

DESENVOLVIMENTO DE MOTOR-FOGUETE SÓLIDO DE PEQUENA ESCALA PARA TESTES DE TECNOLOGIAS E SISTEMAS AEROESPACIAIS

Rodrigo Felix de Araujo Cardoso

Hiago Ricardo Moreira Coutinho

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ - Rua São Francisco Xavier, 524, Maracanã, Rio de Janeiro – RJ – Cep 20550-900 e Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas- CBPF - Rua Doutor Xavier Sigaud, 150, URCA, Rio de Janeiro – RJ – Cep 22.290-180.

rfelix@cbpf.br; hiagoric@gmail.com

Igor Felipe Da Silva Rodrigues Lopes

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ - Rua São Francisco Xavier, 524, Maracanã, Rio de Janeiro – RJ – Cep 20550-900

igorfelipe201615@gmail.com

Resumo: O “Grupo de Foguetes do Rio de Janeiro”, equipe de extensão atrelada à UERJ, desenvolveu um foguete experimental destinado a alcançar apogeu entre 300 e 500 metros, tal projeto foi denominado “Redentor”. O Redentor surgiu da necessidade da equipe em desenvolver um projeto pequeno e de simples replicação para demonstrações, treinamentos de operações, e, principalmente, testes de tecnologias inovadoras em voo. Dentre tecnologias passíveis de serem testadas no foguete, podemos citar: Sistemas de ejeção de paraquedas, telemetria, aditivos de combustível sólido, acopladores, materiais estruturais, etc. A ideia é que essas tecnologias possam ser testadas no “Redentor”, a princípio, como forma de dominar a tecnologia, e, posteriormente, aplicar em foguetes mais robustos. O presente trabalho visa explicitar o desenvolvimento e caracterização de um motor-foguete a ser acoplado no “Redentor”. Como requisitos de projeto foi definido que o motor-foguete deve ser seguro, reutilizável e de fácil replicação. O projeto teórico foi calculado e modelado com o auxílio de softwares, tal como SRM e Solidworks, e, para a validação do protótipo, foram realizados 3 testes estáticos para avaliá-lo em funcionamento. Os testes se deram através da ignição do motor-foguete em uma base fixada no solo acoplada com uma célula de carga, com o objetivo de gerar dados de Força x Tempo. O primeiro teste atingiu força máxima satisfatória, porém, apresentou pouca estabilidade, tendo menor impulso total. O segundo apresentou menor força máxima, mas, por se manter mais estável em sua queima, teve maior impulso total. Ocorreu ainda um terceiro teste, com aquisição de dados de pressão interna. Os testes indicam que, apesar do motor suprir a necessidade do foguete em relação a performance, algumas variações no método de preparação do propelente oferecem certa inconsistência dimensional e de densidade no mesmo, e, para a validação completa do motor, é necessário ajustar esses fatores e inserir instrumentação adequada no teste de modo que seja possível coletar dados de força, pressão e temperatura ao mesmo tempo.

Palavras-chave: Manufatura aeroespacial; Combustão interna; Usinagem; Instrumentação; Sensores strain gages

1. INTRODUÇÃO

O Grupo de Foguetes do Rio de Janeiro é um núcleo multidisciplinar de estudos e desenvolvimento tecnológico focado no dimensionamento, fabricação, teste, lançamento e recuperação de foguetes experimentais e satélites, com sede na Universidade do Estado do Rio de Janeiro. A equipe é dividida em 6 subsistemas: Propulsão, aerodinâmica, estruturas, aviónica, recuperação e payload. Para cada projeto, os subsistemas precisam ser integrados para funcionarem juntos, por isso, surgiu a necessidade da equipe desenvolver um foguete que servisse como uma plataforma de testes, treinos e demonstrações. Para isso, foi adotado como pré requisito que esse foguete devesse atingir de 300 a 500 metros de apogeu, para ser possível visualizá-lo durante toda a sua trajetória, além de ser pequeno e de fácil replicação. Dentre tecnologias passíveis de serem testadas no foguete, podemos citar: Sistemas de ejeção de paraquedas, telemetria, aditivos de combustível sólido, acopladores, materiais estruturais, etc. A ideia é que essas tecnologias possam ser testadas neste foguete como forma de estudo e demonstração das tecnologias, e, posteriormente, aplicá-las em foguetes mais robustos. Este foguete recebeu o nome de “Redentor”. As atividades desenvolvidas com o “Redentor” também servirão como forma de treinar os membros da equipe em suas devidas atividades e em operações de lançamento. O presente trabalho tem como objetivo desenvolver e caracterizar o motor-foguete que será equipado no “Redentor”.

O motor-foguete (Fig. 1a) construído para o projeto conta com propelente sólido (Fig. 1b), ou seja, o combustível e o oxidante estão misturados em uma mesma massa sólida em formato tubular. Tal propelente é posicionado em uma câmara de combustão (também chamado de “casing”), vedado em um lado por uma peça chamada “bulkhead” e contendo uma tubeira na direção oposta.

Para iniciar seu funcionamento, é utilizado um ignitor encostado no propelente para fornecer uma faísca com energia suficiente para gerar combustão. Em propelentes sólidos, uma vez que a reação de combustão é iniciada, não pode ser pausada antes do consumo completo do propelente.

Durante o funcionamento do motor, a câmara de combustão é pressurizada e os gases provenientes da combustão são ejetados pela tubeira, que tem como objetivo acelerar os gases, produzindo a força desejada para fazer o foguete realizar seu voo. Os gases ejetados são supersônicos por conta da geometria da tubeira.

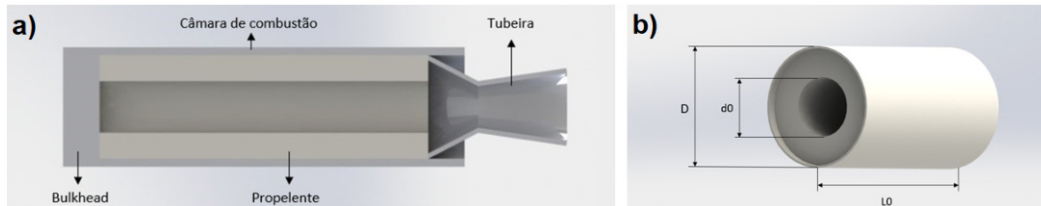


Figura 1. Esquema básico de montagem de um motor-foguete com propelente sólido (a) e um segmento de propelente sólido (b)

Esta força de reação exercida pela estrutura de um motor-foguete devido a ejeção de propelente em alta velocidade recebe o nome de empuxo (F) (Sutton e Biblarz, 2016), é definida pela Equação (1):

$$F = \dot{m}v_2 + (p_2 - p_3)A_2 \quad (1)$$

Sendo $\dot{m}$ a vazão mássica ejetada pela tubeira, p_2 a pressão na saída da tubeira, p_3 a pressão ambiente e A_2 é a área de saída dos gases. A integral do Empuxo (F) no tempo é chamada de Impulso Total (Sutton, Biblarz, 2016), e é definida pela Equação (2):

$$I_T = \int_0^t F dt \quad (2)$$

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos para o desenvolvimento e caracterização do motor-foguete seguiram um fluxograma de atividades (Fig. 2) a partir da necessidade da equipe desenvolver um foguete que servisse como uma plataforma de testes, treinos e demonstrações. Para isso, foi adotado como pré requisito que esse foguete devesse atingir de 300 a 500 metros de apogeu, para ser possível visualizá-lo durante toda a sua trajetória, além de ser pequeno e de fácil replicação.

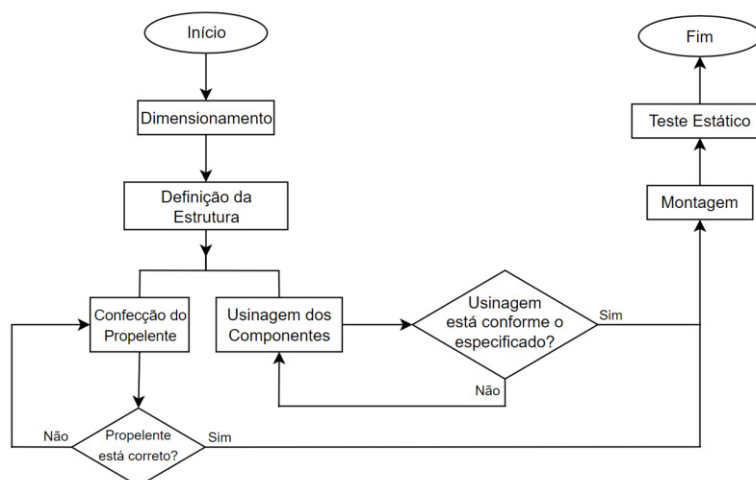


Figura 2. Fluxograma de atividades referentes ao desenvolvimento e teste do motor-foguete

2.1. Dimensionamento

A realização dos cálculos de dimensionamento foi feita através dos softwares Ezalt e SRM, desenvolvidos por Richard Nakka. O Ezalt estima performance de voo através da introdução de dados de empuxo médio, impulso total, massa de propelente, massa do foguete, diâmetro do foguete e coeficiente de arrasto do foguete. Os dados de saída são o apogeu máximo, velocidade máxima e tempo de voo. Já o SRM funciona através da introdução das dimensões de câmara de combustão e propelente pelo usuário, que retorna gráficos de Pressão x Tempo, Empuxo x Tempo e a geometria da tubeira. O Ezalt foi utilizado antes para estimar os valores de empuxo e impulso total que levariam o foguete para o apogeu planejado. Portanto, para atingir os valores necessários para voo, os dados de saída do SRM foram próximos aos valores de entrada do Ezalt.

2.2 Definição da Estrutura

Com as dimensões internas e performance definidas, é possível definir também os materiais a serem utilizados, bem como suas dimensões externas.

2.2.1 Cálculo Estrutural

O material escolhido para o projeto foi o aço SAE 1020, que é um material com baixo custo e apresenta propriedades mecânicas satisfatórias para a aplicação, com limite de escoamento de 205 Mpa (SAE International, 2014). O cálculo estrutural do motor-foguete procurou garantir que os componentes estruturais resistiriam às solicitações mecânicas de forma eficaz e segura. O motor-foguete, do ponto de vista estrutural neste caso é tratado como vaso de pressão de parede fina, um vaso de pressão é dito "parede fina" quando a razão r_{casing}/t_{casing} é maior ou igual a 10 (Hibbeler, 2019) no qual gera a Equação 3.

$$f = \frac{2\sigma_e t_{casing}}{PD_{casing}} \quad (3)$$

Sendo f o coeficiente de segurança, σ_e o limite de escoamento do material, t_{casing} a espessura da casing, P a pressão de operação e D_{casing} o diâmetro médio do casing.

2.2.2 Modelagem

Com os materiais e espessura da casing definidos, foi feita uma modelagem 3D utilizando o software Solidworks para definir a geometria externa da tubeira e do bulkhead e sua montagem (Fig. 3), gerando os desenhos técnicos para orientar a fabricação dos componentes.

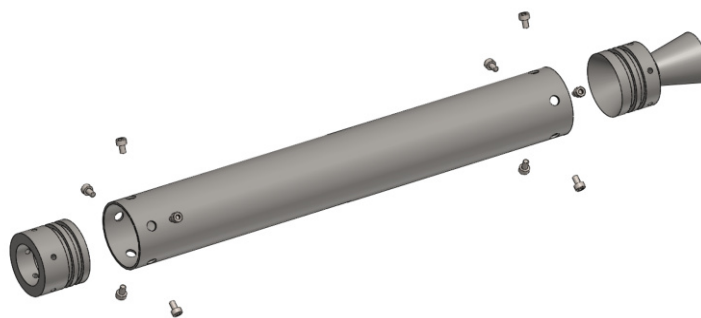


Figura 3. Vista explodida da montagem do motor-foguete feito no software SolidWorks.

Para garantir a vedação e fixação dos componentes, foram criados 2 canais com laterais paralelas na tubeira e bulkhead para comportar o-rings, além de furos contendo rosca M3 para comportar parafusos sextavados com classe de resistência 12,9.

Um modelo de bulkhead alternativo contendo uma rosca passante NPT 1/8" foi modelado para ser utilizado no teste de aquisição de dados de pressão. Este tem 6 furos, ao invés de 5, além de ter o comprimento diminuído, portanto, para o teste de pressão, foi modelado um modelo de casing aumentado e contendo 6 furos em um dos lados para manter o dimensionamento interno e garantia de fixação.

2.3. Usinagem da estrutura

A tubeira e o bulkhead foram confeccionados através de usinagem em torno mecânico e fresadora horizontal. Estas peças foram fabricadas a partir de tarugos com diâmetros próximos aos das peças finais.

No torno mecânico foram utilizadas as operações de torneamento cilíndrico, faceamento, broqueamento e sangramento radial para o bulkhead e torneamento cilíndrico, faceamento, sangramento radial, furação e torneamento cônico para a tubeira.

A fresadora realizou as furações laterais com o auxílio de um cabeçote divisor em todas as peças, incluindo a casing (Figura 4).

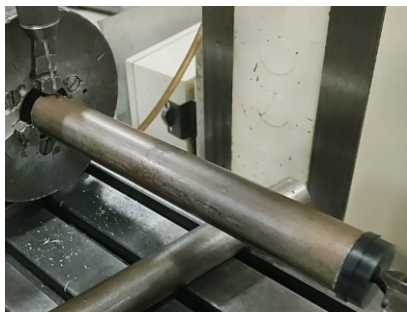


Figura 4. Realização de furações na casing em uma fresadora, com o auxílio de um cabeçote divisor

2.3. Confecção do Propelente

O propelente é uma mistura entre dextrose (combustível) e nitrato de potássio (oxidante) e é chamado de KNDX. o formato de tubo é projetado de maneira com que a área de queima seja relativamente constante durante o funcionamento do motor. Um motor-foguete sólido pode ser composto de uma ou mais unidades de propelentes, e, para cada unidade de propelente, damos o nome de “segmento”. O projeto possui 3 segmentos a serem posicionados dentro da câmara de combustão. Cada segmento possui um invólucro chamado “inibidor”, que serve para garantir que a queima não ocorra na parte externa do segmento, o inibidor é fabricado em papel sulfite 120 g/m².

A dextrose utilizada é comercializada em condições para uso, já o oxidante é obtido a partir de fertilizantes comerciais, o utilizado neste trabalho foi o KRISTA K, da empresa YaraTera. O produto, no entanto, possui impurezas e substâncias que prejudicam a performance do combustível, desse modo, realizar um processo de purificação foi necessário.

2.3.1. Purificação do Oxidante

É sabido que o nitrato de potássio possui boa solubilidade em água a uma alta temperatura, por isso, a primeira etapa do processo de purificação utilizado consiste em adicionar KRISTA K em uma panela de aço inox junto com água a uma temperatura em torno de 85 °C.

Após a solução ficar completamente homogênea, a mistura passa por filtros e é posteriormente resfriada a temperatura ambiente, formando cristais de nitrato de potássio (Figura 5).

Após o resfriamento, os cristais são lavados com água gelada, para eliminar possíveis impurezas que restaram do processo anterior para então serem colocados em estufas para a retirada de toda umidade. Em seguida são triturados e peneirados para ficarem com uma granulometria razoavelmente uniforme. A dextrose não passa por nenhum procedimento de purificação.



Figura 5. Cristais de nitrato de potássio após primeira etapa de purificação

2.3.2. Moldagem do propelente

Para a confecção do formato dos segmentos, é utilizado um molde, contendo todo o mecanismo necessário para compactar a mistura fundida de nitrato de potássio com dextrose, garantindo, assim, que atinja uma densidade ideal, evitando possíveis espaços vazios.

O primeiro passo para confecção do segmento é feito utilizando uma panela de aço inox e um fogareiro de indução magnética. O intuito é fundir os componentes, formando uma mistura homogênea viscosa, para ser introduzida no molde.

O processo de mistura dos componentes dura cerca de 7 minutos a uma temperatura de 120 °C indicada no fogareiro utilizado. Após a consistência desejada ser atingida, a mistura é introduzida no molde. Com a mistura alocada em seu interior, é feita uma força de compressão para compactá-la. Após resfriamento em temperatura ambiente, ele é armazenado junto com sílica gel, pois tem características higroscópicas e perde seu formato e propriedades se exposto ao ar livre.

2.3.3. Avaliação do propelente

O propelente não pode conter trincas ou bolhas, pois elas aumentam a área de queima do segmento, causando assim, uma maior quantidade de material expelido por unidade de tempo que o planejado, o que pode acarretar em picos de pressão no interior da câmara de combustão, por exemplo. No geral, trincas ou bolhas geram imprevisibilidade no funcionamento do motor.

Para avaliar a qualidade dos compostos do propelente, foi medida a taxa de queima em 3 amostras cilíndricas de KNDX utilizando as mesmas remessas que seriam utilizadas para fabricar os segmentos do motor-foguete. Este procedimento se deu através da ignição de uma das pontas de cada cilindro (Fig. 6) para que fosse possível medir o tempo até o consumo completo do mesmo. Uma filmagem foi fundamental para auxiliar no teste, garantindo o momento exato entre a ignição e o consumo completo. O resultado é em mm/s. A taxa de queima ideal em pressão ambiente é 2,13 mm/s, a taxa de queima varia não linearmente com a pressão (Nakka, 2022).



Figura 6. Amostra sofrendo o processo de ignição

Outra maneira de avaliar o propelente é medir sua densidade, que é feita após todo o processo de confecção do mesmo. A verificação consiste em aferir todas as dimensões, calcular o volume e coletar a massa. A densidade ideal para o KNDX é de 1,879 g/cm³, segundo Nakka. Uma baixa densidade pode indicar bolhas internas ou espaços vazios no propelente (Tab. 1), o que irá ocasionar aumentos repentinos na área de queima, causando um funcionamento instável do motor-foguete. A razão de densidade r_{dens} pode ser calculada através da Eq. (4), sendo m_{prop} a massa do propelente, D o diâmetro externo, d o diâmetro interno do segmento e h a altura do segmento.

$$r_{dens} = \frac{m_{prop}}{5,9h \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right]} \quad (4)$$

Tabela 1. Qualidade do propelente de acordo com a razão de densidade (Nakka, 2018)

Razão de densidade	Avaliação
1,00	Valor ideal, não realizável na prática.
0,95 - 0,99	Muito boa/excelente qualidade, essencialmente não existem espaços vazios ou porosidade.
0,90 - 0,94	Razoável/boa qualidade, alguma porosidade, vazios ou outras imperfeições podem existir.
0,85 - 0,89	Baixa/média qualidade, imperfeições significativas existem, se a densidade é pequena por conta de imperfeições escondidas, o segmento deve ser descartado.
<0,85	Imperfeições graves existem. Descartar.

2.4. Teste estático

Um teste estático tem como função principal avaliar um motor-foguete na prática. O teste se dá através da fixação do motor-foguete (de forma que só consiga realizar movimento axial) em uma bancada de testes que possui uma célula de carga acoplada. O motor, após ser fixado na base, deve ser acionado, pressionando sua estrutura contra a célula de carga. Os dados de Empuxo x Tempo são adquiridos diretamente em um computador. O teste estático também pode incluir outros tipos de avaliação, como, por exemplo, medir a pressão na câmara de combustão através de um equipamento adequado.

Os dois primeiros testes estáticos foram feitos com o objetivo de coletar apenas dados de empuxo gerados pelo motor, para isso, foi utilizada uma bancada fabricada em alumínio e madeira (Fig. 7), cedida pela Lufft, equipe de foguetemodelismo da Universidade Federal Fluminense - UFF.

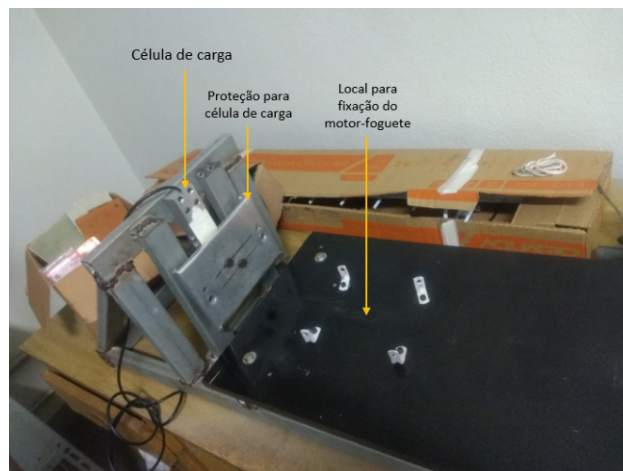


Figura 7. Bancada de testes utilizada nos 2 primeiros testes estáticos

O motor foi fixado através de abraçadeiras de alumínio, que permitiam que ele pressionasse a célula de carga na posição correta. A aquisição de dados foi feita através de um sistema com arduino, conectado diretamente à célula de carga.

Para o terceiro teste estático, foi feita uma instrumentação para coletar dados de pressão, contendo conectores com roscas NPT e SAE, além de um tubo flexível de cobre e um manômetro (Figura 8).

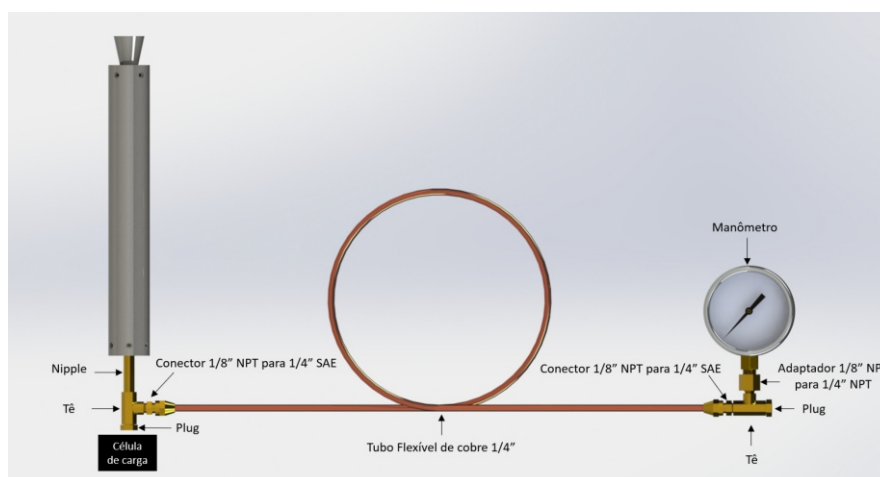


Figura 8. Esquema de teste estático com coleta de dados de empuxo e pressão

O sistema foi montado e testado com pressão de ar a 140 psi, para verificar a existência de vazamento (Figura 9). Este teste foi feito com o auxílio do laboratório de instrumentação e tecnologia mecânica (LITMec), pertencente ao Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF).



Figura 9. Teste de vazamento da linha do manômetro. É possível observar o manômetro marcando 140 psi (esquerda) e a linha de ar comprimido em azul, conectada ao bulkhead com rosca NPT (direita)

Dessa vez, foi utilizado uma bancada de testes e célula de carga confeccionada por uma startup chamada “Estelar”. A base foi colocada em um terreno relativamente plano, com um paredão de rochas na direção de saída dos gases (Figura 10b). Pedras foram posicionadas para mitigar a vibração exacerbada da bancada (Fig. 10a) e uma mesa foi colocada para proteger o computador e o arduino. Câmeras foram posicionadas em frente ao manômetro, para captar o movimento da agulha durante o teste.



Figura 10. Visão traseira do Motor-foguete montado na base de testes (a) e visão frontal do motor-foguete montado na base de testes (b)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados de todas as etapas descritas anteriormente. A comparação dos resultados com os dados teóricos são fundamentais para a validação de um motor-foguete.

3.1 Resultado do dimensionamento

Através do SRM, foram gerados os gráficos de Pressão x Tempo (Fig. 11a) e Empuxo x Tempo (Figura 11b). O motor-foguete dimensionado possui câmara de combustão de 35,7 mm de diâmetro interno e 210 mm de comprimento interno. O propelente foi dividido em 3 segmentos com diâmetro externo de 34 mm, diâmetro interno de 20 mm e comprimento de 65 mm. A tubeira possui 9,5 mm de diâmetro da garganta, que é o menor diâmetro interno pelo qual escapam os gases do motor-foguete. O impulso total teórico alcançado por esse motor é de 260,1 Ns.

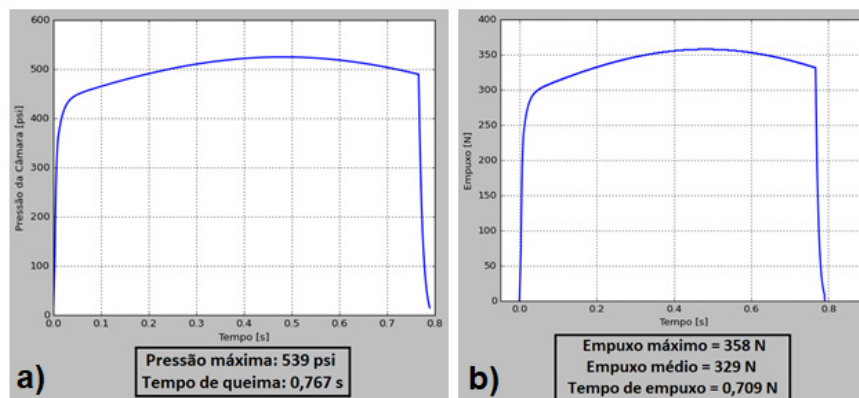


Figura 11. Gráficos de Pressão x Tempo (a) e Empuxo x Tempo (b) gerados no software

Em determinados momentos durante o teste, a queima não se manteve perfeitamente perpendicular ao eixo do cilindro, além de trechos em que a queima visualmente avançou mais rapidamente. Esses efeitos são resultados de bolhas ou espaços vazios dentro desses cilindros, este efeito foi possível observar principalmente na amostra 2. Além disso, variações nas impurezas da remessa do produto base (KRISTA K) e no processo de purificação também geram variações na qualidade do propelente.

As densidades dos segmentos confeccionados (Fig. 14) para o primeiro teste estático ficaram entre 88% até 91% da densidade ideal. Já para o terceiro teste as densidades foram de 92%, 93% e 94% em comparação com a densidade ideal, atingindo a escala “Razoável/boa qualidade” descrita por Richard Nakka.

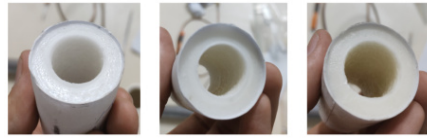


Figura 14. Superfícies dos segmentos confeccionados

3.6. Primeiro e segundo testes estáticos

No primeiro e no segundo testes estáticos foram coletados dados de Empuxo x Tempo através de uma célula de carga. O primeiro teste (Fig. 15a) apresentou 280,383 N de empuxo máximo, porém, apresentou menor estabilidade, tendo impulso total de 189,187 N.s. O segundo (Fig. 15b) alcançou 272,20 N de empuxo máximo, porém, por se manter mais estável em seu funcionamento, teve maior impulso total, que foi 216,025 N.s. Esses 2 testes foram feitos utilizando os mesmos equipamentos, e, apesar de suprirem a necessidade do foguete em relação a performance, algumas variações no método de preparação do propelente ofereceram certa inconsistência dimensional e de densidade do mesmo.

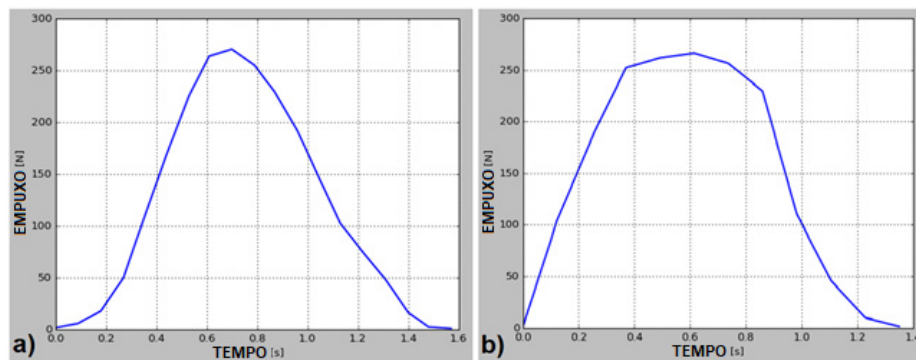


Figura 15. Gráficos de Empuxo x Tempo gerados pelo primeiro (a) e segundo (b) testes estáticos

3.7. Terceiro Teste estático

O terceiro teste estático não teve captação de dados de empuxo, porém, a câmera posicionada em frente ao manômetro captou o movimento da agulha, sendo possível gerar um gráfico de Pressão x Tempo (Figura 16). O manômetro registrou 280 psi como pressão máxima, que é abaixo do esperado (539 psi).

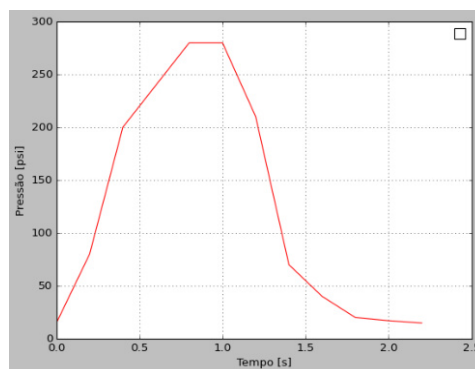


Figura 16. Gráfico de Pressão x Tempo referente ao terceiro teste estático

Durante o funcionamento do motor, foi observado uma faísca sendo ejetada pela tubeira, que corresponde a um pedaço de lã de aço que havia sido anexada na entrada NPT do bulkhead com o intuito de filtrar possíveis resíduos da combustão para dentro da linha de aquisição de dados de pressão. Avaliando o vídeo feito, o ponteiro do manômetro demora cerca de 0,6 segundos para se mover após o início do funcionamento do motor, o que pode indicar imprecisão na coleta dos dados de pressão.

3.4 Integridade da Estrutura após os testes

A integridade dos itens metálicos se manteve intacta após o funcionamento do motor, não ocorreu falha estrutural. A região interna da tubeira (Fig. 17a) e da casing (Fig. 17c) acumularam incrustações que correspondem a produtos da combustão. Após a limpeza destes componentes, foi verificado que as dimensões foram preservadas. Os inibidores foram parcialmente consumidos pela chama e se tornaram quebradiços, não poderiam ser reaproveitados (Figura 17b).



Figura 17. Interior da tubeira após a queima (a); Inibidor após a queima (b); Interior da casing após a queima contendo resíduos da combustão do propelente e vestígios de silicone para alta temperatura (c)

A parte exterior da casing (Fig. 18a) apresentou algumas manchas concentradas em formato circular na cor cinza escuro e uma mancha transversal na cor marrom, como resultado das regiões em que a temperatura foi mais elevada. O aço começa a mudar de cor a partir de uma certa temperatura, cada coloração de mancha corresponde a uma temperatura diferente que o aço chegou e pode ser marrom, roxo, azul, cinza, vermelho ou amarelo (Mann, 2017)



Figura 18. Casing com inibidores (a) e tubeira (b) após o funcionamento do motor

A tubeira é a estrutura do motor-foguete em que a temperatura atinge seu valor máximo. A parte externa da tubeira apresentou manchas em cores que vão do azul ao roxo (Figura 18b).

O manômetro, conexões e tubo de cobre também não sofreram danos visíveis e não houveram sinais de vazamento.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos em testes práticos evidenciam que o projeto alcança menor impulso total que o valor esperado. Um dos fatores decisivos nesta característica pode ser a densidade do propelente, já que, no software utilizado, considerou-se uma razão de densidade de 0,96 e o máximo conseguido até então na prática foi 0,94. Mais testes se fazem necessários, incluindo algumas alterações e melhorias na instrumentação, utilizando, além de um manômetro, um sensor de pressão digital, que possa armazenar os dados, além disso, testes com termopares também estão previstos para avaliação da temperatura.

Apesar dessa diferença em relação a performance esperada, o motor-foguete atinge o mínimo necessário que levaria um foguete com 2 polegadas de diâmetro e 2,4 kg para o apogeu de 300 metros, segundo o que foi definido pelo núcleo de aerodinâmica da equipe. Podemos afirmar então, que é possível embarcar experimentos e inovações para sistemas aeroespaciais produzidos pelo Grupo de Foguetes do Rio de Janeiro, cumprindo seu papel em ser uma plataforma segura para testes iniciais em escala reduzida, além de poder ser utilizado também para demonstrações e treinamento de operações.

5. REFERÊNCIAS

- Hibbeler, R. C. Resistência dos materiais . [S.l.]: Pearson Educación, 2019.
- Mann, Sean. (2023, March 12). How to Give Steel Different Colors. sciencing.com. Retrieved from <<https://sciencing.com/give-steel-different-colors-10012425.html>>
- Nakka, R. Solid rocket motor theory—propellant grain. Richard Nakka's Experimental Rocketry from <<http://www.nakka-rocketry.net>, 2022.>
- SAE International. (2014). SAE J403: Chemical Compositions of SAE Carbon Steels. DOI: 10.4271/J403_201406
- Sutton, G. P.; BIBLARZ, O. Rocket propulsion elements. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2016.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.