

CARACTERIZAÇÃO DE PROPELENTES SÓLIDOS DE FOGUETES PELA TÉCNICA DE MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

**Mariana S. Aguiar¹, Alessandra S. Machado¹, Olga Maria O. Araújo¹, Ricardo
T. Lopes¹, Davi F. Oliveira¹**

¹Laboaratório de Instrumentação Nuclear/COPPE/UFRJ, Av. Horácio Macedo, 2030, I-133, Ilha do
Fundão, Rio de Janeiro, Brasil

Palavras-Chave: Propelente; Microtomografia Computadorizada; Porosidade.

RESUMO

No contexto aeroespacial, a propulsão de veículos é uma questão de altíssima relevância, dado que o sucesso de qualquer missão depende em grande parte desta. Levando em consideração um de seus elementos primários e prioritários, o estudo e validação dos propelentes é de suma importância, especialmente em termos de complexidade, objetivos e consequências. O presente trabalho tem como propósito analisar propelentes sólidos para motores de foguetes universitários e objetiva-se a tratar da qualidade e aptidão para desempenhar a função pela qual foi fabricado. Foi utilizada a técnica de microtomografia computadorizada por transmissão de raios X para gerar imagens de propelentes e avaliar sua estrutura, obtendo informações qualitativas e quantitativas relevantes. Os resultados mostraram que a técnica, aliada ao processamento de imagens, apresenta sensibilidade adequada para afirmar a excelência ou não da amostra, bem como para guiar a escolha entre a validação ou descarte da mesma.

1. INTRODUÇÃO

A construção de um veículo, mesmo que de forma experimental, exige uma série de estudos e aplicações bem feitas de conceitos, transformando o experimento em um foguete útil, capaz de completar sua missão com diversos estágios de execução e cargas úteis. Comumente, um foguete de sondagem atmosférica universitário consiste prioritariamente na concepção e desenvolvimento de tecnologias em fuselagem (corpo do foguete), propulsão (motor e sistemas propulsivos), recuperação (sistemas de paraquedas) e eletrônica (sistemas de controle e acionamentos). A pesquisa desenvolvida na Universidade Federal do Rio de Janeiro pelo Grupo de Pesquisas Aeroespaciais da UFRJ - Minerva Rockets e Sats, é composta especificamente pelos subsistemas de aeroestruturas (estrutura do foguete e aerodinâmica), propulsão (motor e sistemas propulsivos), recuperação (sistemas de paraquedas), eletrônica de foguetes (aviônica embarcada e instrumentação), mecânica de satélites (estrutura de satélites), eletrônica de satélites (sistemas de controle e sensoriamento), experimentos biológicos (pesquisa científica) e administração.

A propulsão é o ato de alterar o movimento de um corpo, seja retirando corpos que estão inicialmente em repouso, alterando a velocidade ou superando as forças de retardo impulsionando-o através de um meio [1]. Em suma, a propulsão se dá a partir da força de reação relacionada à ejeção de matéria. A energia cinética do material ejetado é a energia que se encontra na saída do foguete. O propelente a ser avaliado foi completamente idealizado e manufaturado pelo Grupo de Pesquisas Aeroespaciais da UFRJ - Minerva Rockets e Sats.

Esta trabalho trata sobre características de grãos propelentes compostos por Nitrato de Potássio e Sorbitol (KNSB), manufatura e, especificamente, caracterização desses combustíveis, elucidado pela análise do volume de porosidade que será verificado por um método matemático estimado e executado por uma planilha e comparado, a fim de validação, aos resultados obtidos a partir de microtomografia computadorizada (MicroCT), com o fim de avaliar a porcentagem de matriz e poros, medida de extrema importância quando se trata de propulsão de foguetes.

2. METODOLOGIA

A energia de uma reação de combustão de alta pressão de produtos químicos propulsores (propelentes), geralmente um combustível e um produto químico oxidante, permite o aquecimento dos gases do produto da reação a temperaturas muito altas. Esses gases subsequentemente são expandidos e acelerados no *nozzle*. Portanto, o propelente, nada mais é, do que o combustível do foguete. A disposição dos elementos de um propulsor sólido pode ser observada na Figura 1.

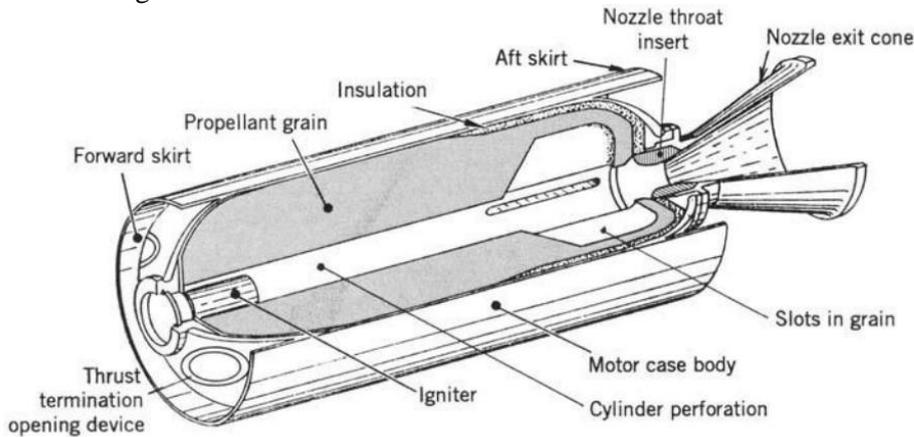


Fig. 1. Esquemático simplificado de um motor a propelente sólido [1].

Para manufatura de propelentes para foguetes experimentais, deve-se considerar composições e processos tão simples quanto forem possíveis. No entanto, existem etapas que podem ter diversos tipos de execução, cabendo a decisão do método ao responsável que a executará.

Independente da composição e da quantidade, os grãos de propulsores sólidos são cilíndricos, de forma que se adequem à câmara de combustão. Contudo, é fundamental que se avalie a geometria do grão combustível, diferenciada pelo "core", dado que esta é responsável por alterar a curva de empuxo, fato justificado pelas diferentes áreas de queima que as geometrias propiciam no momento da combustão. Em geral, em foguetes experimentais a geometria mais comum de ser encontrada é a chamada Bates, isso pela facilidade de construção em comparação às demais.

É importante observar que a área de queima de um grão propelente é de estudo imprescindível, dado que tem grande influência na performance do motor. Vale ressaltar que o objetivo da queima do material e sua posterior ejeção de massa pelo *nozzle* é o que fornece ao motor a energia suficiente para seu lançamento.

Além da matriz propelente em si, um elemento chamado de inibição, representado na Figura 2, também compõe o grão. A inibição tem como finalidade impedir que o propelente em contato com ela não entre em combustão imediata, causando uma queima desordenada, quando o motor estiver em operação. Este é um ponto importante pois, a área de queima do propelente quando este está ignitado tem ligação direta com a pressão dentro da câmara de combustão, portanto, o controle desta área por meio da inibição é primordial para a manutenção da pressão interna do motor, evitando assim que ela exceda a pressão máxima projetada e leve todo o aparato à falha. Em foguetes experimentais, é comum que a inibição seja de papel kraft, poliéster ou resina epoxy.

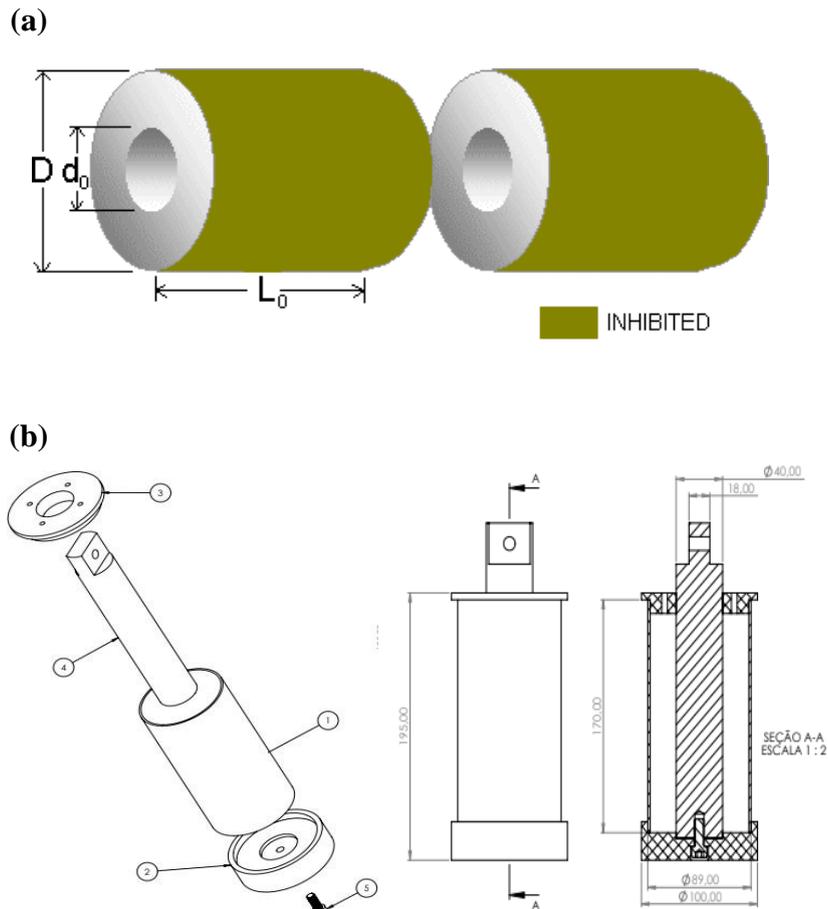


Fig. 2. Grão de geometria Bates com inibição (a) e Componentes e sistema de montagem do molde (b).

2.1. PROPELENTE KNSB

O KNSB se resume a uma combinação de 65% Nitrato de Potássio, como oxidante, e 35% de Sorbitol, como combustível. Propelentes à base de açúcares são extremamente comuns, dentre as opções como sacarose e dextrose, o sorbitol foi escolhido para este estudo. O sorbitol, apesar de presente na natureza, é conhecido como sendo um adoçante artificial e, em relação às outras alternativas, teve suas vantagens observadas empiricamente. O sorbitol é um excelente caminho a seguir quando se busca evitar propelentes quebradiços, como os à base de sacarose, além de possuir ponto de fusão mais baixo, menor tendência a se decompor com o aquecimento e ser menos higroscópico [2]. Na preparação, tem-se o oxidante e o combustível em suas devidas proporções e estado sólido, ambos em pó, que devem ser fundidos e misturados em um recipiente que possa ser aquecido. Os componentes, previamente bem armazenados para que não adquiram umidade indesejada ou passados por processo de secagem, devem ser adicionados ao recipiente aquecido para que possam fundir e tornar-se uma massa viscosa, geralmente de coloração branca, mas que pode atingir o marfim claro em alguns casos devido a impurezas. Com toda a mistura propelente fundida, o que ocorre a uma faixa de temperatura entre 115-125°C, o processo de moldagem (Figura 3), pode ser iniciado.



Figura 3.4: Processo de vertimento do propelente e início da moldagem.

Nessa etapa, o propelente em forma viscosa é despejado no molde já com a inibição posicionada e deixado para curar sob pressão. Em geral, mesmo que o desmolde do grão possa ocorrer antes, o tempo de cura total de um propelente KNSB é de 48 horas. No entanto, mesmo que todo o processo tenha sido realizado com bastante cautela e sem variações significativas, o grão propelente pode guardar em seu interior bolhas, trincas e outras falhas que são capazes de colocar a operação de todo o propulsor em risco. A taxa de queima de um grão propelente, bem como uma grande área de superfície de queima, pode embutir em um aumento de pressão na câmara combustível, fato que pode levar todo o propulsor a uma falha significativa. Portanto, como forma de validar os propelentes para uso eficaz e seguro, deve-se fazer um controle de qualidade em cada uma das peças produzidas. Para tal, considera-se dois tipos de testes de validação: verificação de densidade e teste de toque.

2.2. AVALIAÇÃO DE DENSIDADE

Para verificar a densidade de cada grão, primeiramente calcula-se o volume do grão considerando, claro, a exclusão do volume do core de acordo com a geometria escolhida, que no caso deste trabalho foi a geometria Bates. Depois, toma-se a massa do propelente e divide-se pelo volume, finalmente encontrando a densidade. Por fim, o valor da densidade encontrada pode ser comparado ao valor de densidade ideal da matriz propelente que se está utilizando como, por exemplo, KNSB que possui densidade ideal 1,841 g/cm³. A densidade de um grão deve ser estudada especificamente, dado que também possui forte ligação com o empuxo, pressão na câmara de combustão, eficiência do motor e outros. Essa propriedade física, considerando propelentes compostos por dois constituintes (um combustível e um oxidante), pode ser obtida de forma ideal a partir da equação que se segue.

$$\rho_p = \frac{1}{\frac{f_o}{\rho_o} + \frac{f_f}{\rho_f}} \quad (2.1)$$

Neste caso, ρ_p é a densidade de massa de propelente, f_o é a fração de massa do oxidante e, analogamente, f_f é a fração de massa do combustível. No entanto, sabe-se que a densidade ideal não pode ser atingida e, portanto, uma densidade real é considerada e pode ser expressa por:

$$\rho_p = \frac{m_{grao}}{v_{grao}} \quad (2.2)$$

$$v_{grao} = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \cdot L \quad (2.3)$$

Onde m_{grao} é a massa do grão, v_{grao} o volume do grão, D é o diâmetro externo do grão, d o diâmetro do core e L o comprimento do grão. As equações (2.2) e (2.3) regem os cálculos descritos anteriormente. Para classificar se um grão propelente está apto ou não para uso a partir do cálculo do seu percentual de matriz, toma-se como guia a tabela de qualidade representada na Figura 4.

Razão de Densidade	Avaliação
1,00	Ideal, não realizável na prática
0.95 - 0.99	Qualidade boa a excelente, sem vazios ou porosidade expressivos
0.90 - 0.94	Qualidade regular a boa, apresenta alguma porosidade, vazios e outras falhas.
0.85 - 0.89	Qualidade baixa a regular, porosidade ou falhas significantes. Se a razão de densidade for baixa devido a falhas ocultas, o grão deve ser descartado.
< 0.85	Falhas severas. Descartar o grão.

Fig. 4. A valiação da razão de densidade de propelente adaptada [3].

2.3 MICROCT

O microtomógrafo Phoenix Vtomex/M, do Laboratório de Instrumentação Nuclear da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LIN/UFRJ), foi utilizado neste trabalho cujos parâmetros de aquisição foram: voltagem de 200kV, corrente de 160 μ A, um filtro físico adicional de 0,5 mm de alumínio, 5 frames por projeção e um tamanho de pixel de 103 μ m. O Software Bruker CTAnalyser foi utilizado na análise dos dados 2D e 3D advindos das microCT's e é amplamente utilizado para morfometria e análise quantitativa. Para realizar a análise o processo de binarização [4,5] foi utilizado para discretizar os poros do material do propelente, como pode ser visto na Figura 5.

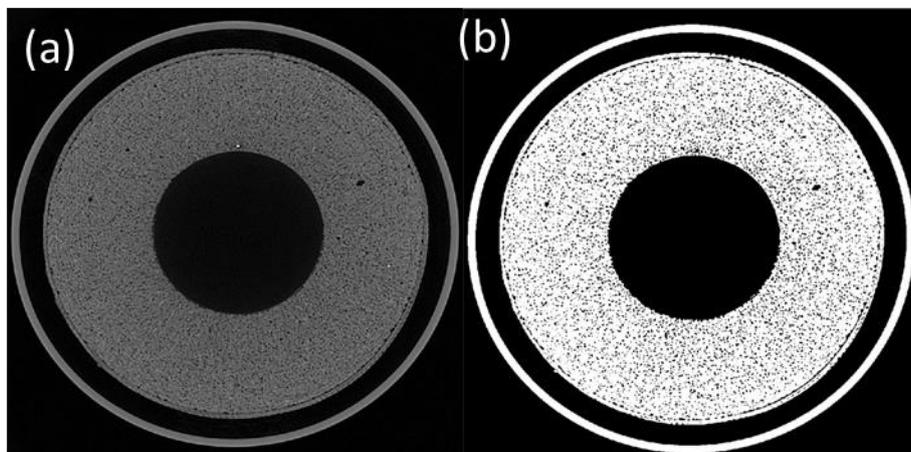


Fig. 5. Fatia 357 antes e depois da binarização.



Finalizada a operação do microtomógrafo, tem-se como retorno imagens adquiridas e provenientes da microCT. Após reconstruídas, tais imagens foram redirecionadas ao CTAn. As imagens obtidas a partir da microCT, representam uma projeção do grão propelente e todo seu conjunto representa a amostra completa. De posse das imagens e com o CTAn à disposição, após a reconstrução das imagens, foi possível iniciar o tratamento dos dados com o intuito de avaliar o percentual de matriz e poros.

3. RESULTADOS

3.1 AVALIAÇÃO DA DENSIDADE

Neste primeiro método, desenvolvido a partir de medições diretas e uso de automação de planilha Excel, obteve-se como razão de densidade de propelente o valor representado na Figura 6.

Densidade [%]	Densidade [kg/m ³]
85,1340%	1.567,32

Fig. 6. Porcentagem de densidade e densidade de propelente obtida através do método experimental.

Com a microCT foi possível realizar a reconstrução em 3D e avaliar qualitativamente o propelente, conforme Figura 5.

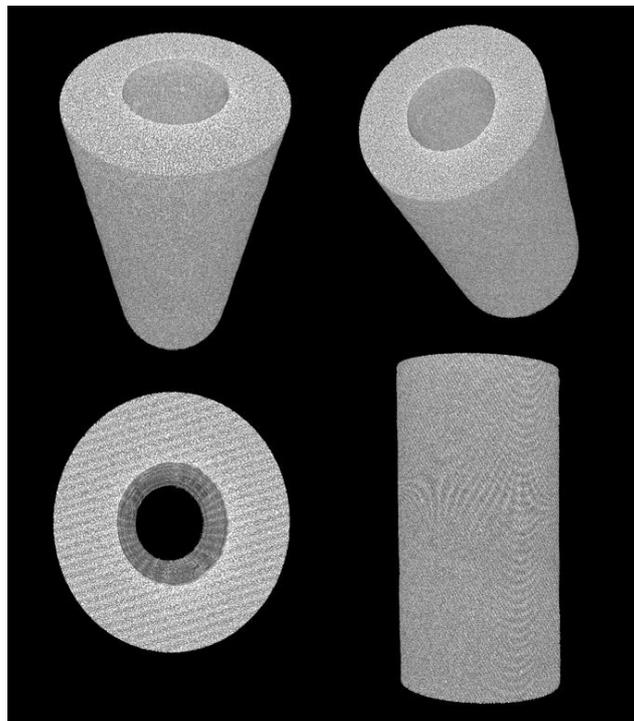


Fig. 5. Reconstrução da matriz propelente em diferentes vistas.



Com as análises foi possível obter como razão de densidade de propelente o valor representado na Figura 6.

Tissue volume, TV, 652569.24808, mm³
Bone volume, BV, 580726.87126, mm³

Fig. 6. Volume do propelente e porcentagem de densidade de propelente obtida através da microC.

O primeiro método executado, este o da planilha, retornou uma razão de densidade no valor de 85.1340%. Já o segundo método, praticado pela microCT, forneceu um percentual de matriz e poros no valor de 88.9908%. Observa-se que, apesar de os valores não serem fielmente compatíveis, a ordem de grandeza de ambos resultados aloca o grão propelente no mesmo nível de qualificação da tabela de avaliação de razão de densidade proposta por Nakka, Figura 4. Por consequência dos resultados obtidos, estando um e outro contidos no intervalado de 85,89%, o veredito é de que há uma quantidade regular de porosidade no interior do grão e, portanto, seu descarte deve ser considerado.

4. CONCLUSÕES

A partir da implementação de ambas metodologias, foi possível desenvolver um estudo aprofundado para caracterização de propelentes. Considerando as propriedades físicas do grão propelente manufaturado, foram alcançadas as seguintes conclusões:

A inspeção do grão propelente pelo primeiro método, este sendo o da Planilha de Avaliação da Razão de Densidade, resultou em um percentual de matriz e poros de valor 85.1340%. Sendo assim, assegurado pela tabela de avaliação da razão de densidade, conclui-se que o grão propelente está apto com ressalvas e com indicação para inaptidão.

A inspeção do grão propelente pelo segundo método, este sendo o da avaliação por MicroCT, resultou em uma razão de densidade de propelente de valor 88.99084%. Sendo assim, assegurado pela tabela de avaliação da razão de densidade [4], conclui-se que o grão propelente está apto com ressalvas e com indicação para inaptidão. Dessa forma, o estudo desenvolvido como substituição ou validação do resultado proveniente do "Coin Tap Test" validou o grão propelente como apto.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi apoiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (processo CAPES 88887.476179/2020-00 para OMOA) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, INCT-INAIS (processo 406303/2022-3 e bolsas de produtividade 314225/2021 para RTL).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Sutton, G. P., Biblarz, O., Rocket Propulsion Elements, 7ª ed., New Jersey, Wiley (2001).



Semana Nacional de Engenharia Nuclear e da Energia e Ciências das Radiações – VII SENCIR
Belo Horizonte, 12 a 14 de novembro de 2024

[2] www.nakka-rocketry.net/ acessado em 20/04/2024. NAKKA ROCKETRY. "Solid Rocket Motor Theory – Propellant Grain", 2023.

[3] <https://www.nakka-rocketry.net/sorb.html> acessado em 2-/04/2024 NAKKA ROCKETRY. "KNSB Propellant", 2023.

[4] BRUKER. Manual for Bruker-microCT CT-Analyser (2013).

[5] BUZUG, T. M. Computed Tomography From Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT. 1 ed. Germany, Springer (2008).