

MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DE QUEIMA À PRESSÃO ATMOSFÉRICA DO PROPELENTE SACAROSE/NITRATO DE POTÁSSIO PREPARADO A FRIO

Antonio Carlos Foltran

Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PG-Mec)
Curitiba, PR, Brasil
antoniocarlos.foltran@gmail.com

Diego Fernando Moro

Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PG-Mec)
Curitiba, PR, Brasil
difmoro@ufpr.br

Nicholas Dicati Pereira da Silva

Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PG-Mec)
Curitiba, PR, Brasil
dicati@ufpr.br

Ana Eliza Gonçalves Ferreira

Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PG-Mec)
Curitiba, PR, Brasil
anaeliza_gf@ufpr.br

Luciano Kiyoshi Araki

Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Departamento de Engenharia Mecânica
Curitiba, PR
lucaraki@ufpr.br

Carlos Henrique Marchi

Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Departamento de Engenharia Mecânica
Curitiba, PR
marchi@ufpr.br

Resumo: *O objetivo deste trabalho é obter a velocidade de queima experimental, à pressão atmosférica, do propelente sólido constituído por 35% de sacarose ($C_{12}H_{22}O_{11}$) e 65% de nitrato de potássio (KNO_3), em massa, com o grão-propelente preparado a frio através de prensagem mecânica. Determina-se o comportamento da massa específica (ρ) e da velocidade de queima (r) em função da pressão de compactação (P_c) no preparo do grão-propelente. Foram preparadas e testadas 44 amostras de propelentes, com sete valores de P_c , no período de novembro de 2013 a março de 2014. Verificou-se que ρ e r dependem de P_c segundo uma função polinomial quadrática, e que o produto de ambos é uma constante.*

Palavras-chave: *Nitrato de potássio / sacarose, KNSU, motor-foguete experimental, minifoguete, propelente sólido.*

1 Introdução

O propelente constituído por sacarose e nitrato de potássio, conhecido por KNSu, é tradicionalmente usado por grupos amadores de estudo de foguetes. Seus componentes são de fácil obtenção, seus produtos de combustão não são tóxicos e este propelente produz um impulso específico relativamente elevado, maior do que o da pólvora negra usada em minifoguetes ou espaçomodelos (NAR, 2014).

A maneira tradicional de produzir grãos-propelente é pelo processo de fusão. Nele, os dois componentes que constituem o propelente são moídos e misturados. Em seguida são aquecidos até que a sacarose se funda ao redor dos grãos de nitrato formando uma mistura pastosa que pode ser vertida em moldes na forma de um grão-propelente, que é então resfriado (Vyverman, 1978; Nakka, 1984). Este método produz grãos-propelente com elevada massa específica (Nakka, 1984, 2014). Entretanto, o uso de calor gera o risco de combustão da mistura. Muitos construtores amadores de foguetes que utilizam este método o consideram seguro, mas é imprescindível a necessidade de aparatos que possibilitem o aquecimento lento da mistura e a medição da temperatura durante o processo de fusão (Nakka, 2014).

No presente trabalho foi estudado um método alternativo, totalmente a frio, usado na moagem e mistura dos componentes do propelente, bem como no preparo do grão-propelente através da compactação dos componentes em uma matriz com auxílio de uma prensa hidráulica. O objetivo foi possibilitar a produção de grãos-propelente que não dependessem de um controle rigoroso dos processos de moagem e mistura dos componentes e principalmente sem a adição de calor. As recomendações de segurança, que foram seguidas, são basicamente as referentes à manipulação de produtos químicos (Wallace, 1995) e as descritas em Nakka (2014). Além destas, a aplicação da força de prensagem foi feita em etapas, com aumento progressivo da força, a fim de possibilitar um lento acomodamento dos grãos dos componentes. A massa específica obtida após a prensagem é menor que a do método da fusão, mas valores relativamente próximos ao método da fusão podem ser alcançados utilizando pressões de compactação mais elevadas. A velocidade de queima à pressão atmosférica é maior quanto menor é a pressão de compactação. O produto da massa específica pela velocidade de queima resultou em uma constante para toda a faixa de pressão de compactação empregada nos testes realizados.

2 Preparação das amostras

Os componentes do propelente utilizados para a fabricação das amostras foram o nitrato de potássio, fertilizante Krista K[®] produzido pelo fabricante Yara, e o açúcar refinado. Cada componente foi moído em um moinho individual identificado com etiqueta a fim de minimizar o risco de mistura acidental dos componentes. Foram utilizados moinhos de café de lâmina rotativa, marca Cadence. Cada moinho foi carregado até 90% do volume e posto em operação por 30 segundos.

Depois de moídos, os componentes foram armazenados em recipientes individuais, identificados no corpo e não na tampa. O ajuste da composição química foi feito medindo a massa dos componentes em uma balança com resolução de 0,01g. Os componentes foram então adicionados a um terceiro recipiente hermético, também identificado, e agitado manualmente por 15 minutos para cada 100 gramas de propelente. Ao terminar a mistura, o recipiente pode ser usado ou armazenado em local seco e com pouca variação de temperatura ambiente. A prensagem das amostras não era feita, necessariamente, no mesmo dia da produção de um lote de propelente; por isso, as datas da produção dos lotes e da prensagem foram registradas.

As amostras tem formato de paralelepípedo com dimensões da seção transversal de 60 mm por 20 mm, com a altura dependendo da pressão de compactação aplicada. Todas as amostras foram produzidas a partir de 16 gramas de propelente em pó. O experimento foi composto por nove testes realizados a partir de cinco lotes de propelente. Cada teste foi composto por cinco amostras, exceto o primeiro que foi realizado com quatro, totalizando 44 amostras.

As forças aplicadas em cada amostra (Fig. 1), em um dado teste, foram de 2, 4, 6, 8 e 10 toneladas-força, exceto para o teste 6 onde todas as cinco amostras foram prensadas com 6 toneladas-força. As pressões nominais geradas para as diferentes forças de compactação foram aproximadamente de 16, 32, 48, 64 e 80 MPa. O objetivo é determinar como a massa específica varia com a pressão de compactação e com o teste ou o lote de propelente. O teste 6 foi conduzido com todas as amostras submetidas à mesma força para verificar a variabilidade dentro de um único teste e de um mesmo lote de propelente.

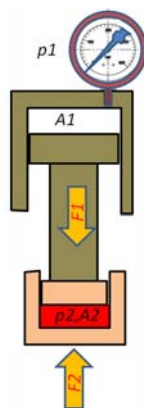


Figura 1. Esquema da operação de prensagem

Foram desconsideradas a força de atrito da vedação do cilindro hidráulico, a força de deformação da mola de retorno do cilindro hidráulico da prensa e a força de atrito entre o punção e a matriz, por serem relativamente pequenas. Admitindo-se que o sistema pressurizado esteja em equilíbrio, a seguinte relação pode ser aplicada:

$$P_c = p_2 = \frac{p_1 \cdot A_1}{A_2} = \frac{F_1}{A_2} \quad (1)$$

onde p_1 é a pressão dentro do sistema hidráulico, P_c ou p_2 é a pressão de compactação, A_1 e A_2 são as áreas do êmbolo do cilindro hidráulico e da amostra sujeita ao esforço de compressão, respectivamente, e F_1 é a força produzida pela pressão do sistema hidráulico atuando na área do êmbolo. É importante notar que muitas prensas hidráulicas comerciais são fornecidas com um manômetro de escala adaptada para mostrar diretamente o valor da força F_1 , sendo que este foi o método usado neste trabalho. Um método alternativo, caso se tenha à disposição uma célula de carga compatível com os esforços gerados, é medir diretamente a força $F_1 = F_2$, montando a célula de carga em série com a matriz de prensagem e o cilindro hidráulico. Neste caso, os efeitos das forças de atrito e da mola de retorno ficam automaticamente eliminados.

3 Medição da massa específica e da velocidade de queima

Após a prensagem, as amostras foram extraídas da matriz e limpas com um pano para remover alguns pequenos grãos soltos. Para a medição das dimensões foi utilizado um paquímetro digital, da marca Lee Tools, com 150 mm de comprimento e resolução de 0,01 mm. As medições realizadas em cada amostra foram: uma do comprimento; da largura, em três diferentes posições ao longo do comprimento; e da espessura, em seis diferentes posições ao longo do comprimento. As várias medições de largura e espessura foram feitas devido a pequenas imperfeições do punção e da matriz.

A massa das amostras foi medida em uma balança digital da marca Marte, modelo AS-500C, de resolução 0,01 g. A partir das médias dos valores das dimensões, foi possível calcular o volume de cada amostra e, a partir da medição da massa de cada amostra, calcular sua massa específica como a razão entre a massa e o volume. Este valor pode ser comparado ao da massa específica teórica (ρ_t), que considera a fração mássica dos componentes e suas respectivas massas específicas como sólidos cristalinos. Este cálculo considera um corpo sem porosidades, portanto, estabelece um limite máximo para a massa específica a ser obtida experimentalmente. Ela é calculada por

$$\rho_t = \frac{1}{\frac{x_{SU}}{\rho_{SU}} + \frac{x_{KN}}{\rho_{KN}}} \cong 1888 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (2)$$

onde ρ_{KN} e ρ_{SU} são as massas específicas do nitrato de potássio (2109 kg/m³) e da sacarose (1581 kg/m³) respectivamente, e x_{KN} e x_{SU} são as frações mássicas do nitrato de potássio e da sacarose, que neste trabalho foram fixadas em 0,65 e 0,35 respectivamente.

As amostras de cada lote foram queimadas em sequência a fim de medir a velocidade de queima. Foram registradas a data da queima, a pressão atmosférica e a temperatura do ar ambiente antes da queima de cada amostra. A variação da pressão atmosférica nos diferentes dias de testes não foi significativa e por isso

desconsiderada. Por outro lado, a temperatura do ar ambiente apresentou uma variação significativa entre os testes, mas durante cada teste apresentou pouca variação, de forma que todas as cinco amostras em cada teste foram queimadas com praticamente a mesma temperatura ambiente.

A queima foi feita em ambiente aberto e bem ventilado. Uma filmadora com resolução de 30 quadros por segundo foi posicionada ortogonal à direção de propagação da frente de chama para minimizar o erro de paralaxe. Uma régua graduada foi posicionada paralelamente a cada amostra para viabilizar a medição da distância percorrida pela frente de chama em relação ao tempo, e desta forma possibilitar o cálculo da velocidade média de combustão à pressão atmosférica, conforme pode ser visto na Fig. (2).

Todas as amostras tiveram cinco faces isoladas com espessa camada de cola Scotch Flex[®] da fabricante 3M, o que permitiu que a frente de chama ocorresse apenas em uma das superfícies. Escolheu-se a superfície de menor área, na qual foi aplicada uma camada fina de cola e aderida sobre ela uma camada de pólvora negra para garantir que a queima iniciasse simultaneamente em toda esta superfície; ela foi ativada de forma homogênea com o auxílio de um estopim para garantir maior segurança, conforme a Fig. (2a). Nos dois quadros inferiores da Fig. (2) a superfície de queima não está bem visível porque os resquícios da camada de cola nas extremidades da superfície não queimaram tão facilmente quanto o propelente. Entretanto a superfície de queima apareceu muito evidente nas filmagens.

A velocidade de queima em pressão atmosférica foi obtida medindo-se a distância percorrida pela frente de combustão entre duas posições arbitrárias ao longo do comprimento da amostra, e dividindo pelo intervalo de tempo que a frente de chama levou para percorrer a distância entre as duas posições. As posições inicial e final das medições foram variadas de forma a verificar se a velocidade de queima mudava localmente entre regiões distintas das amostras. Os intervalos considerados para a medição de todas as amostras foram: de 0 a 20 mm, de 20 a 40 mm, de 40 a 60 mm, de 10 a 30 mm, de 30 a 50 mm, de 0 a 30 mm, de 30 a 60 mm, e de 0 a 60 mm. Como a frente de combustão apresenta certa irregularidade é difícil decidir exatamente em qual momento ela cruza as posições inicial e final. Por isso cada medição foi repetida três vezes. Assim foi possível construir intervalos de incerteza para a medição da velocidade de queima baseados na distribuição t de Student com nível de confiança de 95%. O maior intervalo ocorreu nas medições das amostras do teste 6, com amplitude de 0,2 mm/s, ou seja, 8,44% em relação à média do teste 6.

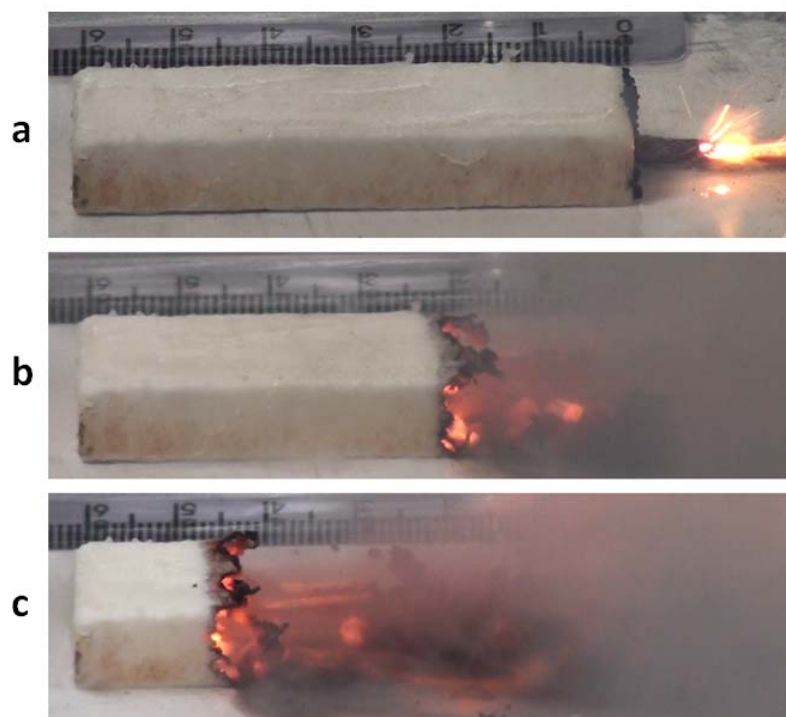


Figura 2. Etapas da queima de uma amostra
a) início da queima com estopim; b) e c) progressão da frente de chama

Em algumas amostras a medição da velocidade de queima foi prejudicada pela ineficiência do inibidor, gerando a queima em outra face que não a ativada com pólvora. Por vezes, a reação de combustão eventualmente não iniciou em toda a superfície ativada, conforme o desejado, ou demorava mais para iniciar em alguns pontos que em outros. Isso provocou uma frente de chama não paralela à superfície originalmente ativada com pólvora.

Sempre que ocorreu algum destes inconvenientes, a velocidade de queima não foi medida. Por isso, das 44 amostras, obteve-se 44 medições da massa específica e apenas 33 da velocidade de queima. Boa parte dos problemas ocorreu nas primeiras medições quando o inibidor ainda não havia sido utilizado nas amostras.

Segundo Douglas (1972) e Fordham (1980), a maioria dos propelentes sólidos de motores-foguete apresenta uma dependência da velocidade de queima com a pressão da câmara de combustão que pode ser descrita por

$$r = a \cdot P_0^n \quad (3)$$

Nesta equação, r representa a velocidade de queima em mm/s, P_0 é a pressão na câmara de combustão do motor, em Mpa, e n é o expoente da pressão, adimensional. Dependendo do autor, outro conjunto de unidades de medida para a pressão e velocidade de queima é usado (Vyverman, 1978; Nakka, 1984; Marchi *et al.*, 1990; Stancato e Miraglia, 1997; Stancato *et al.* 2000). A Eq. (3) é empregada por Nakka (1984, 2014) para o propelente KNSu. Os parâmetros a e n da Eq. (3) são obtidos experimentalmente, por exemplo, com a queima da amostra dentro de uma câmara pressurizada, chamada bomba de Crawford, regulando-se a pressão dentro da câmara e medindo-se a velocidade de queima. No presente trabalho, apenas a velocidade de queima em pressão atmosférica local (90,6 kPa) foi determinada. Outro estudo envolvendo testes em pressões acima da atmosférica ainda serão realizados para encontrar a e n da Eq.(3).

4 Apresentação dos resultados

Conforme o esperado, a massa específica aumenta com o aumento da pressão de compactação, porém são ainda inferiores aos obtidos por Nakka (2014) e Vyverman (1978) pelo processo de fusão. Entretanto os valores encontrados são maiores que os obtidos por processos de produção similares ao apresentado neste trabalho, como o de Marchi *et al.* (1990) e em testes realizados por um dos autores (Moro, 2013) em motores construídos a partir de tubos de PVC. Em Marchi *et al.* (1990) o propelente é produzido de maneira similar, porém sem o uso de prensa hidráulica, e sim misturado à acetona a fim de formar uma pasta que é vertida no interior do motor, pressionada manualmente e posta para secar.

A partir dos resultados experimentais, foi possível ajustar uma função polinomial de segunda ordem para obter a massa específica média em função da pressão de compactação, dada por

$$\rho = -0,039619 \cdot P_c^2 + 7,509303 \cdot P_c + 1302,394 \quad (4)$$

O comportamento da Eq. (4) pode ser visto em forma gráfica na Fig. (3), juntamente com os resultados experimentais de todas as amostras de todos os testes. A Fig. (3) inclui também os resultados de outras fontes e a massa específica teórica, descrita pela Eq. (2).

Os testes 1 a 5 foram todos preparados a partir de lotes distintos de propelente, ou seja, operações distintas de preparação da mistura. É possível observar na Fig. (3) que os testes 3 e 5 apresentam resultados mais elevados que os fornecidos pela Eq. (4) para todo o intervalo de pressão de compactação. Da mesma forma, os lotes 2 e 4 apresentam massa específica menor em relação à média em todo o intervalo. Os testes 6 a 9 foram preparados a partir de um mesmo lote de propelente, portanto resultados semelhantes entre estes testes eram esperados, entretanto estes testes também apresentaram comportamento semelhante aos cinco primeiros. O teste 6, no qual todas as amostras foram prensadas com 48 Mpa, produziu amostras com massas específicas muito semelhantes; várias das cinco amostras aparecem sobrepostas na Fig. (3).

Os valores de todas as amostras foram agrupados conforme a pressão de compactação e, com base na distribuição t de Student e nível de confiança de 95%, intervalos de incerteza foram obtidos. Eles aparecem na Fig (4), sendo que o maior ocorreu para o grupo de 64 MPa e apresentou amplitude de 184,42 kg/m³, ou seja, 11,36% em relação ao valor médio conforme a Eq. (4). Em uma análise semelhante, mas considerando-se apenas as amostras do teste 6, obteve-se um intervalo de incerteza de 20,87 kg/m³, ou seja, 1,31% em relação à média obtida pela Eq. (4).

A velocidade de queima foi medida em diversas regiões das amostras e os resultados foram analisados. Procurou-se verificar se a velocidade de queima variou em alguma região distinta das amostras, por exemplo, no início da amostra, quando as imediações da frente de chama ainda não sofreram transferência de calor significativa. Todas as amostras exibiram pequenas variações locais de velocidade média, mas como não apresentaram um comportamento evidente foram tomados os valores da velocidade média para o intervalo entre 0 e 60 mm como referência para as análises neste trabalho.

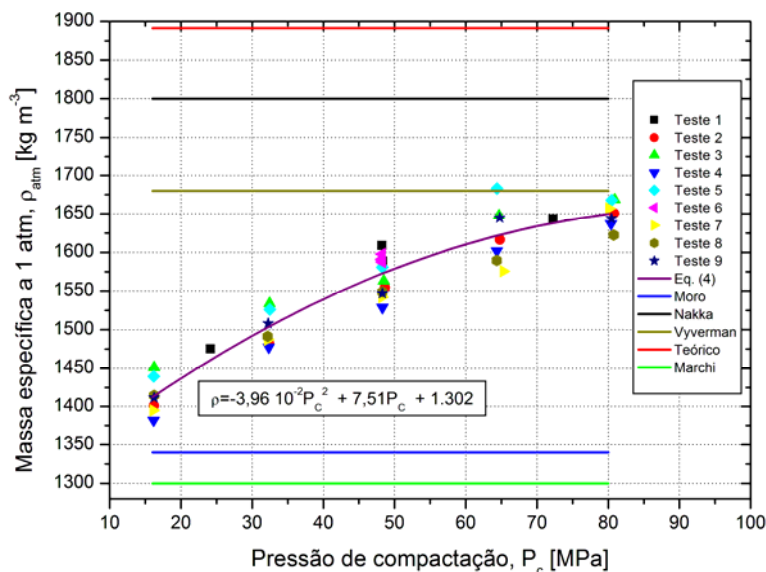


Figura 3. Massa específica versus pressão de compactação, incluindo os valores dos testes

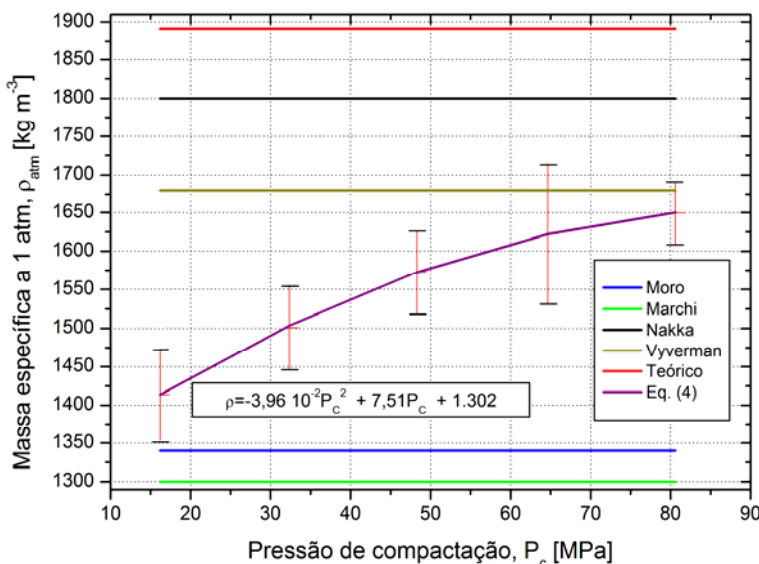


Figura 4. Massa específica versus pressão de compactação com incerteza

A partir dos resultados experimentais, foi possível ajustar uma função polinomial de segunda ordem para obter a velocidade de queima média em função da pressão de compactação, dada por

$$r = 5,6837 \cdot 10^{-5} P_c^2 - 1,1277 \cdot 10^{-2} P_c + 2,8565 \tag{5}$$

O comportamento da Eq. (5) pode ser visto em forma gráfica na Fig. (5), juntamente com os resultados experimentais de todas as amostras de todos os testes. A Fig. (5) inclui também os resultados de outras fontes. A velocidade de queima tem um comportamento inverso ao da massa específica, pois com o aumento da pressão de compactação ela se reduz.

A Fig. (6) apresenta os intervalos de confiança para a média baseados na distribuição t de Student e um nível de confiança de 95%. A amplitude do maior intervalo foi observada no grupo de amostras com pressão de compactação de 32 MPa. O valor obtido foi de 0,55 mm/s, o que corresponde a 21,45% em relação à média do referido grupo. Quando foi considerada a mesma análise, mas apenas do teste 6 (48 MPa), a amplitude foi de 0,15 mm/s, ou seja, 6,41% em relação à média do teste 6.

A vazão mássica dos gases de combustão é dada por

$$\dot{m} = \rho \cdot r \cdot A_b \tag{6}$$

onde A_b é a área de queima. O produto da velocidade de queima pela massa específica pode ser identificado como a vazão mássica dos gases (\dot{m}) por unidade de área de queima (A_b). Como o comportamento da massa específica e da velocidade de queima são diferentes em relação à pressão de compactação, foi verificado como o produto destas variáveis se comportou em relação à pressão de compactação.

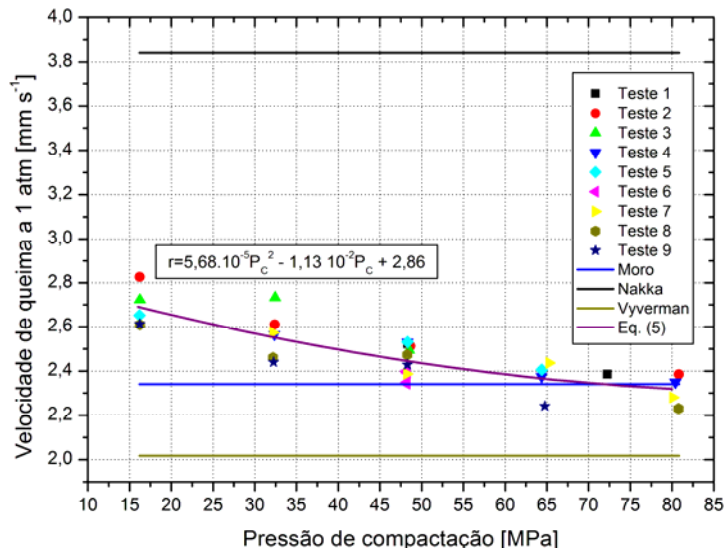


Figura 5. Velocidade de queima versus pressão de compactação, incluindo os valores dos testes

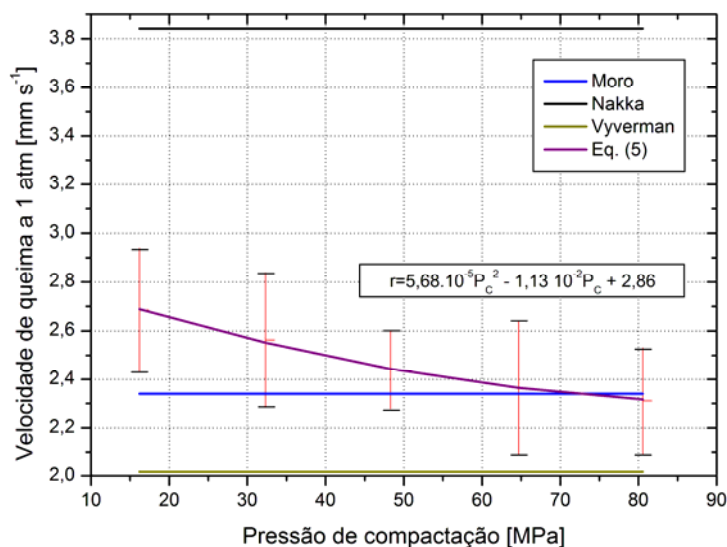


Figura 6. Velocidade de queima versus pressão de compactação com incerteza

A Fig. (7) apresenta um gráfico do produto velocidade de queima e massa específica versus pressão de compactação para todas as amostras que apresentaram queima regular. Observa-se que o produto destas duas variáveis é aproximadamente constante para toda a faixa de pressão de compactação, com valor 3,825 kg/(m²s).

A Fig. (8) mostra os intervalos de confiança baseados na distribuição t de Student, relativos aos resultados experimentais, obtidos com um índice de confiança de 95%. O intervalo maior ocorre na pressão de 32 MPa e é de 0,984 kg/(m²s), ou seja, variou 25,65% em relação à média. Aqui, em vez da média de cada grupo, foi usada a média de todas as amostras de todos os testes, uma vez que ela é praticamente independente da pressão de compactação.

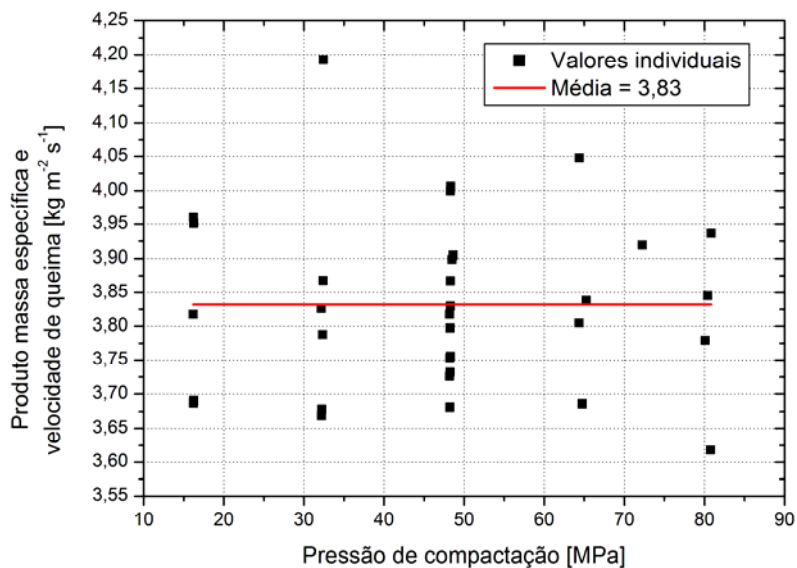


Figura 7. Produto massa específica e velocidade de queima: média e valores experimentais

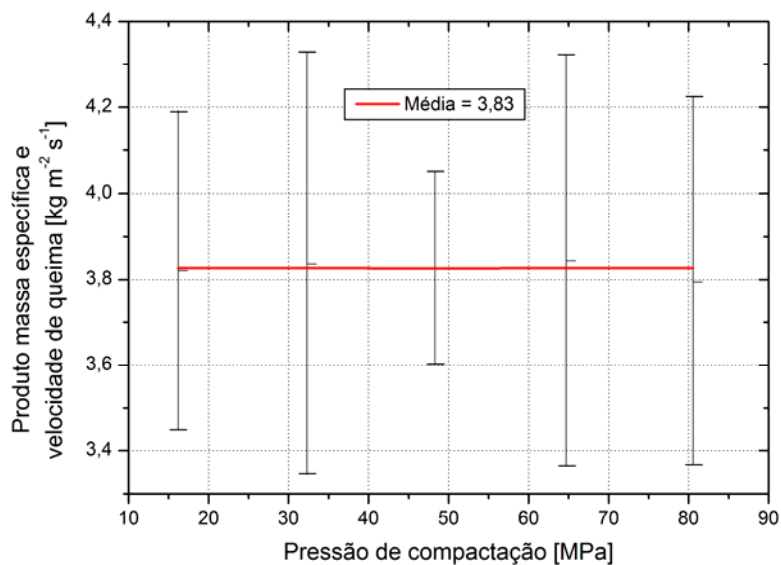


Figura 8. Produto massa específica e velocidade de queima, incluindo as incertezas

Um último aspecto importante a ser mencionado é que houve acúmulo de resíduos sólidos e líquidos na placa sobre a qual as amostras eram queimadas. Aparentemente as fases condensadas, principalmente carbonato de potássio (K_2CO_3), poderão aderir às paredes da tubeira caso este processo de produção venha a ser empregado. A Fig. (9) mostra os resíduos acumulados após a queima de quatro amostras. A quantidade de resíduos não foi medida, principalmente porque eles ficaram firmemente aderidos à placa e uma porção das partículas é ejetada para longe do local do teste. As duas amostras na parte superior da Fig. (9) parecem ter gerado mais carbonato e as duas de baixo, mais carbono, dando indícios de que a mistura dos componentes não ficou muito homogênea nestas amostras.



Figura 9. Resíduos deixados sobre a placa após a queima de quatro amostras

5 Conclusão

A realização deste trabalho permitiu verificar o seguinte:

1. A massa específica (ρ) do grão-propelente aumenta com o aumento da pressão de compactação do propelente. Com base nos resultados experimentais, ajustou-se uma função polinomial de segunda ordem, dada pela Eq. (4), mostrando esta dependência.
2. A velocidade de queima (r) do grão-propelente, à pressão atmosférica, se reduz com o aumento da pressão de compactação do propelente. Com base nos resultados experimentais, ajustou-se uma função polinomial de segunda ordem, dada pela Eq. (5), mostrando esta dependência.
3. O produto de ρ por r é uma constante de valor $3,825 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$.

Atualmente, este trabalho está sendo expandido para a realização de queima do propelente dentro de tubos de acrílico, permitindo visualizar a sua queima em grãos dos tipos cilíndrico e tubular.

Outro estudo envolvendo testes em pressões acima da atmosférica ainda serão realizados para encontrar a e n da Eq.(3). Para isso foram construídos diversos motores-foguete, com câmara de combustão e tubeira convergente. Cada tubeira tem uma área de garganta diferente a fim de permitir maior ou menor vazão mássica e consequentemente menor e maior pressão de combustão. Estes motores podem ser montados em banco estático e possuem uma tomada de pressão conectada a um manômetro, de forma que, além do empuxo gerado em função do tempo medido, a pressão da câmara também poderá ser medida.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem ao professor Juarez e ao técnico Walderson pelo uso do Laboratório de Cerâmica da UFPR. Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), AEB (Agência Espacial Brasileira) através do Programa Uniespaço, e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). Os quatro primeiros autores são bolsistas da CAPES. O último autor é bolsista do CNPq.

7 Referências

- Douglass, H.W., Collins, J.H., Keller, R.B. "Solid Propellant Design and Internal Ballistics", NASA, SP-8076, 1972.
- Fordham, S., High Explosives and Propellants, 2th edition, Pergamon Press, Oxford, 1980.

- Marchi, C.H., Besozzi, B.M., Ciceroni, M., Hering, S.F., “Verificação Experimental da Influência da Tubeira e do Propelente sobre o Desempenho do Minifoguete Netuno-R”, Universidade Federal de Santa Catarina, Relatório, 1990.
- Moro, D.F., Comunicação pessoal a C. H. Marchi, Curitiba, 2013.
- Nakka, R.A., “Solid Propellant Rocket Motor Design and Testing”, Bachelor of Science Thesis in Mechanical Engineering, University of Manitoba, Manitoba, 1984.
- Nakka, R.A., Richard Nakka’s Experimental Rocketry Web Site. Disponível em: < <http://www.nakka-rocketry.net/>>. Acesso em 19/03/2014.
- NAR, Disponível em: < <http://www.nar.org/SandT/NARenglist.shtml>>. Acesso em 31/03/2014.
- Stancato, F., Miraglia, J., Princípios de balística interna: uma metodologia e aplicação experimental didática, International Mobility Technology Conference and Exhibit, 27-29 October, 1997.
- Stancato, F., Racca, J.G.C., Castaldo, F., Carbonari, G., Souza, L.A., Ballarotti, M.G., A 3000 Ns sugar-sodium nitrate motor development for space education, 51th International Aeronautical Congress, 2-6 October, Rio de Janeiro, RJ, 2000.
- Vyverman, T., “The potassium nitrate – sugar propellant”, Report, 1978.
- Wallace, W., FMX The revised Black Book A Guide to Field-Manufactured Explosives, Paladin Press, 1995.