

Processo de fabricação de um micropropulsor

Júlio C S de Oliveira¹, Nicolis A de Araújo¹, Julia Feldhaus¹, Aldélio B Caldeira^{1*}, Carlos A V Carneiro¹, Antônio C P Barbosa², Bruno de C Passon³

¹Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

²Subdivisão de Ensino de Graduação, Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

³FJF, IMBEL, Av. Presidente Juscelino Kubitschek, 7500, 36090-000, Benfca, Juiz de Fora, MG, Brasil.

*aldelio@ime.br

RESUMO: Este trabalho apresenta um processo de fabricação de um micropropulsor. Este micropropulsor contém uma câmara de combustão e uma tubeira convergente-divergente em uma única estrutura cerâmica. O processo de fabricação do micropropulsor pode ser dividido em seis passos: usinagem da matriz em latão, molde do vaso de silicone, fundição do modelo de cera, deposição da alumina, sinterização da cerâmica e, por fim, derretimento e remoção da cera. O protótipo manufaturado mostra a viabilidade do processo proposto de fabricação.

PALAVRAS-CHAVE: Micropropulsor. Fabricação. Fundição.

ABSTRACT: This work presents a fabrication process of a microthruster. This microthruster contains the combustion chamber and the convergent-divergent nozzle in a single ceramic structure. The fabrication process of the microthruster can be divided into six steps: machining of the brass matrix, molding of the silicon vessel, casting of the wax model, deposition of the alumina, sintering of the ceramic and, finally, melting and removal of the wax. The manufactured prototype shows the feasibility of the proposed fabrication process.

KEYWORDS: Microthruster. Fabrication. Casting.

1. INTRODUÇÃO

Micropropulsores são equipamentos em escala sub-cm [1] que geram gases de exaustão com elevada energia cinética a fim de proporcionar o impulso desejado. Estes dispositivos são sistemas microeletromecânicos (MEMS) com várias aplicações, dentre as quais se destacam o controle de atitude de microsatélites e a propulsão de micro veículos aéreos não tripulados (VANT) [2,3]. Adicionalmente, há uma vasta possibilidade para atuadores com micropropulsores como, por exemplo, os utilizados na liberação de medicamentos em cápsulas controladas remotamente [4], bem como em robótica [5].

A tecnologia dos micropropulsores pode ser utilizada para aumentar o alcance de projetis, nas munições com “cargas viajantes” e nas assistidas [6,7]. Em sistemas de propulsão com “cargas viajantes”, o propelente sólido do propulsor é consumido durante a balística interna, enquanto na assistida, o propelente sólido do propulsor é consumido durante a balística externa.

Os micropropulsores que empregam propelente sólido possuem algumas vantagens em relação aos que empregam propelente líquido. O micropropulsor que usa propelente sólido é mais simples, não possui partes móveis e não apresenta problemas de vazamento [8,9]. Além disso, o micropropulsor com propelente sólido é mais fácil de fabricar e tem baixo custo de fabricação [10].

As escalas e as precisões requeridas na manufatura de micropropulsores são desafios tecnológicos a serem enfrentados. Ademais, novas tecnologias de microfabricação usando materiais cerâmicos com alto ponto de fusão são relevantes, pois possibilitam a construção de motores que operem a elevadas temperaturas, permitindo o aumento da eficiência térmica do micropropulsor. Por outro lado, estes materiais cerâmicos devem resistir a impactos elevados sem falhar, o que é um complicador no desenvolvimento destas tecnologias.

Usualmente, as tecnologias adotadas para fabricar a estrutura de micropropulsores são as mesmas usadas na manufatura de placas de circuitos microeletrônicos. Algumas

destas tecnologias são baseadas na deposição de vapor químico a baixa pressão (LPCVD), na impressão por ion reativo (RIE) e na impressão por ion reativo profundo (DRIE) [9].

Os micropropulsores são normalmente fabricados em duas configurações: a horizontal e a vertical. A configuração horizontal é manufaturada em uma camada com a câmara de combustão e uma tubeira. A configuração vertical é construída com o empilhamento de camadas, onde cada camada corresponde a uma parte do propulsor: ignitor, câmara de combustão, convergente e divergente. Utilizando a configuração vertical, o microfoguete pode ter simetria axial, diferindo da configuração horizontal [11,12].

O presente trabalho descreve um processo de fabricação de um micropropulsor cerâmico com simetria axial e com uma única estrutura que integra câmara de combustão e tubeira convergente-divergente. O processo de fabricação é dividido em seis etapas: usinagem da matriz em latão, molde do vaso de silicone, fundição da cera em um molde, deposição da alumina, sinterização da cerâmica e derretimento e remoção da cera. O processo de fabricação proposto se destaca pela facilidade e a construção do micropropulsor comprova a viabilidade do processo.

2. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO MICROPROPULSOR

O processo de fundição para obter o micropropulsor cerâmico é dividido em etapas. Primeiramente, é realizada a usinagem da matriz do micropropulsor em latão que servirá de base para fabricar o micropropulsor cerâmico. O desenho conceitual preliminar do micropropulsor é ilustrado na Fig. 1.

A operação de usinagem para obter a matriz do micropropulsor utilizou um torno CNC da Fábrica de Material de Comunicações e Eletrônica (FMCE) da Indústria de Material Bélico do Brasil (IMBEL).

Uma haste metálica foi colocada atrás da matriz do micropropulsor, visando facilitar o manuseio da matriz nas etapas de fabricação seguintes, como ilustra a Fig. 2.

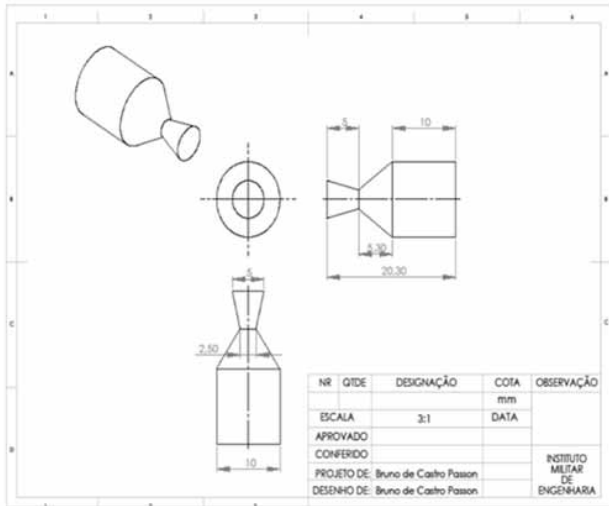


Fig. 1- Desenho técnico do micropropulsor.

O silicone em forma de pó (denominado de Material Elástico Jeltrade® para Impressão Tipo II) é preparado, sendo adicionados 10 por cento de seu peso em água, formando uma pasta. Em seguida, a pasta é inserida em um tubo de cobre com três centímetros de comprimento e quinze centímetros de diâmetro, como mostram as Fig. 3 e 4.

Na etapa seguinte, limpa-se bem a matriz do micropropulsor e a mesma é inserida no centro da pasta de silicone. Em seguida, o silicone se solidifica, conforme ilustram as Fig. 5 e 6.

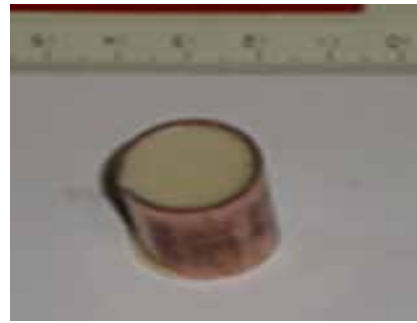


Fig. 4 - Tubo de latão com a pasta de silicone.



Fig. 5 - Inserção da matriz no silicone.



Fig. 2 - Matriz do micropropulsor em latão com haste para manipulação.



Fig. 6 - Matriz inserida no silicone.

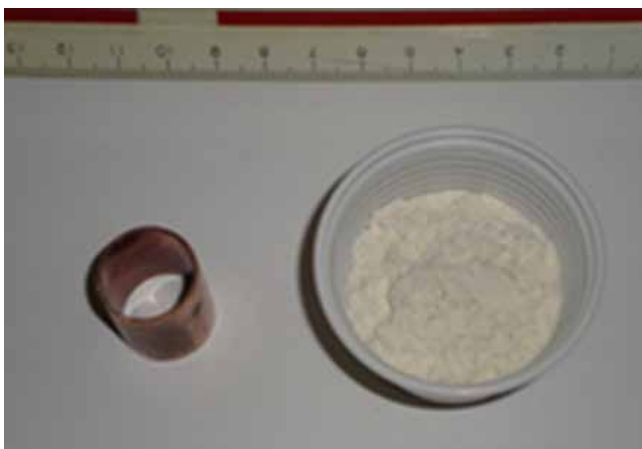


Fig. 3 - Tubo de latão e silicone em pó.

Depois disso, o silicone é retirado do tubo de cobre. Posteriormente, o silicone extravasado é cortado cuidadosamente, tangenciando a matriz de latão. A cavidade resultante no silicone, ao se remover a matriz, tem aproximadamente o perfil da matriz, resultando na geometria interna do molde de silicone.

Na etapa seguinte, derrete-se a cera e a cera líquida é colocada no molde de silicone. Em seguida, a cera solidifica, quando então o silicone elástico é removido, permanecendo a forma do modelo do micropropulsor em cera, como ilustrado na Fig. 7.

A remoção da cera do interior do silicone é uma operação difícil, por causa da pequena região na garganta da tubeira, a qual pode se quebrar durante este procedimento. Para contornar este problema, um fino arame é colocado na garganta da tubeira, o qual é separado da cera, quando a cera é removida completamente da cavidade de silicone.

Na etapa seguinte, faz-se uma cavidade onde se aloja a pólvora e o fio para ignição elétrica do propelente. Prepara-se a pasta de barbotina de alumina (material composto e água), depositando-a ao redor do modelo em cera, mantendo

a disposição externa e a saída livre da tubeira, bem como a ligação dos fios na câmara de combustão.

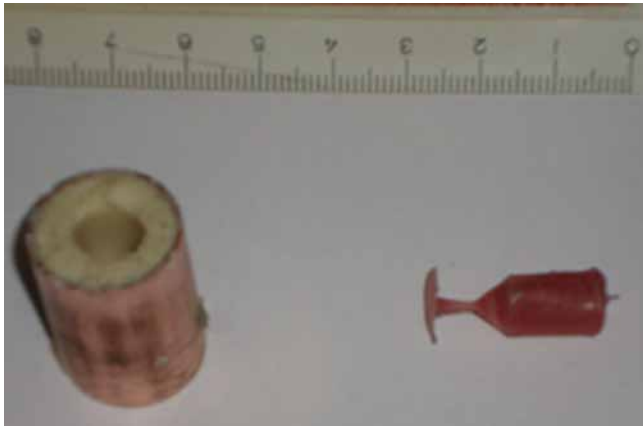


Fig. 7 - Modelo em cera.

Para tanto, aguarda-se a solidificação da pasta de barbotina e repete-se esta operação por duas vezes. Coloca-se no interior de uma estufa a temperatura de 80°C durante um dia. Vale ressaltar que se deve ter cautela para não acionar a pólvora, pois seu acionamento é dependente das características do material da pólvora. É digno de nota que a pólvora utilizada neste experimento ignita em torno de 150°C. Ademais, acima de 80°C, a cera escoa pela saída da tubeira. Assim, a temperatura de sinterização deve ser menor que a temperatura de queima da pólvora, para não ignitar a pólvora.

O processo de fabricação do micropropulsor utiliza a técnica da microfusão que produz um modelo do micropropulsor em cera no estado sólido, o qual é envolvido por material cerâmico. Ao aquecer o conjunto a uma temperatura superior a 80°C a cera derrete. Em seguida, a cera líquida é removida, permanecendo o micropropulsor cerâmico.

O fio utilizado para ignitar a pólvora por efeito Joule é composto por 80% Níquel e 20% Cromo ligado a um sistema elétrico com tensão variável. Assim, ao controlar a voltagem no circuito ignitor, controla-se a corrente, tendo como resultado o controle do aquecimento da pólvora na região do fio ignitor.

3. RESULTADOS

O resultado deste processo de fabricação é o vaso do motor do micropropulsor composto pela câmara de combustão e pela tubeira convergente-divergente, ambos em uma única estrutura, o qual foi submetido a uma verificação dimensional.

A metrologia da matriz do micropropulsor em latão e do micropropulsor cerâmico utilizou o microscópio óptico estereoscópico do Laboratório de Biomateriais do Instituto Militar de Engenharia, cujas imagens são apresentadas nas Fig. 8 e 9.

Os valores dimensionais da matriz do micropropulsor em latão e do micropropulsor cerâmico são apresentados na Tabela 1.

Observa-se que a estrutura produzida em material cerâmico do micropropulsor se encontra porosa, em virtude da sistemática para obtenção do material cerâmico oriundo da pasta de barbotina de alumina formada pela mistura do material composto em pó e água com respectivas frações em peso.

É importante observar que houve uma redução dimensional indesejada, porém esperada do micropropulsor cerâmico. Houve uma diferença relativa de aproximadamente de 17% nas medidas obtidas do diâmetro da garganta e de 2% do diâmetro de saída da tubeira da matriz do micropropulsor em latão em

relação ao micropropulsor cerâmico. É possível observar esta variação maior no diâmetro da garganta, pois esta se encontra mais no interior do micropropulsor, sofrendo um efeito de contração maior da pasta. Isto pode ser resolvido, utilizando um material cerâmico com uma contração menor.

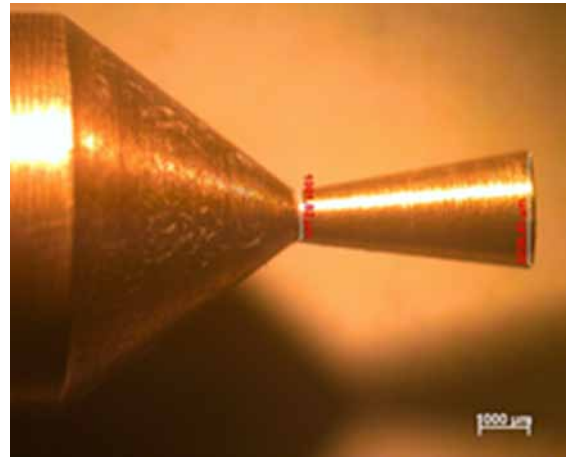


Fig. 8 - Imagem da matriz no microscópio.



Fig. 9 - Imagem da cavidade interna da tubeira do micropropulsor.

Tabela 1: Valores experimentais médios obtidos em 5 ensaios.

Dimensões da tubeira	Diâmetro da garganta (µm)	Diâmetro de saída (µm)
Modelo em latão	1001,82 ± 2,30	2228,45 ± 1,50
Protótipo em alumina	830,03 ± 3,70	2183,34 ± 3,50

Verificam-se também imperfeições na parede do micropropulsor de material cerâmico, em decorrência do procedimento adotado para produção da pasta de barbotina de alumina formada pela mistura do material composto em pó e água com respectivas frações mássicas, bem como das imperfeições superficiais da matriz. Portanto, recomenda-se realizar um exame radiográfico da peça quando da deposição da pasta cerâmica no molde de cera para ver se há inconformidades na estrutura formada.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um processo de fabricação de um micropropulsor cerâmico em desenvolvimento no Instituto Militar de Engenharia.

A fabricação do micropropulsor se baseia na usinagem da matriz, na microfusão em cera e na sinterização do

material cerâmico, processos simples de serem executado.

O micropropulsor foi submetido a verificação dimensional, empregando um microscópio óptico estereoscópico, o que revelou discrepâncias entre a matriz e o micropropulsor cerâmico. Além disso, imperfeições na superfície do micropropulsor também foram observadas, sendo atribuídas ao processo de deposição da alumina e as imperfeições superficiais da matriz. Também foi observada redução dimensional da estrutura do micropropulsor cerâmico em relação a matriz. Este fenômeno era esperado e pode ser explorado de forma produzir micropropulsores ainda menores. Logo, este fenômeno deve ser previsto durante o projeto de fabricação.

É importante destacar que a inserção da pólvora e do fio de ignição durante a fabricação do micropropulsor é uma etapa que aumenta a complexidade do procedimento empregado, sendo necessários cuidados quanto a segurança a fim de não ignitar o propelente durante a etapa de sinterização. Logo, no processo proposto, o carregamento do vaso do motor do micropropulsor com propelente é realizado simultaneamente e de forma integrada a fabricação da estrutura do próprio micropropulsor.

A produção do molde em cera também é um ponto sensível do processo, posto que a garganta da tubeira pode ser danificada nesta etapa.

O aperfeiçoamento do processo proposto permitirá corrigir os defeitos de fabricação encontrados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da CAPES, do CNPq, da Seção de Engenharia Química do Instituto Militar de Engenharia e da Fábrica de Material de Comunicações e Eletrônica (FMCE-IMBEL).

1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] English, B. A., Allen, M. G. Control of ignition delay in microfabricated hot-wire igniters: Simulation, fabrication, and experimental results. *Sensors and Actuators A*, 172, 483-490, 2011.
- [2] Ju, Y., Maruta, K. Microscale combustion: technology development and fundamental research. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37, 669-715, 2011.
- [3] Maruta, K. Micro and mesoscale combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, 33, 125-150, 2011.
- [4] Pi, X., Lin, Y., Wei, K., Liu, H., Wang, G., Zheng, X., Wen, Z., Li, D. A novel micro-fabricated thruster for drug release in remote controlled capsule. *Sensors and Actuators A*, 159, 227-232, 2010.
- [5] Churaman, W. A. Novel Integrated System Architecture for an Autonomous Jumping Micro-Robot. M. Sc. Dissertation. University of Maryland, Maryland, USA, 2010.
- [6] Salwan, S. K. Conventional Armaments for Coming Decades, *Defence Science Journal*, 47 (4), 417-426, 1997.
- [7] Bailey, A., Murray, S. G. *Explosives, Propellants and Pyrotechnics*, Brassey's, London, UK, 2000.
- [8] Orieux, S., Rossi, C., Estève, D. Compact model based on a lumped parameter approach for the prediction of solid propellant micro-rocket performance. *Sensors and Actuators A*, 101, 383-391, 2002.
- [9] Rossi, C., Orieux, S., Larangot, B., T Do Conto, D Estève. Design, fabrication and modeling of solid propellant microrocket-application to micropropulsion. *Sensors and Actuators A*, 99, 125-133, 2002.
- [10] Chou, S. K., Yang, W. M., Chua, K. J., Li, J., Zhang, K. L. Development of micro power generators – A review. *Applied Energy*, 88, 1-16, 2011.
- [11] Morínigo, J. A., Hermida-Quesada, J. Solid-gas surface effect on the performance of a MEMS-class nozzle for Micropropulsion. *Sensors and Actuators A*, 162, 61-71, 2010.
- [12] Lewis Jr., D. H., Janson, S. W., Cohen, R. B., Antonsson, E. K. Digital micropropulsion. *Sensors and Actuators A*, 80, 200, 143-154, 2000.