

USO DE MATERIAIS CERÂMICOS PARA BLINDAGEM E SELAGEM TÉRMICA DE MOTORES FOGUETE A PROPELENTE SÓLIDO

Douglas de Souza Rodrigues, douglas.rodrigues@usp.br¹

Fernanda do Nascimento Monteiro, nanda_nm@yahoo.com.br e-mail¹

Marcos Vinícius Fernandes Ribeiro, ribeiro.mvf@gmail.com¹

Paulo Celso Greco Júnior, pgreco@sc.usp.br¹

¹Departamento de Engenharia Aeronáutica, Escola de Engenharia de São Carlos- Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São Carlense, 400, São Carlos-SP, 13566-590

Resumo: Este trabalho consiste na pesquisa de um material cerâmico capaz de fornecer blindagem e selagem térmica para um motor foguete a propelente sólido. Sendo um motor foguete um vaso de pressão no qual ocorre uma reação química exotérmica geradora de gás, para aumentar a eficiência da reação e, por consequência, o empuxo gerado, deve-se aumentar a pressão interna ao motor, o que causa um aumento na temperatura dos gases gerados. Dessa forma devem-se obter formas seguras de se conter os gases quentes dentro da câmara de combustão, evitando vazamentos que, além de diminuir a eficiência do motor, podem danificar as outras seções do foguete. Como a temperatura pode superar os 1600K, não se torna viável o uso direto de materiais metálicos ou compósitos, mas uma camada de cerâmica é suficiente para permitir que esses materiais suportem essa temperatura. Ainda, materiais cerâmicos possuem maior resistência à corrosão, fadiga e flexão transversal, e são, usualmente, mais leves que os metais, entretanto, possuem maior dureza e porosidade, tornando o processo de fabricação mais complexo. Para seleção correta do material, diversos materiais cerâmicos foram analisados com base em suas propriedades termomecânicas e disponibilidade e para a seleção do mais adequado processo de fabricação, vários processos foram comparados visando sua viabilidade e precisão. Ao fim, pretende-se obter o material e o processo de manufatura que melhor se adequam às necessidades do projeto.

Palavras-chave: Materiais Cerâmicos, Blindagem Térmica, Motor Foguete

1. INTRODUÇÃO

Materiais cerâmicos são aplicados na área aeroespacial desde o seu início, principalmente com o advento dos ônibus espaciais, pois a necessidade de proteger o exterior da espaçonave, seus bocais e sua câmara de combustão exigia características só encontradas nas cerâmicas, como: resistência a altas temperaturas, baixa transferência de calor, leveza e confiabilidade (Richerson, 1992). Entretanto, a aplicação de materiais cerâmicos para tais fins exige um profundo estudo sobre os vários tipos de cerâmicas existentes e seus processos de manufatura, pois mesmo possuindo características únicas, apresentam grandes dificuldades no manuseio e aplicação, fazendo com que se procurem materiais que possuam uma maior facilidade para se trabalhar como metais ou compósitos.

Visando alcançar tal facilidade, Silva et al (2011) analisa diferentes tipos de materiais compósitos, obtendo uma câmara de combustão que utiliza camadas de cortiça, PVC (cloreto de polivinila) e fenolite, entretanto, tal proteção é descartável, tornando dispensoso o seu uso, além de dificultar sua aplicação, devido à necessidade de se colocar novas camadas de cortiça sempre que se for realizar a ignição do motor. Assim, este trabalho tem como objetivo selecionar um material cerâmico capaz de suprir as necessidades de projeto, encontrados na Tab. (1), de uma câmara de combustão totalmente reutilizável e sem reposição de seus componentes e o melhor processo de fabricação tanto da câmara como do bocal, focando não somente nos requisitos técnicos como também na viabilidade do processo.

Tabela 1. Requisitos técnicos iniciais do projeto.

Resistência a Tração (MPa)	60
Resistência a Compressão (MPa)	5
Resistência ao Cisalhamento (MPa)	32
Temperatura de Operação (K)	1582

Variação térmica (K/s)	31640
Tolerância dimensional (mm)	±0.05mm

2. METODOLOGIA

Nesta seção serão apresentados os cálculos e as considerações realizadas para se obter os requisitos técnicos do projeto apresentados na Tab. (1), além de apresentar os materiais e os processos de manufatura que foram comparados no trabalho.

2.1. Requisitos Técnicos Iniciais do Projeto

O projeto se encontra ainda em seu estado conceitual, entretanto, algumas considerações sobre o mesmo já podem ser feitas, sem determinar algumas características com exatidão. Utilizando-se de um programa de otimização de motores obtemos a Tabela (2) para um motor com aproximadamente 1 milha.

Tabela 2. Dimensões Aproximadas do Motor

Diâmetro da Garganta (mm)	10
Diâmetro da Saída do Bocal (mm)	21.5
Diâmetro Externo da Câmara de Combustão (mm)	80
Diâmetro Interno da Câmara de Combustão (mm)	70

2.1.1. Esforços Mecânicos

Para os cálculos estruturais, o motor foguete foi estudado como um vaso de pressão cilíndrico de paredes finas, Fig. (1). Dessa maneira, considera-se que a distribuição de tensão pela sua espessura é uniforme e sua estrutura sofre tensões normais na direção circunferencial (σ_1) e no sentido longitudinal (σ_2).

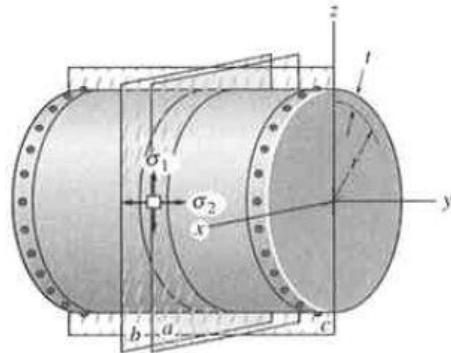


Figura 1. Vaso de pressão cilíndrico de paredes finas e as cargas ao qual está submetido (Hibbeler, 2010).

Considerando uma pressão interna de 5MPa devido a combustão e utilizando-se das equações (1), (2) e (3) obtém-se a tensão normal máxima de 60MPa na direção circunferencial (σ_1).

$$\sigma_1 = \frac{pr}{t} \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \frac{pr}{2t} \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{2r}} \right) \quad (2)$$

$$\tau_{\max} = \frac{pr}{2t} \left(1 + \frac{t}{r} \right) \quad (3)$$

2.1.2. Requisitos Térmicos

O motor foguete utilizado é projetado para utilizar o propelente sólido composto KNSU (nitrato de potássio e sacarose). O nitrato de potássio compõe 65% da mistura e age como oxidante, o restante da mistura é composta de sacarose, que age como combustível. A temperatura teórica da queima de KNSU é 1720K (Nakka, 1997), no entanto consideramos uma eficiência da queima de 0,92%, resultando na temperatura de operação de 1582 K.

Outro requisito térmico importante é o choque térmico ao qual o material cerâmico será submetido, já que ele possui uma variação de temperatura de 1289 K em 0.05s o que pode causar falhas e mudanças nas características do material.

2.1.3. Tolerâncias Dimensionais

As tolerâncias dimensionais são levadas em conta, principalmente no bocal, onde sua eficiência resulta diretamente da sua geometria, sendo apreciada a maior semelhança possível da geometria real com a teórica. Porém, considerando o diâmetro mais crítico como sendo o da garganta e utilizando-se de uma tolerância dimensional de $\pm 0.05\text{mm}$ temos uma variação máxima de 0,5%, sendo desprezível para um motor foguete de pequeno porte como o aqui projetado.

2.2. Materiais

No motor foguete, durante a combustão, a cerâmica sofre choque térmico, abrasão do fluxo de gases carregados com meios sólidos abrasivos e esforços mecânicos nas suas paredes. As propriedades requeridas pelo material utilizado no motor são baixa densidade, tolerância a altas temperaturas, baixo coeficiente de atrito, resistência à corrosão e alta dureza. Os materiais estudados foram alumina (Al_2O_3), nitreto de silício (Si_3N_4) e carbeto de silício (SiC).

Tabela 3. Propriedades dos materiais estudados

	Al_2O_3^1	Si_3N_4^2	SiC^3
Densidade teórica (g/cm^3)	3,97	3,18	3,21
Calor Específico ($\text{J}/\text{kg.K}$)	1088	620-1046	400-1600
Coeficiente de Expansão Térmica ($10^{-6}/\text{K}$)	7,2-8,6	3,0	4,3-5,6
Condutividade Térmica ($\text{W}/\text{m.K}$)	5,8 (1400 K)	9-30 (400 K)	21-33 (1400 K)
Parâmetro de Resistência ao Choque Térmico ⁴	6,5	16	31
Dureza Knoop (GPa)	18 -23	8-19	20-30
Módulo de Young (GPa)	380	207-483	304

¹Alumina de alta pureza (99,9 %)

²Nitreto de Silício tipo α

³Carbeto de Silício tipo α

⁴Calculado usando $R = k\sigma(1-\mu)/E\alpha$

2.2.1. Óxido de Alumínio

O óxido de alumínio (Al_2O_3), também conhecido como alumina, é uma das cerâmicas avançadas mais utilizadas. Isso se deve a sua alta resistência à abrasão e à alta dureza a um bom custo/benefício. Além disso, a alumina pode ser produzida com diferentes graus de pureza, podendo formar outros compósitos cerâmicos, melhorando algumas de suas propriedades. Tem uma condutibilidade térmica relativamente alta para um material cerâmico.

2.2.2. Nitreto de Silício

Entre as cerâmicas, o nitreto de silício (Si_3N_4) possui propriedades de elasticidade e tenacidade moderadamente altas, baixo coeficiente de dilatação térmica, alta resistência em uma ampla faixa de temperatura e condutividade térmica moderada. Isso o permite resistir choques térmicos, altas temperaturas, desgaste e altas cargas estruturais. Essas características o tornam uma das poucas cerâmicas monolíticas capazes de sobreviver aos esforços térmicos e estruturais gerados em motores foguete de grande porte.

2.2.3. Carbeto de Silício

O carbeto de silício (SiC) possui vários polítipos, o mais comum é o tipo alpha, que tem forma hexagonal. Dentre as cerâmicas avançadas, é o que apresenta melhor resistência à corrosão e também apresenta uma boa resistência à abrasão. Além dessas características, possui resistência a altas temperaturas, baixo coeficiente de expansão térmica e excelente resistência ao choque térmico. Isso permite a utilização dessa cerâmica em bocais de foguete.

2.3. Processos de Fabricação

A seleção do processo de fabricação deve ser feita de modo criterioso, pois características fundamentais do projeto como tolerâncias dimensionais e custo estão diretamente ligadas ao processo escolhido. Para materiais cerâmicos existem diversas formas de manufatura de componentes, entretanto, esse trabalho se aprofundará em duas classes de fabricação: a conformação e a aspersão térmica.

Dentre os processos de conformação difundidos, dois em especial têm sido bastante aplicados na obtenção de cerâmicas avançadas: a injeção de massas cerâmicas e a prensagem isostática a frio (Fortulan, 1997). Entre os métodos de aspersão, será analisada principalmente a aspersão térmica por plasma, por ser a mais difundida para aplicações semelhantes as do motor foguete aqui conceituado.

2.3.1. Injeção de Massas Cerâmicas

Consiste basicamente na injeção de um veículo orgânico fundido carregado com pós cerâmicos no interior da cavidade de um molde. Com a solidificação do veículo orgânico obtém-se a peça conformada à verde. Remove-se a parte orgânica da peça conformada e esta é densificada por sinterização.

Basicamente, o ciclo de injeção pode ser descrito em cinco principais etapas:

- 1- Inicialmente a mistura é aquecida no vaso através da combinação de aquecedores externos e plastificação mecânica, obtida pela movimentação do fuso ou batedores;
- 2- O molde é preenchido a uma taxa de vazão elevada, mas sem causar jatos;
- 3- Esta etapa se inicia quando o molde já está preenchido, nela o fluxo ocorre a uma taxa gotejante, aumentando a pressão na cavidade;
- 4- Após o canal de alimentação ter solidificado a pressão externa é removida;
- 5- Nesta etapa ocorre o resfriamento do molde.

Após a moldagem da peça, a próxima etapa é a de remoção do veículo orgânico, responsável pela obtenção da massa cerâmica, e possivelmente é a parte mais crítica do processo, pois muitos dos defeitos são decorrentes de erros nessa etapa.

Algumas vantagens e desvantagens desse processo em relação a outros processos de conformação são apresentados na Tab. (2).

Tabela 4. Vantagens e desvantagens do processo de injeção cerâmica. (Fortulan, 1993)

Vantagens	Desvantagens
Menor necessidade de usinagens posteriores	Menor densidade da peça verde
Execução de formas complexas	Dificuldade para remoção do veículo orgânico
Redução de etapas de fabricação	Dificuldade na fabricação de peças espessas
Possibilidade de automação	Maior propensão de defeitos internos
Obtenção de peças com espessuras relativamente finas	
Baixo custo de operação	
Melhor desempenho	

Para a criação do molde, podemos empregar as mesmas técnicas de projeto de moldes utilizadas na injeção de polímeros, com relativa adaptação na injeção de massas cerâmicas (Wrege et al, 1994).

Em um molde de injeção cerâmica, a parte mais importante é a cavidade que possui a forma do injetado e que deve possuir dimensões superiores à da peça desejada para compensar a sua retração.

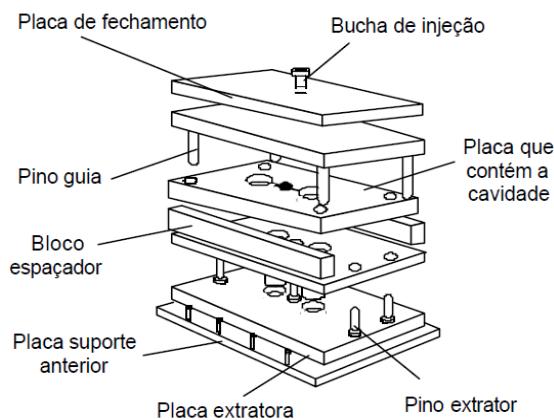


Figura 2. Desenho esquemático de um molde de injeção (German, 1990).

2.3.2. Prensagem Isostática

Tradicionalmente conhecido pela fabricação de velas de ignição automotiva, destaca-se pela uniformidade e elevada qualidade resultante dos produtos obtidos. Em princípio, trata-se de um molde flexível cuja cavidade é preenchida com

pós cerâmicos e posteriormente selada. Colocada dentro de um vaso, o molde é prensado isostaticamente através de um fluido pressurizado que comprime o molde em todas as direções gerando o compacto à verde, como mostra a Fig. (3).

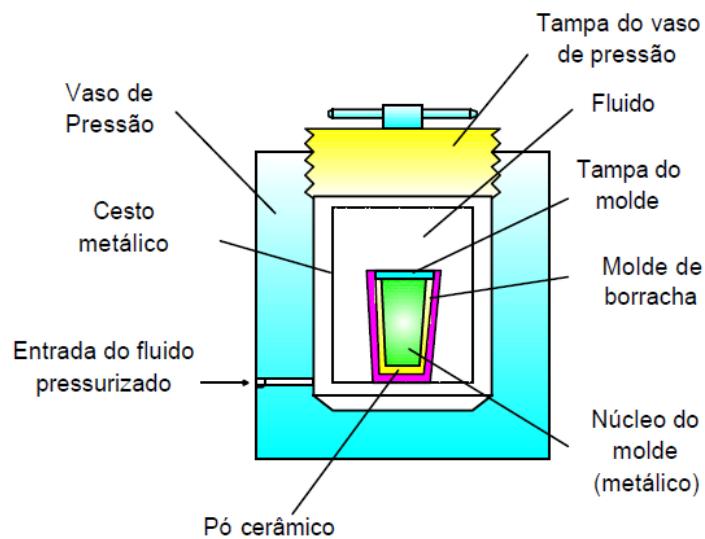


Figura 3. Esquema para obtenção de um produto por prensagem isostática (Richerson, 1992).

A prensagem isostática é particularmente aplicada a produtos que apresentam formas cilíndricas. Vazios internos, todavia, podem ser obtidos com a adição de um núcleo metálico dentro do molde elastomérico. Tais núcleos podem apresentar rocas e escalonamentos no diâmetro, cujos detalhes são transferidos para o produto. Já a superfície externa pode receber acabamento por usinagem à verde.

O projeto de um molde deve ser baseado no conhecimento das características de compactação da peça e a sua posterior retração de sinterização, estas características são sujeitas a variações relativas do material, portanto apenas dimensões aproximadas podem ser adquiridas no produto conformado, tornando-se muitas vezes necessária, a usinagem da peça a verde. No molde, quando este possuir núcleo interno, deve-se cuidar da seleção dos materiais, pois ele deve apresentar compatibilidade química com o pó em processo, ser resistente ao desgaste e quando houver o desgaste, este não deve comprometer a qualidade da cerâmica. Os materiais mais utilizados para os núcleos são o aço inoxidável, o latão e o aço carbono revestido com cromo.

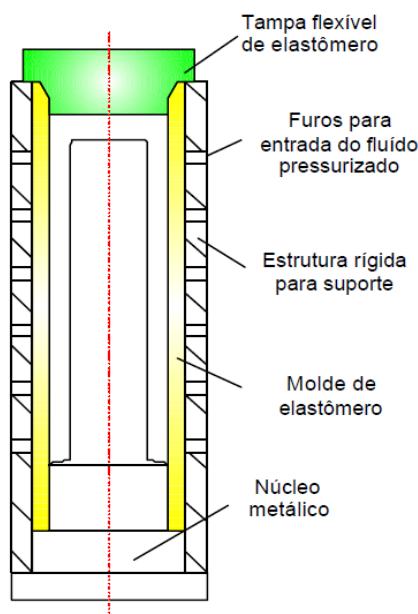


Figura 4. Desenho esquemático de um molde para prensagem isostática de um tubo cerâmico (McEntire, 1984).

2.3.3. Aspersão Térmica por Plasma

Na técnica de aspersão térmica por chama plasmática, partículas são depositadas sobre uma superfície sob circunstâncias extraordinárias: tamanho raramente superior a 100 μm , velocidades de impacto na ordem de $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$ da velocidade do som e temperatura geralmente superior a fusão. A elevada velocidade e a grande diferença de temperatura entre a partícula e o substrato causam uma alta taxa de arrefecimento durante o processo de formação da lamela que vai compor o revestimento.

A aspersão por plasma é o mais flexível dos processos de aspersão térmica com respeito aos materiais que podem ser aspergidos, devido aos gases inertes, alta velocidade do gás e a ampla faixa de temperaturas extremamente elevadas. Entre os equipamentos de aspersão a plasma mais comumente utilizado estão às chamas de plasma de corrente contínua. Estas produzem um jato de plasma de alta temperatura no qual o material a ser processado pode ser injetado para fundir ou vaporizar durante se vôo (M. Boulos, 1991).

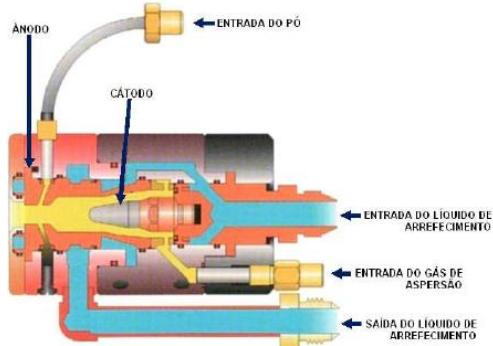


Figura 5. Pistola de aspersão térmica por plasma modelo SG-100 (D. Crawmer, 2004).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Escolha do Material

Rice (2003) orienta que a primeira decisão a ser feita na seleção do material para uma aplicação é determinar quais tipos de materiais são disponíveis, isso geralmente implica estudo dos processos de fabricação e custos, especialmente quando a disponibilidade imediata é desejada ou requerida. No entanto, a pergunta básica é qual candidato tem as melhores características para atingir os requerimentos necessários.

No caso deste estudo, o material escolhido foi o óxido de alumínio (Al_2O_3), pois além de ser capaz de suprir as necessidades do projeto, é um material de baixo custo e alta acessibilidade, tornando viável a conformação de mais peças para posteriores testes.

3.2. Escolha do Processo de Fabricação

O processo de fabricação que melhor se adapta a proposta do trabalho foi a o processo de conformação por prensagem isostática, pois é o único que atende a todas as necessidades do projeto e é factível.

A injeção de massa cerâmica foi descartada devido às complexidades decorrentes da remoção do veículo orgânico que é utilizado no processo, além da inviabilidade geométrica, pois a câmara de combustão e o bocal do motor foguete aqui estudado possuem formatos semelhantes a tubos Fig. (5), que são facilmente produzidos através da prensagem isostática, pelo tipo de molde que este possui.

Quanto à aspersão térmica por plasma, a necessidade de uma posterior usinagem com rebolos diamantados para correção de possíveis deformações na superfície da camada, causa um consequente aumento no custo de fabricação, além da impossibilidade geométrica de se aplicar a aspersão no bocal, devido aos pequenos diâmetros nele encontrados, se comparados com tamanhos médios de pistolas encontradas no mercado, sendo necessária uma adaptação dispendiosa.

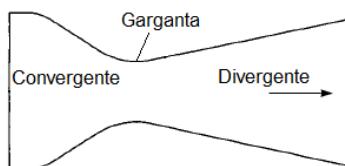


Figura 6. Representação de um bocal convergente-divergente (Sutton e Biblarz, 2001)

Outro fator importante na escolha da prensagem isostática como o melhor processo é a possibilidade da usinagem do produto a verde sem gerar grandes deformações ou trincas no mesmo. Segundo Monteiro et al (2010) é possível com a usinagem a verde diminuir a distorção do produto sinterizado, podendo alcançar níveis de distorção de 0.030mm para uma condição de sobrematerial de 1mm, ao qual estaria dentro da tolerância dimensional exigida no projeto e portanto, evitando uma usinagem pós sinterização com rebolos diamantados.

4. CONCLUSÃO

A partir da comparação de vários materiais cerâmicos, três apresentaram as propriedades necessárias e a viabilidade para serem utilizados em motores foguete a propelente sólido composto KNSU (nitrato de potássio e sacarose), sendo eles: a alumina (Al_2O_3), o nitreto de silício (Si_3N_4) e o carbeto de silício (SiC). Apesar dos estudos dos materiais e dos processos de manufatura, a alumina demonstrou ser o material mais apto para os primeiros protótipos de motores. Entre os processos analisados, a prensagem isostática demonstra ser o mais apto para o estudo, pois é o menos complexo para a utilização e de menor custo. Tais constatações possibilitam a criação de futuros trabalhos, como a produção dos primeiros motores para testes, as alterações na composição da alumina, verificando as mudanças ocorridas na estrutura do produto, e a verificação da confiabilidade e eficácia do uso de materiais cerâmicos para a blindagem e selagem térmica de motores foguete.

5. AGRADECIMENTOS

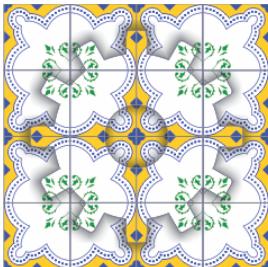
Os autores agradecem ao Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo pelo material e conhecimento sobre materiais cerâmicos utilizados na criação deste artigo.

6. REFERÊNCIAS

- ASM, “ASM Handbooks Online”. 21 Fev. 2012, <<http://products.asminternational.org/hbk/index.jsp>>
- Boulos, M. I. Thermal Plasma Processing. IEEE T. Plasma Sci., v. 19, n. 6 p 1078- 1089, 1991
- Crawmer, D. E. Coating. Structures, Properties and Materials. Handbook of Thermal Spray Technology, J.R. Davis (Ed.), ASM INTERNATIONAL, 338 p., 2004.
- Fortulan, C. A. Desempenho das cerâmicas estruturais associado aos métodos de conformação por injeção, prensagem isostática e projetos de equipamentos e moldes. Dissertação de Doutorado. EESC-USP, 1997.
- Fortulan, C. A. Estudo do processo de injeção de cerâmica e desenvolvimento de injetora. Dissertação de Mestrado. EESC-USP, 1993.
- German, R.M. Powder injection molding. Metal Powder Federation, Princeton, New Jersey, 521p, 1990.
- Hibbeler, R. C., 2010, “Resistência dos Materiais”. Ed. Pearson Prentice Hall, São Paulo, Brasil, pp. 300-301.
- Kingery, W. D., Bowen H. K., Uhlmann D. R., 1975, “Introduction to Ceramics”. Ed. Wiley Interscience.
- McEntire. Tooling design for wet-bag isostatic pressing. In: MANGELS,J.A. Advances in Ceramics, **9** Forming of ceramics, USA, p.16-31, 1984.
- Monteiro, C. I., Sanchez L. E. A., Bukvic, G. Diminuição do Gradiente de densidade em cerâmicas torneadas a verde para minimizar a distorção após a sinterização, FEB, 2010.
- Nakka, R.A., 1984, “Solid Propellant Rocket Motor Design and Testing”, University of Manitoba, Canada.
- Reed, J. S. Principles of ceramics processing. Second Edition. Ed. John Wiley & Sons, Inc. USA, 658P, 1995.
- Rice, R. W., 2003, “Ceramic Fabrication Technology”. Ed. Marcel Dekker, pp 1-24.
- Richerson, D.W.. Modern ceramic engineering, Properties,processing and use in design. Ed. Marcel Dekker, Inc. New York, USA,1992.
- Sutton, P.G. and Biblarz, O., 2001, “Rocket Propulsion Elements: An introduction to the engineering of rockets”, John Wiley & Sons, INC., New York, USA.
- Wrege, P.A.S.; PURQUERIO, B. DE M & FORTULAN, C.A. Projeto de moldes para massas cerâmicas. In: XXXVIII Congresso Brasileiro de Cerâmica. Blumenau. Anais, p.1191-1196, 1994a.
- Zimmer, A. Influência da aspersão térmica por plasma e suas altas taxas de resfriamento na cristalinidade de fases do sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{TiO}_5$. Dissertação de Doutorado. UFRS, 2009.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



USE OF CERAMIC MATERIALS FOR THERMAL SHIELDING AND SEALING OF A SOLID PROPELLANT ROCKET ENGINE

Douglas de Souza Rodrigues, douglas.rodrigues@usp.br¹

Fernanda do Nascimento Monteiro, nanda_nm@yahoo.com.br e-mail¹

Marcos Vinícius Fernandes Ribeiro, ribeiro.mvf@gmail.com¹

Paulo Celso Greco Júnior, pgreco@sc.usp.br¹

¹ Department of Aeronautical Engineering, São Carlos School of Engineering - University of São Paulo, 400 Trabalhador São-carlense Ave., São Carlos, SP – 13566-590, Brazil

Abstract: This paper consists in a research of ceramic material capable of provide shielding and sealing heat to a solid propellant rocket engine. A rocket engine is a pressure vessel where occurs an exothermic chemical reaction that generate gas that increases the reaction efficiency, and therefore the thrust, generated due to the increased internal pressure on the engine. For that, the temperature of the gases needs to increase. Thus, safe forms of containing hot gases within the combustion chamber must be obtained, avoiding leaks that, besides reducing the engine efficiency, may damage the other sections of the rocket. As temperature may exceed 1600K, it becomes not feasible to direct use of metallic materials or composite materials, but a ceramic layer is sufficient to allow these materials to support this temperature. Also, ceramic materials have better resistance to corrosion, fatigue, and flex cross, and are usually lighter than metal, however, have higher hardness and porosity, making the manufacturing process more complex. To a correct material selection, different materials were analyzed based on their thermo-mechanical properties and availability, and to choose the most appropriate manufacturing process, several processes were compared regarding their feasibility and accuracy. Hereafter, this study pretends to get the material and the manufacturing process that will best suit the project needs.

Keywords: Ceramics Materials, Thermal Shielding, Rocket Engine