

Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: **Estudo experimental das oscilações de pressão em motor foguete híbrido (MHF): Desenvolvimento de grão propelente para MFH a base de parafina e negro de fumo**

Bolsista: Rubens Graciano de Campos Godoi

Orientador(a): Renato Felix Nunes

Período a que se refere o relatório: Abril de 2014 a Julho de 2014.

Resumo

A propulsão híbrida tem sido estudada nos últimos anos como uma boa alternativa à propulsão sólida e líquida em termos de economia e segurança, conforme pesquisas feitas pelas universidades de Stanford (EUA) e de Brasília (UnB) que colocaram em evidência o desempenho competitivo desta tecnologia propulsiva. Neste trabalho, a caracterização da parafina foi feita através de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR), e o calor de combustão do grão combustível (parafina + negro de fumo) foi determinado através de bomba calorimétrica. Foram ainda realizados ensaios mecânicos no grão-combustível por meio de durômetro e testes de tração. A partir dos resultados obtidos, foi possível concluir que esse grão combustível apresenta ótimo desempenho energético, porém, suas propriedades mecânicas ainda são pouco satisfatórias, mesmo com o emprego de negro de fumo como aditivo.

1. Introdução

A propulsão de motores-foguete ocorre a partir de uma reação de oxidação de um combustível que pode ser sólido ou líquido. Essa reação é extremamente energética, e resulta na liberação de grande quantidade de energia e gases responsáveis pelo impulso do motor [1,2].

O motor híbrido apresenta vantagens em relação ao motor líquido devido à sua construção mais simples e em relação ao motor sólido pelo fato do agente oxidante estar separado do combustível (Figura 1), o que torna possível um maior controle da combustão e, conseqüentemente, do impulso, permitindo inclusive re-ignições no grão combustível. Porém, uma desvantagem da tecnologia de propulsão híbrida é a baixa taxa de regressão do combustível, que de forma simplificada, limita a produção dos gases oriundos do processo de combustão [3].

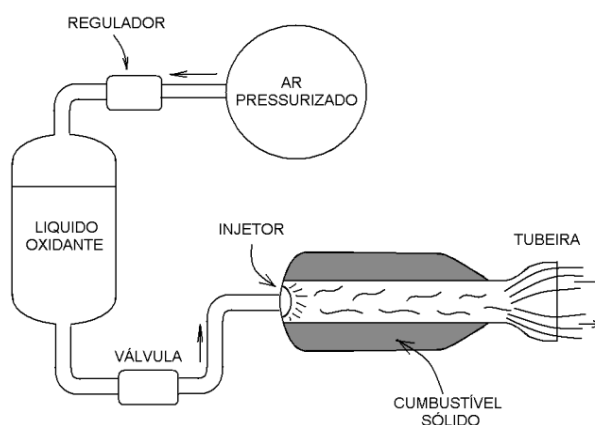


Figura 1 – Modelo simplificado de funcionamento de um motor foguete a propelente híbrido.

Estudos desenvolvidos pela Universidade de Stanford revelaram uma nova classe de combustíveis baseados em parafina que possuem taxa de regressão de três a quatro vezes maior que os grãos combustíveis convencionais [4] [5]. Pesquisadores da Universidade de Brasília também têm se dedicado ao estudo e desenvolvimento de motores híbridos baseados na parafina com esse mesmo fim.

Este trabalho tem como objetivo preparar um grão propelente à base de parafina e negro de fumo para determinar o seu calor de combustão e suas propriedades mecânicas, com o propósito de verificar a viabilidade do emprego desse tipo de material como grão combustível. A caracterização da parafina por FT-IR e DSC também são apresentados como objetivos complementares neste trabalho.

2. Materiais e Métodos

A parafina utilizada neste trabalho foi adquirida na empresa Santa Cruz, com procedência da Petrobras, lote 0413 023, fabricada em 03/04/2013 no formato de micro lentilhas, comercialmente conhecida como Parafina 170/190. A parafina foi primeiramente caracterizada por Calorimetria Exploratória Diferencial em atmosfera dinâmica de nitrogênio, fluxo de 100 mL/min, a uma taxa de aquecimento de 10°C/min; em um equipamento TA Instruments, modelo SDT Q600 em cadinhos de alumínio tampados.

O material de partida (parafina) foi caracterizado por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR), realizadas em um Espectrômetro FT-IR Perkin-Elmer Spectrum One, na temperatura de 25 °C e 48% de umidade, 20 varreduras foram realizadas para cada amostra na região de 4000 a 400 cm⁻¹. A técnica aplicada foi de transmissão, utilizando pastilha de KBr.

Para avaliar a capacidade de deformação das amostras de parafina/negro de fumo foi realizado ensaio de tração em uma máquina de testes ZWICK 1474, com célula de carga CC N°. 168, extensômetro ótico CC N°. 1440/BRICAVA. O ensaio utiliza como norma técnica a STANAG 4506-00.

O calor de combustão do grão propelente de parafina/negro de fumo foi determinado em um Calorímetro Parr 6200, utilizando atmosfera de oxigênio, *spike* de ácido benzóico e filamento de níquel/cádmio.

3. Resultados

Para caracterizar o material de partida foi realizada análise térmica para avaliar o ponto de fusão da parafina utilizada, conforme Figura 2. É possível observar que a parafina apresenta larga faixa de temperatura de fusão. Começando aproximadamente em 40°C, que corresponde à fusão das moléculas de cadeias menores, e terminando próxima de 80°C, que se relaciona à fusão das moléculas de cadeias maiores. A especificação do fabricante indica a existência de um ponto discreto de fusão para a parafina, o que contradiz com os resultados obtidos.

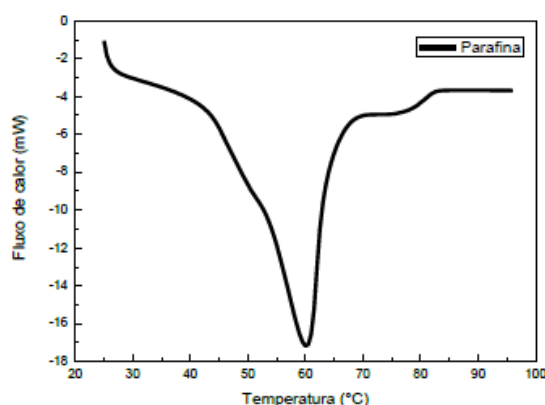


Figura 2 – Curva de DSC da parafina.

Além da análise de DSC, a caracterização da parafina também foi realizada por análise de FT-IR. A Figura 3 mostra que o espectro da parafina apresenta todas as bandas características para este tipo de produto.

Bandas largas na região de 3400 cm⁻¹ referem-se ao OH de umidade presente nas amostras, bandas na região de 2916 – 2936 são características do grupo CH₂, região 1450 à 1475 são do grupo CH₃ e CH₂, banda na região de 1377 à 1383 referente ao grupo CH₃ e banda na região próxima de 720 são do grupo CH₂ com n > 3. Concluindo que a amostra trata-se de um hidrocarboneto alifático saturado.

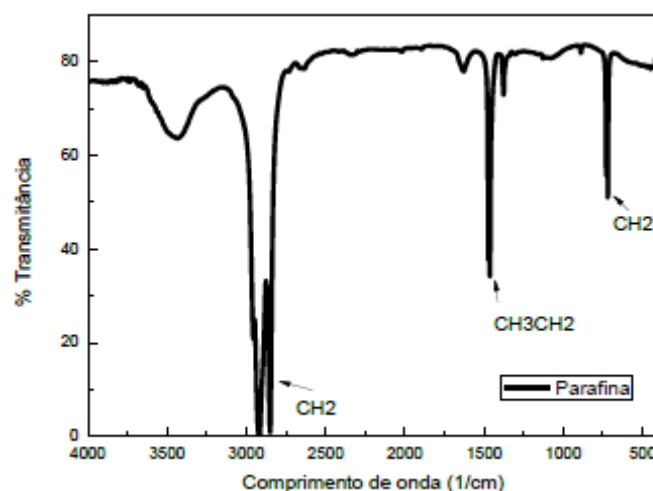


Figura 3 – Espectro de FT-IR da parafina.

Para avaliar o comportamento mecânico do grão Parafina/negro de fumo, ensaios de tração foram realizados utilizando corpos de prova do tipo “Dog bone” conforme Figura 4.



Figura 4 – Corpos de prova utilizados no ensaio de tração.

A tensão de tração média σ das amostras de Parafina / negro de fumo foi de 0,956 MPa, obtidas a partir de apenas três corpos de prova, sendo que o quarto se rompeu durante a montagem e não pôde ser considerado. A elongação obtida foi inferior a 0,5%. A dureza do material apresentou-se maior do que a capacidade do equipamento que é inferior a 80 Shore A. Comprovando com isso a baixa elasticidade e alta rigidez do grão de parafina com negro de fumo.

A caracterização final do grão foi realizada através da determinação do poder calorífico. O grão de parafina/negro de fumo apresentou um valor de 11,015 cal/g com 0,36% de erro. Esse valor é considerado alto quando comparado com outros materiais utilizados como propelentes híbridos,

como por exemplo: o Polibutadieno Líquido Hidroxilado (PBLH) que apresenta valor calculado próximo de 5,001 cal/g.

Um motor-foguete de pequeno porte foi preparado para a moldagem do grão de Parafina / negro de fumo. Seu interior foi forrado com manta de borracha e recoberto com *liner* à base de PBLH. Um mandril de formato estrelado foi instalado no eixo central do motor para conferir uma configuração estrelada para a região central do grão. O pó de negro de fumo foi misturado à Parafina fundida (5% em massa) e a mistura foi mantida em estufa aquecida. O motor foi colocado em estufa em posição vertical e a mistura aquecida foi derramada para dentro do motor. Após o resfriamento controlado em estufa até a temperatura ambiente, o mandril central foi cuidadosamente retirado e o grão removido de dentro do motor recoberto com a manta de borracha, conforme mostra a Figura 5.



Figura 5 – Grão propelente a base de parafina e negro de fumo.

4. Conclusões

Com os resultados obtidos foi possível concluir que a parafina pode ser utilizada como base para preparo de grão propelente para motor foguete híbrido por apresentar alto poder calorífico. No entanto, por apresentar baixas propriedades mecânicas, a parafina não pode ser utilizada isoladamente. Estudos mais aprofundados estão sendo realizados com intuito de misturar a parafina com a resina PBLH (polibutadieno líquido hidroxilado) para melhorar as propriedades mecânicas do grão, mantendo as características de calor de combustão da parafina.

Referências

- [1] SUTTON, G. P.; BIBLARZ, O. **Rocket Propulsion Elements**. 7^a edição. John Willey & Sons, INC. 2001.
- [2] CHIAVERINI, M.J.; KUO, K.K. **Fundamentals of Hybrid Rocket Combustion and Propulsion**, Progress in Astronautics and Aeronautics, Volume 218 (2007)
- [3] BERTOLDI, A. E. M. (2007). **Avaliação Experimental da Queima de Parafina e Óxido Nítrico em Motores Híbridos**. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM.DM-120A/07, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília, DF, 115p.
- [4] KARABEYOGLU, M. A.; CANTWELL, B. J. e ALTMAN, D. **Development and testing of paraffin-based hybrid rocket fuels**. 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Salt Lake City, Utah, July 8 - 11 2001.
- [5] KARABEYOGLU, M. A.; CANTWELL, B. J. e ZILLIAC, G. **Development of Scalable Space-Time Averaged Regression Rate Expressions for Hybrid Rockets**. 41th AIAA/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference, Tucson AZ, July 2005

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo suporte financeiro através da Coordenação PIBIC do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE). A Divisão de Química (IAE/AQI) por possibilitar a realização desse trabalho disponibilizando a infraestrutura laboratorial e a preciosa co-orientação de Marcio Nagamachi (AQI-P) e Kamila Pereira Cardoso do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) entre outros colegas e colaboradores.