

Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Efeito do teor e da granulometria de alumínio no desempenho de propelente sólido composto

Bolsista: Fernanda Gabriela Galvão de Medeiros Braga

Orientadora: Denise Villela Barcza Stockler Pinto

Período a que se refere o relatório: Agosto de 2016 a Julho de 2017

Resumo

Dada a tendência de utilização de aditivos sólidos em escalas micro e nanométricas em sistemas aeroespaciais, nesse trabalho, investigou-se o efeito da utilização de alumínio em granulometria mais fina que a convencional sobre as propriedades físico-químicas e balísticas de um propelente à base de polibutadieno líquido hidroxilado e perclorato de amônio. A melhor eficiência de empacotamento promoveu melhores propriedades mecânicas e densidades mais elevadas para as formulações estudadas. Entretanto, em razão da formação de aglomerados, problema grave em tecnologia de motores-foguete a propulsão sólida, as temperaturas de ignição mais altas dos propelentes levaram a menores velocidades de queima em comparação ao propelente com alumínio convencional. Com vistas a taxas de queima mais levadas, experimentou-se o uso do complexo acetilacetonato de cobre II; embora os propelentes não tenham apresentado características de processamento adequadas para carregamento de motores, as propriedades mecânicas foram promissoras. Os dados dos ensaios de queima, ainda que em pequeno número, sugerem que o aditivo de cobre promove aumento da velocidade de queima dos propelentes sólidos compostos.

1. Introdução

O alumínio é amplamente utilizado como aditivo metálico na composição de propelentes sólidos compostos, explosivos e pirotécnicos, afim de aumentar o conteúdo energético de tais sistemas. A incorporação do metal, em formulações de propelente sólido, em partículas de formato esférico com diâmetros médios variando de 5 a 60 μm , pode resultar em aumento de até 15% no impulso específico (I_{sp}), principal parâmetro balístico de caracterização de propelentes ^[1]. Este efeito é provocado pela alteração da temperatura de chama na superfície

de queima e pela diminuição da massa molar dos gases oriundos da combustão do propelente, que ao expandirem, são direcionados para a tubeira produzindo empuxo. Entretanto, em razão da fusão das partículas de alumínio, seguida de coalescência antes da ignição, a formação de aglomerados, promove um desequilíbrio entre as fases gasosas e condensadas, que por sua vez diminui a performance do sistema propulsivo. Isto porque, à medida que as partículas de aglomerados, constituídos principalmente de alumina, fluem pela garganta da tubeira do motor-foguete provocam redução da velocidade dos gases de exaustão resultando em perdas por arrasto, consideradas um problema sério em tecnologia de motores-foguetes a propulsão sólida ^[2]. Com a crescente utilização de aditivos sólidos em escalas micro e nano métrica em motores aeroespaciais, há que se ressaltar que a introdução de partículas finas de alumínio em propelentes faz com que elas ignitem com mais rapidez na superfície de queima, produzindo maior volume de produtos gasosos e minimizando as referidas perdas. Ademais, outros efeitos como menores temperatura de ignição e tempo de queima e, portanto velocidade de queima mais elevada para o propelente constituem vantagens ^[3]. A literatura apresenta diversos estudos experimentais e teóricos dedicados à utilização de alumínio em granulometria mais fina e a correlação da formação de aglomerados com a velocidade de queima, mas os resultados quanto ao real efeito sobre o desempenho balístico do propelente são controversos. Blanchard ^[4] relata que a alumina gerada durante a combustão do propelente deve ter tamanho inferior a 10 μm de maneira que as partículas se incorporem ao fluxo de gases na tubeira, reduzindo o acúmulo de resíduos no motor e minimizando as instabilidades de queima. No estudo, a utilização do alumínio com diâmetros variando de 1 a 10 μm , em uma formulação de propelente à base de poliubutadieno líquido hidroxilado e perclorato de amônio (PBLH/AP), resultou na formação de alumina em composição monomodal com partículas de diâmetros entre 1 a 3 μm .

Neste contexto, o propósito do presente trabalho foi a análise experimental dos efeitos da adição de pó de alumínio com granulometria de 9,5 μm sobre as propriedades físico-químicas e balísticas de uma formulação de propelente sólido compósito à bases de PBLH/AP. Sabe-se que o desempenho balístico de um grão pode ser melhorado dependendo das características do catalisador de queima incorporado à formulação do propelente sólido compósito. Portanto, adicionalmente, visando maior velocidade de queima, avaliou-se a viabilidade do emprego, nas formulações investigadas, de acetilacetato de cobre II, sintetizado *in situ*; tal aditivo apresentou comportamento promissor em propelentes à base de parafina e PBLH, diminuindo

a temperatura de degradação dos grãos ^[5]. Os propelentes foram estudados quanto ao comportamento reológico, propriedades mecânicas sob tração, análise termogravimétrica, velocidade de queima e calor de explosão.

2. Materiais e métodos

2.1 Material

2.1.1 Alumínio

Com vistas à determinação do teor de metal ativo, as duas amostras de pó de alumínio foram analisadas, por meio da técnica de espectrometria de absorção atômica, quanto aos teores de ferro, cobre, manganês, magnésio, cromo, níquel, zinco e titânio; silício foi determinado por meio de gravimetria. Por diferença, foram calculados os teores alumínio, que resultaram em 99,79% e 99,75%, para as amostras de Al 32,6 µm e Al 9,5 µm, respectivamente.

2.1.2 Acetilacetato de cobre II

O complexo metálico foi sintetizado *in situ*, a partir de cloreto de cobre, hidróxido de amônio e acetilacetona. A caracterização do produto, acetilacetato de cobre II, foi realizada por meio da técnica de FT-IR (espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier).

2.1.3 Propelente sólido composto

A composição básica do propelente sólido composto (PSC) utilizado neste trabalho está apresentada na Tabela 1; tal formulação, validada, contém alumínio convencional de granulometria 32,6 µm, e foi considerada como referência (PSC ref.).

Tabela 1. Composição do propelente sólido composto (PSC referência)

| Constituinte | Fração mássica (%) |
|------------------------------------------------------------|--------------------------|
| PBLH (poliol) | 15,73-15,79 ^a |
| IPDI (agente de cura) | 1,27-1,33 ^a |
| Al 32,6 µm (combustível metálico) | 6,5 |
| Perclorato de amônio (trimodal) | 71,5 |
| Óxido de ferro (catalisador de queima) | 2,0 |
| Aditivos (antioxidante, plastificante e agente de ligação) | 3,0 |

^a Função da razão molar NCO/OH utilizada.

Além da formulação referência (com Al 32,6 µm), foram processadas cinco (05) formulações de propelente com teores distintos de alumínio de granulometria 9,5 µm (Tabela 2); visando

manter-se constante o teor de sólidos, o aumento da fração de alumínio (6,5% - 20%) foi acompanhado de diminuição proporcional da massa de perclorato de amônio (AP) - fração médio.

Tabela 2. Composição dos propelentes sólidos compósitos contendo 2,0% de óxido de ferro e teores distintos de Al 9,5 μm .

| Formulação | Fração mássica (%) | |
|------------|----------------------|----------------------|
| | Al 9,5 μm | Perclorato de Amônio |
| PSC 1 | 6,5 | 71,5 |
| PSC 2 | 8,0 | 70,0 |
| PSC 3 | 12,0 | 66,0 |
| PSC 4 | 16,0 | 62,0 |
| PSC 5 | 20,0 | 58,0 |

A adição de acetilacetato de cobre II à formulação com teor de 6,5% de Al 9,5 μm deu-se com a supressão do catalisador de queima óxido de ferro (Fe_2O_3) e aumento proporcional da massa de perclorato de amônio (AP) - fração médio (Tabela 3). Foram processadas seis formulações contendo Al 9,5 μm e teores distintos de acetilacetato de cobre II, neste trabalho denominado CuAA (Tabela 3).

Tabela 3. Composição dos propelentes sólidos compósitos aditados com acetilacetato de cobre II.

| Formulação | Fração mássica (%) | |
|-----------------------------|---------------------------|----------------------|
| | Acetilacetato de Cobre II | Perclorato de Amônio |
| PSC (CuAA) ref ^a | 0,67 | 72,8 |
| PSC (CuAA) 1 | 0,33 | 73,1 |
| PSC (CuAA) 2 | 0,45 | 73,0 |
| PSC (CuAA) 3 | 0,67 | 72,8 |
| PSC (CuAA) 5 | 1,0 | 72,5 |
| PSC (CuAA) 6 | 1,36 | 72,1 |

^a Formulação com Al 32,6 μm

2.2 Métodos

2.2.1 Preparação das formulações de propelente sólido compósito

As formulações de propelente, em bateladas de 2,2 kg, foram preparadas em um misturador vertical à temperatura de 50°C; o processamento das composições foi acompanhado por medidas de viscosidade em viscosímetro Brookfield. O catalisador de queima CuAA foi incorporado ao poliol e outros aditivos líquidos e a mistura resultante foi adicionada ao misturador. Após ciclos de misturas adequados o alumínio em pó e o perclorato de amônio foram incorporados à massa reacional; ao final, após a adição do agente de cura (IPDI) a

massa foi transferida para moldes no formato de blocos. A cura dos propelentes foi realizada em estufa a 60°C, sendo monitorada por medidas de dureza Shore (A) até estabilização.

2.2.2 Ensaio mecânico

Os propelentes sólidos compósitos foram submetidos a ensaios de tração à temperatura ambiente e à velocidade de 50 mm.min⁻¹, em máquina de Ensaio Universal (Instron 3367) de acordo com a Norma STANAG 4506-00; os parâmetros avaliados foram resistência à tração na tensão máxima (σ_{max}), alongamento na tensão máxima (ϵ_m) e módulo elástico (E).

2.2.3 Ensaio para medida de densidade

As determinações de densidade das formulações de propelente sólido compósito foram realizadas pelo Método Hidrostático, seguindo a Norma ASTM D 792-00.

2.2.4 Análise termogravimétrica (TGA)

Para a determinação da temperatura de ignição, as amostras de propelente, em quantidades entre 5,0 e 6,0 mg, foram aquecidas em Analisador Térmico Simultâneo SDT Q-600 sob atmosfera de nitrogênio (100 mL. min⁻¹) a partir de 30°C até 500°C a 25°C/min.

2.2.5 Medida de calor de explosão

A determinação dos valores calorimétricos ou calor de explosão das formulações de propelente foi conduzida em equipamento PARR Calorimeter, modelo 1266 sob atmosfera de oxigênio.

2.2.6 Ensaio de Queima

Os ensaios de queima dos propelentes foram realizados em dispositivo bomba Crawford, pressurizado com gás nitrogênio, à temperatura ambiente. A velocidade de queima foi medida em uma faixa de pressão entre 4 e 8 MPa, sendo construído o gráfico $\log v$ vs $\log P$, e por regressão linear foram obtidos os valores de a e n .

3. Resultados

3.1 Adequação da formulação referência

As propriedades mecânicas de propelentes compósitos a base de PBLH dependem da densidade de reticulação da matriz poliuretânica, que está diretamente ligada à razão entre o número de grupos isocianato e o número total de grupos hidroxila. Dentre as formulações processadas ao início do estudo, a razão 0,79 resultou em um propelente com resultados satisfatórios para os parâmetros mecânicos e, portanto, foi adotada na formulação PSC referência. Ao longo do desenvolvimento do trabalho optou-se por ensaiar uma

formulação à razão NCO/OH 0,77, entretanto, os parâmetros mecânicos foram pouco sensíveis à pequena variação da razão molar (Tabela 4).

Tabela 4. Características de processamento e propriedades mecânicas sob tração da formulação PSC referência à diferentes razões NCO/OH

| Razão NCO/[OH] | E.O.M ^a (Pa.s) | σ_{\max} ^b (MPa) | ϵ_m ^c (%) | E ^d (MPa) |
|----------------|------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| 0,77 | 190,0 | 0,60±0,01 | 16±1 | 8,52±0,23 |
| 0,79 | 185,6 | 0,61±0,01 | 15±1 | 8,52±0,19 |

^a Viscosidade da massa final, do inglês, *end-of-mix viscosity*.

^b Tensão máxima.

^c Alongamento à tensão máxima.

^d Módulo elástico.

3.2 Comportamento mecânico

De modo geral a incorporação de teores crescentes de Al 9,5 μm resultou em propelentes com melhores níveis para os parâmetros mecânicos avaliados, isto é, aumento nos parâmetros tensão máxima e alongamento, e diminuição discreta no módulo elástico (Figura 1). Este comportamento foi mais significativo para as formulações com teores mais elevados, de pó de alumínio, ou seja, 16 e 20%.

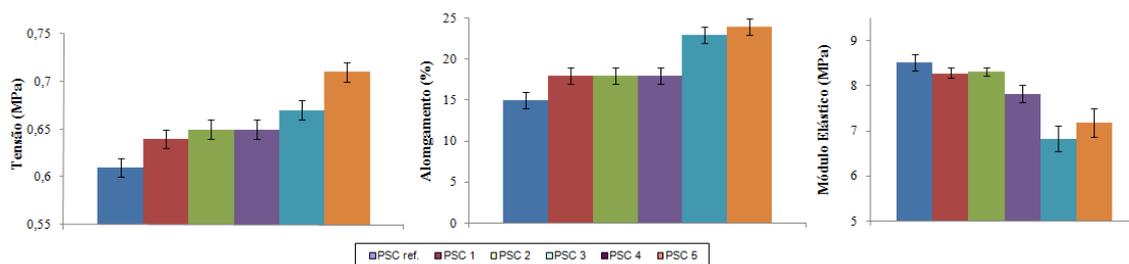


Figura 1. Propriedades mecânicas sob tração dos propelentes referência e com teores distintos de Al 9,5 μm .

3.3 Densidade

Os resultados (Figura 2) mostraram que a densidade dos propelentes aumentou com o teor crescente de Al 9,5 μm das formulações. Este efeito pode ser atribuído à melhor eficiência no empacotamento das partículas sólidas em razão da contribuição mássica das partículas mais finas, bem como à diminuição do teor de AP, que tem densidade inferior ao alumínio. Há que se ressaltar que, a adequada distribuição dos diâmetros dos constituintes sólidos, a saber,

catalisador de queima, pó de alumínio e espécies oxidantes favoreceu a densidade do propelente, maximizando a força propulsiva do motor-foguete.

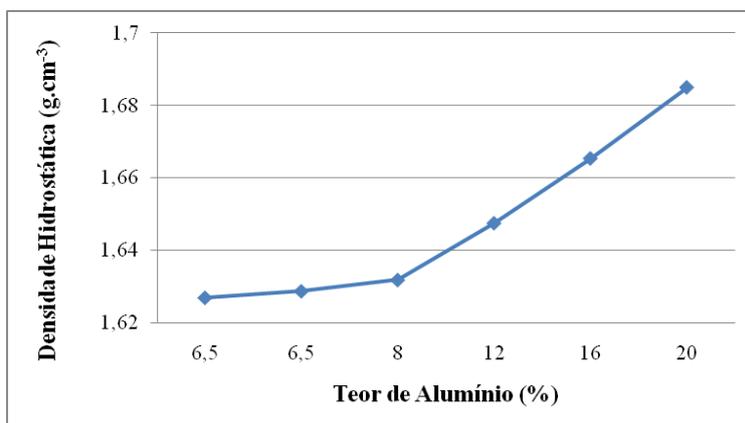


Figura 2. Densidade das formulações de propelente em função do teor de Al 9,5 μm
^a Formulação PSC ref. com Al 32,6 μm .

3.4 Calor de explosão

A Tabela 5 apresenta os valores de calor de explosão para as formulações com Al 9,5 μm em comparação com o propelente referência. Neste tipo de análise o calor gerado durante a ignição do propelente é proporcional à massa de material energético.

Tabela 5. Calor de explosão dos propelentes com teores distintos de Al 9,5 μm

| Formulação | Calor de Explosão (kJ.g ⁻¹) |
|------------|-----------------------------------------|
| PSC ref. | 0,98201 \pm 0,082549 |
| PSC 1 | 0,92813 \pm 0,010468 |
| PSC 2 | 0,97865 \pm 0,067222 |
| PSC 3 | 0,99580 \pm 0,043196 |
| PSC 4 | 1,13527 \pm 0,01576 |
| PSC 5 | 1,04712 \pm 0,014846 |

^a Formulação PSC ref. com Al 32,6 μm .

O calor de explosão das formulações investigadas aumentou com o teor crescente de Al 9,5, uma vez que o alumínio, com maior calor de combustão é quem governa tais variações. Entretanto, os valores absolutos encontrados não corroboram dados da literatura para formulações similares. A elucidação deste comportamento poderá ser realizada por simulação dos parâmetros de composição em programa computacional específico para avaliar dados termodinâmicos de propelentes compósitos e pela revisão do procedimento do ensaio. Como

esperado, a adição de alumínio na forma de partículas mais finas e em maior teor favoreceu a oxidação do metal e a quantidade de calor liberada na combustão das amostras ^[6].

3.5 Análise termogravimétrica

As temperaturas de ignição dos propelentes investigados neste trabalho são apresentadas na Tabela 6. A substituição de alumínio convencional da formulação PSC referência (com Al 32,6 μm) por Al 9,5 μm resultou na redução de cerca de 7°C na temperatura de ignição do propelente, supostamente em razão da maior área superficial do metal de granulometria mais fina. Entretanto, as temperaturas de ignição das demais formulações com frações crescentes de alumínio apresentaram valores superiores à formulação referência que resultam em menores velocidades de queima para os propelentes.

Tabela 6. Temperaturas de ignição dos propelentes com teores distintos de Al 9,5

| Formulação | Temperatura de Ignição (°C) |
|------------|-----------------------------|
| PSC ref. | 348,6 |
| PSC 1 | 341,6 |
| PSC 2 | 354,4 |
| PSC 3 | 349,1 |
| PSC 4 | 356,8 |
| PSC 5 | 354,8 |

3.6 Comportamento balístico

A velocidade de queima de um grão depende da pressão no interior da câmara de combustão do motor-foguete, bem como da composição química e da temperatura inicial do propelente, que afeta a temperatura da superfície do grão e, em consequência, a velocidade das reações químicas que ocorrem no interior da câmara. A correlação da pressão com a velocidade de queima de uma dada formulação de propelente sólido compósito pode ser descrita pela lei de Vieille, que é expressa algebricamente da seguinte forma:

$$v = a \cdot P^n$$

onde v é a velocidade de queima, a é uma constante empírica conhecida como coeficiente de temperatura, P é a pressão na câmara de combustão e n é o expoente de pressão ou índice de combustão. A influência da variação de pressão na câmara de combustão sobre a velocidade de queima é descrita pelo expoente de pressão ^[1].

Quanto ao comportamento balístico, neste trabalho, representado pela velocidade de queima, observou-se que as formulações contendo Al 9,5 μm apresentaram medidas inferiores em comparação ao propelente tomado como referência (Tabela 7). As taxas de queima mostraram uma tendência à valores mais baixos, sendo que as composições com maiores teores de alumínio, 16 e 20%, não puderam ser ensaiadas, em razão da geração de grande quantidade de resíduos, que acarretou em aumento de pressão no dispositivo em Bomba Crawford, inviabilizando a realização do teste. Há que se ressaltar a importância de se ter, para uma dada formulação, o conhecimento de como ocorre a formação dos aglomerados bem como da distribuição de tamanho de tais formações ^[4]. Vale acrescentar que a composição química e a eficiência de empacotamento das partículas da fase sólida, bem como as condições de processamento influenciam as propriedades e a morfologia dos resíduos ^[3].

Os expoentes de pressão, n , observados para as formulações referência e com teores de 6,5 a 12,0% de Al 9,5 μm variaram discretamente e são indicativos de uma queima estável e regular, corroborando resultados da literatura para uma formulação similar aditada com alumínio em escala nanométrica ^[7]. Ademais, para as formulações estudadas, o teor de 12,0% de Al 9,5 μm foi limite para a obtenção de propelentes com comportamento de queima adequado para aplicação em motor-foguete. As tendências inferidas a partir dos resultados dos ensaios de queima em bomba Crawford, estão coerentes com os valores das temperaturas de ignição obtidos por análise TGA.

Tabela 7. Dados dos ensaios de queima dos propelentes com teores distintos de Al 9,5 μm

| Formulação | Teor de Alumínio (%) | Velocidade de Queima à 6,0 MPa (mm.s ⁻¹) | Equação de Vieille |
|------------|----------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------|
| PSC ref. | 6,5 | 10,0 | $v_b = 4,25 \cdot P_c^{0,46}$ |
| PSC 1 | 6,5 | 9,5 | $v_b = 4,13 \cdot P_c^{0,48}$ |
| PSC 2 | 8,0 | 9,7 | $v_b = 4,19 \cdot P_c^{0,46}$ |
| PSC 3 | 12,0 | 8,5 | $v_b = 3,88 \cdot P_c^{0,45}$ |
| PSC 4 | 16,0 | - | - |
| PSC 5 | 20,0 | - | - |

^a Formulação PSC ref. com Al 32,6 μm .

3.7 Aditivção dos propelentes sólidos compósitos com acetilacetionato de cobre II

Com vistas a obtenção de velocidades de queima mais elevadas para o propelente contendo alumínio de granulometria 9,5 μm experimentou-se a adição de acetil acetonato cobre II às formulações investigadas no presente trabalho. Em uma primeira abordagem, os teores utilizados para o catalisador de queima foram similares àqueles adotados nos estudos para aplicação do CuAA em formulações de propelente híbrido ^[5].

3.7.1 Processabilidade dos propelentes

O uso de acetilacetionato de cobre II nas formulações contendo Al 9,5 μm resultou em um aumento acentuado na viscosidade da massa final (E.OM do inglês *end-of-mix viscosity*) e do *pot-life*, período após a adição do agente de cura em que a velocidade da reação é lenta o suficiente para manter a viscosidade da mistura em valores adequados para o carregamento de moldes, ignitores ou motores foguetes. Este resultado é atribuído à presença do aditivo que favoreceu a formação de ligações cruzadas, com correspondente elevação da viscosidade do meio reacional e sutil diminuição do tempo de cura dos propelentes.

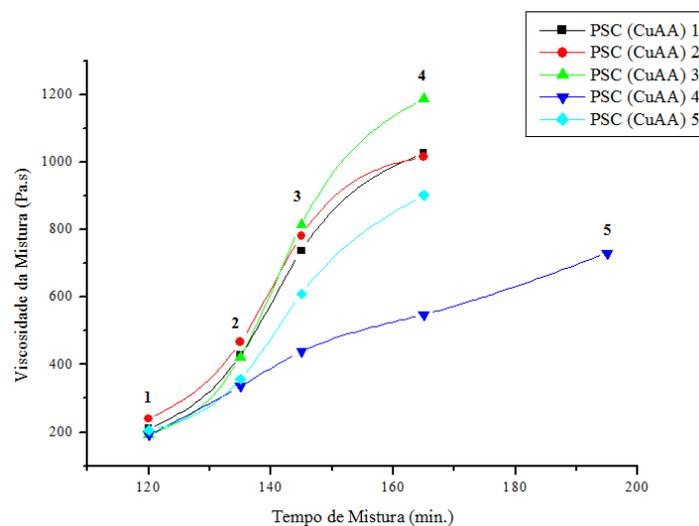


Figura 3. Evolução da viscosidade com o tempo de mistura para os propelente aditados com teores distintos de acetilacetionato de cobre II.

3.7.2 Comportamento mecânico e densidade dos propelentes

Os propelentes processados com acetilacetionato de cobre II e Al 9,5 μm apresentaram desempenho mecânico distinto, com discreta diminuição na tensão, e acentuado aumento no

alongamento e redução do módulo elástico, resultado em níveis mais adequados que as formulações com catalisador óxido de ferro. Entretanto, tais parâmetros não mostraram tendências sistemáticas em relação à estreita faixa de variação no teor do aditivo (0,33 a 1,36%).

Os valores de densidade foram similares para as seis formulações, quando são considerados os valores dos desvios padrão das medidas.

Tabela 8. Propriedades mecânicas sob tração e densidade dos propelentes sólidos compósitos aditados com acetilacetato de cobre II

| Formulação | σ_{\max}^a (MPa) | ϵ_m^b (%) | E^c (MPa) | Densidade (g.cm ⁻³) |
|---------------|----------------------------|-----------------------|----------------|------------------------------------|
| PSC CuAA ref. | 0,61 ± 0,01 | 72 ± 3 | 4,46 ± 0,31 | 1,6098 ± 0,0046 |
| PSC CuAA 1 | 0,62 ± 0,01 | 65 ± 3 | 4,60 ± 0,36 | 1,6097 ± 0,0019 |
| PSC CuAA 2 | 0,61 ± 0,01 | 63 ± 2 | 4,28 ± 0,06 | 1,6100 ± 0,002 |
| PSC CuAA 3 | 0,63 ± 0,01 | 58 ± 4 | 4,70 ± 0,34 | 1,6095 ± 0,0011 |
| PSC CuAA 4 | 0,58 ± 0,01 | 74 ± 4 | 4,02 ± 0,26 | 1,6110 ± 0,002 |
| PSC CuAA 5 | 0,58 ± 0,01 | 64 ± 7 | 4,66 ± 0,24 | 1,609 ± 0,001 |

^a Tensão máxima ^b Alongamento à tensão máxima ^c Módulo elástico

3.7.3 Comportamento balístico

Os resultados de ensaio de queima foram incipientes para se predizer o efeito do acetilacetato de cobre II sobre a balística dos propelentes, mas os dados sugerem correlação positiva entre o teor de acetilacetato de cobre II e a velocidade de queima das formulações contendo Al 9,5 µm.

Tabela 9. Dados dos ensaios de queima dos propelentes sólidos compósitos aditados com acetilacetato de cobre II

| Formulação | Teor de Acetil Acetonato de Cobre II (%) | Velocidade de Queima à 6,0 MPa (mm.s ⁻¹) | Equação de Vieille |
|------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------|
| PSC CuAA 1 | 0,33 | 7,05 | $V_b = 4,36.P_c^{0,27}$ |
| PSC CuAA 3 | 0,67 | 7,93 | $V_b = 5,20.P_c^{0,23}$ |

4. Conclusões

- (i) a incorporação de alumínio em granulometria de 9,5 μm em lugar de alumínio convencional em uma formulação à base de PBLH/AP resultou em melhores propriedades mecânicas e maiores valores de densidade, em função da melhor eficiência de empacotamento, contribuindo para maximizar o impulso específico do grão propelente;
- (ii) as temperaturas de ignição das formulações com alumínio na forma de partículas mais finas foram superiores, promovendo menores velocidades de queima para os propelentes, possivelmente devido à formação de aglomerados ;
- (iii) propelentes aditados com acetilacetato de cobre II não apresentaram boas características de processamento, contudo o comportamento mecânico mostrou-se promissor e os valores de densidade resultaram satisfatórios. Os ensaios de queima, ainda que em pequeno número, sugerem uma correlação positiva do teor de aditivo com a velocidade de queima dos propelentes.

Referências

1. SUTTON, G. P.; BIBLARZ, O. **Rocket Propulsion Elements**. New York: 7th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2001. 751 p.
2. SIPPEL, R. T.; SON, S. F.; GROVEN, L. J. Aluminum agglomeration reduction in a composite propellant using tailored Al/PTFE particles. **Combustion and flame**, v. 161, p. 311-321. 2014.
3. DE LUCA, L.T.; GALFETTI, L.; MAGGI, F.; COLOMBO, G.; BANDERA, A.; CERRI, S.; DONEGÀ, P. (2008), Burning of composite solid rocket propellants: toward nanometric fuel size. **2nd International Symposium on Propulsion for Space Transportation**, Crete, Greece, 05-08 May 2008, Paper 42-242, pp. 1-10
4. BLANCHARD, H. et al. Method for producing solid composite aluminized propellants, and solid composite aluminized propellants US Pat. 2012/0079807 A1, Apr. 5.2012. 8p.
5. CARDOSO, K. P. Estudo e desenvolvimento de grão combustível à base de parafina para aplicação em motor-foguete. São José dos Campos, 2017. 202 p. Tese de Doutorado – Instituto Tecnológico da Aeronáutica.
6. AHMED, A. E. S. I.; ALI, A. A.; EL-MASRY, A. M.; TAWFIK, S. M. Development of Polyurethane-Based Solid Propellants Using Nanocomposite Materials. **Propellants, Explos. Pyrotech.**, v.41, p. 286-294. 2016.
7. KUMARI, A., KURVA, R., JAIN, S., JAWALKAR, S. N., MEHILAL, M., SINGH, P.P and BHATTACHARYA, B. Evaluation of Nanoaluminum in Composite Propellant Formulation Using Bicurative System. **Journal of Propulsion and Power**, v. 31, n.1, p. 393-399. 2015

Agradecimentos

F.G.G.M.B agradece ao CNPq e ao Programa PIBIC/IAE pela concessão da bolsa.

Os autores reconhecem a Alcoa - Alumínio S.A. a doação do Pó de Alumínio Alcoa 1409 utilizado no presente trabalho.