

INFLUÊNCIA DO ENVELHECIMENTO ACELERADO EM FLARES MAGNÉSIO/PTFE/FPM

Humberto Baldessarini Pires^{a,*}, Roberta Jachura Rocha^a, Koshun Iha^a, Ricardo Vieira Binda^b e José Atílio Fritz Fidel Rocco^a

^aDepartamento de Química, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 12228-900 São José dos Campos – SP, Brasil

^bDivisão de Sistemas de Defesa, Instituto de Aeronáutica e Espaço, 12228-904 São José dos Campos – SP, Brasil

Recebido em 31/10/2016; aceito em 27/05/2017; publicado na web em 19/07/2017

THE INFLUENCE OF ACCELERATED AGING ON MAGNESIUM/PTFE/FPM DECOY FLARES. Magnesium/PTFE/FPM decoy flares, also named conventional flares, were designed in order to protect combat aircraft from the threat caused by infrared-guided missiles. Adverse storage or transport conditions may cause reactions that deteriorates chemical properties of the conventional flares, causing the aging and compromising its performance. The aim of this article was to characterize the influence of accelerated aging on conventional flares. The study was performed with the latest lot of conventional flares from Brazilian Air Force, subjected to 50 days exposure in a climatic chamber at 76 °C and 62% RH. Upon completion of the accelerated aging process, samples of aged conventional flares were compared with unaged material. Qualitative determination of chemical species present was carried out using the techniques FT-IR and SEM/EDS. Magnesium hydroxide, the main product of aging process and primary aging indicator on conventional flares performance, was determined using thermogravimetric analysis and the amount was correlated with results of the experimental techniques Density Determination, Calorimetry and Vacuum Stability Test. Formation of additional magnesium hydroxide mass, that increased 100% during the aging process, caused the passivation of magnesium, compromising the combustion process and making the composition less energy efficient, as verified in the results of the calorimetric tests.

Keywords: flares; magnesium/PTFE/FPM; accelerated aging; thermogravimetric analysis; magnesium hydroxide.

INTRODUÇÃO

Dispositivos de contramedidas *flares* são artefatos que se contra-põem a mísseis ar-ar e solo-ar de guiamento infravermelho na medida que possuem o objetivo de produzir uma intensidade radiante que suplante ou se assemelhe àquela produzida pelas partes quentes de uma aeronave.¹

Os mísseis de guiamento infravermelho baseiam-se na detecção da radiação infravermelha emitida pelas partes componentes de uma aeronave, com a consequente perseguição da fonte emissora da radiação.¹

Uma das primeiras composições de *flares* testadas utilizava o magnésio, o PTFE (ou politetrafluoretileno) e um fluor elastômero (FPM), mais especificamente o copolímero de fluoreto de vinilideno e hexafluorpropileno. Em virtude de sua larga aplicação, *flares* que utilizam essa composição são chamados de convencionais. Contudo, mundialmente são também conhecidos como *flares* MTV (magnésio/Teflon[®]/Viton[®]), em virtude dos nomes comerciais registrados pela empresa DuPont[®] para o PTFE e FPM.²

O magnésio é utilizado em composições pirotécnicas devido às suas propriedades, tais como a baixa massa específica, a facilidade de processamento e a boa estabilidade dimensional.³ Nas composições de *flares* convencionais, utiliza-se uma concentração de magnésio maior do que a necessária.⁴ Isso é feito com a finalidade de se aumentar a energia liberada durante o processo de queima, por meio da produção do óxido de magnésio (MgO) em uma reação desse metal com o oxigênio presente na atmosfera, o que também originará uma intensa luz na cor branca.⁴ Outra consequência desse fato é uma alta taxa de queima linear do material, característica necessária para *flares* convencionais.⁴

O PTFE, cuja estrutura molecular está ilustrada na Figura 1, oferece uma excelente combinação de propriedades químicas, elétricas,

mecânicas, térmicas e de antiaderência, consequência da resistência da ligação C-F (507 kJ mol⁻¹).⁵ Para aplicação em *flares* convencionais, a principal característica a ser considerada é a granulometria do PTFE utilizado, que exerce significativa influência sobre a taxa de queima linear.⁴ O copolímero de fluoreto de vinilideno e hexafluorpropileno (Figura 2) é utilizado em *flares* convencionais com a finalidade de proteger a partícula de magnésio contra a oxidação provocada por uma eventual contaminação pela umidade durante o seu período de estocagem (*shelf life*).⁶

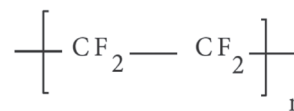


Figura 1. Fórmula estrutural do PTFE⁷

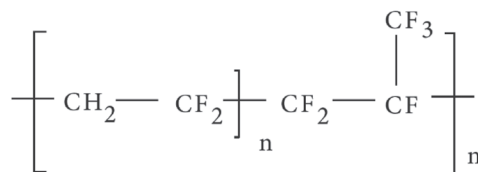


Figura 2. Fórmula estrutural do copolímero de fluoreto de vinilideno e hexafluorpropileno⁷

Os *flares* convencionais compreendem a maior parte desse tipo de contramedida em poder das forças aéreas ao redor do mundo. Isso ocorre em virtude do baixo custo de aquisição e da boa confiabilidade dentro de alguns cenários específicos.¹

Outras características inerentes a essa composição são: uma alta densidade de energia liberada durante a combustão, ocasionando a produção de luz e calor necessários;⁸ um relativo grau de segurança durante o manuseio e a fabricação da mistura, ocasionado pela alta

*e-mail: humbertobpires@gmail.com

temperatura de autoignição do material (530 °C);⁹ e uma boa compatibilidade química entre as espécies componentes, o que corresponde à ausência de eventuais interações químicas e físicas com potencial para ocasionar perda de desempenho e diminuição na segurança do manuseio e de estocagem desse material.⁷

Uma vez que o Brasil é um país de dimensões continentais, condições adversas (altas temperaturas e umidades relativas, além da exposição à radiação solar, dentre outros) experimentadas durante a estocagem ou o transporte do material entre as localidades podem comprometer o material ao ponto de não garantir o correto desempenho para o qual os *flares* foram projetados e a operação segura durante seu manuseio e aplicação.^{10,11}

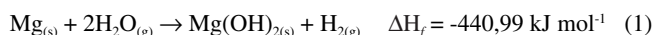
Assim, torna-se importante determinar de que forma os fatores relacionados às condições de estocagem e aos métodos de transporte podem afetar as propriedades físicas e químicas desse tipo de material.¹²

A degradação das propriedades físicas e químicas de uma composição magnésio/PTFE/FPM decorre da combinação entre três fatores: período de exposição, temperatura e umidade, sendo este o elemento mais significativo no evento.¹³ No caso desses *flares*, seu processo de envelhecimento é caracterizado pela tendência do magnésio em sofrer reações de oxidação quando em contato com a umidade e com o oxigênio presente no ar.¹⁴

Uma unidade de *flare* convencional é composta por um estojo de alumínio com tampas plásticas nas extremidades. A composição utilizada é envolvida por um revestimento adesivo reforçado e acondicionada no interior do estojo, que possuirá um formato cilíndrico ou de um bloco retangular, de acordo com o modelo do *flare*. Durante a colocação do mesmo na aeronave, uma das tampas plásticas será substituída por um cartucho ignitor. A separação entre esse cartucho e a carga de magnésio/PTFE/FPM é feita por uma peça plástica que contém um orifício. A chama produzida pela iniciação do cartucho irá se propagar por esse orifício a fim de sensibilizar a composição e provocar a sua ejeção da aeronave.

Essas contramedidas serão suscetíveis ao envelhecimento, uma vez que o orifício da passagem da chama de ignição da carga de magnésio/PTFE/FPM permitirá, também, a entrada de umidade durante o período de estocagem. Essa umidade irá reagir com o magnésio da composição, promovendo o seu processo de degradação.

As reações de oxidação dos *flares* geram como produtos o gás hidrogênio (H₂), o hidróxido de magnésio (Mg(OH)₂) e o óxido de magnésio (MgO),¹³ conforme as Equações (1) e (2).



A formação do hidróxido de magnésio e do óxido de magnésio ocasiona uma diminuição da capacidade de ignição do material e da produção de calor, uma vez que restringem a quantidade de magnésio livre na composição.¹⁴

O eventual acúmulo de gás hidrogênio (ainda que em um determinado período de tempo) no interior das embalagens de armazenamento, em níveis acima do limite inferior de inflamabilidade, ocasiona o comprometimento da segurança das instalações e de eventual pessoal envolvido durante o manuseio e/ou transporte.¹⁵

As tendências atuais relacionadas à proteção da composição magnésio/PTFE/FPM contra o processo de envelhecimento compreendem: a investigação sobre a viabilidade da substituição dos fluorocarbonos utilizados na função de aglutinantes, como o FPM, por outros tipos de compostos, como aqueles à base de silano (SiH₄) com o objetivo de eliminar a possibilidade de liberação de ácido fluorídrico (HF), além da utilização de ligas de magnésio que sejam

menos propensas a sofrer reações de oxidação quando submetidas a eventuais condições de temperatura e umidades elevadas durante o período de armazenamento.⁵

O envelhecimento de *flares* convencionais ocasiona o comprometimento da segurança durante o seu manuseio, bem como do desempenho esperado quando em uma eventual utilização. Apesar disso, em virtude da aplicação militar que esses dispositivos possuem, não há trabalhos disponíveis na literatura aberta em que tenha sido realizado o estudo dos efeitos do envelhecimento com a utilização de *flares* operacionais e nas mesmas condições de armazenamento, sendo este o objetivo do presente trabalho.

PARTE EXPERIMENTAL

Para a realização do trabalho, foi utilizado o mais recente lote de *flares* aeronáuticos constante do acervo da Força Aérea Brasileira.

Envelhecimento acelerado

O envelhecimento acelerado foi realizado em câmara climática VÖTSCH®, modelo VCV 7220-15. Os *flares* foram mantidos nas suas embalagens originais, na condição normal de estocagem. A câmara foi programada para manter uma temperatura de 76 °C e uma umidade relativa de 62%, durante um período de cinquenta dias. Esses valores apresentam correspondência aos trabalhos referentes ao envelhecimento acelerado de composições magnésio/PTFE/FPM,^{16,17} com o objetivo de proporcionar uma taxa de envelhecimento acelerado que corresponda o mais próximo possível ao período equivalente à validade nominal do material sem o comprometimento do mesmo.¹⁸

Os *flares* foram mantidos na câmara climática conservando-se as suas embalagens originais, perfazendo quatro níveis de envelhecimento acelerado em função do tempo de permanência no interior da câmara climática: 8, 22, 35 e 50 dias, na temperatura de 76 °C e umidade relativa igual a 62%. Concluído o processo de envelhecimento acelerado, os *flares* foram comparados ao material de referência (não envelhecido).

A extração da carga de magnésio/PTFE/FPM dos *flares* de suas respectivas embalagens, por meio de prensa hidráulica, foi realizada com antecedência mínima da execução das análises, armazenando-a em dessecadores até a preparação das amostras.

Para a determinação da influência do envelhecimento acelerado no material estudado, foi procedida uma série de ensaios por meio das técnicas experimentais descritas nos próximos itens.

Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR)

As análises por FT-IR foram executadas com a utilização de um espectrômetro modelo *Spectrum One*, da *PerkinElmer*® para a determinação qualitativa das espécies químicas presentes na composição de amostras dos *flares* estudados.

Para isso, foi utilizada a técnica UATR, sendo realizados ensaios que corresponderam ao intervalo espectral do infravermelho médio (MIR), na faixa de 4.000 cm⁻¹ a 550 cm⁻¹ (em número de onda), com resolução de 4 cm⁻¹, ganho um, vinte varreduras e torque de 120 N.

Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva de Raios-X (EDS)

Para as análises por meio do MEV, foi utilizado o detector de elétrons secundários (SE) do equipamento *LEO*®, modelo 435 VPi, com aplicação de tensão de 4 kV, devido à natureza energética do material analisado, a fim de prevenir a iniciação do material em virtude

do calor gerado pelo feixe incidente de elétrons. Tornou-se necessário o recobrimento da amostra com ouro, em processo de metalização, para permitir a dissipação da energia elétrica originada pelo feixe incidente. Os ensaios por EDS foram efetuados com a utilização do equipamento *OXFORD*[®], modelo 7059. Ambos os ensaios foram empregados na análise da influência do envelhecimento acelerado no material e, também, no processo de determinação qualitativa do material, iniciado por meio da técnica FT-IR, uma vez que a mesma não é válida para a identificação de metais.

Análise Termogravimétrica (TGA)

Para as análises termogravimétricas, foi utilizado o equipamento SDT (*Simultaneous Differential Thermogravimetric Analyzer*), modelo Q600, da *TA Instruments*[®] na determinação do teor de hidróxido de magnésio, antes e depois de o material ser submetido ao processo de envelhecimento na câmara climática. Essa determinação foi realizada considerando-se as perdas de massa ocorridas na faixa de temperatura entre 300 °C e 360 °C, correspondente à decomposição do hidróxido de magnésio.^{19,20} As seguintes condições foram estabelecidas: utilização de panela de alumina; massa da amostra de 10,00 mg ± 0,20 mg; razão de aquecimento de 10 °C min⁻¹; faixa de temperatura de 30 °C até 700 °C; e atmosfera de nitrogênio, com fluxo de 100 mL min⁻¹.

Determinação da Massa Específica

A determinação da massa específica foi realizada utilizando-se método hidrostático previsto na norma ASTM D3800M:2011 (*Standard Test Method for Density of High-Modulus Fibers*).²¹ Adotou-se, como líquido auxiliar, a água deionizada. Foram utilizados um *kit SHIMADZU*[®] SMK-401 e uma balança analítica *SHIMADZU*[®], modelo AUW220D, com a inserção dos valores referentes à massa específica da água, obtida após verificação da temperatura da mesma por termômetro; e às massas da amostra, registradas antes e após a imersão no líquido.

Calorimetria

A determinação do calor de combustão das amostras selecionadas foi realizada com emprego do Calorímetro *PARR*[®] 6200, na seguinte configuração: massa da amostra de 0,50 g ± 0,05 g; atmosfera de oxigênio (calor de combustão); e pressão de 360 PSI.

Estabilidade química a vácuo

Para a determinação da estabilidade química das amostras, empregou-se o teste de estabilidade a vácuo (*VST – Vacuum Stability Test*) com a utilização do equipamento *OZM Research*[®], modelo *STABIL VI*. Esse teste é considerado o mais eficiente para a determinação da estabilidade térmica de materiais energéticos, avaliada em função do volume de gás liberado durante o aquecimento de amostras do material, contidas em tubos selados a vácuo, durante um determinado período sob uma temperatura constante.²²

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR)

Com o objetivo de realizar a separação do material, foi estabelecido um procedimento inicial que correspondeu ao tratamento de uma amostra de referência com o acetato de etila, a quente. O acetato de etila é eficaz em aplicações como solvente para o FPM.²³

Na Figura 3, observa-se o espectro de radiação de absorção no infravermelho, gerado pela parte solúvel da amostra (espectro A) e o espectro de referência do copolímero de fluoreto de vinilideno e hexafluorpropileno (espectro B), fornecido pela *DuPont*[®].

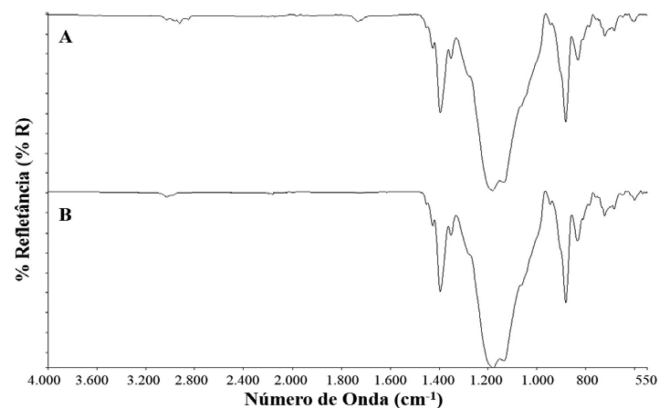


Figura 3. Espectros da amostra do material não envelhecido (parte solúvel, espectro A) e de referência do copolímero de fluoreto de vinilideno e hexafluorpropileno (espectro B)

As absorções em torno de 1400 cm⁻¹, 1175 cm⁻¹, 1125 cm⁻¹, 875 cm⁻¹ e 840 cm⁻¹ são atribuídas à ligação C-F²⁴ e indicam a presença do copolímero de fluoreto de vinilideno e hexafluorpropileno na composição da amostra. Em função do espectro obtido, é possível afirmar que o tratamento da amostra do material não envelhecido com o solvente acetato de etila, a quente, foi eficiente para separar da matriz o fluorelastômero presente na amostra.

Na Figura 4, podem ser observados os espectros referentes à parte insolúvel da amostra (espectro A) e o espectro da análise de um filme de PTFE (espectro B), cedido pela *PerkinElmer*[®].

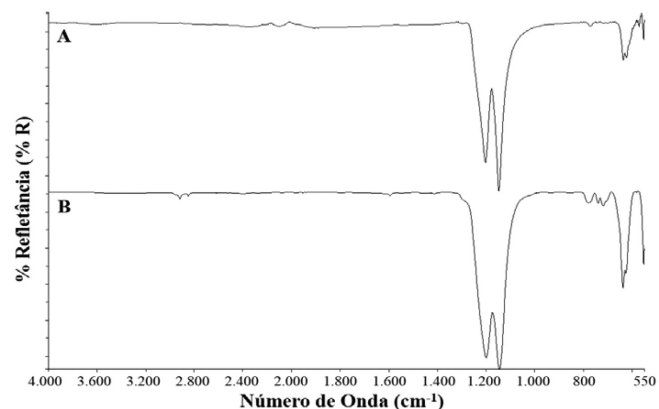


Figura 4. Espectros da amostra do material não envelhecido (parte insolúvel, espectro A) e de um filme de PTFE (espectro B)

No espectro A, as absorções verificadas em, aproximadamente, 1200 cm⁻¹, 1150 cm⁻¹ e 680 cm⁻¹, caracterizam a ligação C-F²⁴ e indicam a presença do PTFE, conforme o trabalho de Koch.²⁵

Microscópio Eletrônico de Varredura e Espectroscopia por Energia Dispersiva de Raios-X

A Figura 5 apresenta a fotomicrografia de uma amostra de referência, com ampliação de 3.500 vezes (esquerda), e o espectro EDS da área correspondente ao quadrado referenciado como *Spectrum 4* (direita).

A amostra correspondeu a um cubo com arestas de 1 cm,

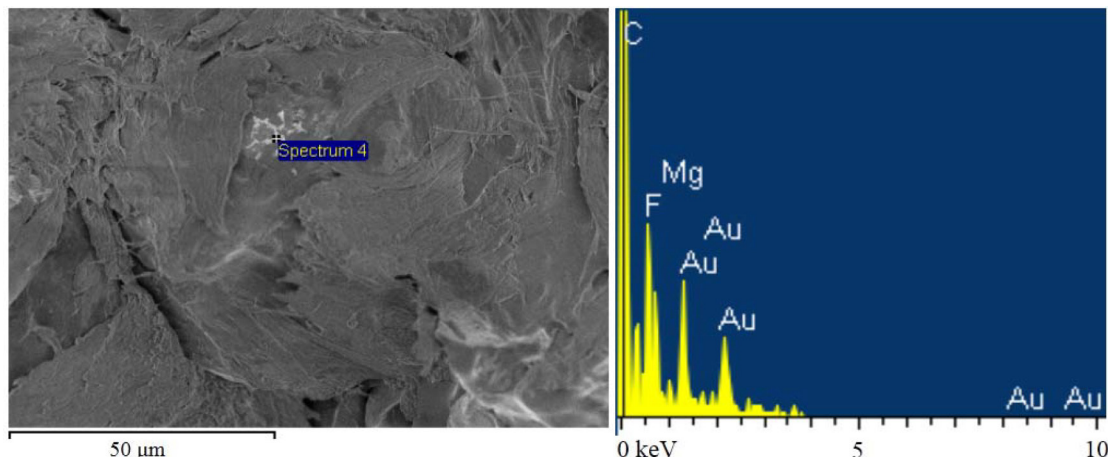


Figura 5. Fotomicrografia (3.500x) (esquerda) e espectro EDS da amostra de referência (direita)

retirado da parte central de um *flare* não submetido ao envelhecimento acelerado. Por sua vez, a parte central foi analisada. Esse resultado indica a presença do magnésio metálico na composição. Nessa região, pode-se verificar, ainda, radiação emitida na faixa correspondente aos elementos químicos carbono e flúor, evidenciando o tratamento de recobrimento da partícula de magnésio metálico, possivelmente com o copolímero de fluoreto de vinilideno e hexafluorpropileno. O elemento químico ouro foi utilizado no processo de metalização da amostra.

Análise Termogravimétrica (TGA)

Na Figura 6, os valores percentuais de hidróxido de magnésio são apresentados em função do tempo de envelhecimento dos *flares* (em dias) na câmara climática. Os valores percentuais de hidróxido de magnésio foram obtidos por meio da análise termogravimétrica dos diferentes grupos das amostras, realizadas em triplicata para o material de referência e para cada um dos níveis de envelhecimento dos *flares*. Os valores foram estabelecidos em referência às amostras do material não envelhecido.

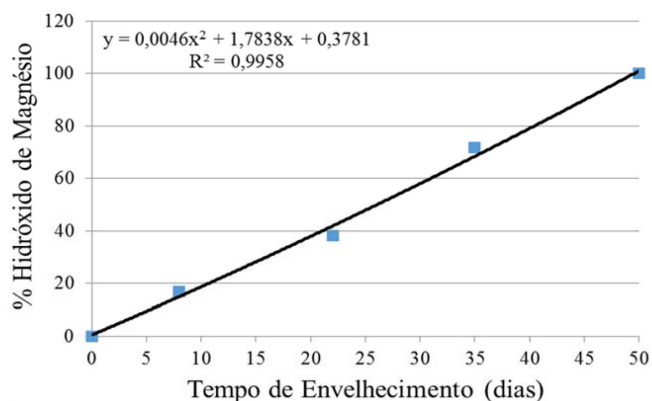


Figura 6. Porcentagem de hidróxido de magnésio em função do tempo de envelhecimento na câmara climática, em dias

Na Figura 6, observa-se uma tendência de crescimento linear nos valores percentuais do teor de hidróxido de magnésio, o que indica uma velocidade constante da conversão do magnésio em hidróxido de magnésio, característica de uma reação de primeira ordem. Em cinquenta dias de envelhecimento acelerado nas condições estabelecidas, a quantidade de hidróxido de magnésio foi 100,22 % maior em relação às amostras relativas aos *flares* não envelhecidos.

Determinação da Massa Específica

Na Figura 7, visualizam-se as porcentagens de massa específica em função do tempo (em dias) de envelhecimento do material na câmara climática. Os valores percentuais constituem uma relação de referência com as amostras não envelhecidas. Foram realizados ensaios em triplicata para cada nível de envelhecimento acelerado.

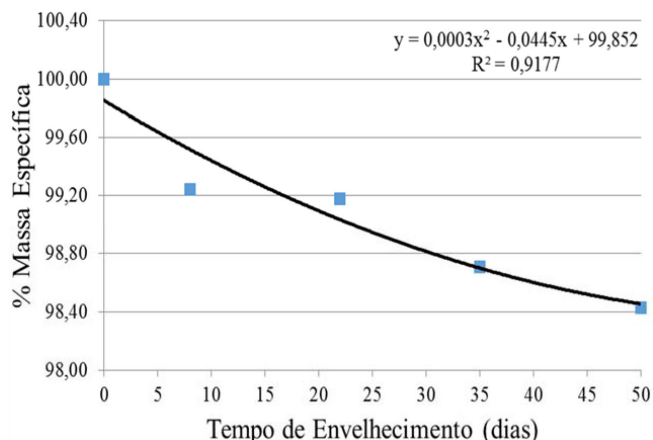


Figura 7. Percentual da massa específica em função do tempo de envelhecimento na câmara climática, em dias

Durante o processo de envelhecimento, ocorreu tanto um aumento da massa, em função da absorção da umidade presente no ambiente, quanto do volume do material à medida que se formava o hidróxido de magnésio.⁵ Esse fato deve-se a essa substância apresentar uma maior massa específica quando em comparação com o magnésio.¹⁹ Como consequência desse processo, há a geração de rupturas filamentosas da matriz polimérica e uma maior exposição das partículas de magnésio à umidade presente no meio.²⁶

Em função dos valores observados, o aumento do volume ocorreu a uma velocidade ligeiramente maior do que o aumento da massa das amostras. A alteração de volume é possível, uma vez que há um espaço de 2 mm a 3 mm entre cada uma das faces da carga de magnésio/PTFE/FPM e o estojo de alumínio que provê a proteção física do material.

Calorimetria

A Figura 8 especifica a porcentagem do calor de combustão obtido durante as análises relativa ao calor de combustão medido para

cada grupo de amostras, utilizando-se como referência as amostras do material não envelhecido.

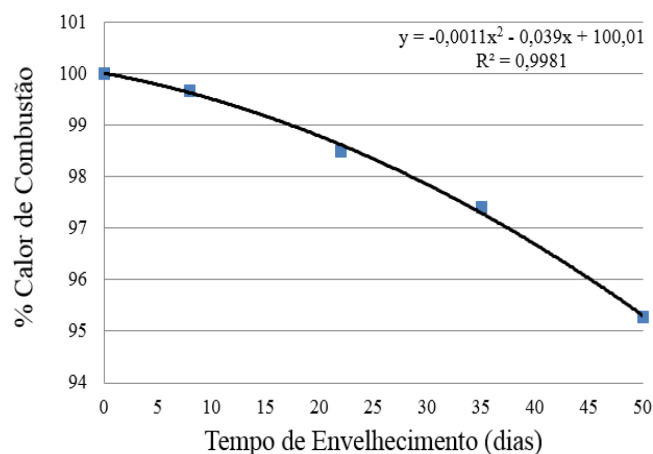


Figura 8. Percentual do calor de combustão em função do tempo de envelhecimento na câmara climática, em dias

Verifica-se uma tendência de diminuição dos valores em função do tempo de envelhecimento (em dias), o que possui uma relação direta com a formação do hidróxido de magnésio, de maneira que houve uma queda de aproximadamente 5%, quando considerados os valores de referência e os relativos ao grupo Envelhecimento 50 dias. A literatura indica que, durante a formação dessa substância, ocorre a sua deposição, em camadas, sobre as partículas de magnésio, ocasionando a passivação do metal e, conseqüentemente, uma menor liberação de calor durante o processo de combustão, levando a uma diminuição da velocidade da queima.²⁷

Estabilidade química a vácuo

Os ensaios consistiram na exposição de amostras, com massas de 5,00 g ± 0,01 g, a uma temperatura de 100 °C ± 0,01 °C por um período de quarenta horas, em conformidade com a norma STANAG 4556 (*Vacuum Stability Test*).²⁸

Os resultados médios das análises, realizadas em triplicata para cada grupo de amostras, podem ser verificados na Tabela 1, bem como as respectivas incertezas-padrão associadas ao processo de medição, com um nível de confiabilidade de 95%. Na coluna da direita, são apresentadas as respectivas classificações do resultado, baseadas no método US/202.01.001 da norma AOP-7 (*Manual of Data Requirements and Tests for the Qualification of Explosive Materials for Military Use*), da Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN).²⁹ Esse método, elaborado pelos EUA, regula a aplicação do teste de estabilidade a vácuo em composições pirotécnicas, estabelecendo como critério de aceitação um volume de gás liberado por massa menor do que 2 mL g⁻¹ durante o período de duração do teste.

Para ambos os grupos analisados, observa-se que as condições de temperatura e de umidade relativa às quais o material esteve exposto durante cinquenta dias não foram suficientes para ocasionar o comprometimento da sua funcionalidade e segurança durante eventual

armazenamento e manuseio. Em virtude dos resultados, não foram realizadas as análises dos grupos referentes aos níveis intermediários de envelhecimento.

CONCLUSÃO

A determinação qualitativa das espécies químicas componentes do material estudado foi realizada com a utilização das técnicas FT-IR e MEV/EDS, indicando como resultado a presença do magnésio, do PTFE e do copolímero de fluoreto de vinilideno e hexafluorpropileno. As análises por MEV e EDS evidenciaram o tratamento de recobrimento da partícula de magnésio com, possivelmente, o copolímero de fluoreto de vinilideno e hexafluorpropileno.

A análise termogravimétrica foi utilizada para a determinação da quantidade de hidróxido de magnésio. O teor percentual dessa substância apresentou um crescimento de cerca de 100% para o grupo de amostras submetido ao envelhecimento acelerado durante cinquenta dias.

Conclui-se que os valores de temperatura e de umidade relativa definidos, bem como o tempo de permanência do material na câmara climática, permitiram atingir um significativo nível de envelhecimento do material, sendo o hidróxido de magnésio o principal indicador do envelhecimento de *flares* convencionais. Durante a sua formação, essa substância causou o passivamento das partículas de magnésio, comprometendo o processo de combustão do material e inibindo a produção de calor pelo magnésio metálico, tornando a composição menos eficiente energeticamente, conforme verificado nos resultados dos ensaios calorimétricos.

Os valores percentuais da massa específica apresentaram uma tendência de diminuição, em função do tempo de exposição do material em câmara climática e da formação do hidróxido de magnésio, que causou o aumento da massa e, principalmente, do volume das amostras.

Contudo, a estabilidade química das amostras relativas ao material envelhecido durante cinquenta dias e ao material não envelhecido se apresentou inalterada para um acréscimo de cerca de 100% na quantidade de hidróxido de magnésio. Esses resultados indicam valores considerados aceitáveis de acordo com os parâmetros estabelecidos pela publicação AOP-7 (Segunda Edição), da OTAN.

As técnicas empregadas neste trabalho mostraram-se eficazes na determinação qualitativa das espécies componentes das amostras dos *flares* convencionais e, também, na caracterização do processo de envelhecimento acelerado desse tipo de contramedidas aeronáuticas.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), organização da Força Aérea Brasileira sediada em São José dos Campos-SP, pelo inestimável apoio prestado durante a realização das análises executadas neste trabalho, ao ceder laboratórios, equipamentos e pessoal altamente qualificado, dentre os quais destacam-se: Ademir de Oliveira, Adriana Cosentino Garcia, Afonso Paulo Monteiro Pinheiro, Antônio Claret Sandi, Carlos Alberto Moura Guedes Pinto, Denise Contini, Elizabeth da Costa Mattos, Hémerston Orlando Licorini, Ivan Carlos dos Santos, Jairo Sciamarelli, João

Tabela 1. Resultado da análise de estabilidade química a vácuo dos grupos Referência e Envelhecimento 50 dias

Grupo das Amostras	Volume Médio de Gás Liberado por Massa (mL g ⁻¹)	Incerteza (mL g ⁻¹)	Classificação do resultado
Referência	0,082	± 0,005	Aceitável
Envelhecimento 50 dias	0,198	± 0,050	Aceitável

Marcos Kruszynski Assis, Jorge Luis Leme de Siqueira, José Ednilson da Rosa, Júlio Hisashi Miyoshi, Luciana de Barros, Margarete Ferreira Prata Azevedo, Milton Faria Diniz, Nanci Mieko Nakamura, Raul Santos Lemos e Silvana Navarro Cassu.

REFERÊNCIAS

1. Koch, E.-C.; *Propellants, Explos., Pyrotech.* **2011**, *26*, 3.
2. Adamy, D.; *EW 102: A Second Course In Electronic Warfare*, 1st ed., Artech House: Boston, 2004.
3. Callaway, J.; Davies, N.; *Proceedings of the 35th International Pyrotechnics Seminar*, Fort Collins, EUA, 2008.
4. Brune, N. Em *Countermeasure Systems*; Pollock, D., ed.; Infrared Information Analysis Center: Michigan, cap. 4.
5. Koch, E.-C.; *Metal-Fluorocarbon Based Energetic Materials*, 1st ed., Wiley-VCH: Weinheim, 2012.
6. Christo, F. C.; *Weapons Systems Division Aeronautical and Maritime Research Laboratory*, Melbourne, Austrália, 1999.
7. Barros, L.; Pinheiro, A. P. M.; Câmara, J. E.; Iha, K.; *J. Aerosp. Technol. Manage.* **2016**, *8*, 130.
8. Andrade, J.; Iha, K.; Rocco, J. A. F. F.; Bezerra, E. M.; *Quim. Nova* **2007**, *30*, 952.
9. De Yong, L. V.; Griffiths, T. T.; *Proceedings of the 19th International Pyrotechnics Seminar*, Christchurch, Nova Zelândia, 1994.
10. Baldessarini Pires, H.; Iha, K.; Rocco, J. A. F. F.; *Anais do 17o Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa*, São José dos Campos, Brasil, 2015.
11. Kirchof, E.; Rocha, R. J.; Nakamura, N. M.; Lapa, C. M.; Pinheiro, G. F. M.; Gonçalves, R. F. B.; Rocco, J. A. F. F.; Iha, K.; *Quim. Nova* **2016**, *39*, 661.
12. Andrade, J.; Iha, K.; Rocco, J. A. F. F.; *Quim. Nova* **2008**, *31*, 569.
13. Koc, S.; Eroglu, F.; Tinaztepe, H. T.; *Proceedings of 4th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Denver, EUA, 2009.
14. Gudgeon, T. J.; Chapman, F.; Sambasivan, S.; Gillard, T.; Wilharm, C.; Douda, B.; *Proceedings of the 35th International Pyrotechnics Seminar*, Fort Collins, EUA, 2008.
15. Claridge, R.P.; Griffiths, T. T.; Charsley, E. L.; Goodall, S. J.; Rooney, J. J.; *Proceedings of the 33rd International Pyrotechnics Seminar*, Fort Collins, EUA, 2006.
16. Bixon, E. R.; Broad, R.; DeSalvio, J.; Gagliardi, F.; Nagori, A.; Poret, J.; Zimmer, A.; *Proceedings of the 35th International Pyrotechnics Seminar*, Fort Collins, EUA, 2008.
17. Leenders, J.; Van Driel, C. A.; *Proceedings of the 23rd International Pyrotechnics Seminar*, Tsukuba, Japão, 1997.
18. Yang, L. C.; *Proceedings of 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*. Cincinnati, EUA, 2007.
19. L'vov, B. V.; Novichikhin, A. V.; Dyakov, A. O.; *Thermochim. Acta* **1998**, *315*, 135.
20. Wilharm, C. K.; *Proceedings of the 35th International Pyrotechnics Seminar*, Fort Collins, EUA, 2008.
21. ASTM D3800M, *Standard Test Method for Density of High-Modulus Fibers*, ASTM International Standard, 2011.
22. <http://www.ozm.cz/en/stability-tests/stabil-vi-vacuum-stability-test/>, acessada Junho 2017.
23. DuPont Performance Fluoroelastomers; *Viton® Fluid Resistance Guide*, technical information.
24. Smith, A. L.; *Applied Infrared Spectroscopy*, John Wiley & Sons: New York, 1979.
25. Koch, E.-C.; *Propellants, Explos., Pyrotech.* **2002**, *27*, 340.
26. Van Driel, C.; Leenders, J.; Meulenbrugge, J.; *Proceedings of 26th International Annual ICT Conference*, Karlsruhe, Alemanha, 2009.
27. Bender, S.; Gollner, J.; Heyn, A.; Blawert, C.; Bala Srinivasan, P. Em *Fundamentals of Magnesium Alloy and Metallurgy*; Pegguleryuz, M. O., Kainer, K. U., Kaya, A. A., eds.; Woodhead Publishing Limited: Oxford, 2013, cap. 7.
28. STANAG 4556 (Edition 1), *Explosives: Vacuum Stability Test*, NATO Standardization Agreement, 1999.
29. NATO AOP-7 (Edition 2), *Manual of Data Requirements and Tests for the Qualification of Explosive Materials for Military Use*, NATO Allied Ordnance Publication, 2003.