

# Estudo Comparativo de Metodologias de Predição da Vida Útil de Dispositivos de Contramedidas *Flares* MTV

Humberto Baldessarini Pires<sup>1</sup>, Koshun Iha<sup>1</sup>, José Atílio Fritz Fidel Rocco<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, São José dos Campos – SP

**Resumo** — Dispositivos de contramedidas *flares* que utilizam a composição designada como MTV (Magnésio, Teflon<sup>®</sup>, Viton<sup>®</sup>) são os mais comumente empregados pelas forças aéreas ao redor do mundo. Devido à vocação pacífica da maioria dos países, esses artefatos tendem a permanecer armazenados por longos períodos, o que pode comprometer a operação segura desse tipo de material energético, bem como alterar o desempenho esperado em uma eventual utilização. Essa questão ocasionou o desenvolvimento de metodologias de predição de vida útil, dentre os quais três delas foram estudadas e comparadas ao longo do presente artigo. A umidade relativa e a temperatura são determinantes no processo de envelhecimento do dispositivo.

**Palavras-Chave** — *Flares*, MTV, envelhecimento.

## I. INTRODUÇÃO

A primeira utilização, em combate, de mísseis ar-ar de guiamento infravermelho possui registro na década de 1950 do século passado, quando mísseis AIM-9 *Sidewinder* foram empregados a partir de aeronaves F-86 (ambos, mísseis e aeronaves, de fabricação norte-americana) da Força Aérea de Taiwan em sua bem-sucedida guerra de independência contra a República Popular da China [1].

A partir desse evento, foi inaugurada uma nova era do combate aéreo, uma vez que, desde então, os mísseis de guiamento infravermelho, tanto ar-ar quanto solo-ar, têm sido os maiores responsáveis pelas quedas de aeronaves militares [2]. Surgiu, assim, a necessidade de desenvolver artefatos e/ou técnicas que se contrapusessem a esse tipo de armamento, sendo uma das principais contramedidas o emprego dos *flares* (dentre os quais se destacam os *flares* MTV – compostos por Magnésio, Teflon<sup>®</sup> e Viton<sup>®</sup>), dispositivos que surgiram com o objetivo inicial de suplantar a intensidade espectral radiante proveniente, predominantemente, das partes quentes da tubeira da aeronave e da pluma formada pelos gases de exaustão, de forma que pudessem seduzir os mísseis infravermelhos, servindo como alvo e permitindo, conseqüentemente, o escape da aeronave atacada [2].

Devido à vocação pacífica de grande parte dos países, esses dispositivos podem permanecer estocados por consideráveis períodos de tempo. Assim, tornou-se importante determinar como os fatores relacionados ao processo de estocagem e aos métodos de transporte (condições ambientais, contato com materiais orgânicos, entre outros), poderiam afetar as propriedades químicas e mecânicas [3] dos *flares*.

No presente artigo, foi realizado um estudo comparativo de três metodologias de predição de vida útil aplicáveis a esse tipo de contramedidas, estabelecidos e aperfeiçoados ao longo do tempo de maneira que os períodos limites de armazenamento fossem determinados e seus efeitos, conhecidos, a fim de que não houvesse o comprometimento da segurança durante o manuseio e a operação dos *flares* MTV e, principalmente, do desempenho esperado quando em uma eventual utilização.

## II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE

### *Materiais Energéticos*

Materiais energéticos são compostos que se caracterizam pela capacidade de desenvolver altas temperaturas na forma de produtos gasosos durante o seu processo de combustão [4]. A quantidade de energia liberada na queima é suficiente para provocar transições eletrônicas, ocasionando a produção de luz e de calor. Esses materiais podem ser classificados, de acordo com os seus efeitos e propriedades, em propelentes, explosivos e pirotécnicos [5].

Os propelentes são empregados em motores aeroespaciais, gerando produtos da combustão em um processo de queima a velocidade subsônica, enquanto os explosivos sofrem uma detonação que provoca ondas de choque supersônicas. Em ambos os tipos, os produtos da combustão geram altas pressões e estão, predominantemente, na fase gasosa [4],[5].

Os pirotécnicos também produzem ondas de choque subsônicas, mas liberam considerável quantidade de produtos da reação na fase condensada (sólida e líquida). São constituídos, basicamente, a partir de combustíveis metálicos (Al, Mg e Ti, dentre outros) ou não-metálicos, como por exemplo o B, o Si e o C; e oxidantes orgânicos [como o C<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub> e o (-C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>-)<sub>n</sub>] ou inorgânicos (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, KClO<sub>4</sub> e NaNO<sub>3</sub>, por exemplo) [5].

Diferentemente dos propelentes, os combustíveis constituem a maior parte da composição química dos pirotécnicos, e seu processo de combustão é influenciado pelas reações de pós-combustão realizadas com o oxigênio atmosférico, ou ainda com o nitrogênio ou com o vapor d'água contido na atmosfera [5].

Em virtude de suas propriedades térmicas e balísticas, os pirotécnicos podem ser empregados em uma ampla gama de situações, como, por exemplo, na função de ignitores, iluminadores, obscurantes, além de contramedidas *flares* [5], em especial aqueles que utilizam a composição MTV, foco desse trabalho.

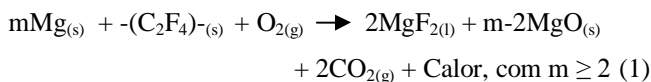
Humberto Baldessarini Pires, hubpires@ita.br, Tel +55-12-39476892, Fax +55-12-39475845. Koshun Iha, koshun@ita.br, Tel +55-12-39476852, Fax +55-12-39475845. José Atílio Fritz Fidel Rocco, friz@ita.br, Tel +55-12-39475918, Fax +55-12-39475845.

## Flares MTV

Uma das primeiras composições químicas dos *flares* era formada pelo Magnésio, Mg, pelo Teflon<sup>®</sup>,  $(-C_2F_4)_n$ , nome comercial do politetrafluoretileno (PTFE), e pelo Viton<sup>®</sup>, por exemplo  $(-C_5H_3F_8)_n$  [6], nome comercial do copolímero de fluoreto de vinilideno e hexafluorpropileno - motivo pelo qual são denominados *flares* MTV. Com o passar do tempo, novas tecnologias (como a discriminação do alvo em duas ou mais bandas distintas da região do infravermelho) foram incorporadas ao funcionamento dos mísseis de guiamento infravermelho, com o consequente aperfeiçoamento da composição química dos *flares*, na tentativa de assemelhar-se ao comportamento espectral de uma aeronave [7].

A energia radiada pelos *flares* MTV é obtida através de reações pirotécnicas dos elementos que os compõem. A primeira reação do processo de combustão de um *flare* MTV é anaeróbica, entre frações do magnésio e do PTFE [7]. Nessa reação, ocorre liberação de calor responsável por liquefazer e vaporizar o magnésio e decompor o PTFE que não tomaram parte da primeira reação [6].

Considerando que essa queima ocorre em um sistema aberto, observa-se, na região de pós-combustão, uma reação com o oxigênio presente na atmosfera, cuja reação global está descrita em (1) [2].



onde a letra s significa a fase sólida, a letra g indica que o composto encontra-se na fase gasosa e a letra l indica a fase líquida.

Em virtude da baixa complexidade inerente ao manuseio, aceitável probabilidade de sucesso quando lançados e relativamente baixo custo dos componentes empregados, os *flares* MTV ainda compreendem a maior parte desse tipo de artefato em poder das forças aéreas ao redor do mundo [2].

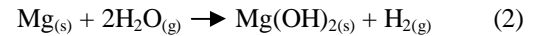
## Metodologias de Predição de Vida Útil

Considera-se o período de vida útil de materiais pirotécnicos o limite de tempo imediatamente antes do qual não é mais possível a operação segura do material, o que é caracterizado pela deterioração das propriedades mecânicas e químicas, ou seja, envelhecimento [8].

Um fator que contribui sobremaneira para esse envelhecimento é o ambiente a que o material está exposto (por um determinado intervalo de tempo), com maior relevância para a temperatura e a umidade relativa. Elevadas temperaturas aumentam a velocidade das reações químicas que provocam o envelhecimento, bem como contribuem para a migração de determinadas espécies químicas. Uma alta umidade relativa favorece reações que deterioram as propriedades do material [8].

Em *flares* MTV, essa degradação possui ao menos duas causas principais envolvendo reações do magnésio: nas suas superfícies expostas, com a umidade relativa presente no ambiente; e reações entre essa mesma espécie (e seus compostos) e os fluorelastômeros contidos no próprio *flare*. Nessa última reação, ocorrerá a liberação do ácido fluorídrico (HF) na forma gasosa, pela decomposição das espécies envolvidas [5].

A reação do magnésio com a água produz o hidróxido de magnésio, além do hidrogênio gasoso, como pode ser verificada na reação (2) [5].



Em [8], é abordada, além de (2), outra reação de envelhecimento que ocorre com os *flares* MTV, conforme (3).



Um dos primeiros mecanismos de predição de vida útil desenvolvidos foi o teste de envelhecimento acelerado (AAT – *Accelerated Aging Testing*), proposto por S. A. Moses em 1971 [9], devido à demanda do setor aeroespacial por determinar os períodos de vida útil e de armazenamento dos materiais energéticos empregados [10].

O AAT utiliza uma equação modificada a partir da equação de Arrhenius, sendo baseado na premissa de que, se não ocorrer a degradação do material avaliado quando submetido a altas temperaturas durante um período relativamente curto, então não haverá a deterioração do mesmo uma vez exposto a temperaturas mais brandas durante períodos maiores de tempo [11].

Os propósitos do teste são: identificar aqueles componentes que podem se degradar mais rapidamente, prover uma base sólida que previna o descarte prematuro dos materiais utilizados e permita a extensão da vida útil dos componentes [11], além da própria predição da vida útil, já abordada. Por conta desses aspectos, é bastante utilizado pelas indústrias farmacêutica, química e alimentícia [12].

A equação mais comumente utilizada para a realização de AAT em pirotécnicos [11] pode ser visualizada em (4) [12].

$$H_L = H_T * F^{(T_1 - T_2) / \delta T} \quad (4)$$

onde  $H_L$  é o tempo de vida útil, em dias,  $H_T$  é o tempo de duração do teste, em dias,  $F$  é o fator referente à velocidade da reação ( $F = 3,0$ ),  $T_1$  é a temperatura de teste ( $T_1 = 160$  °F, ou 71,1 °C),  $T_2$  é a temperatura de estocagem, e  $\delta T$  é o incremento da temperatura de referência ( $\delta T = 20$  °F, ou 11,11 °C, especificamente). Os valores acima mencionados foram adotados em [12], podendo variar de acordo com a referência estudada, e referem-se a materiais energéticos.

De forma a normatizar a realização do AAT nesses tipos de materiais empregados no setor aeroespacial, requisitos de aplicação do teste foram estabelecidos nas seguintes documentações: MIL-STD-1576 [13], MIL-HDBK-83578 [14], EWR 127-1 [15] e AIAA S-113-2005 [16]. As disposições contidas nessas especificações requerem, por exemplo, trinta dias de realização do teste à temperatura de 160 °F (71,1 °C), com umidade relativa de  $50 \pm 10\%$ , para a validação da extensão da vida útil em três anos [10],[12].

A metodologia AAT, conforme a utilização de (4), apesar da ampla aceitação universal, foi alvo de uma série de reservas, apresentadas por seu próprio autor [9]. As restrições quanto à precisão do AAT incluem, dentre outros, o valor do fator referente à velocidade da reação, a forma com que se estabelece a temperatura de estocagem e o fato de que fica definida uma energia de ativação universal - uma vez que (4) é uma modificação da equação de Arrhenius -

independentemente do tipo de material energético avaliado [11]. Em alguns trabalhos, pode-se observar  $F = 3,25$  [10],[12]. Porém, a velocidade da reação de determinados pirotécnicos nem sempre é conhecida. Além disso, pode haver mais de um tipo de pirotécnico no material analisado [11]. Apesar desses aspectos, alguns estudos demonstram que um valor de  $F = 3$  estabeleceria uma melhor precisão [12].

Já a definição da temperatura de estocagem é uma questão complexa. Geralmente, opta-se por determinar uma temperatura média com base nas condições de armazenamento do material. Contudo, dependendo da amplitude entre as variações máxima e mínima da temperatura, o estabelecimento de uma média não corresponderá à realidade [11]. Em muitos casos, não há um controle efetivo dessa temperatura, mas sim um registro dos valores obtidos ao longo do dia, o que se aplica também à umidade relativa. Em [12], é sugerido um método, através de uma equação específica, para tornar mais precisa a adoção desse parâmetro.

Diferente abordagem é descrita em [17], ligeiramente aperfeiçoada por Koch em [5]. Através da análise dos dados experimentais obtidos, mais especificamente o comportamento das curvas das amostras de MTV produzidas a partir da microcalorimetria, os autores idealizaram um modelo de previsão de vida útil para aplicação em composições MTV.

Naquele trabalho, foi realizado um estudo da influência conjunta da temperatura e da umidade no envelhecimento das composições, com o objetivo de um melhor entendimento acerca dos mecanismos de deterioração do magnésio sob as várias condições testadas – combinações de umidades relativas dentre 0%, 20%, 50%, 60% e 80% para temperaturas de 50 °C, 60 °C e 80 °C [17].

As amostras, de 5g cada, foram preparadas nas seguintes frações mássicas: 65% de Magnésio, 30% de Teflon® e 5% de Viton®, na forma de *pellets*, com diâmetro de 15,85mm e porosidade de 29,6% [17].

Da Fig. 1, nota-se um aumento na massa dos *pellets* da ordem de, aproximadamente, 90%, o que corresponde à conversão total do magnésio em hidróxido de magnésio [5], enquanto o aumento do volume da amostra é causado pelo fato de esse composto apresentar uma maior densidade, ocasionando a geração de rupturas filamentosas das partículas de magnésio [17]. Tal ação possui um efeito extremamente degradante em *flares* MTV, como pode ser verificado na Fig. 2 [5],[18].

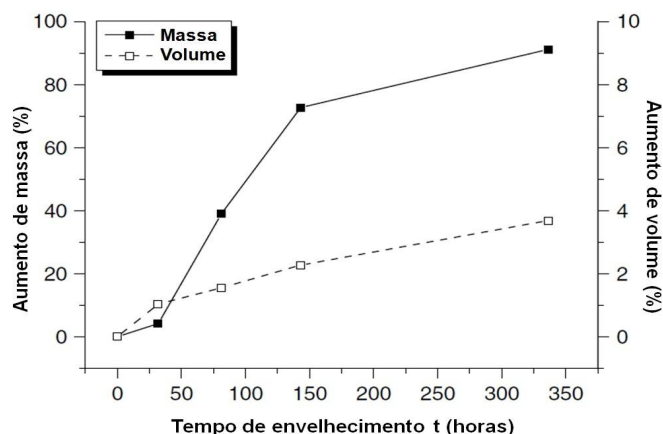


Fig. 1. Aumento de massa e de volume para *pellets* MTV expostos a 80 °C e a 80% de umidade relativa ( $\sim 240 \text{ gH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}$ ) [5].



Fig. 2. Cartuchos de *Flares* MTV, modelo M-206, após sofrerem expansão volumétrica em função do processo de envelhecimento acelerado [18].

Através da Fig. 3, pode-se observar, para amostras mantidas aquecidas a 80 °C em uma atmosfera a 20% de umidade relativa, que ocorre, inicialmente, uma diminuição da geração de calor durante um intervalo de tempo relativamente curto, havendo a menor geração de calor nesse momento, especificado como  $t_1$ . Após esse intervalo, porém, dá-se um aumento no calor gerado até ser atingido o máximo calor gerado, o que foi definido como  $t_2$ . Essa tendência ocorre devido ao aumento da velocidade da reação, pela conversão mais rápida de magnésio em hidróxido de magnésio, uma vez que a geração de calor é proporcional à velocidade da reação. A partir de  $t_2$ , a geração de calor começa a diminuir, agora em função da redução dessa velocidade, decrescendo quase que linearmente [5].

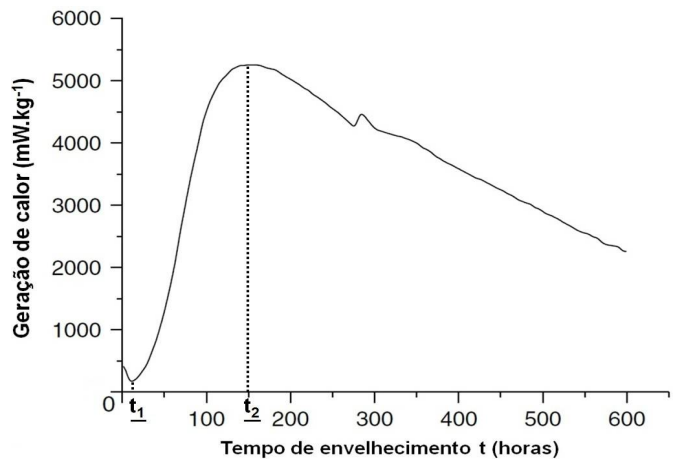


Fig. 3. Geração de calor dos *pellets* MTV expostos a 80 °C e a 20% de umidade relativa ( $15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) [5].

Baseado no perfil triangular da curva de geração de calor observada na Fig. 3, foi elaborado o modelo de previsão de envelhecimento, esquematizado na Fig. 4 [5].

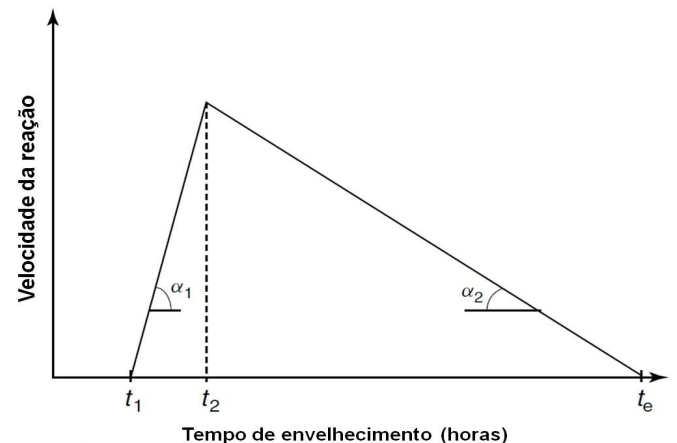


Fig. 4. Representação esquemática da velocidade de reação em função do tempo de envelhecimento [17].



Para a Fig. 4, são definidos os seguintes símbolos, com as suas respectivas equivalências:  $t_1$  (h) é o tempo em que a geração de calor começa a aumentar,  $t_2$  (h) representa o tempo a partir do qual a geração de calor inicia a tendência descendente,  $t_e$  (h) é o tempo em que todo o magnésio foi convertido,  $\alpha_1$  ( $h^{-2}$ ) é o gradiente da curva da velocidade da reação entre  $t_1$  e  $t_2$ , e  $\alpha_2$  ( $h^{-2}$ ) é o gradiente da curva da velocidade da reação entre  $t_2$  e  $t_e$  [5].

Através dos dados analisados em [17], concluiu-se que  $t_1$  é dependente apenas da temperatura, enquanto  $\alpha_1$  é dependente tanto da temperatura quanto da umidade relativa.

As equações, a partir das quais a degradação de composições MTV poderá ser modelada, são definidas em (5), (6), (7), (8) e (9) [17].

$$t_1 = 8,0 \cdot 10^4 \cdot e^{(-0,1151 \cdot T)} \quad (5)$$

$$\alpha_1 = 8,0 \cdot 10^{-16} \cdot e^{(0,2197 \cdot T)} \cdot RH^2 \quad (6)$$

$$\alpha_2 = -\alpha_1 \cdot \frac{\xi_{r2}}{1 - \xi_{r2}} \quad (7)$$

$$t_2 = t_1 + \sqrt{\frac{\xi_{r2}}{0,5 \cdot \alpha_1}} \quad (8)$$

$$t_e = t_2 + (t_2 - t_1) \cdot \frac{1 - \xi_{r2}}{\xi_{r2}} \quad (9)$$

onde  $T$  refere-se à temperatura (em graus Celsius),  $RH$  (*relative humidity*) refere-se à umidade relativa presente no ambiente, e  $\xi_{r2}$  significa a quantidade percentual das partículas de magnésio convertidas em hidróxido de magnésio, sendo a principal incerteza do modelo justamente o parâmetro  $\xi_{r2}$ , valor provavelmente dependente da área superficial e do grau inicial de oxidação das partículas de magnésio. À temperatura de 80 °C,  $\xi_{r2}$  equivaleria a 0,15 para uma umidade relativa de 20%, e seria igual a 0,17, para 80% de umidade relativa [17].

Já o terceiro estudo deste artigo envolveu a comparação experimental entre uma amostra de controle e um determinado número delas submetidas a envelhecimento acelerado. Resultados foram obtidos, dentre outros, através de análise térmica por Termogravimetria (TG) e por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) [8].

Para isso, foram confeccionadas amostras de vinte gramas com uma concentração constante de magnésio (não especificada) e variações na concentração de Viton<sup>®</sup> B ( $(-C_{10}F_{13}H_7)_n$ ) entre 8% e 14%, além do PTFE, sendo formados dois grupos amostrais no decorrer do estudo [8].

No primeiro grupo, as amostras foram acondicionadas em bolsas seladas (Fig. 5) e submetidas às temperaturas de 50 °C, 57 °C e 70 °C por períodos de quatro, seis, oito e dez meses. Mesmo na condição mais crítica (70 °C por dez meses), não foram percebidas diferenças consideráveis em relação às propriedades da amostra de controle, independentemente das variações de concentrações utilizadas. Também, foi verificado que uma maior concentração de Viton<sup>®</sup> B não proporcionou uma maior resistência da composição ao envelhecimento [8].

Concluiu-se que o fator temperatura, isoladamente, não é efetivo a ponto de ocasionar o envelhecimento de

composições MTV. Para as experiências seguintes, foram submetidas apenas as composições formadas com 8% de Viton<sup>®</sup> B, tanto na forma de grãos quanto na de *pellets*, expostas diretamente à umidade relativa presente no ambiente [8].

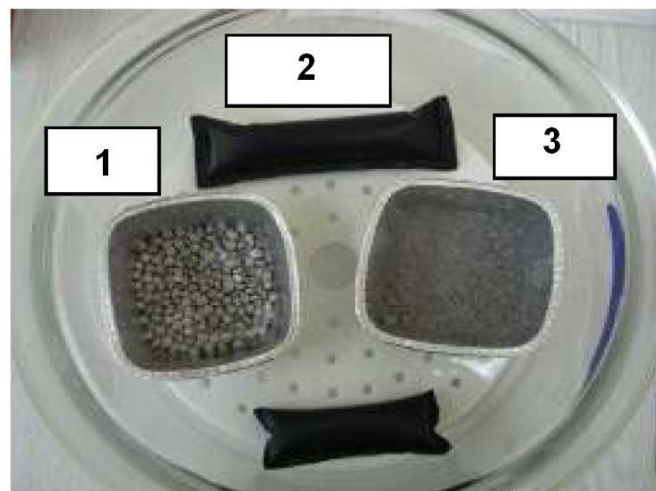


Fig. 5. Configuração das amostras: 1 – Forma de *pellets*; 2 – Bolsas seladas; 3 – Forma de grãos [8].

Assim, o segundo grupo foi mantido a uma temperatura de 30 °C, mas exposto a níveis de umidade relativa de 30%, 60% e 90% (soluções de cloreto de magnésio, de nitrato de magnésio e de nitrato de potássio, respectivamente). Após meses de exposição a 90% de umidade relativa, as amostras, apesar da absorção de umidade, recuperavam as suas propriedades após processo de secagem. Isso demonstrou que as composições são estáveis quando em ambientes a 30 °C e a umidades relativas de 30%, 60% e 90% [8].

O próximo passo foi aumentar a temperatura de exposição para 57 °C e 70 °C, alterando-se os níveis de umidade relativa para 70% (nitrato de sódio), 80% (brometo de potássio) e 90% (nitrato de potássio). As amostras foram expostas diretamente às condições ambientais, ou seja, não foram utilizadas as bolsas seladas, sendo analisadas a intervalos específicos de tempo [8].

Nessas configurações, houve mudanças nas características físicas tanto dos grãos (escurecimento) quanto dos *pellets* (escurecimento e aspereza), resultando, nesses, em um aumento de 11% no diâmetro e de 21% na altura. Os testes foram interrompidos quando o aumento de massa alcançou um nível estável [8].

Durante o período de exposição, a quantidade de calor liberada pelo material durante a sua combustão apresentou um determinado valor de pico, para então decrescer gradualmente até alcançar um estado onde as amostras não puderam mais ser ignitadas (1.440 horas para os grãos e 1.200 horas para os *pellets*) em virtude da absorção de umidade [8]. Tal comportamento foi o mesmo observado no estudo anterior, que resultou na elaboração de um modelo de envelhecimento para composições MTV.

Dentre as amostras submetidas às umidades relativas de 80% e de 90%, verificou-se que os grãos foram mais higroscópicos do que os *pellets*, ou seja, apresentaram uma maior tendência de absorver a umidade pela maior superfície de exposição, sendo mais vulneráveis, portanto, ao processo de envelhecimento [8].

### III. CONCLUSÃO

O presente artigo abordou três metodologias relacionadas à predição da vida útil de composições MTV, utilizadas em dispositivos de contramedidas *flares*.

O teste de envelhecimento acelerado (AAT) utiliza uma equação modificada a partir da equação de Arrhenius e, apesar de estar bem especificado em documentações, deve ter os seus parâmetros criteriosamente pensados, para não incorrer em resultados que não correspondam à realidade.

As duas metodologias restantes basearam-se na avaliação de dados experimentais. Verificou-se, como efeito do envelhecimento em composições MTV, o aumento da massa da amostra, efeito provocado pela conversão das partículas de magnésio em hidróxido de magnésio. Ambos os métodos convergiram no sentido de que a análise da liberação de calor da amostra em função de um determinado intervalo de tempo é um importante parâmetro para se determinar a influência do envelhecimento nessas composições. Foi abordado um modelo de predição de vida útil baseado nesse fenômeno.

Além disso, concluiu-se que a exposição de amostras a elevadas temperaturas, somente, não induz os efeitos esperados de envelhecimento, o que ocorrerá quando for adicionado a isso o fator umidade relativa.

### REFERÊNCIAS

- [1] R. A. T. Santos. "A-Darter: características e impacto operacional", Revista Spectrum, n. 13, p. 34-39, Set. 2010.
- [2] E. C. Koch. "Review on pyrotechnic aerial infrared decoys", Propellants, Explosives, Pyrotechnics, n. 26, p. 3-11, 2001.
- [3] R. V. Binda, E. Kirchhoff, K. Iha, J. A. F. F. Rocco. "Predição do tempo de vida útil de motor sólido do SBAT 70 mm", XV SIGE, 2013.
- [4] N. Kubota. Propellants and Explosives: Thermochemical Aspects of Combustion, 2nd ed. Wiley-VCH: Weinheim, 2007, p. 1, 33.
- [5] E. C. Koch. Metal-Fluorocarbon Based Energetic Materials, 1st ed. Wiley-VCH: Weinheim, 2012, p. 1-3, 264-270.
- [6] E. C. Koch. "Metal-fluorocarbon-pyrolants IV: thermochemical and combustion behavior of Magnesium/Teflon/Viton (MTV)", Propellants, Explosives, Pyrotechnics, n. 27, p. 340-351, 2002.
- [7] H. B. Pires. Estudo conceitual do software SIMIS: seu emprego operacional. 93 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Análise do Ambiente Eletromagnético) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2014.
- [8] S. Koc, F. Erogul, H. T. Tinaztepe. "Accelerated aging study for MTV igniter charges", 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, August 2-5, 2009, Denver, CO.
- [9] S.A. Moses. "Accelerated life test for aerospace explosive components", Proceedings of the Seventh Symposium on Explosives and Pyrotechnics, p. 11.3.1-11.3.8, 1971, Pennsylvania.
- [10] L.S. Russakov, I.A. Whalley. "Accelerated aging testing of energetic components - A current assessment of methodology", 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, July 17-19, 2000, Huntsville, AL.
- [11] J.D. Glass. "Uses and abuses of accelerated age testing of pyrotechnic devices", 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, July 11-14, 2004, Ft. Lauderdale, FL.
- [12] L. C. Yang. "Correlation between the accelerated aging test (AAT) and real world storage temperature", 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, July 8-11, 2007, Cincinnati, OH.
- [13] MIL-STD-1576 (USAF), Electroexplosive Subsystem Safety Requirements and Test Methods for Space Systems, July 31st, 1984.
- [14] MIL-HDBK-83578 (USAF), Criteria for Explosive Systems and Devices Used on Space Vehicles, May 1st, 1999.
- [15] EWR 127-1 (USAF), Eastern and Western Range Safety Requirement, 45th Space Wing and 30th Space Wing, December 31st, 1999.
- [16] AIAA S-113-2005, Criteria for Explosive Systems and Devices on Space and Launch Vehicles, AIAA, November 10th, 2005.
- [17] C. Van Driel, J. Leenders, J. Meulenbrugge. "Ageing of MTV", 26th International Annual ICT Conference, p. V-31, July 4-7, 2009, Karlsruhe, Germany.
- [18] E. Bixon, R. Broad, J. DeSalvio, F. Gagliardi, A. Nagori et al. "Accelerated aging of the M206 Countermeasure IR flare", 35th International Pyrotechnics Seminar, p. 449, July 13-18, 2008, Fort Collins, CO.