



ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS DA AERONÁUTICA  
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS 1/2021

**CAMILA MARIA LAPA, Cap Eng**

**Proteções Térmicas para motores foguetes de veículos espaciais  
desenvolvidos no Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE): proposta de  
adequação**

Rio de Janeiro

2021

ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS DA AERONÁUTICA  
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS 1/2021

**CAMILA MARIA LAPA, Cap Eng**

**Proteções Térmicas para motores foguetes de veículos espaciais desenvolvidos no Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE): proposta de adequação**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Curso de Aperfeiçoamento de Oficiais da Aeronáutica como requisito parcial para aprovação no Curso de Pós-graduação em Gestão Pública com ênfase em Projetos e Processos.

Linha de Pesquisa: Logística e Mobilização Aeroespaciais

Orientador: André da Costa Gonçalves, Prof Msc

Rio de Janeiro

2021

**CAMILA MARIA LAPA, Cap Eng**

**Proteções Térmicas para motores foguetes de veículos espaciais  
desenvolvidos no Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE): proposta de  
adequação**

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
no Curso de Aperfeiçoamento de Oficiais da  
Aeronáutica.

Aprovado por:

---

**Carlos Eduardo** José da Silva, Maj Esp Av  
EAOAR

---

**André da Costa Gonçalves**, Prof MSc  
EAOAR

Rio de Janeiro

2021

## RESUMO

Um dos componentes do sistema propulsivo de veículos espaciais a propulsão sólida é o sistema de proteção térmica (SPT), cujo papel é proteger envelope motor e demais sistemas do calor de queima do propelente e proteger o grão propelente de esforços mecânicos. Do início do Programa Espacial Brasileiro ao presente, os projetos dos veículos evoluíram e os sistemas e materiais precisam atender a novos requisitos. Assim, o SPT precisa ter melhor capacidade termo-mecânica para suportar maior tempo de queima. O aspecto essencial no projeto de uma proteção térmica é a sua formulação, que tem uma matriz elastomérica e um reforço de fibras como componentes principais. Atualmente, são empregados como matriz e reforço, respectivamente, borracha nitrílica (NBR) e amianto, que apresentam limitações e devem ser substituídos. Este trabalho defende a tese de que o desenvolvimento de novas formulações determina a obtenção de uma proteção térmica ajustada aos requisitos dos motores foguetes de veículos espaciais atualmente desenvolvidos no Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE). O amianto, mesmo com excelentes propriedades está sendo banido no mundo por ser cancerígeno. Em contrapartida, a borracha de monômero etileno-propileno-dieno (EPDM) é mais leve e possui melhores propriedades que a NBR. O posicionamento do Brasil no grupo de países do mundo que dominam o ciclo completo de acesso ao Espaço (veículo, carga, lançamento) passa pelo sucesso na missão de um veículo lançador e isso, em determinado grau, depende da obtenção de um SPT que assegure o voo eficaz e seguro de um veículo de grande porte.

**Palavras-chave:** Proteção térmica. Motor foguete a propulsão sólida. EPDM.

## 1 INTRODUÇÃO

O Programa Espacial Brasileiro (PEB) remonta à década de 1950. De lá para cá, os projetos dos veículos evoluíram e os sistemas e materiais precisam se adequar às novas demandas. Por exemplo, veículos com motores maiores e maior tempo de queima exigem melhor capacidade de isolamento térmico e resistência mecânica do seu sistema de proteção térmica (SPT).

Um dos componentes do sistema propulsivo de veículos espaciais a propulsão sólida é o sistema de proteção térmica, cujo papel é proteger o envelope motor e os demais sistemas do calor emitido na queima do propelente e de evitar danos ao grão propelente ante os esforços mecânicos do voo, como a vibração. As proteções térmicas são revestimentos interfaces entre o invólucro e a massa solidificada de propelente no motor. Quanto maior a capacidade do material constituinte, menor a massa de material necessária para o efeito de proteção.

O aspecto essencial no projeto de um SPT é a sua formulação. Em geral, são empregados materiais compósitos, em que há uma matriz elastomérica e um reforço de fibras - os componentes principais da formulação, que leva, ainda, diversos aditivos em menores quantidades. Atualmente, são empregados como matriz e reforço, respectivamente, a borracha nitrílica (NBR) e o amianto. Ambos os materiais apresentam limitações de engenharia e devem ser substituídos.

A mudança de quaisquer dos componentes principais define uma nova formulação. Desta feita, este trabalho defende a tese de que o desenvolvimento de novas formulações é determinante para a obtenção de uma proteção térmica ajustada aos requisitos dos motores foguetes de veículos espaciais atualmente desenvolvidos no Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE).

O amianto vem sendo usado como reforço nas proteções térmicas desde os primórdios do PEB. Entretanto, está sendo banido em todo o mundo por seu potencial carcinogênico. Em contrapartida, hoje existem elastômeros mais leves e com melhor capacidade isolante, que atendem melhor ao requisito de massa do que a NBR. Assim, uma nova formulação em que a matriz elastomérica e o reforço sejam substituídos permite a adequação do SPT aos requisitos dos veículos mais modernos do IAE, além de resolver o problema de disponibilidade de matéria prima.

## 2 DESENVOLVIMENTO

Uma das formas de melhorar o desempenho e capacidade dos veículos espaciais é a redução do seu peso inerte e os principais esforços para se conseguir isso estão focados nos materiais constituintes do invólucro e do sistema de proteção térmica (SPT) (ISOPI; PITTARELLI; SEBASTA, 1979; RALLINI et al., 2018).

A escolha de um SPT passa, primeiro, por fatores relacionados às propriedades do material, mas na seleção do material não se pode desprezar fatores de engenharia como disponibilidade de matérias primas e facilidade de processamento.

O principal requisito para o SPT é resistência à ablação, um processo erosivo causado pelo escoamento dos gases de queima em alta temperatura e alta velocidade. Além de ablativos, os materiais devem ser leves, apresentarem baixa condutividade térmica e boas propriedades mecânicas, pois contribuem para a função estrutural do veículo. Para evitar falha catastrófica do motor, o material deve conservar as propriedades elastoméricas (deformar e retomar a forma) em toda a faixa de temperatura e tempo de operação (BHUVANESWARI et al., 2006)

Os materiais mais comuns para SPT são os compósitos, em que se tem uma fase em maior volume, a matriz, e uma fase dispersa, o reforço. A dispersão de fibras em uma matriz tem a capacidade de aumentar a resistência mecânica do conjunto e por isso, a denominação reforço. Os compósitos associam as propriedades das fases componentes, podendo até se beneficiar de efeitos sinérgicos entre elas.

Além da matriz e do reforço, que são os componentes principais da formulação, as proteções térmicas levam em sua composição aditivos diversos (plastificantes, agentes de cura e adesão, antioxidantes, entre outros).

A matriz do compósito é quem dita características gerais do material. Os Materiais Poliméricos Ablativos (MPA), em particular os elastômeros, constituem a principal escolha de matriz para o SPT por associarem baixa densidade com a capacidade de suportar ambientes hipertérmicos, mantendo a integridade estrutural (BASSYOUNI et al., 2014; RALLINI et al., 2018).

Porém, os MPA costumam sofrer carbonização das suas cadeias, o que enfraquece o material. A adição de fibras curtas (tais como amianto, fibras de

carbono ou vidro) como reforço à matriz polimérica permite um significativo aumento das propriedades ablativas, mecânicas e térmicas (AHMED e HOA, 2012; BASSYOUNI et al., 2014; RALLINI et al., 2018; ZHAO et al., 2014).

Assim, o material de reforço tem um papel crítico na determinação das propriedades do SPT e deve ser criteriosamente escolhido, pois também interage com os aditivos e interfere fortemente no processamento.

## 2.1 Substituição do amianto como reforço

Dentre os reforços mencionados, o amianto vem sendo usado por décadas em programas espaciais de todo o mundo, por suas incomparáveis propriedades. O amianto ou asbesto é uma fibra de silicatos de origem mineral, existente em diversas formas: serpentinas (crisotila ou amianto branco) e anfibólios (tremolita, actinolita, antofilita, amosita e crocidolita).

Por ser amplamente encontrado na natureza a baixo custo e por suas propriedades físico-químicas (grande resistência mecânica e a altas temperaturas, a ataque ácido, alcalino e de bactérias, é incombustível, durável, flexível, facilmente tecido), é referido como “mineral mágico” e considerado essencial para diversos setores da indústria no último século (construção civil, automotiva, bélica, petrolífera, têxtil, entre muitas outras) (AMIANTO, 2020).

Tão antigo quanto seu uso, no entanto, é o conhecimento dos seus efeitos nocivos à saúde humana, cujas evidências clínicas e epidemiológicas remontam ao início do século XX (WÜNSCH FILHO, NEVES e MONCAU, 2001). A exposição ao amianto está relacionada à ocorrência de diversas doenças graves: asbestose, placas pleurais, câncer de pulmão; e mesoteliomas de pleura e peritônio (AMIANTO, 2020; AMIANTO CRISTOLITO, 2017; WÜNSCH FILHO, NEVES e MONCAU, 2001).

O amianto é responsável por cerca de metade das mortes por câncer profissional no mundo (107.000 pessoas por ano) e, segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS) e o Instituto Nacional do Câncer (INCA), não há níveis seguros para a exposição a todas as formas do mineral (AMIANTO, 2020; AMIANTO CRISTOLITO, 2017).

Por essa razão, e a despeito de toda a pressão existente por parte da indústria do amianto, seu uso está praticamente encerrado nos Estados Unidos e

outras nações industrializadas desenvolvidas - mais de 50 Estados-Membros da OMS, inclusive os 28 Estados-Membros da União Europeia, que proibiram a importação, fabricação e comercialização de produtos derivados de amianto (AMIANTO CRISTOLITO, 2017; WÜNSCH FILHO, NEVES e MONCAU, 2001).

No Brasil, é possível observar contradições internas, advindas do fato de que, se por um lado, é indiscutível o risco da exposição ao mineral, por outro, o país é um dos maiores produtores e exportadores mundiais. Apenas o uso do amianto crisotila ainda é permitido, conforme a Lei nº 9.055, de 1995, regulamentada pelo Decreto nº 2.350, de 1997. Porém, segundo o INCA (AMIANTO, 2020), em 29 de novembro de 2017, foi declarada a inconstitucionalidade do artigo 2º da Lei Federal 9.055/1995, sendo, dessa forma, o banimento desta substância na indústria brasileira, definitivo.

É válido, ainda, ressaltar que a Resolução CONAMA nº 307/02 classifica como resíduo perigoso os resíduos da construção civil que contenham amianto e estabelece o seu adequado gerenciamento para que se evite a contaminação ambiental e da saúde humana (MMA, 2020).

O encerramento definitivo do uso do amianto no Brasil é fato iminente e, por isso, é importante observar que: i) o IAE possui acordos de cooperação internacional com diversos países, como Alemanha, França, Rússia; ii) o desenvolvimento e homologação de produtos no setor espacial levam, em geral, diversos anos para ocorrer; iii) os evidentes malefícios do uso contrariam os valores do IAE no sentido de valorização do ser humano, da ética, do rigor científico e da responsabilidade social.

Assim sendo, é imperativa a imediata busca pela substituição do amianto como reforço nas formulações de proteções térmicas no IAE, tal como vêm fazendo programas espaciais de diversos países (AHMED e HOA, 2012; BASSYOUNI et al., 2014; MORGAN et al., 2000; ZHAO et al., 2014).

## **2.2 Substituição da matriz elastomérica**

A borracha acrilonitrila-butadiênica ou borracha nitrilica (NBR) é a mais amplamente aplicada como matriz elastomérica em SPT e é o material de referência dos projetos do IAE. Porém, sua vida útil é considerada curta e sua densidade é alta

(BHUVANESWARI et al., 2006). Dessa forma, fica clara a necessidade de substituição deste componente da formulação.

A borracha de monômero etileno-propileno-dieno (EPDM) é considerada por muitos autores como o estado da arte, sendo o melhor elastômero para esta finalidade, por apresentar uma excelente estabilidade térmica, excelente resistência à oxidação, ozonização e efeitos climáticos, além de ter a menor densidade dentre todos os elastômeros conhecidos (BHUVANESWARI et al., 2006; NATALI et al., 2013; RALLINI et al., 2018).

Além disso, devido à sua estrutura química, a EPDM é muito versátil no sentido de compatibilizar com reforços e aditivos, seja no sentido de absorver cargas, seja na capacidade de interagir com elas, permitindo que um grande número de sistemas ou formulações possa ser estudado. Isso amplia as chances de se obter um material adequado para um SPT e ganha especial importância considerando a já discutida substituição do amianto.

Bassyouni et al (2014) e Ahmed e Hoa (2011) destacam que “o desenvolvimento de novos materiais passa pela mudança de ingredientes e/ou novas formas de processamento”. No caso do SPT, o processamento não pode ser desprezado, mas as maiores expectativas de aprimoramento e melhoramento das propriedades estão, de fato, nos componentes principais.

A substituição da NBR pela EPDM soluciona a equação de reduzir a massa do SPT e obter um material com melhor resistência à ablação para atender a veículos mais robustos, mesmo sem o uso do amianto, que é excelente em ambos os critérios. Retirar o amianto da formulação exige o emprego de outro tipo de reforço. Porém, isso é muito mais difícil de se conseguir com a matriz NBR do que com a EPDM.

A EPDM por si só é a melhor no quesito massa, dentre os elastômeros conhecidos. A versatilidade na admissão de carga potencializa o uso de diferentes aditivos, que ajudam a melhorar também propriedades como estabilidade física e química, permitindo o emprego de menores espessuras do revestimento, o que leva a reduções ainda maiores de massa inerte no veículo.

O ajuste da proteção térmica para os veículos do IAE é determinado por uma nova formulação. Isso fica evidenciado pela premente necessidade de substituição do amianto como reforço e da NBR como componentes principais.

### 3 CONCLUSÃO

Nas últimas décadas o mundo experimenta avanços tecnológicos cada vez mais acelerados. Além disso, têm-se dado mais atenção a questões relacionadas ao ambiente e à saúde. Isso representa um avanço enquanto sociedade, mas impõe desafios à ciência e à tecnologia.

O IAE tem como missão ampliar o conhecimento e desenvolver soluções científico-tecnológicas para fortalecer o Poder Aeroespacial Brasileiro e tem a visão de ser reconhecido, no Brasil e no exterior, como uma Instituição de excelência nas Áreas Aeroespacial e de Defesa. O poder de dissuasão e o reconhecimento advêm do alinhamento com o contexto global e, por isso, os atuais projetos de veículos espaciais do Instituto contemplam missões mais arrojadas e exigem mais dos materiais e tecnologias empregados.

A evolução dos veículos espaciais passa pela evolução dos seus sistemas componentes, dentre eles, o SPT, que precisa ter a menor massa e as melhores propriedades termo-mecânicas possíveis. Por outro lado, o sucesso das missões dos veículos, sejam elas bélica, civil ou ambas, depende do perfeito funcionamento dos seus sistemas.

No caso das proteções térmicas, a evolução é determinada por uma nova formulação. O desenvolvimento de novas formulações é determinante para a obtenção de uma proteção térmica ajustada aos requisitos dos motores foguetes de veículos espaciais atualmente desenvolvidos no IAE. A substituição do amianto e a troca da NBR pela EPDM permitem a obtenção de um material dentro dos requisitos desses novos veículos, resolvendo um problema de engenharia.

O Brasil já detém a tecnologia de produção de satélites e possui um dos melhores centros de lançamento de veículos espaciais do mundo, o Centro de Lançamento de Alcântara. Também, tem um sólido histórico de lançamentos e vendas de veículos de sondagem para outros países. O posicionamento do Brasil no seleto grupo de países do mundo - e único no hemisfério sul - que dominam o ciclo completo de acesso ao Espaço passa pelo sucesso na missão de um veículo lançador e isso, em determinado grau, depende da obtenção de um SPT que assegure o voo eficaz e seguro de um veículo de grande porte.

## REFERÊNCIAS

AHMED, A. F.; HOA, S. V. Thermal insulation by heat resistant polymers for solid rocket motor insulation. **Journal Of Composite Materials**, [S.L.], v. 46, n. 13, p. 1549-1559, 11 out. 2011. SAGE Publications. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/0021998311418850>.

AMIANTO. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/amianto>. Acesso em: 19 out. 2020.

AMIANTO CRISOTILO [CHRYSOPILE ASBESTOS]. Genebra: Organização Mundial da Saúde; 2017. Licença: CCBY-NC-SA 3.0 IGO. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/143649/9789248564819-por.pdf?sequence=17>.

BASSYOUNI, M.; IQBAL, N.; IQBAL, S. S.; ABDEL-HAMID, S. M.-S.; ABDEL-AZIZ, M. H.; JAVAID, U.; KHAN, M. B. Ablation and thermo-mechanical investigation of short carbon fiber impregnated elastomeric ablatives for ultrahigh temperature applications. **Polymer Degradation And Stability**, [S.L.], v. 110, p. 195-202, dez. 2014. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.08.032>.

BHUVANESWARI, C. M; SURESHKUMAR, M. S.; KAKADE, S. D.; GUPTA, M. Ethylene-propylene diene rubber as a futuristic elastomer for insulation of solid rocket motors. **Defence science journal**, v. 56, n. 3, p. 309, 2006.

ISOPI, R.; PITTARELLI, E.; SEBASTA, A..Development of low density insulators for space motors. **15Th Joint Propulsion Conference**, [S.L.], p. 1-8, 18 jun. 1979. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2514/6.1979-1214>.

MMA. **FAQs - Geral - Amianto**. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/perguntas-frequentes?catid=21>. Acesso em: 20 out. 2020.

MORGAN, R.; PRINCE, A.; SELVIDGE, S.; PHELPS, J.; MARTIN, C.; LAWRENCE, T..Non-asbestos insulation testing using a plasma torch. **36Th Aiaa/asme/sae/asee Joint Propulsion Conference And Exhibit**, [S.L.], p. 1-8, 24 jul. 2000. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2000-3317>.

NATALI, M.; RALLINI, M.; PUGLIA, D.; KENNY, J.; TORRE, L. EPDM based heat shielding materials for Solid Rocket Motors: a comparative study of different fibrous reinforcements. **Polymer Degradation And Stability**, [S.L.], v. 98, n. 11, p. 2131-2139, nov. 2013. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.006>.

RALLINI, M.; PURI, I.; TORRE, L.; NATALI, M. Thermal and ablation properties of EPDM based heat shielding materials modified with density reducer fillers.

**Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [S.L.], v. 112, p. 71-80, set. 2018. Elsevier BV. Disponível em:  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.05.031>.

ZHAO, Y.; HU, S.; LIU, W.; AN, G.; WU, Z.; WU, D.; JIN, R. Nitrile butadiene rubber-based heat-shielding insulations for solid rocket motors. **High Performance Polymers**, [S.L.], v. 27, n. 2, p. 153-160, 31 jul. 2014. SAGE Publications. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/0954008314541819>.

WUNSCH FILHO, V.; NEVES, H.; MONCAU, J.E. Amianto no Brasil: conflitos científicos e econômicos. **Rev. Assoc. Med. Bras.**, São Paulo, v. 47, n. 3, p. 259-261, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-42302001000300040>.