

APLICAÇÃO DE COMPÓSITOS CARBONO-CARBONO NO PROJETO DE MODELOS HIPERSÔNICOS DO LANÇADOR HIPERSÔNICO DE MASSA

R.A. Paes^{1,2,*}; F.D. Origo²; M.M. Borges²; A.C. Oliveira²; A. Gonçalves³; J.A. Motta Jr.³

1 Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos - Professor Jessen Vidal
Av. Cesare Mansueto Giulio Lattes, 1350 - Eugênio de Melo, São José dos Campos/SP,
CEP.: 12247-014, Brasil.

Telefone: (12) 3905-2423

*ranpaes@yahoo.com.br

2 Instituto de Estudos Avançados

Trevo Coronel Aviador José Alberto Albano do Amarante, 01 - Putim, São José dos Campos/SP

CEP.: 12228-001, Brasil.

Telefone: (12) 3947-5360

3 Instituto de Aeronáutica e Espaço

Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias, São José dos Campos/SP

CEP.: 12228-904, Brasil.

Telefone: (12) 3941-2333

RESUMO: Neste trabalho foram desenvolvidos dois protótipos de modelos hipersônicos com partes em compósito carbono-carbono (C/C) para o Lançador Hipersônico de Massa (LHM) do Instituto de Estudos Avançados (IEAv). A tecnologia do Lançador Hipersônico de Massa e dos modelos hipersônicos foi brevemente revisada. Os critérios para a seleção dos materiais empregados no projeto de modelos hipersônicos foram apresentados, com ênfase na utilização de compósitos C/C, em razão de suas propriedades termomecânicas. A metodologia de desenvolvimento dos projetos e de manufatura dos modelos hipersônicos foi definida e explicada. Os protótipos de modelos hipersônicos com partes em compósito C/C foram usinados. Os protótipos obtidos foram discutidos, avaliando-se aspectos geométricos e dimensionais e sua influência no perfil das ondas de choque que afetam o escoamento hipersônico.

PALAVRAS-CHAVE: Lançador Hipersônico de Massa; modelo hipersônico; hipersônica; compósito carbono-carbono; manufatura.

ABSTRACT: In this work, two hypersonic projectiles with carbon-carbon composite (C/C) parts were developed for the Hypersonic Mass Launcher of the Institute of Advanced Studies (IEAv). The technology of the Hypersonic Mass Launcher and hypersonic projectiles was briefly reviewed. Selection of the materials applied in the design of hypersonic projectiles were presented, emphasizing the use of C/C composites due to their thermomechanical properties. The development methodology for the project and manufacture of hypersonic projectiles was defined and explained. The hypersonic projectile prototypes with C/C composite parts were machined. The prototypes were discussed, considering geometric and dimensional aspects and their influence on the shock wave profiles that affect the hypersonic flow.

KEYWORDS: Hypersonic Mass Launcher; hypersonic projectile; hypersonic; carbon-carbon composite; manufacturing.

1. INTRODUÇÃO.

No ano de 1983, foi desenvolvido na Universidade de Washington, nos Estados Unidos, um dispositivo conhecido como *Ram Accelerator*, que consiste em um lançador de hipervelocidade capaz de acelerar projéteis a velocidades teóricas de até 8 km/s [1].

O estudo desta tecnologia no Brasil só receberia destaque no final da década de 90, a partir da construção do Lançador Hipersônico de Massa (LHM), instalado no Instituto de Estudos Avançados (IEAv) [2].

Concebido inicialmente para investigar escoamentos hipersônicos, o LHM possibilita aplicações potenciais, tais como: ensaios de impacto, estudos de propulsão hipersônica, desenvolvimento de armas de energia cinética, lançamentos orbitais de satélites e cargas úteis ao espaço [1][2].

1.1. Lançador Hipersônico de Massa

O Lançador Hipersônico de Massa (LHM) possui uma configuração em forma de tubo, o qual é preenchido com uma mistura propelente gasosa, composta por combustível, oxidante e diluente [3].

Neste ambiente, um projétil de geometria aerodinâmica similar ao corpo central de um motor cilíndrico *scramjet* é lançado. Ocorre então a combustão da mistura propelente confinada, a qual gera empuxo ao projétil, acelerando-o. A este projétil, denomina-se modelo hipersônico. Sua geometria é apresentada na Figura 1.

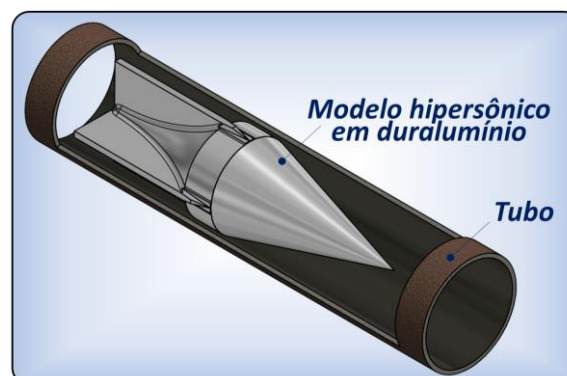


Figura 1. Exemplo de modelo hipersônico no interior de um tubo de lançamento.

Historicamente, diversos modelos hipersônicos têm sido confeccionados em materiais metálicos de elevada resistência específica, tais como as ligas de alumínio, magnésio e titânio. Tais ligas permitem obter modelos leves, com massa variando entre 50g e 140 g, além de proporcionar resistência mecânica moderada para suportar as tensões que atuam no modelo durante o lançamento [1].

Segundo Borges [2], os modelos hipersônicos do LHM têm sido produzidos em liga de alumínio aeronáutico, com peso médio de 130 g, distribuídos em duas partes. A parte dianteira do modelo consiste de um cone com ângulo de 30°. Já a parte traseira possui uma configuração com aletas que garantem a centralização do modelo durante o lançamento. Um exemplo de modelo hipersônico utilizado no LHM pode ser visto na Figura 2.

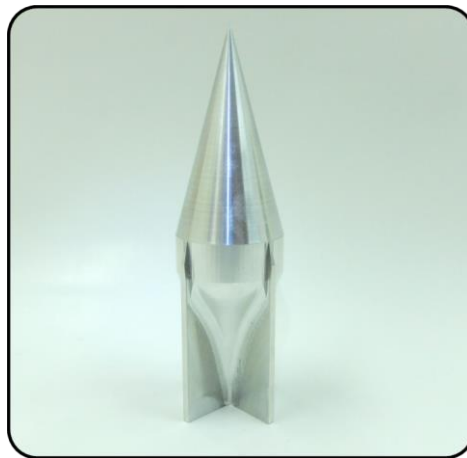


Figura 2. Modelo hipersônico do LHM, confeccionado em liga de alumínio aeronáutico.

No entanto, as ligas metálicas comumente empregadas na manufatura de modelos hipersônicos apresentam limitações do ponto de vista da engenharia, em razão das cargas termomecânicas elevadas que atuam sobre os projéteis. A combustão da mistura propelente gasosa resulta em uma rápida transferência de calor para o modelo hipersônico, resultando na fusão e ablação dos materiais que o constituem. De acordo com Seiler [1], para que seja possível atingir velocidades hipersônicas superiores à 3 km/s, os materiais empregados na fabricação de modelos hipersônicos devem atender aos requisitos de projeto e conferir elevada resistência termomecânica para suportar os regimes de detonação.

Com base nesta problemática, este trabalho propõe a utilização de compósitos carbono-carbono (C/C) no projeto dos modelos hipersônicos utilizados no LHM. Assim, foram desenvolvidos dois protótipos de modelos hipersônicos com partes em compósito C/C. Espera-se que estes protótipos permitam investigar a viabilidade da utilização de compósitos C/C em lançadores como o LHM, através de lançamentos experimentais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O critério adotado para a seleção dos materiais a serem empregados na confecção dos protótipos de modelos hipersônicos foi baseado na literatura pesquisada, a qual ressalta a aplicação de materiais de elevado desempenho termomecânico, sugerindo o emprego de compósitos C/C [3][4][5].

Na Figura 3, por exemplo, observa-se um gráfico da variação da resistência à tração para diversas classes de materiais em função da temperatura.

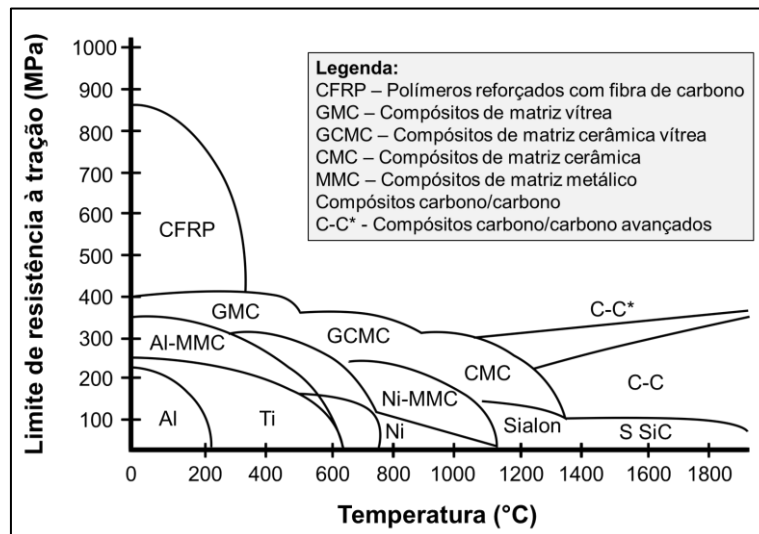


Figura 3. Gráfico da variação de resistência à tração em função da temperatura para diversas classes de materiais. Adaptado de Manocha.

Observa-se que a resistência mecânica dos compósitos C/C, em geral, aumenta progressivamente com a temperatura. Este fenômeno não ocorre com os materiais metálicos e cerâmicos, pois os mesmos têm sua resistência mecânica reduzida com o aumento de temperatura.

Assim, considerou-se que a aplicação de compósitos C/C em modelos hipersônicos atenderia ao requisito de resistência termomecânica exigido pela combustão detonativa da mistura propelente no LHM.

Após a fase de pesquisa, foram desenvolvidos dois projetos de modelos hipersônicos com partes em compósito C/C, utilizando-se o *software* Autodesk Inventor. Em ambos os projetos, respeitou-se a geometria e as dimensões gerais dos modelos metálicos atualmente utilizados no LHM. Deste modo, a parte traseira não foi modificada. Na parte dianteira, no entanto, foram empregadas peças em compósito C/C, com algumas modificações necessárias para a montagem dos conjuntos.

O projeto do primeiro protótipo consiste na parte dianteira em compósito C/C, fixada com resina epóxi a um anel de rosqueamento em liga de alumínio aeronáutico, possibilitando a montagem da parte dianteira do modelo à sua traseira, tal como no projeto ilustrado da Figura 4.

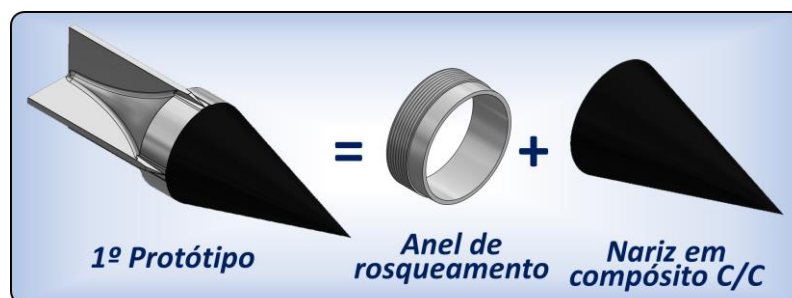


Figura 4. Projeto do primeiro protótipo de modelo hipersônico com partes em compósito C/C.

O projeto do segundo protótipo assemelha-se ao primeiro, ou seja, a parte dianteira em compósito C/C também foi fixada com resina epóxi ao anel de rosqueamento, porém nela foi introduzida um inserto cônico, igualmente fixado com resina epóxi. O inserto consiste em uma ponta metálica de aço SAE 4340. O projeto deste protótipo pode ser visto na Figura 5.



Figura 5. Projeto do segundo protótipo de modelo hipersônico com partes em compósito C/C.

Posteriormente, os protótipos foram manufaturados na Divisão de Mecânica (AME) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), através do processo de usinagem em torno mecânico, a partir de compósitos C/C utilizados na fabricação de gargantas de tubeiras.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, avaliou-se adesão dos componentes metálicos às partes em compósito C/C, que se mostrou adequada, possibilitando a montagem dos protótipos exibidos na Figura 6.

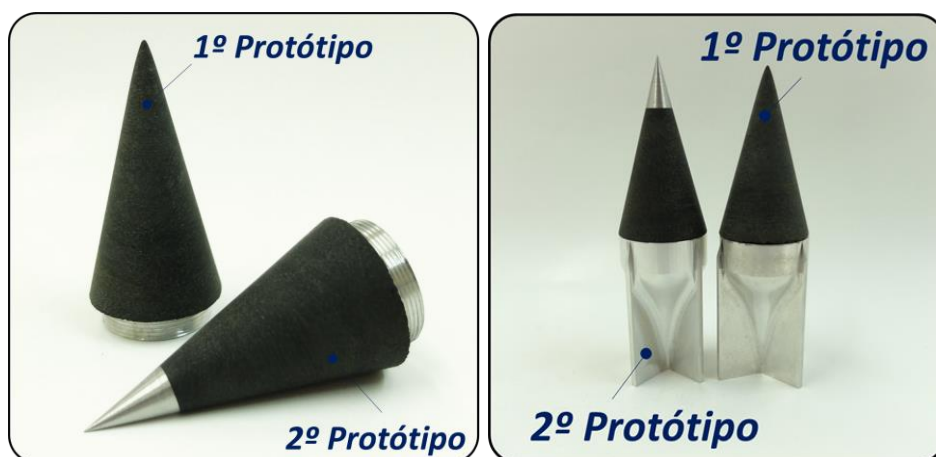


Figura 6. Protótipos preliminares de modelos hipersônicos com partes em compósito C/C.

Na Figura 6, observa-se que a ponta do primeiro protótipo apresenta uma geometria ligeiramente abaulada e com variações dimensionais em relação ao projeto inicial. No entanto, para o segundo protótipo, um inserto metálico foi empregado, em razão de limitações do processo de usinagem em se obter geometrias pontiagudas, principalmente em pequenos volumes de compósito C/C.

Acredita-se que durante um lançamento experimental no LHM, a ponta rombuda do primeiro protótipo, tendo sofrido modificações em sua geometria aerodinâmica, pode resultar na formação de uma onda de choque curva (*bow shock*) durante o deslocamento supersônico, ao invés de originar uma onda de choque oblíqua (*oblique shock*). Esta variação no perfil da onda de choque resultante influenciaria o fenômeno de formação das ondas de detonação, responsáveis por fornecer empuxo ao modelo hipersônico, afetando seu desempenho. Este fenômeno é comparado na Figura 7.

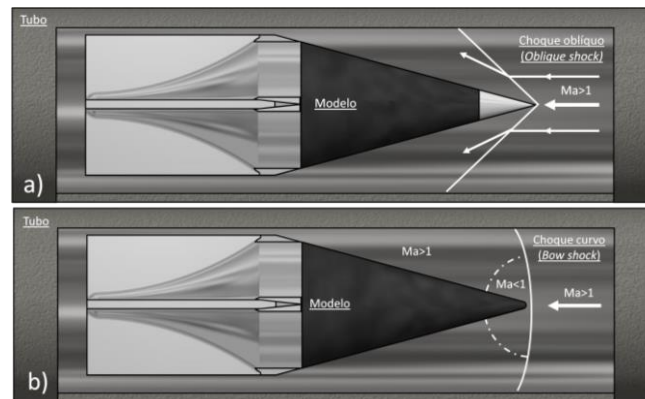


Figura 7. A) Representação esquemática da formação de uma onda de choque oblíqua no modelo hipersônico com inserto metálico de geometria pontiaguda. B) Representação esquemática da formação de uma onda de choque curva no modelo hipersônico com geometria rombuda.

Por se tratar de um projeto preliminar, a introdução de um inserto metálico adequadamente dimensionado no segundo protótipo, cujo material apresente maior massa específica que o compósito C/C, possibilita equilibrar a massa do modelo hipersônico, ajustando a posição de seus centros de massa e pressão.

Entre os possíveis materiais metálicos a serem empregados na confecção de insertos metálicos, destacam-se as superligas de Ni e Ni-Fe, por se tratarem de materiais de elevada resistência mecânica e capazes de suportar altas temperaturas.

Em uma etapa futura, serão realizados lançamentos experimentais no LHM. Assim, os protótipos desenvolvidos permitirão investigar a viabilidade do emprego de compósitos C/C em modelos hipersônicos, avaliando seu desempenho termomecânico sob condições específicas de lançamento.

Posteriormente, os protótipos de modelos hipersônicos com partes em compósito C/C desenvolvidos neste trabalho poderão ser aprimorados. Outra possibilidade, consiste na manufatura de um modelo hipersônico inteiramente em compósito C/C.

4. CONCLUSÃO

O projeto de modelos hipersônicos requer a aplicação de materiais que apresentem elevado desempenho termomecânico, tais como os compósitos carbono-carbono (C/C).

Neste trabalho, foram projetados e manufaturados dois protótipos de modelos hipersônicos com partes em compósito C/C, os quais permitirão investigar a viabilidade destes materiais neste tipo de aplicação e determinar seu desempenho através de lançamentos experimentais no LHM.

5. REFERÊNCIAS

- [1] BRUCKNER, A. P.; KNOWLEN, C. *The Ram Accelerator: Review of Experimental Research Activities in the U.S.* In: SEILER, F.; IGRA, O. *Hypervelocity Launchers*. Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
- [2] BORGES, M. M. *Estudo Experimental do Lançador Hipersônico de Massa*. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.
- [3] MANOCHA, L. M. *Sad.*, v. 28, p. 349-358, 2003.
- [4] CHUNG, D. *Carbon Composites*. Cambridge: Elsevier, 2017.
- [5] PARDINI, L. C.; GONÇALVES, A. J. *Aero. Tech. Man.*, v. 1, p. 231-241, 2009.