

## **MACH DIAMONDS: ESTUDO DOS DIAMANTES DE MACH PRESENTES NA PLUMA DOS MOTORES FOGUETE**

**João Pedro Barbosa Krugner<sup>1</sup>, Mariana Marciano Leite<sup>2</sup>, Nicolas Miquelin<sup>2</sup>, Heidi Korzenowski<sup>1</sup>, Israel da Silveira Rego<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade do Vale do Paraíba/Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Av. Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, [jpedrobkrugner@gmail.com](mailto:jpedrobkrugner@gmail.com); [heidi@univap.br](mailto:heidi@univap.br); [regoisrael@gmail.com](mailto:regoisrael@gmail.com)

<sup>2</sup>Bizu Tecnologias Aeroespaciais e Servicos LTDA, Av. Shishima Hifumi, 2911, Módulo S101, Urbanova - São José dos Campos-SP, Brasil, [mariana@bizu.space](mailto:mariana@bizu.space); [miquelin@bizu.space](mailto:miquelin@bizu.space)

### **Resumo**

Os *Mach Diamonds*, também conhecidos como diamantes de choque, são padrões luminosos característicos observados na pluma de escape de motores-foguete operando em regime supersônico. Esses padrões se formam devido à interação complexa entre ondas de choque e ondas de expansão que surgem quando há uma discrepância entre a pressão de saída do bocal do motor e a pressão do ambiente externo. Este trabalho tem como objetivo analisar a física envolvida na formação dos *Mach Diamonds*, com ênfase nos fenômenos de compressão e expansão que ocorrem ao longo da pluma de exaustão. Para isso, são abordados os princípios da dinâmica dos gases e os efeitos termodinâmicos associados ao escoamento compressível. Os resultados obtidos reforçam que os *Mach Diamonds* vão além de um simples efeito visual, desempenhando um papel fundamental como ferramenta diagnóstica na avaliação do desempenho e da eficiência dos motores-foguete, sendo úteis na identificação de regimes de operação fora do ideal e no ajuste de parâmetros de projeto de bocais.

**Palavras-chave:** *Mach Diamonds*, motores-foguetes, pressão

### **Introdução**

A propulsão de foguetes desempenha um papel central para a exploração espacial e transporte orbital. Em sistemas aeroespaciais, a eficiência do motor está diretamente ligada ao comportamento do escoamento dos gases no bocal. Motores-foguete, que operam em regime supersônico, exibem uma série de fenômenos característicos, dentre eles os *Mach Diamonds*, também conhecidos como diamantes de choque. Estes padrões periódicos visíveis na pluma de exaustão resultam da interação entre ondas de choque e ondas de expansão, formadas quando há discrepância entre a pressão de saída do bocal ( $P_e$ ) e a pressão ambiente ( $P_a$ ) (LOS ALAMOS SCIENCE, 1985; NASA, 1982; ZUCKER; BIBLARZ, 2002).

Do ponto de vista físico, os *Mach Diamonds* não se trata apenas de um efeito visual, mas sim de estruturas periódicas que indicam zonas alternadas de compressão e expansão no jato supersônico. O ponto central dessas estruturas é o chamado *Mach disk*, uma onda de choque normal localizada no eixo do jato, cuja posição e intensidade dependem da razão de pressões e da razão de áreas do bocal (LARSEN, 1991; SAS PUBLISHERS, 2025). Por essa razão, os diamantes de choque constituem uma ferramenta diagnóstica relevante, permitindo identificar se o motor opera em condição de expansão ideal e fornecendo parâmetros para o ajuste de projeto e otimização de desempenho (AIAA, 2019; MDPI, 2024).

Na cidade de São José dos Campos – SP, a empresa BIZU Space, sediada no Parque Tecnológico da UNIVAP, atua no desenvolvimento de tecnologias voltadas ao setor espacial, inserindo-se no contexto do chamado NewSpace brasileiro, um movimento caracterizado pela crescente participação de empresas privadas na pesquisa, inovação e aplicação de soluções aeroespaciais. O foco principal da empresa está no desenvolvimento e fabricação de motores-foguete a propelente líquido (MFPL). Nos diversos ensaios realizados, foi possível observar claramente a formação de diamantes de choque, que são efeitos de escoamento supersônico que aparecem em propulsores operando onde há atmosfera.

Assim, este trabalho tem como objetivo analisar o fenômeno dos *Mach Diamonds*, discutindo os aspectos físicos por trás de sua formação, sua importância diagnóstica no contexto de motores-foguete,

e o impacto técnico e simbólico que resultados como esses representam para o fortalecimento do Programa Espacial Brasileiro.

### Metodologia

O MFPL foi projetado para operar em configuração bipropelente, empregando peróxido de hidrogênio (90–91%) como oxidante e Jet-A (querosene aeronáutico) como combustível. Os propelentes são armazenados em tanques pressurizados independentes, garantindo alimentação segura e controlada por meio de linhas de suprimento dedicadas.

Os ensaios são conduzidos em uma bancada estática, preparada para suportar operações com propelentes líquidos pressurizados. Esse arranjo experimental inclui dispositivos de segurança, instrumentação mínima de monitoramento e supressor de ruído, assegurando condições adequadas para a realização dos testes. O supressor de ruído atua para diminuir níveis sonoros ao ambiente externo e como barreira contra possíveis fenômenos de ressonância acústica que poderiam comprometer a integridade estrutural do motor devido à elevada potência do sistema.

A figura 1, demonstra o teste da missão “Fogo no Parquinho”, no qual foi utilizado um motor-foguete de propulsão líquida de aproximadamente 150N de empuxo, realizados pela BIZU Space, foi possível observar a formação de *Mach Diamonds*. O fenômeno está intimamente ligado à dinâmica de escoamentos compressíveis e à eficiência do motor-foguete, fornecendo informações importantes sobre o regime de operação do sistema propulsor. Assim, essa observação experimental forneceu informações importantes sobre o regime de escoamento supersônico do motor e permitiu validar aspectos de projeto e desempenho, reforçando também a capacidade da engenharia nacional em executar experimentações reais e relevantes na área aeroespacial.

Figura 1 - Missão “Fogo no Parquinho”



Fonte: BIZU Space, 2025.

Após o êxito da missão “Fogo no Parquinho”, foi iniciado o desenvolvimento da missão “Pururuca”, que veio a se tornar o maior MFPL já concebido e testado in house por uma empresa brasileira, apresentando uma força aproximada de 3KN de empuxo. No ensaio mais recente, a visualização de múltiplos *Mach Diamonds* foi limitada pela presença do supressor de ruído. Mesmo assim, foi possível observar de forma clara um *Mach Diamond* nitidamente formado, fornecendo dados relevantes para o estudo do fenômeno e a validação dos parâmetros de operação do motor.

Para a documentação da pluma de exaustão, foi utilizado um sistema de registro visual composto por câmeras de segurança modelo IM3 C e *smartphones*, posicionados estrategicamente em torno da bancada. Essa configuração possibilitou a captura de múltiplos ângulos, permitindo tanto a análise qualitativa da formação dos *Mach Diamonds* quanto a detecção de eventuais comportamentos anômalos.

A figura 2, registrada durante o ensaio, evidenciou a coerência entre os resultados experimentais e os modelos teóricos de escoamento supersônico, confirmando a correspondência entre o comportamento observado da pluma e os padrões previstos.

Figura 2 - Missão “Pururuca”



Fonte: BIZU Space, 2025.

As imagens coletadas foram posteriormente analisadas com base em dois aspectos principais: (1) a observação qualitativa dos *Mach Diamonds*, visando correlacioná-los ao regime de escoamento supersônico do motor; e (2) a verificação de falhas operacionais ou instabilidades durante os testes.

Com base nesses dados experimentais, foram discutidos os aspectos físicos que levam à formação dos *Mach Diamonds*, a influência das condições de operação (pressão, razão de mistura) e o papel desses padrões como indicadores práticos de desempenho e regime de expansão do motor-foguete. A análise combinou observações empíricas com modelagem teórica, permitindo uma compreensão abrangente do fenômeno.

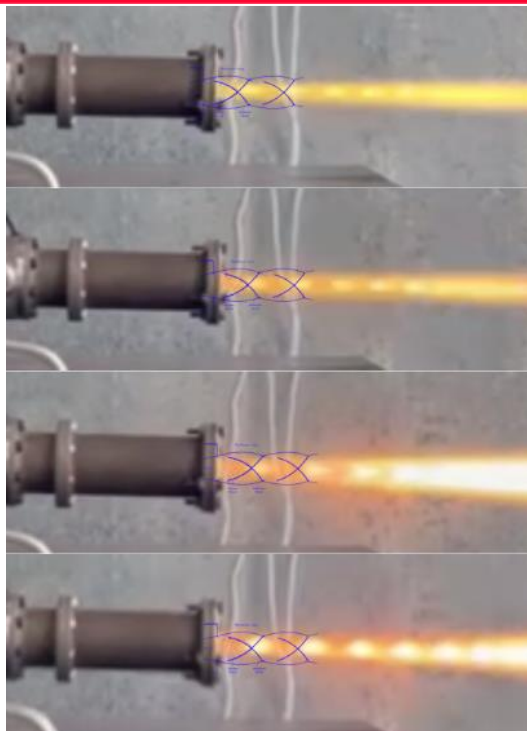
### Resultados

Através dos registros visuais nos testes das missões “Fogo no Parquinho” foi possível observar a formação de *Mach Diamonds* na pluma ao longo do eixo, com boa repetitividade em diferentes momentos da queima.

Para melhor observação, foi realizada sobreposição qualitativa de um esquema teórico de reflexão regular de um jato ligeiramente sub-expandido (adaptado de LOS ALAMOS SCIENCE, 1985), conforme demonstrado na figura 3, às imagens do ensaio, com ajuste visual satisfatório entre as posições dos choques refletidos e as regiões de alta luminosidade.

Figura 3: Reflexão regular em um jato ligeiramente sub-expandido adaptado de LOS ALAMOS SCIENCE (1985), plotado sobre a pluma de exaustão registrada durante o ensaio da missão “Fogo no Parquinho” em diferentes momentos (BIZU Space, 2025).

## A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO



Fonte: Os autores, 2025.

Na figura 4, a seguir, foi feita sobreposição qualitativa de esquema teórico de escoamento super expandido, evidenciando compatibilidade geométrica entre as frentes de choque e as regiões de maior intensidade observadas. O ensaio evidencia o uso do supressor de ruído acoplado ao conjunto de exaustão, conferindo alguns discos de *mach* dominante próximo à saída e redução da nitidez dos discos seguintes, com maior atenuação luminosa.

Figura 4: Esquemático teórico de estruturas de ondas que formam diamantes de choque em um escoamento super expandido (LOS ALAMOS SCIENCE, 1985) plotado sobre a pluma de saída do ensaio da missão “Pururuca” (BIZU Space, 2025)



Fonte: Os autores, 2025.

### Discussão

As imagens obtidas durante os testes do MFPL, nas missões “Fogo no Parquinho” e “Pururuca”, evidenciaram a formação de *Mach Diamonds*, permitindo a comparação entre parâmetros teóricos e observações reais. As variações na intensidade e consistência dos padrões foram associadas à estabilidade do escoamento e às condições operacionais do sistema bipropelente.

O número e espaçamento dos *Mach Diamonds* estão diretamente relacionados à razão de pressões  $P_e/P_a$ , enquanto o comprimento da primeira célula indica regimes de sub-expansão ou super expansão. Já a intensidade luminosa observada foi interpretada como um indicador da estabilidade da combustão: testes estáveis exibiram padrões regulares e bem definidos, enquanto irregularidades estiveram associadas a oscilações de pressão ou instabilidades na queima.

A análise comparativa mostrou que ensaios considerados estáveis tendem a apresentar *Mach Diamonds* simétricos e de espaçamento uniforme, em conformidade com modelos teóricos descritos por *Los Alamos Science (1985)*. Por outro lado, variações de diâmetro do jato e irregularidades na distribuição dos padrões reforçam a influência da diferença entre pressão de saída e pressão ambiente, afetando diretamente o desempenho propulsivo.

A figura 4 ilustra essa comparação entre os padrões observados experimentalmente e aqueles descritos na literatura, confirmando a adequação dos resultados aos modelos clássicos de jatos sub e super expandidos.

## Conclusão

O presente estudo teve como objetivo analisar a formação de *Mach Diamonds* na pluma de um MFPL, relacionando sua ocorrência com as condições de operação do bocal. A partir dos ensaios estáticos realizados pela BIZU Space, verificou-se que a intensidade e regularidade desses padrões variam conforme a razão de expansão, podendo servir como diagnóstico visual das condições de escoamento e combustão em motores-foguete.

Apesar das limitações — principalmente a ausência de testes em diferentes altitudes e de instrumentação quantitativa de pressão — os resultados destacam a relevância do uso dos *Mach Diamonds* como ferramenta prática de avaliação. Esses padrões podem contribuir para a otimização do desenvolvimento propulsivo, oferecendo subsídios para ajustes de projeto e operação. Recomenda-se a continuidade dos estudos com instrumentação mais precisa e em condições mais próximas às reais de voo, a fim de aprofundar a compreensão dos fenômenos envolvidos.

## Referências

Aerospaceweb. Available online: <http://www.aerospaceweb.org/question/propulsion/q0224.shtml> (accessed on 14 August 2015).

AIAA – American Institute of Aeronautics and Astronautics. *Fundamentals of supersonic and hypersonic flow: shock waves and expansion fans*. 2019.

LARSEN, J. *Supersonic jet flow and shock diamond formation*. SAS Publishers: São José dos Campos, 1991.

LOS ALAMOS SCIENCE. *Steady-state jets*. Number 12, Spring/Summer 1985. Disponível em: [https://library.sciencemadness.org/lanl1\\_a/lib-www/pubs/00326958.pdf](https://library.sciencemadness.org/lanl1_a/lib-www/pubs/00326958.pdf). Acesso em: 19 ago. 2025.

MDPI. *Visualization of shock diamonds in supersonic jets*. 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/journal/aerospace>. Acesso em: 19 ago. 2025.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. *Physics of rocket plumes*. 1982.

PRAVEEN, D. M. *Prediction of shock diamonds and Mach disk in an underexpanded air jet*. Old Dominion University, 2010. Disponível em: [https://digitalcommons.odu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1602&context=mae\\_etds](https://digitalcommons.odu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1602&context=mae_etds). Acesso em: 19 ago. 2025.

SAS PUBLISHERS. *High-speed jet phenomena and Mach disks*. 2025.

## A Ciência do **NANO** e seu impacto transformador no **MACRO**

ZUCKER, R. D.; BIBLARZ, O. *Aerodynamics and propulsion of supersonic jets*. Department of Aeronautics and Astronautics, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2002. Disponível em: <https://research-solution.com/uplode/books/book-46467.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2025.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à BIZU Space pelo apoio técnico e científico durante o desenvolvimento deste trabalho, bem como à Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP) pela infraestrutura disponibilizada e pelo incentivo à pesquisa.