



APRENDIZAGEM ATIVA EM ALTAS VELOCIDADES: CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DE UM TÚNEL DE CHOQUE POR ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2025.6127

Autores: FABIO RAIA, ROGÉRIO BEGLIOMINI DE ALENCAR, ADRIANO AFONSO MUNIZ BOTELHO, CAIO JUN TAKAHASHI, VINICIUS BARROS BRITO, DANILO MARCOS FRATE CIRINO, GABRIEL D. S. CORREIA, GEORGE LIN, PEDRO P. AZEVEDO, PEDRO HENRIQUE MINARI

Resumo: A propulsão hipersônica aspirada é de fundamental importância para a análise de resultados experimentais obtidos em ensaios realizados em túneis de vento de alta entalpia. Isso vem despertando interesse na comunidade científica devido aos resultados obtidos que interessam não apenas a instituições de pesquisa e universidades, mas também ao setor de defesa e ao setor empresarial produtivo. Nesse sentido, a academia vem adaptando e promovendo a inclusão de componentes curriculares que abordem diretamente o tema ou reservem espaços, modificando o conteúdo programático tradicional. Essa abordagem visa ampliar o conhecimento para acadêmicos, contribuindo para o desenvolvimento e domínio de problemas que envolvem propulsão hipersônica. A tecnologia para esse fim requer pessoal com expertise e um laboratório capaz de dar suporte a trabalhos científicos relevantes. Para tanto, tubos de choque no regime pulsado são construídos para experimentos acadêmicos, como ensaios e validação de modelos nu

Palavras-chave: Shock tube, hypersonic, propulsion, hypersonic speed

APRENDIZAGEM ATIVA EM ALTAS VELOCIDADES: CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DE UM TÚNEL DE CHOQUE POR ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA

1 INTRODUÇÃO

O túnel de choque é uma instalação de laboratório utilizada para gerar ondas de choque sob condições controladas em escoamentos hipersônicos, sendo amplamente empregado em estudos de aerodinâmica de alta velocidade, dinâmica dos gases, cinética química, transferência de calor e escoamentos compressíveis (PETERS, 2023; ANDERSON, 2003). A estrutura construída na Universidade, embora tecnicamente ainda classificada como tubo de choque, passa a ser denominada túnel de choque quando atinge velocidades superiores a Mach 5 (BIAGIONI, 2012). Tais instalações têm sido utilizadas em diversas áreas científicas e tecnológicas, como investigações médicas relacionadas a lesões por explosão, testes balísticos, materiais para reentrada atmosférica e validação de ignição de combustíveis (NING, 2015; LIUA et al., 2017; LU, 2024; HUETE et al., 2021). No contexto acadêmico, o túnel de choque supre a lacuna experimental existente na validação de modelos computacionais de escoamentos hipersônicos. O equipamento é formado por duas seções (*driver* e *driven*), separadas por membranas rompíveis instaladas no *Double Diaphragm System* (DDS), com disparo acionado por válvula solenóide quando se atinge uma diferença de pressões típica de 30%. A eficácia da membrana depende de material, espessura e geometria de fragilização (LYLE et al., 2017). Para garantir reprodutibilidade experimental, a fabricação das membranas deve ser precisa e uniforme, o que motiva este trabalho, centrado na sistematização da produção dessas membranas e na operacionalização do túnel. O domínio do disparo hipersônico insere a universidade em um cenário de pesquisa avançada em materiais e propulsão aeroespacial (LU, 2013). Além de validar simulações, o túnel poderá apoiar pesquisas de outras instituições, colaborar com a indústria e viabilizar a transferência de tecnologia. Do ponto de vista acadêmico, experimentos como os realizados no projeto 14-X (BRASIL, 2021; PEACE et al., 2018) contribuem para o desenvolvimento de competências em propulsão hipersônica, incluindo combustão supersônica tipo *scramjet*, voltada ao acesso ao espaço (SILVA, 2022). No Brasil, apenas três instituições possuem túneis semelhantes, sendo o pioneiro o IEAv, com três túneis operacionais voltados à pesquisa em propulsão hipersônica (MEIER, 2017; TORO et al., 2012). O Hipermack, da Universidade, alcança Mach > 5, com propagação de onda de choque provocada pelo rompimento da membrana e subsequente expansão para a seção de baixa pressão, gerando reflexões internas típicas desse regime. O projeto do Hipermack foi conduzido por alunos de Engenharia Mecânica – Mecatrônica, com tubos de aço inox 304L e dimensões internas de 75 mm, driver de 1303,70 mm e driven de 4852,35 mm (BOTELHO; TAKAHASHI, 2021). Ensaio preliminares com diafragmas de alumínio com ranhura em cruz validaram a operacionalidade do sistema (LYLE et al., 2017). Para pleno funcionamento como túnel de choque, são necessárias ainda as seguintes etapas: comissionamento com sensores, instalação de sistemas de aquisição de dados e construção de câmara de vácuo com tubeira de visualização. Localizado em laboratório com infraestrutura dedicada, o túnel aguarda definição de plano de manutenção e estimativa de custo por ensaio. Este trabalho tem como objetivos apresentar os primeiros testes de operação e o processo sistemático de fabricação das membranas, estanqueidade do sistema, adequação do painel de controle e melhorias nas conexões.

2 METODOLOGIA - TÚNEL DE CHOQUE

O túnel de choque foi construído com recursos próprios da Universidade e da Escola de Engenharia, ocupando uma área de 12 m² no laboratório de motores. A construção envolveu alunos de graduação, servidores dos setores de manutenção civil e elétrica, e apoio técnico terceirizado na soldagem dos tubos. O projeto teve início em 2020 e foi concluído em 2023, tomando como referência o túnel de choque do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), modelo T1 (CORREIA, LIN e AZEVEDO, 2020). A concepção artística do equipamento encontra-se representada na Figura 4, enquanto a estrutura real montada e em operação é mostrada na Figura 5 (MINARI, 2024). O túnel é constituído por seções com diâmetro interno constante de 75,0 mm e paredes de 5,0 mm, sendo o driver com 1303,7 mm de comprimento e o *driven* com 4852,35 mm (BOTELHO; TAKAHASHI, 2021). Essas seções são interligadas por flanges circulares segundo a norma ANSI B16, e as extremidades são vedadas com flanges cegas. O DDS, posicionado entre o driver e o *driven*, é mostrado na Figura 6. Os flanges do *driven* foram preparadas para receber sensores de pressão e temperatura, cujas posições e dimensões estão representadas na Figura 7 (ALENCAR, 2023). Para controle operacional, foi construído um painel contendo manômetros, válvulas, registros e uma bomba de vácuo. O gás utilizado na região de alta pressão é o hélio, e na baixa pressão, ar seco. O driver é montado sobre dois anéis deslizantes, o que permite seu deslocamento para facilitar a troca de membranas

Figura 4 - Concepção artística do túnel de choque construído na Escola de Engenharia



Fonte: CORREIA, LIN e AZEVEDO (2020).

Figura 5. Construção do túnel finalizada com painel de controle.



Fonte: MINARI (2024).

A Figura 5 indica, na extremidade direita, os centralizadores do driver, a flange de tomada de pressão com válvula de alívio e a flange tipo cego. A Figura 6, mostra o posicionamento do DDS entre o *driver* e *driven*.

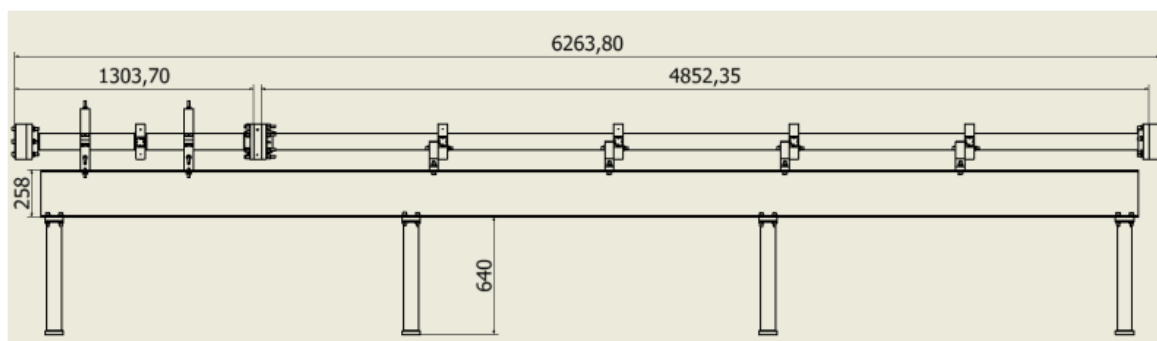
Figura 6 - Desenho esquemático e seções do túnel de choque



Fonte: CORREIA, LIN e AZEVEDO (2020).

A Figura 7 mostra as dimensões do túnel de choque e, em cada flange do *driven*, foi deixado um espaço para a colocação de tomadas de pressão e sensores de temperatura.

Figura 7 – Dimensões (em milímetros) do túnel de choque

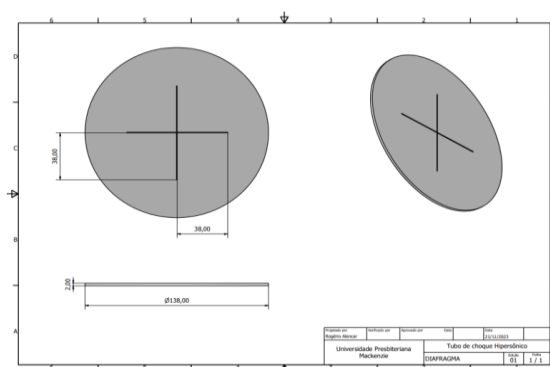


Fonte: ALENCAR (2023).

2.1 Fabricação das membranas

As membranas foram confeccionadas em liga de alumínio 6061, com 138,0 mm de diâmetro e 2,0 mm de espessura, recortadas de chapas de 300,0 mm × 300,0 mm. O desenho técnico inicial está apresentado na Figura 8 (ALENCAR, 2023). A ruptura da membrana é promovida por sulcos usinados na superfície da peça, com geometria em cruz (+), como sugerido na literatura (LYLE *et al.*, 2017). Essa configuração, também utilizada em estudos do IEAv, facilita uma abertura uniforme no momento do disparo.

Figura 8. Primeiro projeto da membrana de alumínio



Fonte: ALENCAR (2023)

Para viabilizar a fabricação seriada, foi projetado um dispositivo de centralização que aparece na Figura 9, o qual permite o corte e a usinagem padronizada dos discos.

Figura 9 - Etapas de Fabricação da membrana, corte e usinagem



Fonte: ALENCAR (2023)

Alternativamente, também foram consideradas geometrias em forma de ípsilon (Y) e asterisco (*), ilustradas na Figura 10 (ALENCAR, 2023).

Figura 10. Concepção artística de possíveis geometrias de fragilização, para rompimento da membrana



Fonte: ALENCAR (2023)

A realização do sulco foi feita com broca de centro de 2,5 mm, com afiação para corte lateral, a 800 rpm e avanço de 5,0 mm/s. O controle da profundidade, de aproximadamente 20% da espessura da peça, foi feito com relógio comparador Mitutoyo ID-SX, enquanto a perpendicularidade dos sulcos foi avaliada com projetor de perfil Digimess, conforme ilustrado na Figura 11 (ALENCAR, 2023).

Figura 11. Controle dimensional da ferramenta de corte



Fonte: ALENCAR (2023)

2.1 Túnel de choque e operação

Do ponto de vista operacional, túneis de choque requerem rotinas de inspeção rigorosas, como verificação de flanges, parafusos e conexões, antes e após os disparos

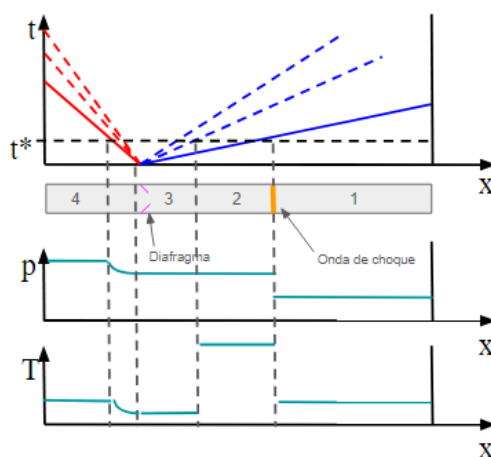
experimentais (LI, 2007). Esses procedimentos são acompanhados do uso obrigatório de equipamentos de proteção individual (EPIs), dada a natureza energética dos fenômenos envolvidos. A propagação da onda de choque ocorre quando a membrana entre driver e driven se rompe, impulsionando o gás da região de alta para a de baixa pressão. Durante esse processo, forma-se também uma superfície de contato entre os dois gases, que se propaga com características próprias. Além disso, é possível estudar as reflexões internas e ondas secundárias dentro do túnel. O comportamento das ondas no interior do túnel está representado esquematicamente na Figura 12, que mostra a distribuição das regiões de pressão e temperatura ao longo do comprimento do tubo (Adaptado de BEM-DOR, 2000).

A dinâmica é descrita em quatro regiões principais:

- Região 1: gás não perturbado no *driven*, com pressão, temperatura e densidade iniciais e baixas.
- Região 2: gás no *driven* pós-choque, com salto abrupto nos parâmetros termodinâmicos devido à compressão.
- Região 3: gás expandido no driver após a ruptura da membrana, com queda de pressão e temperatura em relação à região 4, mas ainda superiores às da região 1.
- Região 4: gás não perturbado no driver, representando o estado original de alta energia antes do disparo.

A interface entre as regiões 2 e 3 corresponde à superfície de contato, na qual ocorre troca de massa sem variação brusca de pressão. O gráfico de pressão mostra a localização da onda de choque (entre as regiões 1 e 2) e da onda de expansão (região 3), evidenciando a conversão de energia em escoamentos compressíveis. Para caracterizar quantitativamente essas transições, aplicam-se as condições de salto de Rankine-Hugoniot, que obedecem aos princípios de conservação de massa, quantidade de movimento e energia (ANDERSON, 2003; BEM-DOR, 2000; LI, 2007). Essas equações permitem determinar as variáveis termodinâmicas de cada região a partir das condições iniciais de pressão e temperatura. Nos testes iniciais, utilizou-se gás argônio, e a velocidade da onda de choque foi estimada com base em fórmulas analíticas Equações (1) e (2). A validação experimental desses resultados requer ainda a instrumentação do túnel com sensores de pressão e temperatura — etapa prevista para os desenvolvimentos futuros deste projeto

Figura 12 – Concepção artística das regiões da onda de choque no túnel de choque.



Fonte: Adaptado de BEM-DOR (2000).

$$M_{oc} = \sqrt{\frac{2(\gamma^2-1)}{\gamma+1} \left(\frac{p_4}{p_1} - 1 \right) + 1} \quad (1)$$

$$(velocidade do som no driven) \quad a = \sqrt{\gamma R_s T} \quad (2)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{(\gamma_1+1)M_{oc}^2}{2+(\gamma_1-1)M_{oc}^2} \quad (3)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{2\gamma_1}{\gamma_1+1} (M_{oc}^2 - 1) \quad (4)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = 1 + \frac{2(\gamma_1-1)}{(\gamma_1+1)^2} \frac{\gamma_1 M_{oc}^2 + 1}{M_{oc}^2} (M_{oc}^2 - 1) \quad (5)$$

onde M é o número de Mach. A troca de simbologia de p para P é devido à escolha de referenciais. Com respeito às regiões 2 e 3, as relações *shock-jump* dados por:

$$v_3 = v_2 \quad (6)$$

$$p_3 = p_2 \quad (7)$$

A relação *shock-jump* principal entre as regiões 1 e 4 dada pela Equação 6.

$$\frac{p_4}{p_1} = \left[1 + \frac{2\gamma_1}{\gamma_1+1} (M_{oc}^2 - 1) \right] \left[\frac{1}{1 - \frac{\gamma_4-1}{\gamma_4+1} \left(M_{oc}^2 - \frac{1}{M_{oc}^2} \right)} \right]^{\frac{2\gamma_4}{\gamma_4-1}} \quad (8)$$

A Equação (8) é utilizada, também, para determinar as condições de *shock-jump* das regiões 3 e 4 (BEM-DOR, 2000).

A operação do túnel exigiu o uso de gás Hélio, pois se mostra apropriado devido à diferença de pressão nas seções, mas também por se tratar de um gás leve, o que significa que suas partículas se movem mais rapidamente em comparação a outros gases mais pesados, que por fim irá gerar um escoamento hipersônico no túnel de choque. (ALENCAR, 2023). Exemplificando, o quadro 1 indica cálculo de Mach para Hélio considerando pressão alta (P_4): variando de 3,0 a 7,0 MPa, pressão baixa p_1 0,081 MPa. Relação de calores específicos $\gamma = 1,66$ para o hélio. Temperatura assumida: 300,0 K (para estimar a velocidade do som). Nesse caso, recorreu-se a uma estimativa teórica baseada nas condições iniciais do fluido (pressão, temperatura) e na proporção de gases em cada seção do tubo.

$$p_0 = p_4 (\gamma + 12\gamma)^{\gamma-1\gamma} \quad (9)$$

p_4 é a pressão inicial do driver;

γ é a razão de capacidades térmicas do gás no driver

$$M_s \approx \sqrt{\frac{p_0}{p_1} \left(\frac{\gamma_1+1}{2\gamma_1} \right)} \quad (10)$$

Velocidade do choque: Com a velocidade do som no *driven* c_1 (supondo 343,0 m/s, com temperatura próxima a 20°C), a velocidade do choque é:

$$U = M_s \cdot c_1 \quad (11)$$

Quadro 1. Comparação entre velocidades estimadas com Hélio.

p_{driver} (MPa)	p_0 (MPa)	M_s	Velocidade do Choque (m/s)
3,0	5,2	7,4	2548,0
4,0	7,0	8,6	2943,0
5,0	8,7	9,6	3291,0
6,0	10,4	10,5	3607,0
7,0	12,2	11,4	3897,0

Fonte: acervo do autor

Quadro 2. Comparação entre velocidades estimadas com gás Argônio.

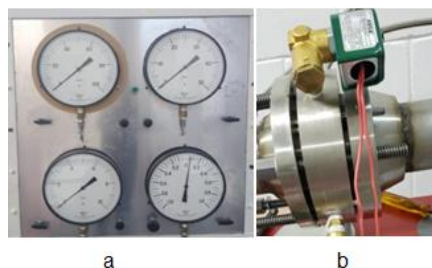
p_{driver} (MPa)	p_0 (MPa)	M_s	Velocidade do Choque (m/s)
3,0	5,244	7,4	2553,0
4,0	6,992	8,6	2949,0
5,0	8,740	9,6	3295,0
6,0	10,488	10,5	3610,0
7,0	12,236	11,4	3902,0

Fonte: acervo do autor

O teste tem início com a evacuação do *driven*, por meio da bomba de vácuo. Esse procedimento se completa com aproximada mente 10,0 min quando o manômetro indica que o driven está com 20% da pressão atmosférica. Nesse instante o registro de proteção do manômetro do vácuo é acionado para proteção. A operação do túnel de choque, se dá por meio do controle e manuseio de um painel com manômetros e válvulas capazes de apresentar o estado de pressão e vácuo no interior do túnel, permitindo controlar a pressurização do *driver*, *driven* e DDS. Existe um procedimento de segurança na manobra dos gases, antes do disparo, com a finalidade de não danificar os instrumentos. Estabelecendo as pressões adequadas, um botão de disparo é acionado para dar início ao experimento.

Ainda, segundo os trabalhos apresentados, a pressurização do DDS e do driver deve ser feita em conjunto. Quando ocorrer 35,5 MPa no DDS, a válvula de segurança deve ser fechada e, prosseguir com a pressurização até 70,9 MPa no driver, com *driven* em vácuo. Quando essa relação é atingida, o solenóide da válvula de alívio, no DDS, é acionado. Essa ação provoca o rompimento da membrana, sinalizado por um forte estampido, o teste tem duração de 0,1 s. Após esse tempo, dá-se por encerrado o experimento. A onda de choque se propagou e a pressão de retorno foi equivalente a pressão no driver. O pós teste se faz com a depressurização do túnel por meio de um registro ligado ao driver. A Figura 13 mostra o painel com os equipamentos citados (a) e o detalhe do DDS (b) com o solenoide. A função do DDS é aliviar a pressão na seção intermediária para disparar o túnel de choque. O acionamento é feito por uma chave de contato momentâneo instalada no painel.

Figura 13 - Painel de operação do túnel de choque com as válvulas de acionamento, botão de disparo e manômetros

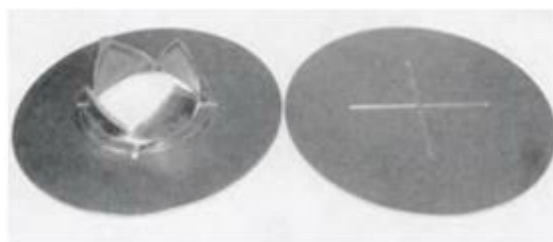


Fonte: BRITO (2022), CIRINO (2023).

3 Resultados e discussão

O primeiro disparo em um túnel de choque em uma Universidade não pública foi realizado em dezembro de 2023 para testes de membranas de alumínio. Com configuração geométrica discutida, o rompimento de membranas, deveria se apresentar como mostrado na Figura 14, onde as “pétalas” apresentam abertura uniforme e sem deformações anômalas no disco de alumínio.

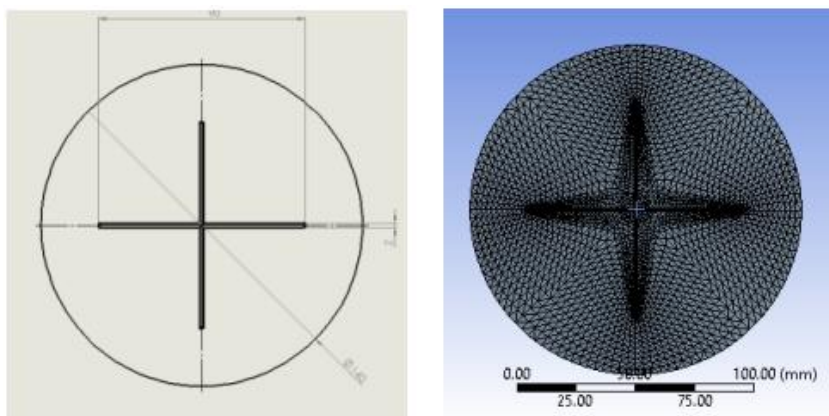
Figura 14. Membrana antes e após o rompimento. Os setores se separam formando um aspecto de “pétalas”.



Fonte: ALENCAR (2023)

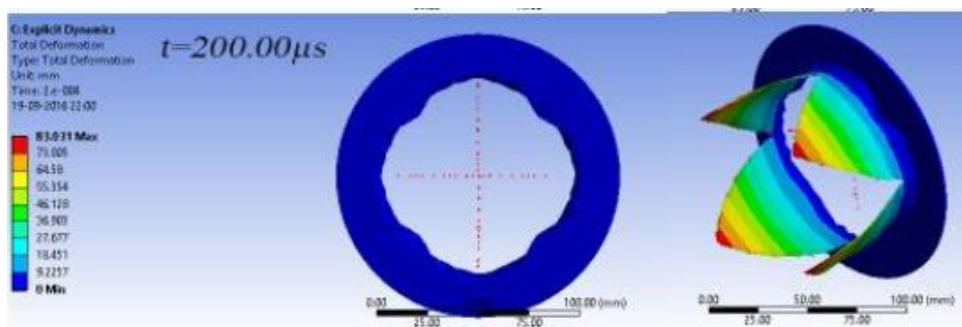
Estudos recentes, por meio de simulação numérica (LYLE, 2017), Figuras 14 e Figura 15 indicam que a topografia do rompimento da membrana segue o padrão experimental e previa que após o disparo, o rompimento iria apresentar a dinâmica de ruptura estabelecida com aspecto semelhante a “pétalas”.

Figura 15. Modelo em elementos finitos com malha otimizada



Fonte: LYLE (2017)

Figura 16. Dinâmica do rompimento da membrana



Fonte: LYLE (2017)

No primeiro teste – disparo – foram utilizadas duas membranas no DDS. Elas podem ser vistas na figura 17. Elas não apresentaram uma uniformidade geométrica e percebe-se amassamentos incomuns e não vistos na literatura. É possível que algumas ocorrências podem ter influenciado a má “formação das pétalas”, tais como: vazamentos na região do DDS, na região onde futuramente serão colocados os sensores depressão afetaram a pressurização adequada do sistema e de certa forma podem ter comprometido a estabilidade e a consistência dos resultados dos diafragmas. Estima-se que a velocidade da onda de choque tenha atingido

Figura 17 - Diafragma após o disparo.



Fonte: ALENCAR (2023)

4 Conclusão

A construção e a operação do túnel de choque Hipermack foram viabilizadas por um esforço coletivo envolvendo alunos, professores, coordenação, universidade e instituto, além da integração de conteúdos curriculares específicos, como as disciplinas optativas Princípios de Propulsão I e II. Com a futura inclusão de componentes como escoamentos compressíveis e mecânica computacional, o curso passa a oferecer uma base acadêmica sólida para experimentação e análise de escoamentos hipersônicos. Entre os resultados mais relevantes destaca-se o desempenho das membranas de alumínio nos primeiros disparos, cuja ruptura formou “pétalas” de maneira sincronizada, em conformidade com a literatura (ALENCAR, 2023). Esse comportamento indica adequação dos procedimentos operacionais e valida a proposta de fabricação desenvolvida. A experiência mostrou que, mesmo em ambiente de graduação, é possível conduzir experimentos sofisticados, criando oportunidades para trabalhos de conclusão de curso e projetos de iniciação científica. A continuidade do projeto já contempla a construção de sensores piezoelétricos para medição de pressão na seção driven e, assim, estabelecer uma ponte com a validação de modelos computacionais. Está

também prevista a implementação de uma câmara de amortecimento com janela de observação óptica, compatível com técnicas de visualização como a fotografia de Schlieren. Além das melhorias estruturais, está planejado o uso de diafragmas com diferentes materiais e geometrias, que servirão para manter o sistema em operação contínua. Apesar de não haver ainda uma estimativa formal de custo por disparo, a operação revelou-se funcional, mesmo diante de desafios como vazamentos no DDS e conexões soltas, os quais foram contornados sem prejuízo aos ensaios. No experimento analisado, os dois diafragmas foram rompidos: o que se encontrava entre o driver e o DDS apresentou uma ruptura eficiente com formação clara de “pétalas”, enquanto o outro, entre o *driven* e o DDS, apresentou deformações mais grosseiras. No entanto, nenhuma das membranas liberou fragmentos metálicos que comprometessem a estrutura do túnel, conforme evidenciado na Figura 13 (ALENCAR, 2023).

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a colaboração incessante do Professor Dr. Marcos Antônio Sala Minucci que proporcionou e incentivou essa pequena legião de alunos a realizarem esse projeto.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, Rogério Begliomini de. **Operacionalização do túnel de choque hipersônico do Mackenzie**. 2023. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo

ANDERSON, John D. **Modern Compressible Flow**, Second Edition. McGraw-Hill series in aeronautical and aerospace engineering, New York . 2003.

BEM-DOR, G.; IGRA, D.; ELPERIN, T. **Handbook of shockwaves**. 1. ed. Estados Unidos da América: 2000. v. 1.

BIAGIONI, Leonardo. SCORTECCIF, Fabrizio. PAGANUCCI, Fabrizio. Experimental characterization for hypersonic testing. **American Institute of Aeronautics and Astronautics** - AIAA 98-3131, 2012. Disponível em:< <https://arc.aiaa.org/doi/epdf/10.2514/6.1998-3131>> Acesso em 21/12/2024

BOTELHO, Adriano Afonso Muniz. TAKAHASHI, Caio Jun. **Construção, montagem e teste do túnel de choque hipersônico do Mackenzie**. 2021. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo

BRASIL, Ministério da Ciência tecnologia e inovações. **Primeiro teste de voo do motor aeronáutico hipersônico 14-X é realizado em Alcântara**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/aeb/pt-br/assuntos/noticias/primeiro-teste-de-voo-do-motor-aeronautico-hipersonico-14-x-e-realizado-em-alcantara>. Acesso em: 15 de abr. 2024.

BRITO, Vinicius Barros. **Manual de operação do túnel de choque hipersônico do Mackenzie**. 2023. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo.

CIRINO, Danilo Marcos Frate. **Conclusão da montagem do túnel de choque hipersônico do Mackenzie**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo. 2023

CORREIA, Gabriel D. S.; LIN, George; AZEVEDO, Pedro P. P. **Projeto de um túnel de choque de área transversal constante**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo. 2020.

HUETE, CUADRA, VERA, URZAY, Thermochemical effects on hypersonic shock waves interacting with weak turbulence. **Physics of Fluids**. v.. Aug. 2021. Disponível em: <<https://pubs.aip.org/aip/pof/article-abstract/33/8/086111/1080394/Thermochemical-effects-on-hypersonic-shock-waves?redirectedFrom=fulltext>>. Acesso em: 18/12/2024

LI, q. LIU, d. TEMPLETON, d RAJU, b. A shock tube–based facility for impact testing. Experimental Techniques. **Society for Experimental Mechanics**. Ago. 2007. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1111/j.1747-1567.2007.00156.x>. Acesso em 19/12/2024

LIUA, Menglong. Lissendenb, Cliff, J. Wangc, Qiang. Sua, Zhongqing. Zhange. Qingming. Longe, Renrong. Characterization of damage in shielding structures of space vehicles under hypervelocity impact. **Procedia Engineering**. v.188. p. 286 – 292. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817320386?via%3Dihub>>. Acesso em: 15/12/2024

LU, Qin. HU, Longfei. LUO, Xiaoguang. JIANG, Guiqing. Development of ceramic composite and hot structures for hypersonic vehicles. . v. 41, n. 2. p. 251-260. 2013, fev.1. 2013. Disponível em <<https://www.ingentaconnect.com/content/ccs/jccs;jsessionid=cbb9tiosdkd93.x-ic-live-02>>. Acesso em: 18/12/2024

LYLE, J, Livil . GUNA, K, R . KUMAR, Pradeep . SUNDARARAJ, Aldin, Justin. Rupture dynamics of shock-tube diaphragm. In: 2017 First International Conference on Recent Advances in **Aerospace Engineering** (ICRAAE). Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/323355112_Rupture_dynamics_of_shock-tube_diaphragm> Acesso em : 15/12/2024.

MEIER, Ricardo. **Airway**, 10 abril 2017. Disponível em: <<https://www.airway.com.br/fab-planeja-aviao-hipersonico-nao-tripulado-para-2020/>>. Acesso em: 22 novembro 2021.

MINARI, Pedro Henrique. **Simulações de ondas de choque no túnel de choque da Universidade presbiteriana Mackenzie**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo. 2024

NING ,Ya-Lei . ZHOU. Yuan-Guo . Shock tubes and blast injury modeling. . V.18, p. 187-1983. Aug. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1008127515001005?via%3Dihub>>. Acesso em: 21/12/2024

PEACE, James, T. Pulimidi, Rohit, R. Umapathy, Nirmal, Kumar. Singh, Mohit, K. Lu, Frank, K. Mid-Tier Defense Against Hypersonic Glide Vehicles During Cruise. In: 22nd AIAA **International Space Planes and Hypersonics Systems and Technologies Conference**, set. 2018. Disponível em: <<https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2018-5254>>. Acesso em: 13/12/2024

PETERS, ZHANG, . CHEN, , OTT, . OSES, .. Mccue, . POLLOCK , Prameela, . Materials design for hypersonics. **Nature Communications**. 2023. Disponível em: . Acesso em 21/12/2024

SILVA, Elder Samuel Taveira da. **Estudos sobre o uso de um motor scramjet como estágio atmosférico em um veículo lançador de nanossatélites**. Dissertação (Engenharia aeroespacial), Universidade Federal do Rio Grande do Norte Escola de Ciências e Tecnologia. Rio Grande do Norte. p. 6. 2022. Disponível em: Acesso em 10/05/2024.

TORO, P. G. P.; MINUCCI, M. A. S.; ROLIM, T. C.; FOLLADOR, R. C.; SANTOS, A. M.; CAMILLO, G. P.; BARRETA, L. G. Brazilian 14 – X hypersonic aerospace vehicle project. In: 18th AIAA/3AF International Space Planes and Hypersonic **Systems and Technologies Conference** 24-28 September 2012, Tours, France

ACTIVE LEARNING AT HIGH SPEEDS: CONSTRUCTION AND OPERATION OF A CRASH TUNNEL BY MECHANICAL ENGINEERING STUDENTS

abstract

Aspirated hypersonic propulsion is of fundamental importance for the analysis of experimental results obtained in tests carried out in high-enthalpy wind tunnels. This has been arousing interest in the scientific community due to the results obtained that are of interest not only to research institutions and universities, but also to the defense sector and the productive business sector. In this regard, academia has been adapting and promoting the inclusion of curricular components that directly address the topic or reserve spaces by modifying traditional programmatic content. This approach aims to increase knowledge for academics, contributing to the development and mastery of problems involving hypersonic propulsion. The technology for this purpose requires personnel with expertise and a laboratory capable of supporting relevant scientific work. To this end, shock tubes in the pulsed regime are built for academic experiments, such as testing and validation of numerical models in high-speed flows. The pulse or trigger is produced by a mechanism by which a membrane is ruptured due to the movement of gases at high and low pressure. This paper shows the development and results of the work carried out between 2018 and 2023 on the construction and operation of the shock tube and aims to build a shock tube and evaluate aluminum metal membranes. The construction of the shock tube was based on the material characteristics and geometric dimensions of the existing tube at the Institute for Advanced Studies (IEAv) of the Brazilian Air Force. The first tests with aluminum membranes ruptured as expected, presenting the geometric characteristics for shots of this nature.

Keywords: Shock tube, hypersonic, propulsion, hypersonic speed

