

APERFEIÇOAMENTO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE MEMBRANAS METÁLICAS PARA EXPERIMENTOS EM TUBO DE CHOQUE HIPERSÔNICO

Universidade Presbiteriana Mackenzie

Coordenadoria de Fomento à Pesquisa - Pró-reitoria de Pesquisa e
Pós-Graduação

Carolina Quercio de Barros Pereira
Apoio: PIVIC Mackenzie

Fábio Raia

Escola de Engenharia

Unidade acadêmica e/ou Programa de Pós-graduação do Orientador ²

10418321@mackenzista.com.br
fabio.raia@mackenzie.br

RESUMO

O texto a seguir trata-se majoritariamente dos estudos de membranas, ou diafragmas, de tubos hipersônicos, equipamento que simula ondas de choque e escoamento hipersônicos, sendo de grande valor para a pesquisa aeroespacial. O tubo contido na universidade foi reparado de diversas formas. Desde válvulas até flanges, vários vazamentos foram identificados e tiveram que ser arrumados. No âmbito teórico, compreendeu-se mais da dinâmica de funcionamento do tubo, tendo um maior foco nas membranas: como elas devem se romper, as fórmulas por trás disso e novas possibilidades de estudos, variando as geometrias de corte. Além disso, estudou-se a possibilidade de instalação de novos sensores. No final da pesquisa, foi realizado um disparo, o momento em que finalmente o tubo executa sua principal função. Embora o resultado não tenha sido o esperado, novas ideias surgiram após o teste, focando-se principalmente nas válvulas solenoides e na profundidade do corte da membrana. Estudos envolvendo essa tecnologia são extremamente importantes – representando um maior interesse pela pesquisa aeroespacial e a infraestrutura que a universidade possui, mas que é subutilizada.

Palavras-chave: tubo hipersônico, ondas de choque, diafragma, membrana.

ABSTRACT

The following text is mainly about the study of membranes, or diaphragms, of hypersonic tubes, equipment that simulates shock waves and hypersonic flow, being of great value for aerospace research. The tube at the university was repaired in several ways. From valves to flanges, multiple leaks were identified and had to be fixed. From a theoretical perspective, a deeper understanding of the tube's operating dynamics was achieved, with greater focus on the membranes: how they should rupture, the formulas behind this process, and new study possibilities by varying cutting geometries. In addition, the possibility of installing new sensors was analyzed. At the end of the research, a shot was carried out—the moment when the tube finally performs its main function. Although the result was not as expected, new ideas emerged after the test, mainly focusing on solenoid valves and the membrane cutting depth. Studies involving this technology are extremely important, as they represent growing interest in aerospace research and the infrastructure that the university possesses, which is, unfortunately, underutilized.

Keywords: hypersonic tube, shock waves, diaphragm, membrane.

1. INTRODUÇÃO

O campo de pesquisa aeroespacial vem se tornando cada vez mais relevante da atualidade. A aviação representa 3,9 % do PIB global, movimentando cerca de US\$ 4,1 trilhões em 2023 e gerando cerca de 86,5 milhões de empregos diretos e indiretos (Poder360, 2024). Dessa forma, torna-se imprescindível que seja desenvolvido cada vez mais tecnologia nessa área. A tecnologia aeroespacial está no cerne de inovações que vão muito além do que podemos imaginar... ela não apenas expande nosso conhecimento sobre o cosmos, mas também melhora a qualidade de vida na Terra (Vogliotti, 2024).

A utilização de tubos de choque para esse fim já é há muito tempo empregada no país, sendo o Instituto de Estudos Avançados (IEAv) o principal referencial brasileiro na área. O laboratório de pesquisas do IEAv está equipado com 3 tubos de choque e desenvolve a pesquisa do sistema de propulsão hipersônica aspirada baseada em combustão supersônica (TORO et al., 2012). O objetivo do atual trabalho é reativar o uso de um dispositivo semelhante, sendo também necessário realizar reparos, para assim serem feitos testes com a utilização de membranas metálicas.

Essas peças separam as duas partes de um tubo hipersônico: o *driver* – trecho de alta pressão; e o *driven* – trecho de baixa pressão, que são conectadas por duas seções chamadas de DDS – *Double Diaphragm System*, onde são posicionadas duas membranas, também referidas como diafragmas, que são sempre trocadas após cada disparo. O equipamento é majoritariamente composto de Aço Ino 304 e chega a alcançar 6 metros – 1,2 metros do driver e 4,8 metros do driven.

No entanto, o tubo hipersônico encontrava-se deteriorado, não tendo sido formalmente utilizado há anos. Seria necessária a execução de uma limpeza além de reparos na tubulação, verificação de vazamento nos flanges e melhor indicação de funcionamento. Após isso ser realizado, poder-se-ia focar na fabricação das membranas metálicas e seu subsequente teste. Um tópico de grande interesse seria também variar os formatos dos rasgos das membranas, estudando qual modelo seria o mais eficiente.

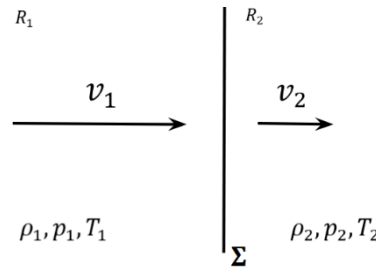
Desde os primeiros experimentos realizados no equipamento, demonstrou-se a capacidade de serem feitos disparos com número de Mach superior a 5, ou seja, uma gama de trabalho que vai até no mínimo 5 vezes a velocidade do som (343 m/s ou 1.235 km/h). Poucas instituições estudantis no país possuem um semelhante potencial de estudo. Dessa forma, o objetivo desse trabalho também, de certa forma, voltar as atenções para esse ramo

em ascensão, considerando a baixa importância dada para uma tecnologia complexa que vem sendo cada vez mais relevantes, principalmente visando a produção de motores com tecnologia da combustão supersônica *scramjet* (veículos aeroespaciais que usam sistema de propulsão aspirada baseada em combustão, a ser utilizada na fase atmosférica terrestre) (SILVA, 2022).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O funcionamento de um tubo hipersônico se resume a região de *upstream* e a região de *downstream*.

Imagem 1 – Mudança de velocidade entre as sessões



Fonte: Adaptado de BEM-DOR (2000).

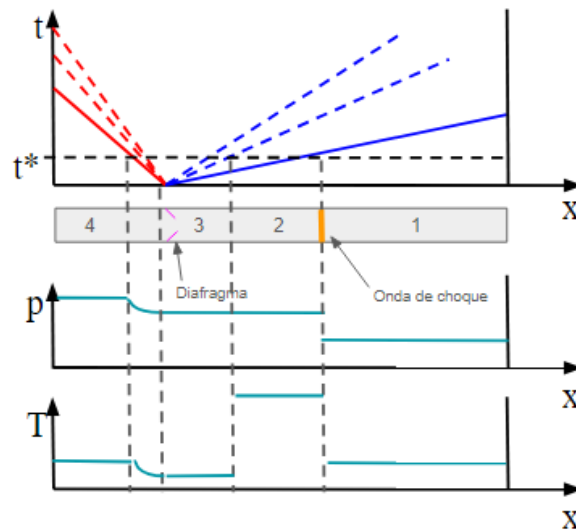
Como o tubo é isolado – nota-se a importância de não haver nenhum tipo de vazamento; deve haver uma conservação da massa, momento e energia durante todo o experimento. Ou seja, pode-se resumir as principais relações entre o *driven* e o *driven* nas chamadas relações “*shock-jump*”, descritas abaixo.

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2, \quad (1)$$

$$p_1 + \rho_1 v_1^2 = p_2 + \rho_2 v_2^2, \quad (2)$$

$$h_1 + \frac{1}{2} v_1^2 = h_2 + \frac{1}{2} v_2^2. \quad (3)$$

Imagem 2 - Representação artística da propagação da onda de choque, contendo a variação da pressão e temperatura dependendo da posição.



Fonte: Adaptado de BEM-DOR (2000).

O *upstream*, no *driven*, apresenta baixas pressões, tendo assim uma maior velocidade, enquanto o *downstream* tem uma velocidade final menor, com pressões mais altas. Ficou-se estabelecido uma pressão estática máxima de 70 atm no driver. A utilização dessas fórmulas permite uma determinação da condição de cada trecho do tubo.

Um outro estudo interessante é o cálculo do número de Mach, que pode ser obtido através da seguinte fórmula

$$M_s = \frac{u_s}{\sqrt{\gamma \cdot R \cdot T}} \quad (4)$$

Em 1957, estudos japoneses confirmaram, por exemplo, a obtenção de um número Mach 6,4, considerando um disparo que durou apenas um milissegundo. Também pode-se obter a velocidade da onda de choque incidente através da equação

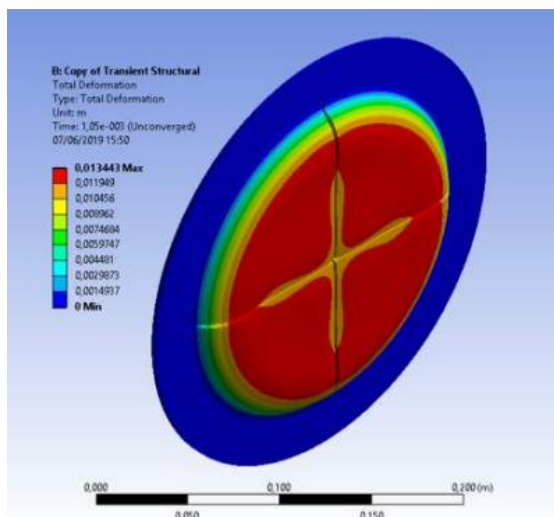
$$u_s = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (5)$$

Considerando “t” o tempo entre o aumento de pressão entre dois sensores e “x” a distância entre eles. Importante de se observar que a nossa montagem atual não possui, no momento, sensores, assim sendo, esse tema seria estudado em trabalhos futuros.

Para um correto funcionamento do dispositivo, é preciso a presença de um gás, necessariamente leve, que tem suas partículas se movimentando de forma mais rápida – não atrapalhando o escoamento e permitindo que ele se torne supersônico.

As membranas, foco do trabalho, como supracitado, têm rasgos em formato de cruz. Seguindo-se, na imagem 3 pode-se perceber que a área de maior deformação é envolta dos rasgos, região que, após o disparo, formará as quatro pétalas. O software utilizado pelo autor para análise, o Ansys Academic, fornece grande precisão quanto a simulações mecânicas, sendo um dos mais frequentes no ramo.

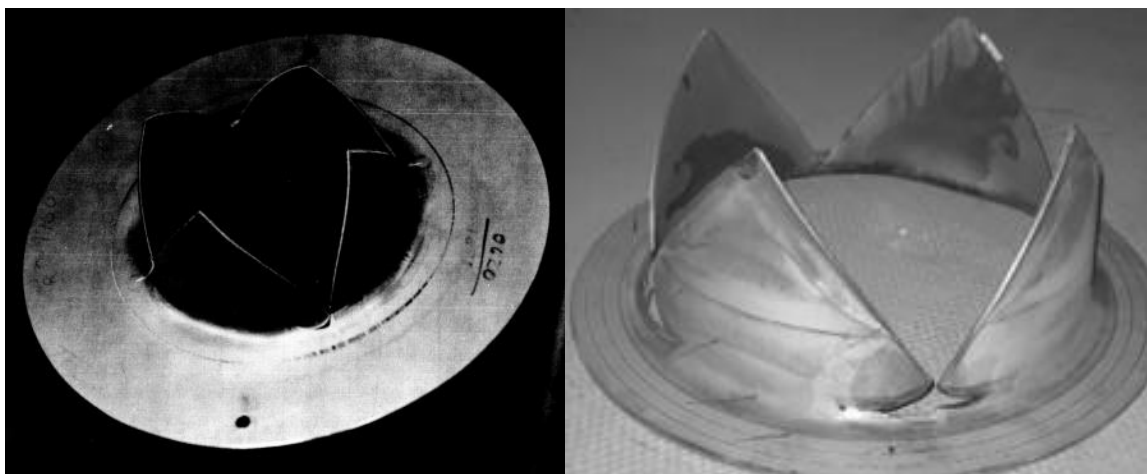
Imagem 3 – Simulação por FEM indicando áreas de maior tensão.



Fonte: AFONSO (2019).

Na prática, o diafragma acaba tomando a seguinte forma após a ocorrência do disparo. Interessante de se observar que as referências abaixo têm 58 anos de diferença (1965 e 2023, respectivamente), indicando que a geometria empregada de fato é extremamente bem consolidada nesse meio. Ao fim e ao cabo, o rompimento dos diafragmas é o que simula a onda de choque.

Imagens 4 e 5 – dois exemplos de abertura das pétalas do diafragma.



Fontes: DREWRY; WALENTA (1965) e JIANG; CHUE (2023), respectivamente.

Para um estudo mais aprofundado da membrana, pode-se deduzir o tempo que se leva para o rompimento de um diafragma, que pode ser calculado através da expressão:

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{Fb}{6} - M_{\sigma} \quad (6)$$

Sendo I o momento de inércia da pétala do diafragma; F a força atuante; M_{σ} o momento (criado a partir da deformação). Já $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ significam o movimento da pétala a partir do tempo.

Inicialmente, trabalhando-se com o momento de inércia, podemos considerar que a pétala possui uma geometria triangular, podendo-se escrever “I” como:

$$I = \frac{\rho d^4 h}{96} \quad (7)$$

Sendo que ρ é a densidade; d é o valor do diâmetro da membrana e h é a sua espessura. Em seguida, pode-se obter a expressão da força exercida na pétala a partir de:

$$F = \frac{p_4 d^2 \cos\theta}{4} \quad (8)$$

Considerando que p_4 é a pressão medida no interior do driver. Por fim, falta calcular M_{σ} , que pode ser obtido através de:

$$M_{\sigma} = \frac{\sigma d h^2}{4} \quad (9)$$

Sendo σ o esforço de flexão.

Substituindo as equações 7, 8 e 9 na equação 6, teremos que:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{4p_4 \cos\theta}{\rho d h} \left[1 - \frac{6}{\cos\theta} \frac{h^2}{d^2} \frac{\sigma}{p_4} \right] \quad (10)$$

Por fim, essa fórmula pode ser simplificada. Pensando-se que queremos adquirir o tempo levado para a pétala da membrana se abrir, $\frac{d\theta}{dt} = 0$ no segundo zero, assim como θ também valerá zero. Além disso, pode-se considerar que o último termo dos colchetes, $\frac{\sigma}{p_4}$, será aproximadamente um, tornando possível cortar todo o trecho final dos colchetes. Depois de manipular a fórmula para deixá-la nas medidas do Sistema Internacional de Unidades, adquirimos a expressão final:

$$t = 4,51 \left(\frac{\rho r h}{p^4} \right)^{1/2} 10^4 \quad (11)$$

3. METODOLOGIA

O tubo supersônico não era manuseado há muito tempo antes do começo dessa pesquisa, sendo necessária a realização de reparos diversos a fim de garantir um funcionamento correto e facilitado.

3.1 Indicadores de válvulas

Inicialmente, nas primeiras semanas da pesquisa, foram feitas alterações nos indicadores das válvulas. Por haver muitas delas, todas sem indicação, seria provável algum erro quando elas fossem acionadas. Portanto, foram colocadas etiquetas e molduras nos indicadores, aperfeiçoando esteticamente e auxiliando na maior compreensibilidade da interface. Não menos importante, o motor recebeu um suporte em MDF para não ficar apoiado no chão.

3.2 Escolha do gás

O gás Hélio foi utilizado durante grande parte do desenvolvimento da pesquisa. No entanto, ele apresenta altos custos de aquisição. Assim, outros gases foram considerados, sendo eles o Hidrogênio e o Argônio. A última opção se mostrou mais adequada, tendo, além de um custo baixo, outras referências de uso. Embora não permita um número de Mach tão alto como o Hélio, o gás consegue fornecer $M = 5$ no mínimo e as expansões começam em temperaturas consideravelmente mais baixas, o que, no entanto, não afeta a boa ocorrência do experimento.

3.3 Produção das membranas

Dentre os materiais, já tínhamos disponíveis membranas de diâmetro 135 mm. Dessa forma, bastou-se apenas realizar os cortes em forma de cruz, seguindo-se o desenho técnico da Imagem 8. Todos os métodos de fabricação dos diafragmas presam para que o corte seja feito à 90°, como foi realizado. A espessura das membranas é uma medida variável, normalmente variando entre 1,6 mm e 4,47 mm. Isso embasa o desenho técnico produzido, que considera uma espessura de 2 mm.

Imagem 6 – Método de corte empregado para produção dos rasgos.

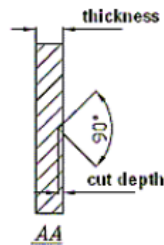
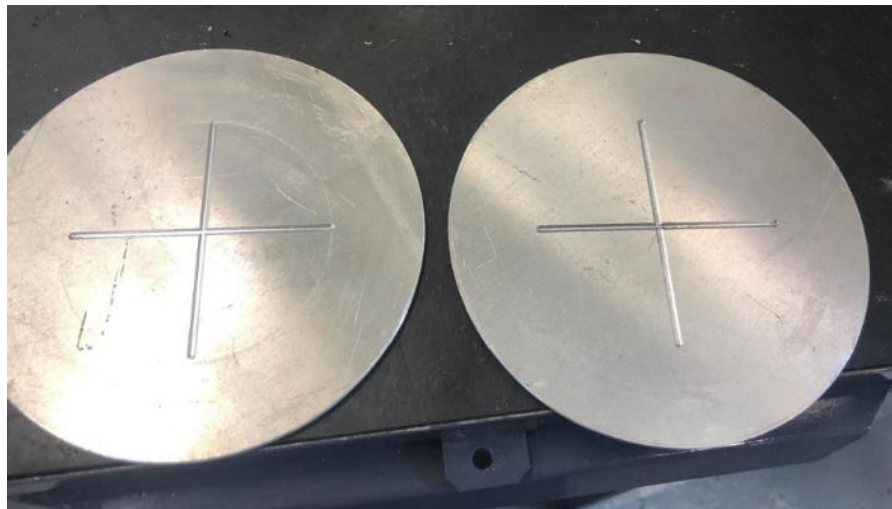
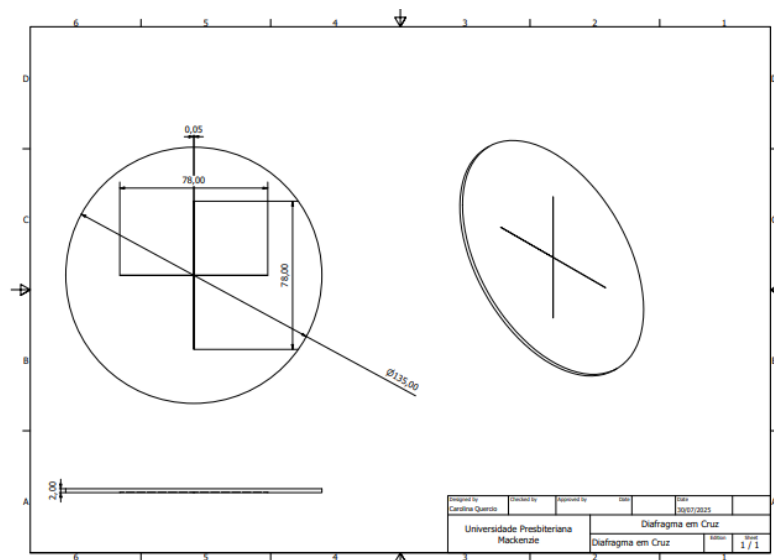


Imagem 7 – Membranas fabricadas no laboratório de usinagem.



Para uma correta fabricação das peças, foi necessária a elaboração de um desenho técnico, baseado nos estudos anteriores realizados na universidade, que pode ser visto abaixo.

Imagem 8 – Especificações técnicas das medidas do diafragma com corte em cruz.



3.4 Reparo do tubo

Nos primeiros meses de projeto, houve maior foco em arrumar as tubulações na parte de trás das válvulas. Nessa região, pequenos tubos de aço estavam disformemente dispersos. Assim, eles foram cortados e reduzidos.

Além disso, para garantir uma boa junção, as válvulas dos flanges foram reforçadas, muitas vezes com o auxílio de fita. Quando os reparos pareciam corretos, o gás era ativado e observávamos se os indicadores de pressão elevavam – caso não, era sinal de que havia algum vazamento. Um outro método eficaz empregado foi escutar pequenos ruídos de gás passando, que ocorrem quando há um vazamento. Como a figura abaixo indica, um vazamento muito grande pode fazer com que parte do equipamento “congele”.

Concluídos os reparos na tubulação, focou-se encontrar os problemas no próprio tubo hipersônico. Durante esse período, foi empregado um método informalmente conhecido como “espumar”, em que o equipamento foi coberto por espuma de sabão e, nos locais onde formavam-se bolhas, eram onde havia vazamento. A imagem abaixo retrata a formação suas formações mediante uma condição de problemas na contenção de gás.

Imagem 9 - Vazamento de gás percebido pela formação de bolhas.



Os principais pontos encontrados foram a flange fina e a flange do DDS, onde são posicionadas as membranas. Nesse segundo caso, bastou-se fazer um aperto melhor das válvulas, com uso de fita. Porém, a flange final precisou ser desmontada. Dentro dela, foi encontrado um o-ring que não estava selando corretamente a saída de ar. Dessa forma, seria

necessário passar um silicone novo para melhor fixação, visto que o anterior já estava consideravelmente desgastado. O ajuste foi prontamente realizado.

3.5 Produção Desenhos Técnicos

A geometria em cruz já possuía uma referência técnica quanto às medidas. Assim, estudou-se a possibilidade de outras formas distintas. Para o desenho tradicional, os rasgos vão até o raio 77,92 mm dos 135 mm de diâmetro disponíveis na peça, ocupando 57,7% do diâmetro disponível. Para outros experimentos, essa proporção é semelhante, chegando na casa de 65,8% (Rolim, 2009). Dessa forma, como será apresentado nos resultados, o raio de corte manteve-se o mesmo.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 Disparo

Em meados de junho, foi realizado um único disparo no tubo hipersônico. Devido a reforma no Prédio 29, todo o equipamento teve que ser rapidamente desmontado, comprometendo a realização de outros testes.

Inicialmente, foi reparado que as válvulas solenóide estavam bloqueadas, tendo um problema no disparo em si, isso por conta dos diversos testes de estanqueidade que foram realizados ao longo da pesquisa. O botão de disparo também estava quebrado, sendo sua principal função a sincronização entre a câmara e o tubo, um fator que acaba por não ter muito impacto nos resultados do teste. Apesar desses problemas, o experimento foi realizado, mas não apresentou o seguimento desejado.

Imagem 10 – Resultado final de deformação das membranas após a realização dos testes.



Na imagem, pode-se notar que a membrana não abriu-se em pétalas como esperado, em parte por conta dos problemas nas válvulas solenoide. No entanto, também pode-se levantar a hipótese de uma profundidade muito pequena de rasgo, o que certamente deve ser levado em conta nos trabalhos futuros, independente da geometria da membrana.

Além disso, os valores de pressão para cada trecho foram obtidos: 60 bar no drive e 30 bar no DDS, que, em kPa, valem 6.000 kPa e 3.000 kPa, respectivamente. Essas medições obtidas pelos instrumentos de medição já mostram um resultado interessante, criando uma pressurização de cerca de 60 vezes a pressão atmosférica na maior parte do tubo. Pode-se perceber que houve uma diminuição de 3.000 kPa depois da membrana, o que caracteriza, novamente, a grande diferença entre os trechos do tubo.

Tendo a membrana 2 mm de espessura, pode-se calcular a força que foi exercida nas pétalas. Para esse objetivo, foi adotado que houve um deslocamento de 30° da pétala com relação à sua posição original, faltando, assim 60° para atingir o objetivo final. Utilizando a equação 8, obtêm-se uma força de 13.668,75 N, o que seria equivalente ao peso de um corpo de cerca de 1.393,35 kg.

4.2 Comparação com modelo teórico

Como abordado na introdução, um dos objetivos do trabalho era a análise de diferentes geometrias de rasgos. No entanto, a desmontagem imprevista do tubo impossibilitou essa análise mais profunda. Segundo as referências, o formato de cruz é, efetivamente, o modelo mais amplamente utilizado na área.

Seguindo-se o explicado no referencial teórico, podemos observar que as pétalas começaram a ter sua deformação, vindo do momento M_σ de flexão e a força F aplicada. No entanto, pode-se concluir que a força não foi suficiente para causar o rompimento dos diafragmas.

Isso pode ser observado pelo fato de que o experimento, idealmente, resultaria em uma membrana que teria suas pétalas fazendo 90° com a superfície original, assim precisando de uma força de 27.337,5 N, valor esse que não foi alcançado experimentalmente. Vale destacar que, em média, 17 bar são necessários para que haja o rompimento do diafragma. Portanto, pode-se perceber que houve um problema no design na membrana, mas, majoritariamente, por conta do bloqueio das válvulas solenoides.

Apesar de não terem sido fabricadas, os desenhos técnicos de membranas com geometrias de asterisco (seis pontas) e de estrela (três pontas) foram produzidos, sendo dispostos abaixo.

Imagem 11 - Desenho técnico com as medidas do diafragma com corte em asterisco.

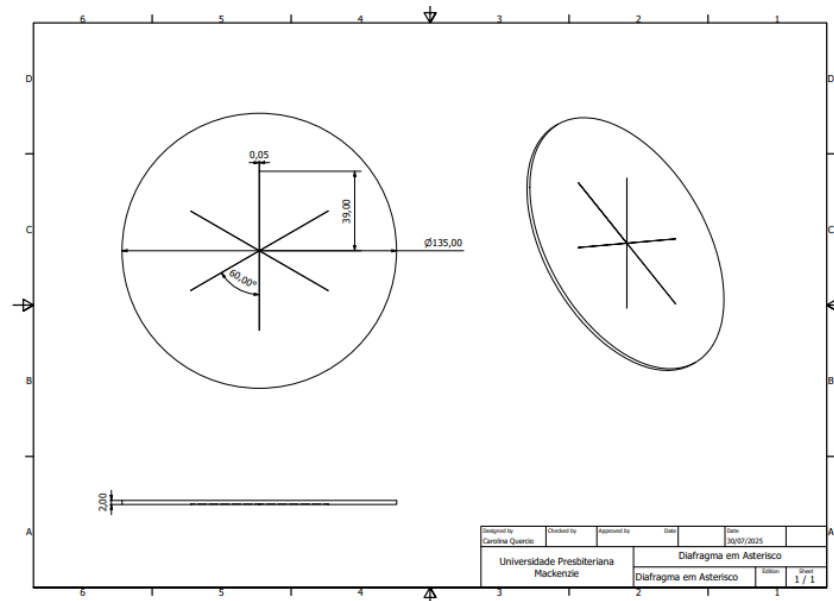
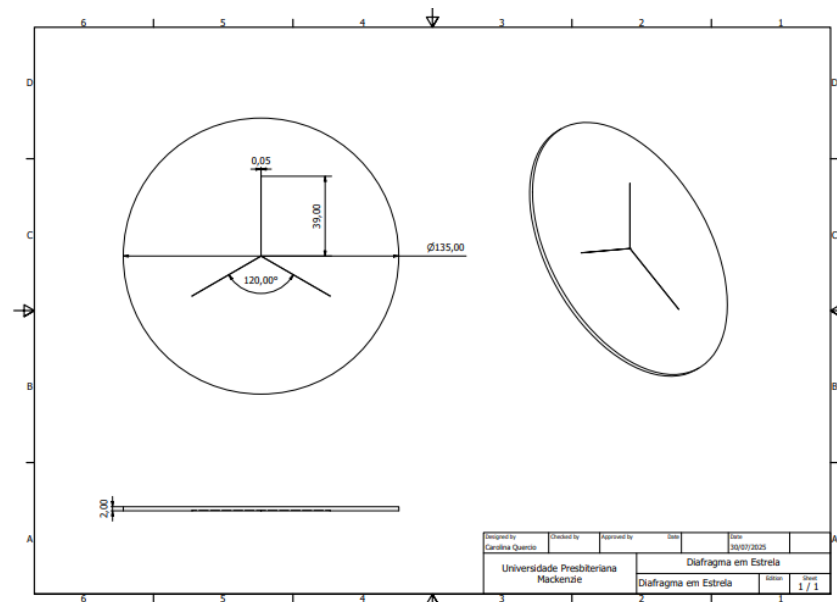


Imagem 12 - Desenho técnico com as medidas do diafragma com corte em estrela.



5. CONCLUSÃO

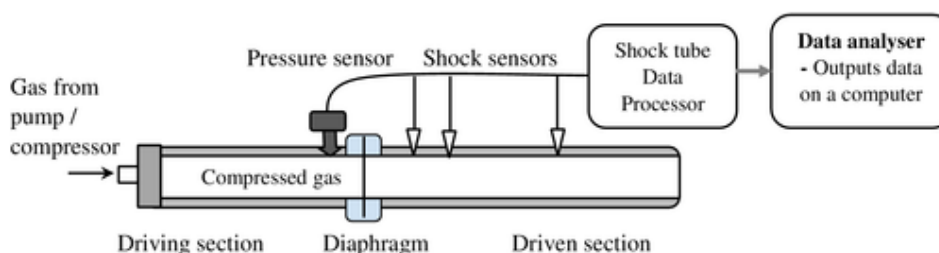
A pesquisa envolveu bastante trabalho operacional de arrumar o tubo e garantir seu correto funcionamento. No entanto, foram encontradas mais adversidades do que o esperado, resultando em uma quebra de expectativa com relação às metas iniciais; e somente um disparo que não ocorreu seguindo as nossas expectativas. A partir dessa tentativa, aprendemos que seria vital ter uma maior profundidade no corte. A imagem 10 indica que a membrana sofreu a pressão do disparo; mas não se rompeu provavelmente pela usinagem ter sido deveras superficial.

Apesar desses pontos, tem-se agora uma melhor gestão de conhecimento das falhas habituais no equipamento. Ademais, os estudos dos conceitos teóricos reforçam os próximos passos que devem ser dados.

O primeiro deles trata-se da análise de novas geometrias além da clássica. Mesmo tendo sido estudado conceitualmente, é imprescindível a realização de um disparo utilizando membranas com cortes diferentes – e, como já dito anteriormente, com maior profundidade no corte. Existem escassos registros com geometrias distintas, chegando-se a no máximo 5 pétalas. Assim, a variação do tipo de corte é um campo que ainda pode ser investigado mais profundamente.

Além disso, um outro sistema extremamente comum em tubos hipersônicos é sensores de pressão e do próprio choque. No caso desse último, alguns sensores seriam posicionados no *driven*, como indica a imagem.

Imagem 13 – Posicionamento de sensores no tubo hipersônico.



Fonte: THIRUMALESH; HIRIYUR, KUMARASWAMY (2020).

No entanto, esse tipo de equipamento ainda não foi pesquisado para instalação. Mas tal conceito mostra-se muito interessante, por permitir uma análise mais aprofundada dos dados do experimento. Isso, além de proporcionar uma melhor qualidade de resultados, também englobaria o trabalho de mais áreas da engenharia, como a elétrica e a de

computação, expandindo os horizontes dessa pesquisa para mais estudantes interessados na área.

Concluindo, a Iniciação Científica realizada mostrou-se valorosa no âmbito de reparos mecânicos e levantamento de próximas ações a serem estudadas. Ao longo dessa pesquisa, percebeu-se de fato que há pouca apreciação desse equipamento tão extraordinário. Espera-se que as ideias acima sugeridas sejam levadas em conta pelos demais estudantes de engenharia interessados na pesquisa aeroespacial.

6. REFERÊNCIAS

DREWRY, J. E.; WALENTA, Z. A. *Determination of diaphragm opening-times and use of diaphragm particle traps in a hypersonic shock tube*. Washington: NASA, 1966. (NASA Technical Note D-3202). Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19660006483/downloads/19660006483.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2025.

AFONSO, Francisco João Gonçalves. *Projeto do diafragma para o tubo de choque ESTHER*. Universidade de Lisboa, 2019.

BARÓN, Iván Felipe Rodríguez. *Experimental investigation of the Scramjet Demonstrator 14-X B at Mach number 6 to 12 in the hypersonic shock tunnel*. Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2014.

THIRUMALESH, K. et al. *Shock tube data processing tools using open source hardware and software platforms*. Engineering Reports, [S. l.], v. 3, n. 5, e12353, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/eng2.12353>. Acesso em: 28 jul. 2025.

BOTELHO, Adriano Afonso Muniz; TAKAHASHI, Caio Jun; MINUCCI, Marco Antônio Sala (Orientador). *Construção e montagem do tubo de choque hipersônico do Mackenzie*. Universidade Presbiteriana Mackenzie. Disponível em:

api.mackenzie.br/server/api/core/bitstreams/f5e75be7-14f0-4a1a-8899-9b3617c35dee/content. Acesso em: 30 jul. 2025.

VOGLIOTTI, André. Tecnologia aeroespacial: inovações que transformam o futuro. 16 jul. 2024. Disponível em: <https://www.autentify.com.br/antifraude/tecnologia-aeroespacial-inovacoes-que-transformam-o-futuro/> Acesso em: 11 ago. 2025.

PODER360. Aviação representa 3,9% do PIB global, diz Iata. Poder360, 03 jun. 2024. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/poder-economia/aviacao-representa-39-do-pib-global-diz-iata/> Acesso em: 11 ago. 2025.

TORO, Paulo. G. P.; MINUCCI, Marco. Antonio. Sala. ROLIM, T. C.; FOLLADOR, Roberto. 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.

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.

ZAHORANSKY, R. A.; HÖSCHELE, J.; STEINWANDEL, J. Homogeneous nucleation of argon in an unsteady hypersonic flow field. *Journal of Chemical Physics*, v. 110, n. 17, p. 8842-8845, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.478790> . Acesso em: 15 ago 2025.

ROLIM, Tiago Cavalcanti; CINTRA, Sheila Cristina; PELLEGRINI, Marcela Marques da Cruz. Development and application of computational tool using local surface inclination methods for preliminary analysis of hypersonic vehicles. *Journal of Aerospace Technology and Management*, v. 15, e2023, 2023. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/jatm/a/dWjfhVhkN3QVzBJ9HXzCQqK/?format=html&lang=en>. Acesso em: 17 ago. 2025.