



Mens Agitat 16 (2021) 74-79

ISSN 1809-4791

74

Análise computacional da estrutura de um tubo de choque acadêmico simplificado

William Henrique de Lima Fiuza, Paulo Gilberto de Paula Toro, George Santos Marinho

Escola de Ciências e Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Caixa postal 1524, CEP 59078-970, Natal/RN, Brasil. william.fiuza.mec@gmail.com, toro11pt@gmail.com, gmarinho@ct.ufrn.br.

Resumo

O tubo de choque é um dispositivo que pode ser utilizado para estudos laboratoriais sobre escoamentos supersônicos e hipersônicos, fornecendo dados importantes sobre parâmetros aerodinâmicos de voo de veículos aeroespaciais. No presente trabalho foram realizadas modelagem e análise estrutural de um tubo de choque acadêmico, considerando-se dimensões de tubos doados pelo Instituto de Estudos Avançados (IEAv/DCTA) à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Além disso, foram estimados os esforços mecânicos atinentes à operação do tubo. Atenção especial foi dispensada ao dimensionamento dos componentes, etapa fundamental do projeto desse dispositivo, que permite evitar erros e, portanto, prevenir acidentes, pois se trata de um equipamento que opera sob altas pressões e onde se utilizam gases diversos. As condições de contorno e cargas aplicadas foram selecionadas criteriosamente, para garantir a confiança requerida pelo projeto. Assim, os componentes foram modelados tridimensionalmente, por meio de software. Foi utilizado para esta análise o software *Autodesk Inventor*, com discretização por geração de malha e análise estrutural computacional pelo *Método dos Elementos Finitos*. Esse projeto diz respeito à primeira etapa da construção do tubo de choque da UFRN, em parceria com o IEAv.

Palavras-chave: Tubo de choque, Modelagem tridimensional, Análise estrutural, Método dos elementos finitos.

Abstract

The shock tube is a device that can be used for laboratory studies on supersonic and hypersonic flows, providing important data on aerothermodynamic parameters of aerospace vehicle flight. In the present work, modeling and structural analysis of an academic shock tube were carried out, considering the dimensions of tubes donated by the Institute of Advanced Studies (IEAv/DCTA) to the Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN). In addition, the mechanical efforts related to the tube operation were estimated. Special attention was given to the dimensioning of the components, a fundamental step in the design of this device, which allows avoiding errors and, therefore, preventing accidents, as it is equipment that operates under high pressures and where different gases are used. Boundary conditions and applied loads were carefully selected to ensure the reliability required by the project. Thus, the components were modeled three-dimensionally, using software. Autodesk Inventor software was used for this analysis, with meshing discretization and computational structural analysis by the Finite Element Method. This project concerns the first stage of the construction of the UFRN shock tube, in partnership with the IEAv.

Keywords: Shock tube, Three-dimensional modeling, Structural analysis, Finite element method.

1. INTRODUÇÃO

O domínio de C&T espacial distingue nações com potencial de desenvolvimento daquelas subdesenvolvidas. Essa distinção tornou-se mais evidente durante o período da história denominado “Corrida Espacial”, iniciado em 1957, com o lançamento do satélite artificial *Sputnik* pela União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS). O fato originou uma disputa entre URSS e EUA por primazias na exploração do espaço, tendo a Lua como ponto de chegada da corrida.

Os subprodutos da tecnologia espacial que permitiu colocar homens na Lua, ainda na década de 1960, foram aplicados à praticamente todos os setores da atividade humana, resultando em profundas mudanças no cotidiano terrestre. Hoje, agricultura, aviação e meteorologia, entre outros, são indissociáveis da tecnologia espacial, assim como qualquer ramo da economia voltada ao mercado globalizado.

Imprescindível ao desenvolvimento de C&T espacial, a formação de recursos humanos requer investimentos vultosos e perenes, sob pena de tornar obsoleto o poder econômico de qualquer país desatento. Para formar profissionais altamente qualificados, aptos a atender às demandas do setor, o conhecimento prático é fundamental. Isso requer laboratórios equipados com recursos que permitam simular em solo o ambiente espacial. Um desses recursos é o tubo de choque.

O uso de tubos de choque em pesquisa remonta a 1899, quando o francês Paul Marie Eugène Vieille (1854 – 1934) estudou a propagação de chama em ambiente confinado. Ele projetou um dispositivo composto por dois reservatórios pressurizados, sendo um de baixa e outro de alta pressão, separados por um diafragma que, ao se romper, gerava ondas de choque com velocidades próximas a Mach 2 – i.e., duas vezes a velocidade do som [1, 2].

Para entender o escoamento de ar sobre corpos voando em velocidades hipersônicas ($Mach > 5$), como ocorre durante a reentrada de veículos espaciais na atmosfera terrestre, recorreu-se ao tubo de choque [3, 4].

Atualmente, o tubo de choque continua servindo à pesquisa sobre velocidades hipersônicas, tanto aplicado a veículos espaciais como nos projetos de novas aeronaves, propelas por tecnologia disruptiva (scramjet), que serão utilizadas em voos comerciais no século XXI.

Com aspirações desenvolvimentistas, o Brasil possui um parque industrial dedicado ao transporte aéreo. Se há pretensões de manter a indústria aeroespacial nacional competitiva, o domínio da tecnologia hipersônica deve constituir meta a ser atingida pelo menos em médio prazo. Essas pretensões somente se tornarão realidade se houver investimentos em recursos materiais e humanos.

Permitir que estudantes de engenharia tenham acesso a uma ferramenta laboratorial como um tubo de choque, motivará a formação de recursos humanos aptos a desenvolver

pesquisas sobre tecnologia hipersônica dos tubos reais já disponíveis na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Também foram estudados os regimes de escoamento no interior do equipamento. Por fim, o objetivo é viabilizar tecnicamente a futura construção do referido tubo de choque.

Visando alcançar o objetivo geral, uma série de objetivos específicos se faz necessária, a saber: obter dados sobre os tubos doados pelo Instituto de Estudos Avançados (IEAv); criar modelo computacional dos tubos, respeitando dimensões e propriedades dos materiais; desenvolver em software de desenho assistido por computador (CAD) peças de união e suporte para os tubos; discretizar os modelos ao gerar malhas, dividindo-os em elementos e nós; definir condições de carga e contorno para a análise; resolver a análise através do software; conferir os resultados de deslocamento, tensão e deformação; auxiliar na possibilidade futura de construção do tubo de choque acadêmico da UFRN.

2. FUNCIONAMENTO DO TUBO DE CHOQUE

Durante a operação de um tubo de choque de alta pressão, a seção de baixa pressão (driven), onde são feitos os testes, normalmente fica pressurizada a 1 atm, simulando a atmosfera terrestre. Já a seção de alta pressão (driver) pode ser pressurizada com 100 atm ou mais, a depender do projeto. Apesar disso, existem tubos de choque que operam em pressões mais baixas, visando baratear os custos de construção, manutenção e operação, tendo a finalidade principal de demonstrar aos estudantes o funcionamento. Nesses, as seções transversais são constantes.

Quando a pressão atinge o limite do diafragma, rompendo-o, uma onda de choque incidente é gerada na direção da seção de baixa pressão (à jusante). Ao mesmo tempo, uma onda de rarefação é gerada na direção da seção de alta pressão (à montante). Por fim, a onda incidente é refletida na extremidade final da seção driven, interagindo posteriormente com a superfície de contato entre os gases nas seções [4].

Na Figura 1 vê-se a representação da estrutura básica de um tubo de choque que possui apenas um diafragma.



Fig. 1. Representação bidimensional do tubo de choque [4].

O objeto de estudo nas simulações do presente artigo foi constituído apenas da seção de alta pressão, com flanges fechando as duas extremidades, para considerar o modelo como um vaso de pressão.

3. PROPRIEDADES DO MATERIAL

*Address correspondence to this author at the Department, Faculty, University, P.O. Box: 0000-000, City, Country; Tel/Fax: ++0-000-000-0000, +0-000-000-0000; E-mail: Institutional email.

O material que compõe os tubos doados à UFRN é aço inoxidável, com uma densidade de 8000 kg/m³ [5]. Apesar de ser fabricado em um material muito resistente à oxidação, antes da construção do equipamento é necessário testar os tubos por meio de diferentes métodos.

Para simplificar a simulação e, ao mesmo tempo, permanecer próximo à realidade, foi considerado um tubo de aço inoxidável, com peso de 97,0729 kg. As Tabelas 1 e 2 mostram as propriedades do material e do modelo usadas como base para simulações.

Tabela 1. Propriedades do material usado e medidas do tubo com flanges.

Massa específica	Área	Volume	Resistência ao escoamento
8000 kg/m ³	0.967971 m ²	0.0121341 m ³	250 MPa

Tabela 2. Propriedades do material usado e medidas do tubo com flanges.

Resistência à tração	Módulo de Young	Coefficiente de Poisson	Módulo de cisalhamento
540 MPa	193 GPa	0.30	74.2308 GPa

De posse das propriedades do material a ser utilizado nas simulações, é possível modelar tridimensionalmente a seção do tubo de choque e aplicar as propriedades no software Autodesk Inventor.

4. PROCEDIMENTOS

De acordo com Reddy (2006), os modelos matemáticos tratam da descrição analítica de fenômenos e processos físicos, sendo desenvolvidos por meio de suposições sobre o comportamento real do fenômeno investigado. Como as leis que regem o fenômeno podem ser descritas por equações diferenciais e integrais muito complexas, diante da possibilidade de usar computadores para resolver os problemas, o modelo criado foi bastante simplificado, visando resolvê-lo de forma analítica [6].

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma ferramenta útil para análise de problemas práticos de engenharia, desde que aplicado corretamente. Situações em que os domínios geométricos são complexos podem ter soluções aproximadas utilizando-se o MEF [6].

A seção de alta pressão do tubo de choque foi representada tridimensionalmente, por meio do software *Autodesk Inventor Professional 2020* (ver Fig. 2). Flanges foram adicionados às extremidades, unidos ao tubo por uma junta completamente restrita e simplificada. As medidas utilizadas no modelo correspondem às medidas dos tubos doados à UFRN, visando uma maior proximidade da realidade (ver Fig. 3).

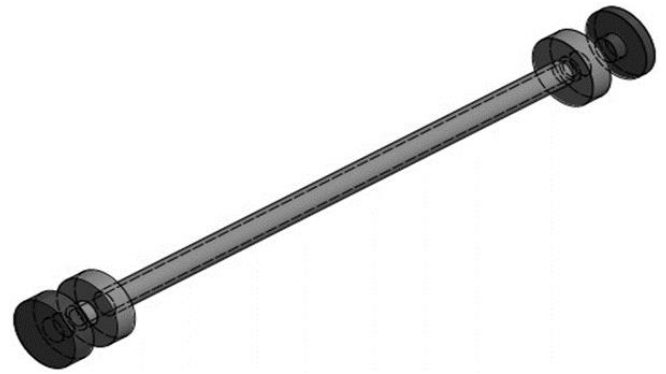


Fig. 2. Vista explodida do modelo tridimensional do tubo de choque com flanges.

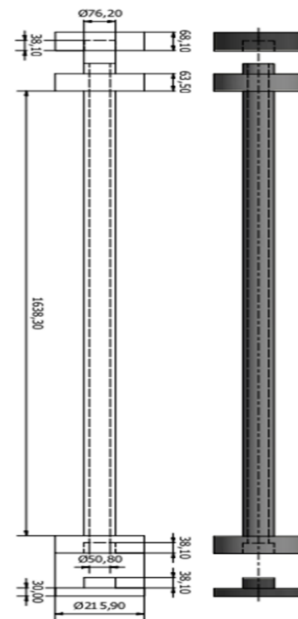


Fig. 3. Modelo de seção de tubo de choque com flanges.

Após a criação do modelo, duas malhas são geradas seguindo as configurações disponíveis nas Tabelas 3 e 4, sendo a primeira grosseira e a segunda refinada. Essa metodologia foi adotada para permitir a comparação dos resultados entre os dois tipos de malhas. Nas tabelas 3 e 4, mostram-se dados para discretização do modelo.

Tabela 3. Configurações de malha para discretização do modelo.

Configurações de malha			
	Tamanho médio do elemento - fração do diâmetro do modelo (mm)	Tamanho mínimo dos elementos - fração do tamanho médio (mm)	Fator de nivelamento
Malha 1	0.01	0.1	1.5

Malha 2	0.004	0.1	1.5
---------	-------	-----	-----

Tabela 4. Mais configurações de malha para discretização do modelo.

Configurações de malha		
	Ângulo máximo de giro	Criar elementos de malha curvos
Malha 1	60°	Sim
Malha 2	60°	Sim

Como apenas o tamanho médio dos elementos foi alterado entre as malhas 1 e 2, houve uma diferença considerável no número de elementos e nós. Posteriormente, isso refletiu nos resultados computacionais obtidos por meio do Método dos Elementos Finitos. As malhas representadas na Figura 4 possuem grande diferença no número de nós, tendo a malha 1 (à esquerda) 24041 e a malha 2 (da direita) 271771 nós.

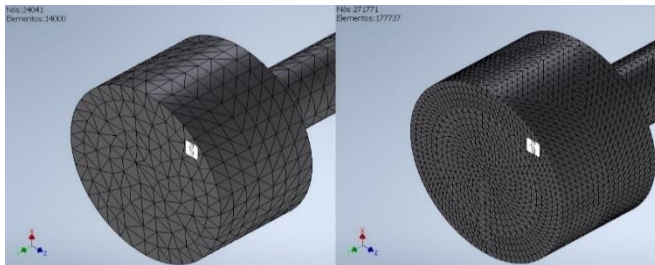


Fig. 4. Vistas parciais das malhas geradas.

Se a malha gerada for refinada continuamente, o computador utilizado na simulação do modelo demorará cada vez mais para calcular todas as variáveis, pois o número de elementos e nós aumenta consideravelmente. Por exemplo, se o tamanho médio dos elementos for 0.001 mm e todas as outras informações permanecerem com valores apresentados nas Tabelas 3 e 4, a malha gerada terá mais de 1,7 milhão de nós.

Na análise estrutural, consideraram-se as cargas exercidas na operação de um tubo de choque acadêmico, sendo importante determinar os pontos de apoio e as superfícies que recebem a carga. Durante as simulações, considerou-se uma pressão interna na seção do tubo equivalente a 100 atm, ou cerca de 10,133 MPa. Os flanges foram fixados, simulando os pontos de fixação do suporte do equipamento real (ver Fig. 5).

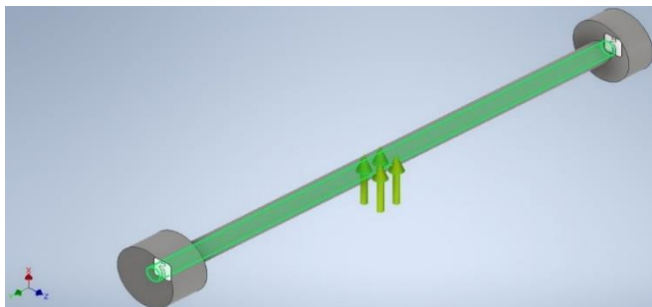


Fig. 5. Pressão exercida na superfície interna do tubo (em amarelo e verde) e pontos de fixação da estrutura (quadrados brancos).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando-se a discretização de malhas, a aplicação de cargas e as restrições, procedeu-se a modelagem simplificada do equipamento. Assim, foram calculadas as tensões de von Mises, os deslocamentos e as deformações sobre a estrutura em 3 – D, resultando em vantagem quando comparado com métodos de cálculo 2 – D; estes, apesar de simplificarem muito o modelo, se distanciam muito da realidade. Nas Tabelas 5 e 6 veem-se as diferenças entre os resultados da primeira e segunda malhas.

Tabela 5. Resultados obtidos para as duas malhas geradas.

	Tensão de von Mises mínima (MPa)	Tensão de von Mises máxima (MPa)	Deslocamento mínimo (mm)
Malha 1	0.0841421	35.1411	0
Malha 2	0.0591384	33.3626	0

Tabela 6. Mais resultados obtidos para as duas malhas geradas.

	Deformação equivalente mínima	Deformação equivalente máxima	Deslocamento máximo (mm)
Malha 1	3,96E-07	1,59E-04	0.00412966
Malha 2	2,71E-07	1,51E-04	0.00410292

A Tensão de von Mises variou consideravelmente entre as malhas grossa e fina – diferença de 1,785 MPa no ponto máximo. O deslocamento máximo sofreu uma alteração menor, com uma diferença de 2,674e-05 mm. Nas Figuras 6 e 7 veem-se as expressões gráficas dos deslocamentos obtidos nas duas malhas. A Tensão de von Mises variou consideravelmente entre as malhas grossa e fina – diferença de 1,785 MPa no ponto máximo. O deslocamento máximo sofreu uma alteração menor, com uma diferença de 2,674e-05 mm. Nas Figuras 6 e 7 veem-se as expressões gráficas dos deslocamentos obtidos nas duas malhas.

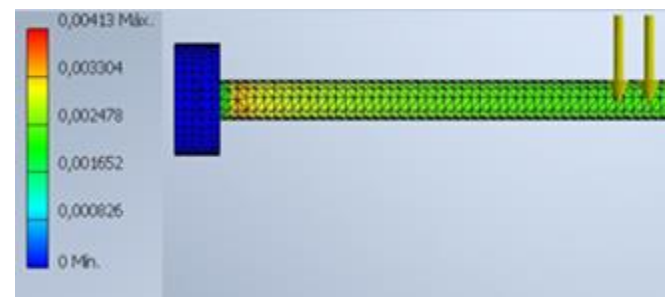


Fig. 6. Deslocamentos sofridos pela estrutura, dados da primeira malha (em mm).

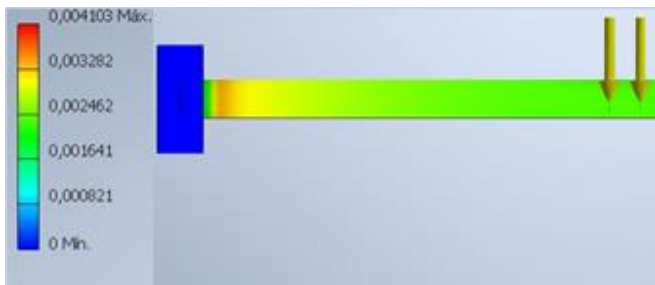


Fig. 7. Deslocamentos sofridos pela estrutura, dados da segunda malha (em mm).

Nas Figuras 8 e 9 veem-se as Tensões de von Mises na estrutura tubular, distribuídas em locais semelhantes aos vistos na representação gráfica dos deslocamentos.

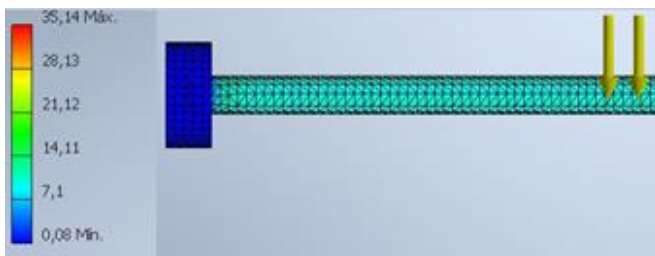


Fig. 8. Tensão de von Mises sobre a estrutura, dados da primeira malha em megapascal.

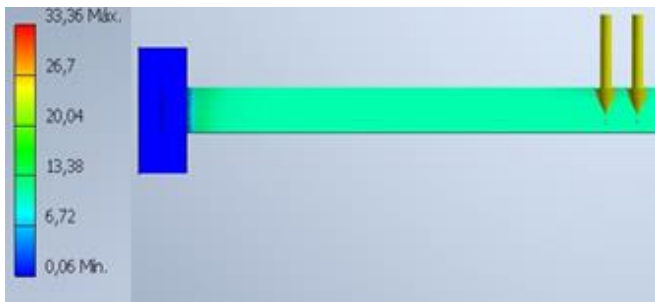


Fig. 9. Tensão de von Mises sobre a estrutura, dados da segunda malha em megapascal.

Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que os tubos disponibilizados à UFRN suportam as cargas de pressão exercidas durante a operação, pois a resistência ao escoamento, tensão e módulo de cisalhamento apresentam valores muito superiores aos obtidos nas simulações.

Com as malhas geradas, os cálculos necessários à análise estrutural demandaram cerca de dois minutos entre execução e exibição de resultados. Em termos práticos, a diferença de tempo entre as duas foi mínima. Para efeito comparativo, a malha citada após a Figura 4, com 1.7 milhão de nós, demandaria quatro dias para ser calculada utilizando-se o mesmo computador.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Gerar malhas muito refinadas, que demorariam dias para ser calculadas, não é vantajoso, principalmente se a diferença nos

resultados não for significativa. Para evitar o uso de uma máquina por tempo longo, é interessante que o engenheiro entenda até que ponto deve refinar uma malha, buscando sempre a melhor relação custo-benefício.

O tubo de choque é parte de um dispositivo mais complexo, com seções adicionais que permitem aumentar a capacidade de análise experimental da aerodinâmica de escoamentos hipersônicos. Ao complementar um tubo de choque com um bocal de expansão, instalado na extremidade da seção de baixa pressão (driven), obtém-se um túnel de choque. Esse bocal de expansão, chamado de tubeira, deve ser separado do driven por um diafragma [7].

O túnel de choque permite estudos mais avançados, mais próximos da realidade de voo dos veículos aeroespaciais. Isso porque ele admite a instalação de corpos-de-teste maiores em seu interior, possibilitando, por exemplo, a análise de parâmetros geométricos de projetos de veículos aeroespaciais.

No presente artigo foi feita a demonstração, por meio da utilização de uma ferramenta computacional, da possibilidade de construção de um tubo de choque acadêmico a partir de material disponível na UFRN, disponibilizado pelo IEAv. Simulações simplificadas são válidas, dada a brevidade deste artigo, mas requerem mais avaliações e cálculos antes de prosseguir com a construção de um protótipo. Além disso, fatores econômicos também devem ser levados em consideração no futuro, visto que o tubo de choque acadêmico é um equipamento caro.

A partir deste trabalho inicial, é possível aprimorar os modelos em software para aproximá-los da realidade, até que um protótipo de veículo aeroespacial possa ser construído com segurança e economia de material e trabalho. Itens como o diafragma entre as diferentes seções, parafusos de fixação de flange e suportes de estrutura adicionam complexidades aos estudos, mas são necessários para se dimensionar corretamente o tubo de choque.

Vale ressaltar que os resultados obtidos mostram que o material disponível resiste à pressão de trabalho e, portanto, pode ser utilizado na construção do tubo de choque acadêmico da UFRN. Porém, antes disso, são necessários testes para avaliar a integridade dos tubos, procurando por possíveis trincas, defeitos de fabricação ou outros tipos de danos. Essa verificação é importante porque o tubo de choque é um equipamento que opera em pressões muito superiores à pressão atmosférica e, conseqüentemente, qualquer problema na operação representa perigo potencial ao operador e ao laboratório.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Aeroespacial da UFRN pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa e ao Instituto de Estudos Avançados (IEAv / DCTA) pela doação dos tubos.

REFERÊNCIAS

- [1] Halliday D.; Resnick R.; Walker J. Fundamentos de Física, volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica. Tradução e revisão técnica: Ronaldo Sérgio de Biasi. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 314 p.

- [2] Vieille P. Sur les Discontinuités Produites par la de 'tente Brusque de Gas Comprimés. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, v. 129, p. 1228-1230, 1899.
- [3] Baker D. Missão Apollo – A incrível História da Corrida à Lua. 1. ed. São Paulo: M. Books, 2019. 192 p.
- [4] Lima BC. Estudo da Dinâmica dos Gases de um Tubo de Choque. Dissertação de Mestrado – Ciências e Tecnologias Aeroespaciais, 81f, pp. 20. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2016.
- [5] D'Oliveira AS. Aços Inoxidáveis. UFPR. Available from: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM206/Prof_Marcondes/Acos%20inoxidaveis.pdf [cited: 11 Aug 2021].
- [6] Reddy JN. An Introduction To The Finite Element Method. Third Edition. 2006. McGraw-Hill, New York.
- [7] Santos AM. A Pesquisa e Desenvolvimento em Hipersônica no IEAv. Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, v. 27, n. 1, 5-10, 2008.