

Aparatos aeroelásticos: uma revisão do estado da arte e sua aplicação didática para o estudo de flutter

Gabriel Sabino de Oliveira, gabrielsabinooli13@gmail.com¹

Mila Fernanda Esper, milaferrnanda2000@gmail.com¹

Polliana Candida Oliveira Martins, polliana.martins@unb.br¹

Rafael Castilho Faria Mendes, rafael.mendes@unb.br¹

¹Engenharia Aeroespacial - Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília-DF | CEP 70910-900

Resumo. O flutter é um dos fenômenos aeroelásticos mais difíceis de se prever. Por isso, a busca por metodologias mais precisas que ajudam a prevenir esse evento, como os ensaios aeroelásticos, vem ganhando tamanha notabilidade. O propósito deste estudo foi determinar um modelo de aparato aeroelástico que seja capaz de atender às necessidades didáticas. Uma revisão bibliográfica narrativa foi feita acerca da construção e montagem de aparatos aeroelásticos considerando a complexidade, viabilidade e quantidade de resultados de cada um. Cinco modelos principais foram identificados. Eles foram o PAPA, o com torção desacoplada, o NATA, o com sistema de suspensão elástico com três graus de liberdade e o com superfície de controle e compensador. O estudo constatou que o aparato mais conveniente para a aplicação proposta é o PAPA.

Palavras chave: flutter, aeroelasticidade, aparato aeroelástico, ensaio aeroelástico, túnel de vento.

Abstract. Flutter is one of the most difficult aeroelastic phenomena to predict. That's why, the search for more precise methodologies that help prevent this event, such as aeroelastic tests, has been gaining so much notoriety. The purpose of this study was to determine an aeroelastic apparatus model that is capable of meeting the needs of students and researchers at universities. A narrative bibliographical review was made about the construction and assembly of aeroelastic devices considering the complexity, viability and quantity of results of each one. Five main models were identified. They were the PAPA, the uncoupled torsion, the NATA, the elastic suspension system with three degrees of freedom and the control surface and compensator. The study found that the most convenient apparatus for the proposed application is the PAPA.

Keywords: flutter, aeroelasticity, aeroelastic apparatus, aeroelastic test, wind tunnel.

1. INTRODUÇÃO

A aeroelasticidade é o ramo da engenharia aeroespacial que estuda a deflexão de estruturas flexíveis de aeronaves em função das forças aerodinâmicas provenientes da corrente de ar. Na análise estática, as propriedades do sistema não variam em função do tempo e as forças inerciais são desconsideradas. As forças aerodinâmicas fazem com que, por exemplo, a asa flexione e torça, mudando o ângulo de ataque do fluxo de ar. Como consequência, é criado um processo iterativo entre variação de cargas aerodinâmicas e deflexão da estrutura, até que se atinja uma condição de equilíbrio em casos estáveis, ou uma falha estrutural, em casos instáveis (Cooper and Wright, 2007).

Já a instabilidade dinâmica de um corpo flexível é chamada *flutter*, na qual tanto as forças aerodinâmicas, elásticas e inerciais são consideradas, como ilustra a Fig. 1. Esse fenômeno é mais comumente encontrado em partes da aeronave submetidas às cargas do tipo sustentação, como asas, caudas e superfícies de controle (Bisplinghoff *et al.*, 1955). Nesse caso, uma determinada velocidade de voo excita o componente da aeronave, que possui modos de vibração acoplados, apresentando uma característica oscilatória que frequentemente resulta em uma falha estrutural catastrófica (Marqui, 2004).

De acordo com Kehoe (1995), o primeiro acidente registrado envolvendo *flutter* aconteceu com o *Handley Page O/400*, um bombardeiro biplano bimotor utilizado durante a Primeira Guerra Mundial, em 1916. O fenômeno foi causado pelo acoplamento do modo de torção da fuselagem com um modo de rotação antissimétrico do leme. Nos anos seguintes, esse problema de aeroelasticidade foi sendo corrigido, mas novos surgiram conforme o avanço da tecnologia, que possibilitou o alcance de maiores velocidades. Por isso, continua sendo um assunto relevante no projeto de aeronaves até hoje.

Marqui (2004) explica como o *flutter* acontece a partir de um teste de uma asa engastada montada em um túnel de vento com pequeno ângulo de ataque. Com o túnel ligado, conforme a velocidade do fluxo vai aumentando, a taxa de amortecimento do aerofólio também aumenta. Até que, a partir do ponto em uma determinada velocidade, chamada velocidade crítica de *flutter*, o amortecimento decai rapidamente. Nessa velocidade, que depende da configuração do

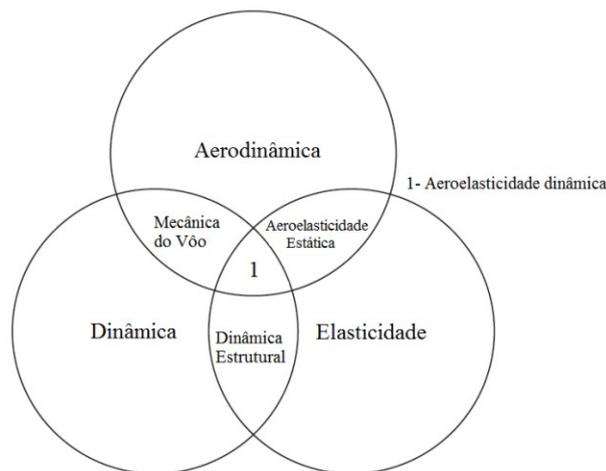


Figura 1. Diagrama dos campos de estudo de aeroelasticidade (Vergani, 2017)

sistema, a amplitude de oscilação é constante, mas em velocidades maiores, qualquer perturbação no sistema pode causar oscilações instáveis.

Pela alta complexabilidade e difícil predição, o *flutter* vem sendo estudado por meios teóricos, computacionais e experimentais com modelos em escala menores ou reais em túneis de vento. A escolha do método depende de diversos fatores como custo, simplicidade do modelo, margem de segurança do projeto e quantidade de configurações estruturais a serem testadas (Bisplinghoff *et al.*, 1955).

Para assegurar o projeto de uma aeronave, é necessário garantir que, durante o voo, ela não passará pelo fenômeno de *flutter*. Embora existam modelos de análise teóricos, em alguns casos, como nas regiões de não-linearidade do sistema, eles não são suficientes para prever o comportamento da estrutura com precisão (Farmer, 1982).

Dessa forma, os ensaios aeroelásticos em túneis de vento são importantes para a verificação do fenômeno de *flutter* e do comportamento da estrutura em função do fluxo de ar. Eles podem ser realizados considerando modelos de asas flexíveis ou modelos de asas rígidas associadas a dispositivos flexíveis.

Considerando que o *flutter* tem natureza destrutiva, os testes feitos em voo, além de muito caros, podem resultar em catástrofes. Sendo assim, os ensaios aeroelásticos servem como alternativa para verificação e certificação dos componentes de aeronaves, tornando a investigação mais barata que os testes em voo e mais confiável que a análise teórica (Tavares, 2009).

Também para fins didáticos, as predições analíticas do comportamento aeroelástico podem ser validadas a partir da comparação com resultados obtidos em testes de modelos em escala em túneis de vento (Friedmann, 1999). A observação do fenômeno real pode ajudar no melhor entendimento do assunto e servir de complemento nos estudos para pesquisadores e acadêmicos.

Logo, o objetivo deste trabalho é realizar uma revisão bibliográfica narrativa acerca da construção de diferentes aparatos aeroelásticos, avaliando a viabilidade econômica e comparando os resultados obtidos de cada um. Além disso, determinar um modelo que melhor se enquadre nos requisitos de construção em universidades para que sirva de apoio didático para estudos iniciais relacionados ao fenômeno aeroelástico de *flutter*.

2. METODOLOGIA

É intuito deste trabalho abordar o estado da arte de aparatos projetados para bancadas de ensaios aeroelásticos. Para tal, será desenvolvida uma revisão bibliográfica narrativa, abordando os principais trabalhos que tratam do projeto de aparatos aeroelásticos para ensaios em túnel de vento.

Ao final da apresentação dos aparatos, serão apresentados também os pontos positivos e negativos de cada modelo. Assim, a construção textual servirá de guia para determinar qual deles é mais adequado para a construção em universidades, no qual serão realizados estudos iniciais sobre o fenômeno aeroelástico de *flutter* em túneis de vento.

3. TIPOS DE APARATOS AEROELÁSTICOS E ENSAIOS

Para a investigação experimental do fenômeno de *flutter* em túneis de vento, são desenvolvidos aparatos aeroelásticos (Sanches, 2022). Hodges and Pierce (2011) descrevem que o desenvolvimento de um aparato que represente o fenômeno de *flutter* em uma aeronave real é uma tarefa complexa, sendo mais interessante confeccionar uma versão em escala que represente corretamente o comportamento estrutural.

Os aparatos aeroelásticos abordados neste trabalho possuem vias de experimentação do fenômeno de *flutter* em túneis

de vento. Abordagens a respeito de ensaios de *flutter* em voo podem ser vistas no trabalho de Bidinotto (2007).

Sanches (2022) menciona, tomando como base Farmer (1982), que os aparatos aeroelásticos são compostos, em linhas gerais, por duas partes: asa e estrutura de suporte. E ainda, Cooper and Wright (2007) afirmam que, para a existência de *flutter*, as forças aerodinâmicas devem estar associadas com movimento em pelo menos dois modos de vibração, fazendo com que os modos se acoplem de maneira desfavorável. Posto isso, Farmer (1982) descreve que a rigidez da asa é maior que a da estrutura do suporte, de modo que os suportes garantem que a asa possua mais de um grau de liberdade (GDL), condição necessária para que o fenômeno de *flutter* seja evidenciado.

3.1 Aparato PAPA

O aparato aeroelástico PAPA, sigla em inglês para *Pitch and Plunge Aeroelastic Apparatus*, foi proposto e desenvolvido por Farmer (1982). O dispositivo é utilizado para estudo do *flutter* em túneis de vento, sendo que a geometria permite apenas os movimentos de *pitch* e *plunge*.

Farmer (1982) menciona que uma asa rígida, a qual possui apenas graus de liberdade de *pitching* e *plunging*, é capaz de representar de maneira qualitativa o fenômeno de *flutter* para um modelo de asa flexível de três dimensões que possua modos de vibração estrutural de flexão e torção. Para que isso ocorra, é necessário que o aparato seja capaz de suportar os carregamentos dinâmicos que se fazem presentes no experimento em túnel de vento.

O modo de vibração de *pitching* está relacionado ao modo de vibração de torção da asa. Assim, este modo de vibração esta diretamente ligado as propriedades de torção do sistema, tais como momento de inércia de massa, rigidez de torção e momento polar de inércia. O modo de vibração de *plunging*, por sua vez, é ligado ao modo de vibração de flexão da geometria. Logo, as propriedades do sistemas que regem esse modo de vibração é não só o momento de inércia de área, assim como a rigidez à flexão. Vale ressaltar que a frequência natural de ambos os modos sofrem influência do comprimento da barra que confere rigidez ao aparato.

Farmer (1982), utilizando o aparato aeroelástico PAPA, realizou os experimentos no túnel de vento *Langley Transonic Dynamics Tunnel* (TDT), desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). O túnel de vento foi projetado para estudos nas áreas de aeroelasticidade, dinâmica e testes de alto risco (NASA, 2016). O aparato pode ser visto nas Fig. 2 e 3.

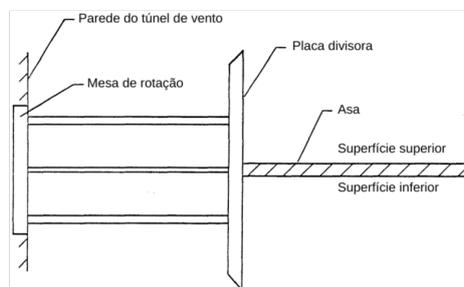


Figura 2. Aparato projetado por Farmer (1982) (adaptado)

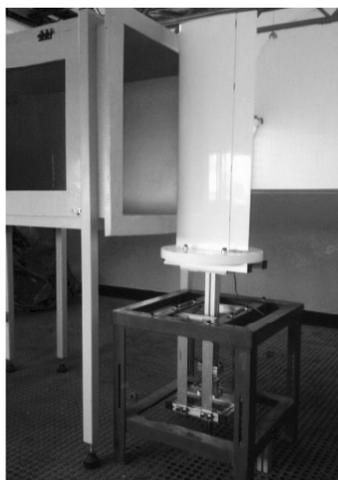


Figura 3. PAPA adaptado (Silva *et al.*, 2018)

3.2 Aparato com torção desacoplada

Diferente de Farmer (1982), o objetivo principal do trabalho de Conner *et al.* (1997) não era desenvolver um aparato aeroelástico, mas sim realizar um estudo experimental a respeito do *flutter* e seu comportamento não linear. Para tal, foi utilizado um aerofólio com superfície de controle para a realização do experimento.

Conner *et al.* (1997) projetaram um sistema de aparato aeroelástico, de modo que o aerofólio fosse fixado utilizando um sistema de viga equivalente, como pode ser visto na Fig. 4. Assim, os aparatos que conferem rigidez ao sistema podem ser representados matematicamente por um único corpo, semelhante ao que foi feito por Farmer (1982).

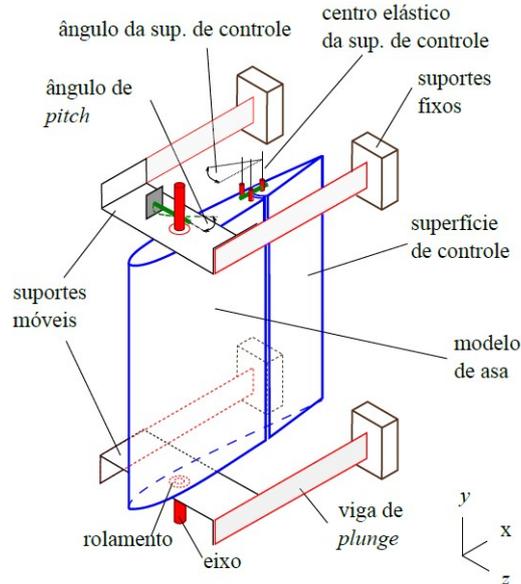


Figura 4. Aparato aeroelástico proposto por Conner *et al.* (1997) (Sanches, 2022)

A configuração do aparato aeroelástico desenvolvido por Conner *et al.* (1997) possui três GDL, sendo eles relacionados tanto a flexão e torção do perfil aerodinâmico, assim como a rotação da superfície de controle. Curiosamente, o aparato possui um eixo que possibilita que o movimento de *plunge* seja independente do movimento de *pitch*.

3.3 Aparato NATA

O'Neil *et al.* (1996) desenvolveram um aparato aeroelástico com a finalidade de realizar estudos experimentais da resposta não linear do *flutter*. Na estrutura é fixada um aerofólio, o qual possui dois GDL, flexão e torção. Para que o movimento de *plunging* aconteça de maneira independente do movimento de *pitching*, os autores utilizaram rolamentos. Os autores nomearam o aparato como *Nonlinear Aeroelastic Test Apparatus* (NATA), apresentado na Fig. 5.

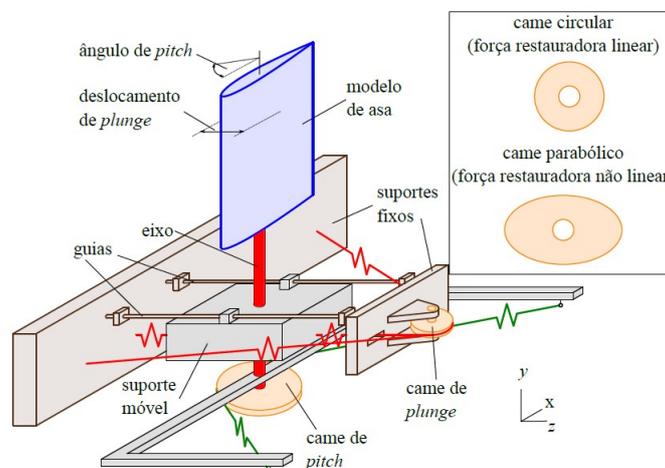


Figura 5. Aparato aeroelástico proposto por O'Neil *et al.* (1996) (Sanches, 2022)

O aparato pode ser usado tanto para estudo linear, bem como não linear do fenômeno aeroelástico de *flutter*. Para tal, são utilizados *cames* circulares para à análise linear e, por sua vez, a não linearidade estrutural ocorre quando se utiliza

comes não circulares. *Cames* são mecanismos que convertem o movimento rotacional em retilíneo (Melo and Carneiro, 2008). A natureza da não linearidade é governada tanto pela geometria dos *comes*, quanto pela rigidez das molas utilizadas na estrutura do aparato aeroelástico (O'Neil *et al.*, 1996).

3.4 Aparato com sistema de suspensão elástico com três GDL

Assim como Conner *et al.* (1997), Chowdhury and Sarkar (2003) propõem um esquema de suspensão elástico da asa com três GDL. Além da deflexão vertical (h) e da rotação ao redor do centro geométrico da asa (α), é adicionada uma deflexão horizontal denominada p , como ilustra a Fig. 6.

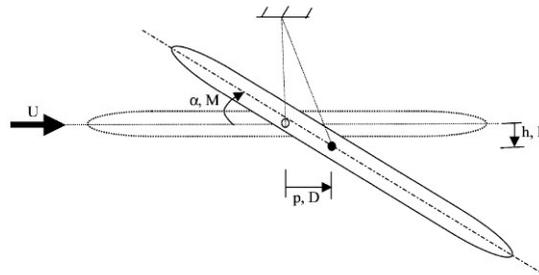


Figura 6. Três graus de liberdade da asa (Chowdhury and Sarkar, 2003)

O sistema construído para testes no Laboratório de Simulações de Vento e Testes (WiST), no Departamento de Engenharia Aeroespacial, Universidade Estadual de Iowa, permite a extração dos efeitos de acoplamento entre diferentes configurações de graus de liberdade.

No aparato são utilizadas buchas pneumáticas, que deslizam ao longo dos eixos de aço, permitindo os deslocamentos verticais e horizontais. Dois conjuntos de torção, um de cada lado do aerofólio, geram o movimento de torção do modelo. O centro de gravidade do modelo coincide com o eixo elástico para evitar desequilíbrio estático. O aparato pode ser visto em maior detalhes na Fig. 7.



Figura 7. Aparato proposto por Chowdhury and Sarkar (2003) (adaptado)

3.5 Aparato com superfície de controle e compensador

O modelo sugerido por Sanches (2022) trata-se de uma asa de perfil NACA 0012 e com superfície de controle e compensador no bordo de fuga. O dispositivo é impresso em 3D e possui alta rigidez, podendo ser considerado um modelo rígido.

Em cada seção há um eixo de rotação e a asa principal é suportada por um extensor, como ilustra a Fig. 8. Os testes focam nos modos torcionais de cada seção e são feitos no túnel de vento do LARAVA (Laboratório de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento), na Universidade Federal da Grande Dourados.

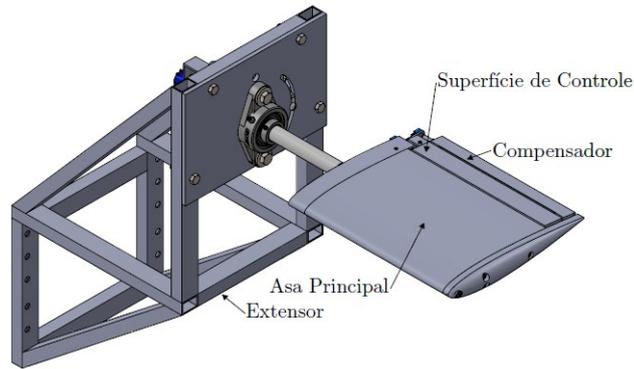


Figura 8. Aparato aeroelástico sugerido por Sanches (2022)

3.6 Comparação entre aparatos

Dadas as características apresentadas dos modelos propostos por diferentes autores, a Tab. 1 compara as vantagens e desvantagens de cada um, com foco na viabilidade da construção em universidades.

Ademais, a Tab. 2 mostra qual é a instrumentação utilizada para a captação de dados experimentais para cada um deles.

Tabela 1. Vantagens e desvantagens de cada aparato

Tipos de Aparatos	Vantagens	Desvantagens
PAPA	Montagem simples; Modelo de asa adaptável; Possui equacionamento para estimar as frequências naturais.	Oferece uma quantidade menor de resultados em relação aos outros.
Torção Desacoplada	Montagem simples; Modelo de asa adaptável.	Parâmetros iniciais precisam ser estimados utilizando análise modal experimental.
NATA	Permite que sejam estudadas as respostas linear e não linear do fenômeno de <i>flutter</i> ; Modelo de asa adaptável.	Geometria e montagem complexas.
Suspensão elástica com três GDL	Permite a configuração de vários modos de vibração.	Montagem complexa; Materiais caros; Extração de parâmetros avançados para primeiros estudos.
Superfície de controle e compensador	Montagem simples; Material barato (impressão 3D); Modelo de asa adaptável.	Permite apenas o movimento de <i>pitch</i> para cada seção.

Tabela 2. Equipamentos de cada aparato

Tipos de Aparatos	Equipamentos
PAPA	Acelerômetros.
Torção Desacoplada	Transdutores de deslocamento e velocidade rotacional.
NATA	Acelerômetros e codificadores ópticos.
Suspensão elástica com três GDL	Transdutores de força; Sensor de torque.
Superfície de controle e compensador	Potenciômetros (sensores de deslocamento angular ou linear); Tubo de Pitot (anemômetro).

Para definir qual equipamento melhor atende à finalidade do estudo, a Tab. 3 apresenta uma avaliação dos aparatos por meio de uma matriz de decisões, na qual são atribuídas notas aos equipamentos.

Os critérios de precisão, desempenho, acessibilidade e aplicabilidade foram classificados de 1 a 3, sendo 1 a pior opção e 3, a melhor. Esses critérios descrevem:

- Precisão: refere-se à consistência entre os resultados experimentais, numéricos e teóricos.
- Desempenho: avalia em que medida o aparato atende aos requisitos estabelecidos para a pesquisa;
- Acessibilidade: disponibilidade fácil aos equipamentos e materiais propostos.;
- Aplicabilidade: necessidade dos resultados alcançáveis para o objetivo definido.

Tabela 3. Matriz de decisões

	Precisão	Desempenho	Acessibilidade	Aplicabilidade	Total
PAPA	3	3	3	3	12
Torção Desacoplada	3	2	1	2	8
NATA	3	2	2	1	8
Suspensão Elástica com 3 GDL	2	2	2	1	7
Superfície de Controle e Compensador	2	3	1	2	8

Desse jeito, o aparato com pontuação maior na matriz de decisões é o PAPA.

4. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Considerando os requisitos dos testes aeroelásticos em estudos didáticos iniciais, alguns tipos de aparatos avaliados podem ser desprezados, já que abordam conteúdos mais avançados. Assim, a resposta não linear do *flutter* e a presença de superfícies de controle não se mostram interessantes para estudos iniciais.

A análise dos efeitos de não linearidade do *flutter* no aparato proposto por O'Neil *et al.* (1996), bem como as diferentes configurações de graus de liberdade no aparato de Chowdhury and Sarkar (2003), são vantagens interessantes em um estudo mais aprofundado do fenômeno, mas acabam dificultando o processo de construção sem que haja necessidade nesse primeiro momento.

O modelo com torção desacoplada (Conner *et al.*, 1997) apresenta uma superfície de controle dispensável para obtenção de resultados preliminares da asa. Apesar do modelo permitir a mudança, extraíndo essa superfície da geometria, uma análise modal experimental teria que ser feita para estimar os parâmetros iniciais, tais como frequências naturais e modos de vibração.

Da mesma forma, o aparato com superfície de controle e compensador (Sanches, 2022) poderia ser modificado, a fim de que apresentasse somente a geometria simplificada da asa. Entretanto, esse projeto foi pensado de modo a obter somente efeitos relacionados ao modo de *pitch* da asa, havendo necessidade de ajustá-lo de forma a considerar também o *plunge*.

Sendo assim, após análises e utilizando a tab. 3, o projeto que se mostrou mais adequado à construção em universidades foi o aparato PAPA (Farmer, 1982). Além da geometria ser simples e fácil de ser reproduzida, a única desvantagem é que ele oferece uma quantidade menor de resultados quanto comparado aos outros aparatos. Contudo, para o objetivo desejado, eles se mostram suficientes.

É interessante ressaltar que o túnel de vento em que o experimento será realizado é um fator limitante. Nesse sentido, é necessário que as dimensões do aparato aeroelástico sejam compatíveis com a seção de teste do túnel. Além disso, é imprescindível que a velocidade de *flutter* do aparato esteja dentro da capacidade de fluxo do equipamento.

Por fim, embora o PAPA tenha se mostrado um bom modelo didático, todos os outros apresentados são relevantes a depender da necessidade.

5. REFERÊNCIAS

- Bidinotto, J.H., 2007. *Proposta conceitual de excitador de "Flutter" alternativo para ensaios em vôo*. Master's thesis, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- Bisplinghoff, R.L., Ashley, H. and Halfman, R.L., 1955. *Aeroelasticity*. Addison-Wesley Publishing Co., New York, 1st edition.
- Chowdhury, A.G. and Sarkar, P.P., 2003. "A new technique for identification of eighteen flutter derivatives using a three-degree-of-freedom section model". *Engineering Structures*, Vol. 25, No. 14, pp. 1763–1772.

- Conner, M.D., Tang, D.M., Dowell, E.H. and Virgin, L.N., 1997. "Nonlinear behavior of a typical airfoil section with control surface freeplay: A numerical and experimental study". *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 11, pp. 89–109.
- Cooper, J.E. and Wright, J.R., 2007. *Introduction to Aircraft Aeroelasticity and Loads*. John Wiley & Sons, Chichester, 1st edition.
- Farmer, M.G., 1982. "A two-degree-of-freedom flutter mount system with low damping for testing rigid wings at different angles of attack." *NASA-TM-83302*.
- Friedmann, P.P., 1999. "Renaissance of aeroelasticity and its future". *Journal of Aircraft*, Vol. 36, pp. 105–121.
- Hodges, D.H. and Pierce, G.A., 2011. *Introduction to Structural Dynamics and Aeroelasticity*. Cambridge University Press, New York, 2nd edition.
- Kehoe, M.W., 1995. "A historical overview of flight flutter testing".
- Marqui, C.d., 2004. *Estudo Teórico e Experimental de um Controlador para Supressão de 'Flutter'*. Ph.D. thesis, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- Melo, F.Q. and Carneiro, J., 2008. *Física I*. Universidade do Minho, Azurém.
- NASA, 2016. "Transonic dynamics tunnel". Transonic Dynamics Tunnel - Aeroelasticity Branch. 28 Dez. 2022 <<https://aeroelasticity.larc.nasa.gov/facilities/transonic-dynamics-tunnel/>>.
- O'Neil, T., Gilliatt, H. and Strganac, T.W., 1996. "Investigations of aeroelastic response for a system with continuous structural nonlinearities". *Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Vol. 37, No. 96-1390.
- Sanches, P.A.M., 2022. *Projeto de Aparato Aeroelástico com Superfície de Controle e Compensador*. Master's thesis, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil.
- Silva, G., Silvestre, F. and Donadon, M., 2018. "Active and passive control for acceleration reduction of an aeroelastic typical wing section." *Journal of Vibration and Control*.
- Tavares, E.J., 2009. *Modelo Experimental para Ensaios de Flutter de uma Seção Típica Aeroelástica*. Master's thesis, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- Vergani, R.D., 2017. "Análise conceitual, numérica e experimental utilizando modelo de asa rígida".

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.