



XXVIII CREEM

Congresso Nacional de Estudantes
de Engenharia Mecânica

Santa Maria - RS



XXVIII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
09 a 13 de maio de 2022, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

AseS - Aeroservoelastic Solutions

Rafael Magalhães Coelho, rafamagacoelho@gmail.com
Polliana Cândida Oliveira Martins, polliana.martins@unb.br

Universidade de Brasília, Faculdade UnB Gama - FGA, Setor Leste, Gama - DF | CEP 72.444-240,

Resumo. Dado o potencial catastrófico dos fenômenos aeroelásticos e sua natural importância nas fases de concepção de aeronaves, este trabalho tem por objetivo fornecer uma ferramenta denominada AseS -Aeroservoelastic Solutions, que almeja viabilizar análises aeroelásticas computacionais iniciais em modelos aeronáuticos simplificados, a fim de facilitar o estudo e o entendimento de como diferentes condições de escoamento e geometria dos sistemas afetam um determinado conjunto, ainda em sua fase de concepção. A princípio, foi implementada uma análise de estabilidade aeroelástica dinâmica em um modelo de aerofólio com dois graus de liberdade (torção e flexão) o qual está sujeito a um fluxo de ar de velocidade e densidade conhecidos. A aerodinâmica envolvida foi considerada estacionária. A fim de viabilizar a iterações com possíveis usuários, o código desenvolvido na plataforma Matlab é integrado a uma interface, na qual os dados associados ao modelo bidimensional de 2GDL podem ser modificados de acordo com as necessidades do usuário. Após o recebimento dos dados, é montado e solucionado o problema de autovalores característico, que provê a análise de estabilidade aeroelástica do tipo dinâmica. Dessa análise é possível obter o clássico diagrama V-g-f, que permite o usuário desenvolver uma noção visual de como o fenômeno aeroelástico dinâmico flutter se configura na faixa de velocidades analisadas. Com tais informações, é possível fazer uma estimativa preliminar de envelopes aeroelásticos livres de flutter. Em sua continuidade, a plataforma AseS prevê implementação de outras capacidades, tanto no que diz respeito a modelos estruturais mais complexos quanto no que diz respeito a análise de outros fenômenos aeroelásticos.

Palavras chave: AseS, aeroelasticidade, flutter, interface.

Abstract. Considering the catastrophic potential of aeroelastic phenomena and its natural importance in the aircraft design phase, this work aims to provide a tool called AseS -Aeroservoelastic Solutions, which aims to enable initial computational aeroelastic analysis in simplified aircraft models, in order to facilitate the study and understanding of how different flow conditions and system geometry affect a given assembly, still in its design phase. At first, a dynamic aeroelastic stability analysis was implemented on an airfoil model with two degrees of freedom (torsion and bending) which is subjected to an airflow of known velocity and density. The aerodynamics involved were considered stationary. In order to enable iterations with possible users, the code developed on the Matlab platform is integrated into an interface, in which the data associated with the two-dimensional 2GDL model can be modified according to the user's needs. After receiving the data, the characteristic eigenvalue problem is assembled and solved, which provides the dynamic type aeroelastic stability analysis. From this analysis it is possible to obtain the classic V-g-f diagram, which allows the user to develop a visual notion of how the dynamic aeroelastic phenomenon flutter is configured in the analyzed speed range. With such information, a preliminary estimate of flutter-free aeroelastic envelopes can be made. In its continuation, the AseS platform foresees the implementation of other capabilities, both in terms of more complex structural models and in terms of the analysis of other aeroelastic phenomena.

Keywords: AseS, aeroelasticity, flutter, interface.

1. INTRODUÇÃO

Aeroelasticidade é termo usado para denotar o campo de estudo focado na interação entre as forças elásticas, inerciais e aerodinâmicas que surgem quando uma estrutura elástica se encontra imersa em um escoamento de ar (Bisplinghoff *et al.*, 1996). Tais interações podem ser melhor compreendidas quando da observação do clássico Diagrama de Collar, ilustrado na Figura 1. As teorias de aerodinâmica clássica proporcionam a projeção das forças que atuam em um corpo de uma dada geometria. A elasticidade permite a antecipação da geometria de um corpo elástico sob o efeito de uma dada carregamento (Hodges and Pierce, 2011). A dinâmica introduz os efeitos de forças inerciais.

É comum dividir os fenômenos aeroelásticos em estáticos e dinâmicos (Martins *et al.*, 2017), sendo que esta última é o objeto de trabalho definido nessa pesquisa. A aeroelasticidade dinâmica é a ciência que estuda as consequências das interações simultâneas entre forças aerodinâmicas, elásticas e inerciais (Fung, 2002). Um corpo aerodinâmico alcança a aeroelasticidade dinâmica quando o movimento varia significativamente com o tempo, sob acelerações e velocidades significativas o que implica no surgimento das componentes de inércia que interagem com as componentes elásticas e aerodinâmicas.

Dentro da aeroelasticidade dinâmica, discute-se, principalmente, os seguintes fenômenos de instabilidade aeroelástica:

1. Buffeting

O buffeting constitui-se de vibrações causadas pelas esteiras de escoamento geradas por outras partes da aeronave. Associado à resposta aeroelástica no tempo. Fenômeno típico de aeronaves de alta manobrabilidade, como aeronaves militares, que voam em grandes velocidades e grandes ângulos de ataque. Para aeronaves em velocidade de cruzeiro ou maior velocidade, dependendo do ângulo de ataque, o escoamento pode conter separações, as quais geram excitação aerodinâmica. A estrutura da aeronave vibra devido a essa excitação. Fenômeno altamente não linear, difícil de modelar matematicamente, sendo necessário investigação em túnel de vento.

2. Resposta a Rajada

Ocorrem devido a submissão da aeronave a forças transientes, como rajadas de vento, pouso, disparo de armamentos, alijamento, choque e etc. O aumento do carregamento aerodinâmico devido a uma rajada de vento ocorre devido ao aumento do ângulo de ataque instantâneo, podendo elevar o fator de carga a limite além dos autorizados para a aeronave.

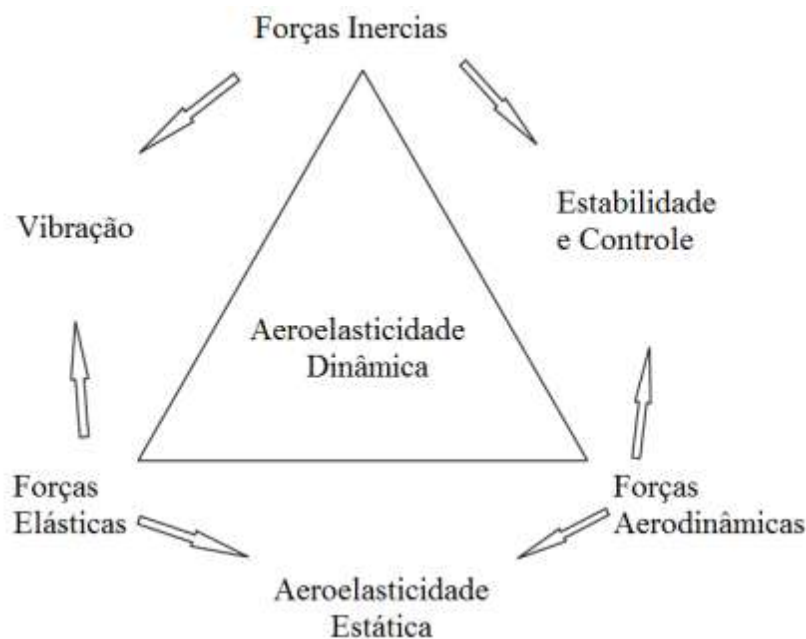


Figura 1: Diagrama de Collar. Adaptado de Wright and Cooper (2014)

3. Flutter

O *flutter* é uma auto excitação de dois ou mais modos de vibração de um sistema, devidamente alterada e realimentada pelo escoamento de um fluido (Wright and Cooper, 2014). Associado a estabilidade dos sistemas aeroelásticos, é considerado o mais importante de todos os fenômenos aeroelásticos e o mais difícil de ser prognosticado. Pode vir a causar oscilações de amplitude que crescem exponencialmente levando a estrutura a uma falha dinâmica. Ocorre à uma velocidade crítica, chamada de velocidade de *flutter*. Abaixo dessa velocidade oscilações são amortecidas pela estrutura, enquanto velocidades acima dessa um dos modos de vibração se torna negativamente amortecido e oscilações instáveis ocorrem, a não ser que alguma forma de não-linearidade à limite. O *flutter* pode tomar várias formas dependendo dos diferentes pares de modos interagindo e também levando em conta a presença de não linearidades.

O fenômeno de instabilidade aeroelástica de interesse deste projeto é o *flutter*. Ele é considerado o fenômeno mais relevante e mais difícil de ser previsto no que se refere a estabilidade de modelos aeroelásticos.

Na história da aviação ocorreram vários acidentes relacionados ao *flutter*. Como o caso clássico de *Whirl Flutter* de Lockheed Electra, decorrente da interação entre a hélice e a asa, que causou acidentes fatais



(a)



(b)

Figura 2: (a) Lockheed L-188C Electra. (b) Destroços Lockheed L-188C Electra.(BAAA (1990))

Na Figura 2-a é possível ver a aeronave Lockheed L-188C Electra e na Figura 2-b estão os destroços da mesma aeronave que sofreu um acidente cuja a causa provável foi a separação da asa direita em voo devido à *flutter* induzido por oscilações na popa.

Todas as aeronaves estão sujeitas aos fenômenos aeroelásticos. Pelas imagens acima (Figura 2-a e Figura 2-b), percebe-se o quão catastróficas podem ser as falhas estruturais causadas pelo *flutter*. Dessa forma, é nítido o quanto a análise de estabilidade aeroelástica dinâmica, especialmente, para prevenção do *flutter*, é um estágio crítico no projeto de aeronaves e no processo de certificação das mesmas. Dessa forma, esse trabalho objetiva fornecer a indivíduos ou grupos amadores de aviação, equipes de competição de aeromodelos e/ou estudantes universitários, uma ferramenta acessível e de fácil utilização, capaz de realizar essa análise de estabilidade aeroelástica para projetos simples e casos simplificados da literatura que embasem projetos em sua fase de concepção.

2. METODOLOGIA

O fluxograma da Figura 3 fornece uma visão geral e simplificada do passo a passo tomado no desenvolvimento deste trabalho. Após a revisão bibliográfica, implementou-se um algoritmo em ambiente MATLAB®, visando uma abordagem gráfica - determinação do diagrama V_{gf} - do comportamento dinâmico aeroelástico de um aerofólio de 2GDL para determinadas condições de escoamento. A abordagem de cálculo da velocidade crítica de *flutter*, para modelos binários aeroelásticos, se dá pelo chamado Método k , (ou método $V-g$), que será descrito na próxima subseção.

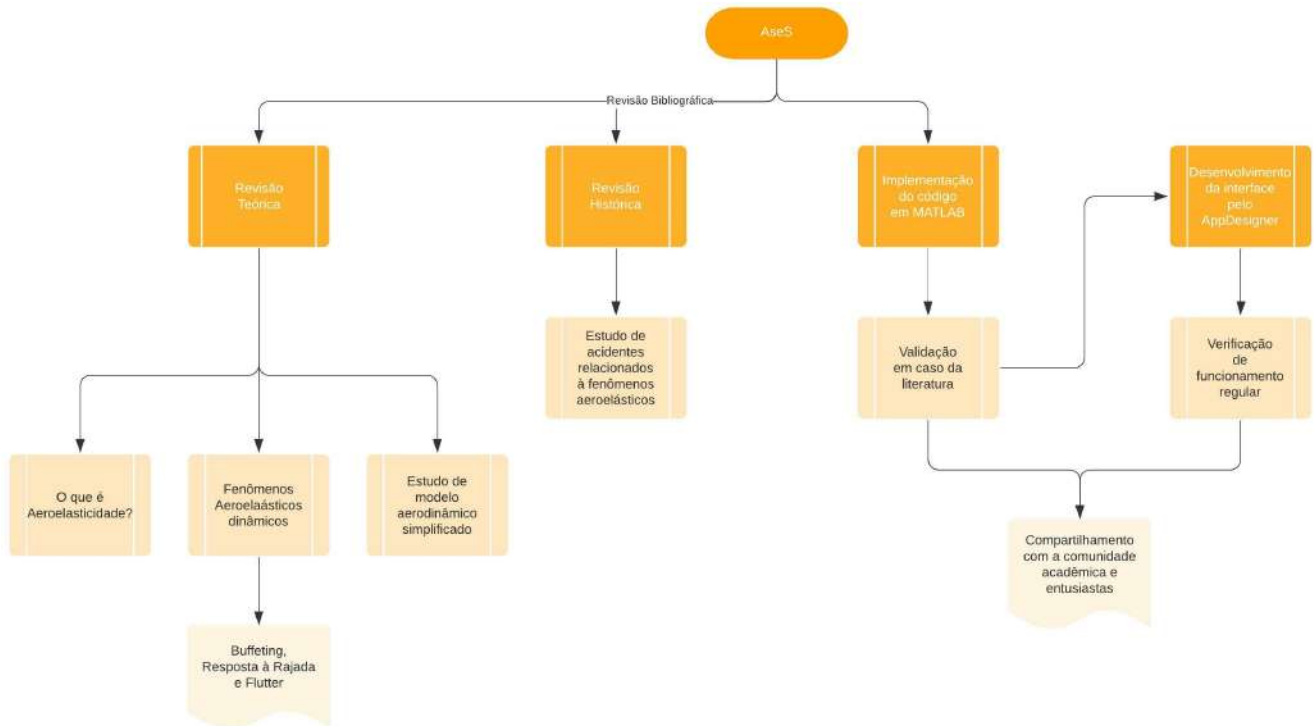


Figura 3: Fluxograma Geral utilizado para geração da plataforma AseS.

Em seguida, foram realizadas mudanças e adaptações no código inicial visando deixá-lo aplicável a ferramenta do software MATLAB®, o *AppDesigner*, que é um ambiente interativo para desing do layout e programação comportamento de uma interface de usuário. A interface construída objetiva facilitar a utilização pelos usuários do código inicial e o entendimento dos resultados proporcionados por ele.

2.1 Método k

O Método k descreve as matrizes aeroelásticas em função do parâmetro adimensional frequência reduzida, $k = \omega b/V$ (Wright and Cooper, 2014), para configuração de um problema característico da autovalores.

Destaca-se ainda que nessa abordagem há a inserção de um amortecimento estrutural fictício, por meio de uma modificação na matriz de rigidez $[K]$ (Martins, 2014), que passa a ser complexa. Esse amortecimento, g , não é um parâmetro de entrada do sistema, ou seja, somente na condição de *flutter* este amortecimento tem significado físico, sendo apenas real no ponto em que é nulo. Assim, o problema de autovalores é formulado de forma que, no resolução, o único valor real de g seja calculado. Então, determina-se o autovalor, a partir do qual determina-se as frequências do movimento e os fatores de amortecimento para cada uma das frequências reduzidas de interesse.

Deste método, pretende-se traçar os tradicionais diagramas de análise de estabilidade aeroelástica, os chamados Diagramas V_{gf} (Velocidade, amortecimento e frequência). Nesses diagramas, é possível observar a evolução das frequências e fatores de amortecimento de cada modo da estrutura em função da velocidade (Martins *et al.*, 2017). O ponto onde ocorre a mudança de sinal do fator de amortecimento denuncia a velocidade crítica de flutter.

O processo pode ser melhor compreendido quando da observação da Figura 4.

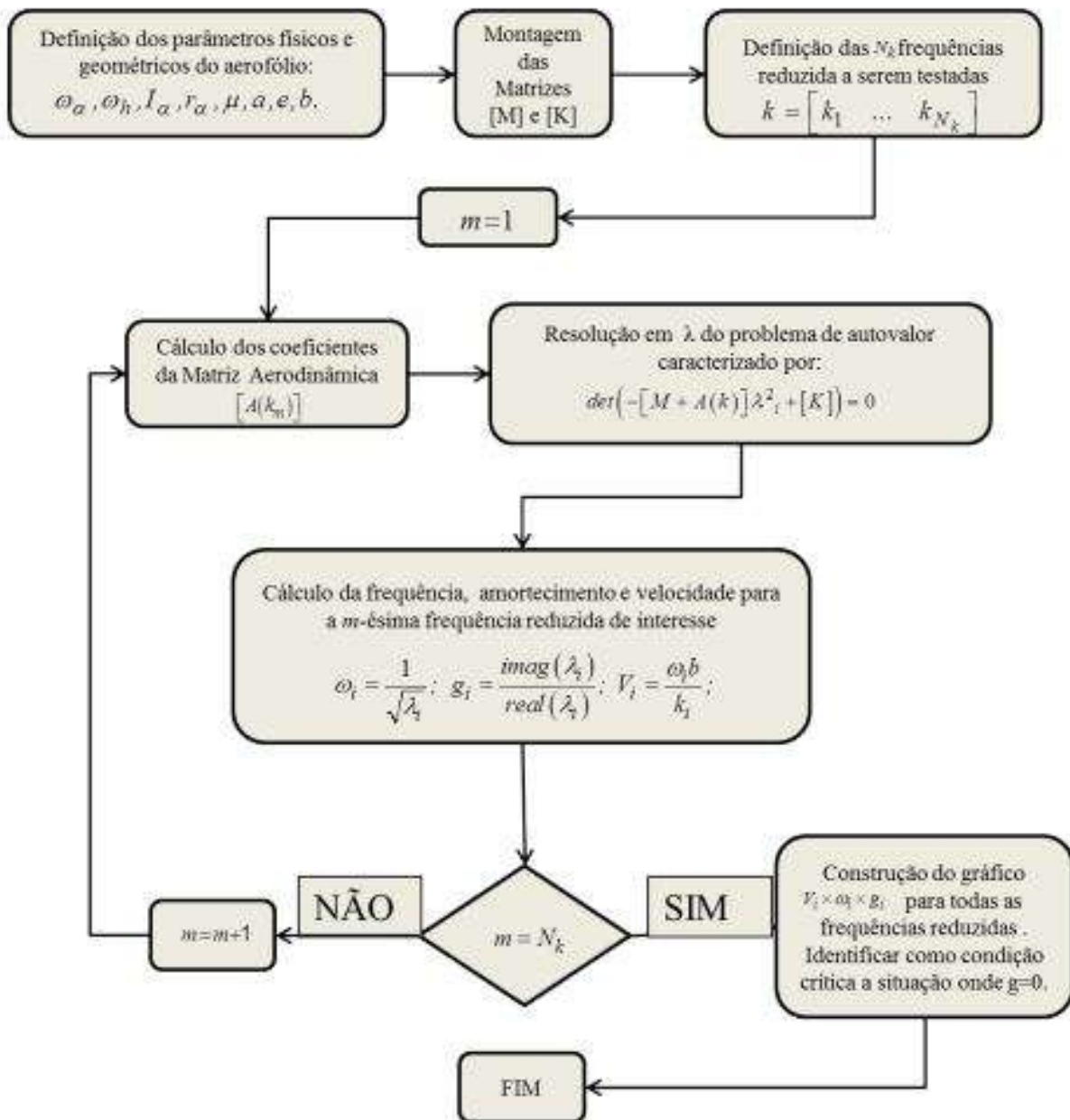


Figura 4: Método K. Fonte: Martins (2014).

3. INTERFACE AseS

A interface desenvolvida, AseS - Aero-servo-elastic Solutions tem sua versão preliminar apresentada na Figura 5.

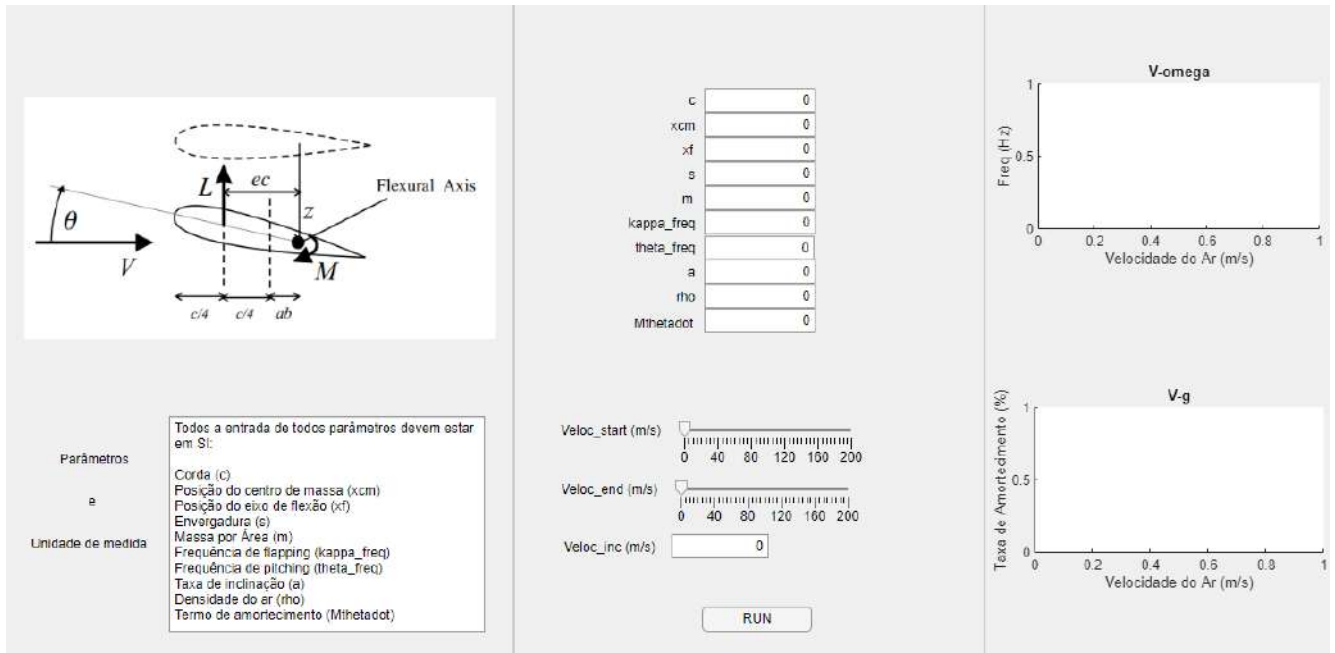


Figura 5: Interface - AseS: Uma versão preliminar

A utilização dessa interface pelo usuário é simples, e será demonstrada pelo BPMN (Business Process Model and Notation) abaixo:

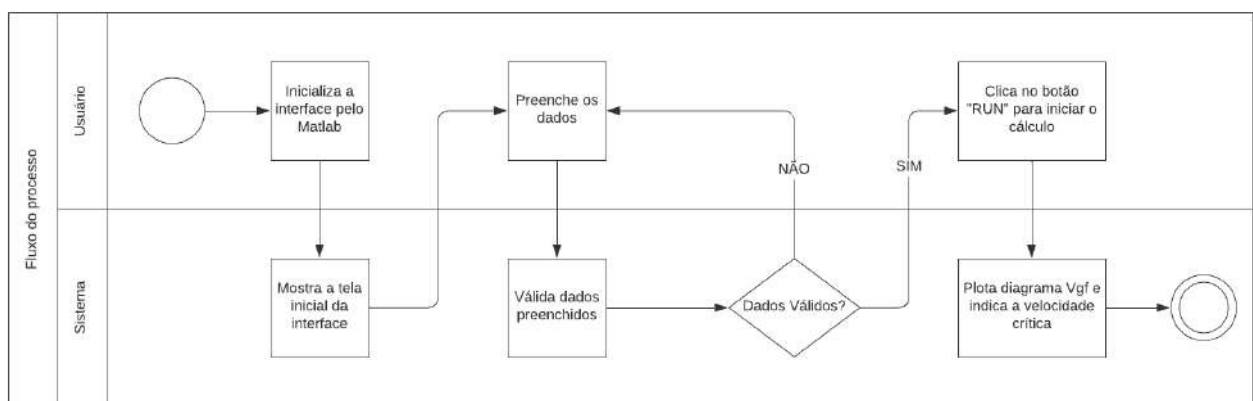
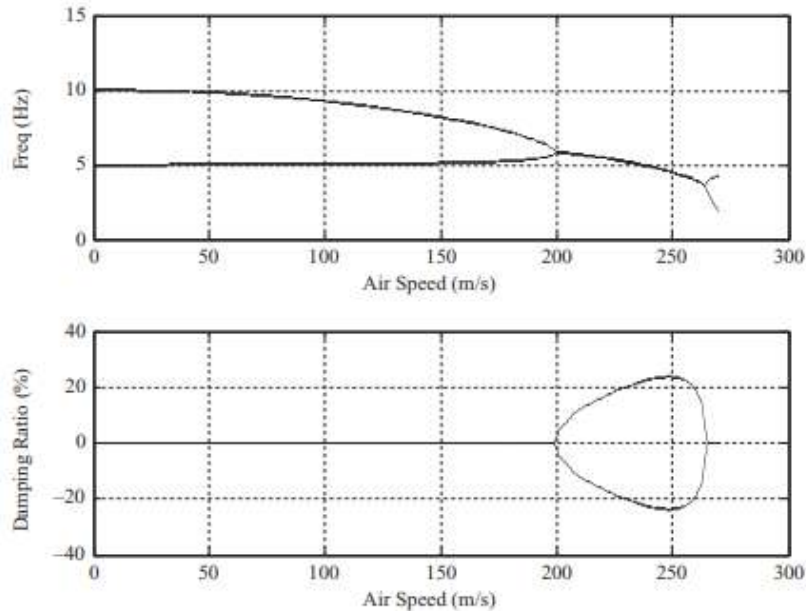


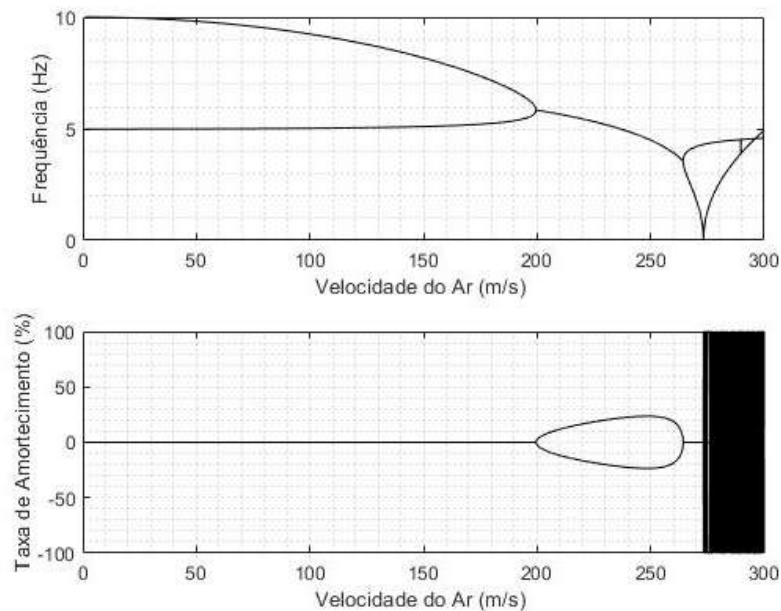
Figura 6: BPMN - AseS

3.1 Aplicação do AseS

O objetivo dessa aplicação é averiguar a qualidade do comportamento dos resultados obtidos pelo AseS comparado aos resultados de um caso exemplo conhecido da literatura (Wright and Cooper (2014)). A Figura 7 compara os resultados obtidos pelo AseS com os resultados do caso exemplo.



(a) Caso Exemplo. Fonte:Hodges and Pierce (2011).



(b) AseS.

Figura 7: Comparação de resultados.

A partir da observação dos diagramas V_{gf} percebe-se a proximidade entre os resultados da literatura e os resultados do AseS dentro do intervalo de interesse, entre a velocidade inicial e a velocidade crítica de flutter. Após esse intervalo, nota-se que o AseS continua plotando os dados até o fim do intervalo de velocidades dados como entrada, o quais não são apresentados no exemplo estudado.

Assim, é possível inferir que o AseS gera resultados de alto nível de confiabilidade quando comparado com soluções de problemas de referência.

4. CONCLUSÕES

Um algoritmo computacional, que ilustra o comportamento dos modos aeroelásticos e indica a condição potencial de ocorrência do fenômeno de *flutter* em um aerofólio de 2GDL foi adaptado para se tornar extensível a uma interface utilizável para usuários poucos familiarizados com programação e/ou com as teorias aeroelásticas relacionadas a análise de estabilidade aeroelástica. Considerando-se a dificuldade de previsão desse fenômeno aeroelástico, o AseS desempenhará um papel importante no âmbito acadêmico no nível de graduação, como também no contexto de competições de aeromodelismo e até mesmo para amadores da aviação, uma vez que essa ferramenta possibilita o estudo e compreensão de casos simplificados da literatura de forma aplicada, bem como análises preliminares e abreviadas de projetos de aeromodelos amadores ou de competição.

Futuramente, pretende-se estender o campo de aplicações da plataforma, para prever diversas outras capacidades. Uma delas é a possibilidade de variações paramétricas (valores físicos e geométricos) dos modelos. A implementação de modelos tridimensionais incluindo superfícies de controle também é almejada. Ademais, pretende-se incluir modelos aerodinâmicos de maior complexidade, para fomentar outras discussões no que concerne a fenômenos dinâmicos. Todas essas capacidades tornarão a ferramenta mais completa para análises aeroelásticas e facilitarão a vida do projetista, para que este tenha condições de tomar decisões apropriadas e alcançar sucesso em seus projetos.

5. REFERÊNCIAS

- BAAA, 1990. “Crash of a LOCKHEED L-188C ELECTRA near tell city: 63 killed”. Bureau of Aircraft Accidents Archives. Fevereiro. 2022. <<https://www.baaa-acro.com/crash/crash-lockheed-l-188c-electra-near-tell-city-63-killed>>.
- Bisplinghoff, R.L., Ashley, H. and Halfman, R.L., 1996. *Aeroelasticity*. Dover Publications, New York, first dover edition edition. ISBN 978-0-486-69189-3.
- Fung, Y.C., 2002. *An Introduction to the Theory of Aeroelasticity*. Dover Publications. ISBN 978-0-486-49505-7. Google-Books-ID: KetYrthKfEgC.
- Hodges, D.H. and Pierce, G.A., 2011. *Introduction to Structural Dynamics and Aeroelasticity*. Cambridge University Press, 2nd edition.
- Martins, P.C.O., Guimarães, T.A.M., Pereira, D.d.A., Marques, F.D. and Rade, D.A., 2017. “Numerical and experimental investigation of aeroviscoelastic systems”. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 85, pp. 680–697. ISSN 0888-3270. doi:10.1016/j.ymssp.2016.08.043. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327016303351>.
- Martins, P.C.O., 2014. *ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO AMORTECIMENTO VISCOELÁSTICO NO FENÔMENO AEROELÁSTICO DE FLUTTER*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Uberlândia.
- Wright, J.R. and Cooper, J.E., 2014. *Introduction to Aircraft Aeroelasticity and Loads*. Wiley, 2nd edition. ISBN 978-1-118-48801-0.