

Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Modelagem de uma asa AGARD 445.6 por meio do Método de Elementos Finitos - CALCULIX

Bolsista: Breno Henrique Reis Oliveira

Orientador(a): Adolfo Gomes Marto

Período a que se refere o relatório: Abril de 2017 a Julho de 2017

Resumo

Este projeto teve como objetivo o estudo da validação de um programa de elementos finitos *open-source*, CALCULIX, através de sua aplicação em problemas de análise modal de uma placa retangular fina, a qual possui solução analítica, e de análise modal da asa AGARD 445.6, a qual possui resultados experimentais. Os resultados mostraram que o elemento finito do CALCULIX usado para modelar a asa e placa, o S4, não produz resultados satisfatórios para frequências modais mais altas. Observou-se que a aplicação dos elementos S8 e S8R foi muito mais eficiente. Uma vez que para a placa retangular fina, a utilização dos elementos S8 e S8R gerou bons resultados, é possível concluir que o uso do software CALCULIX é viável para o cálculo das frequências modais de uma estrutura. Para trabalhos futuros, espera-se realizar testes do CALCULIX na asa AGARD 445.6 com o elemento S4 com um maior refinamento da malha, e analisar os resultados da modelagem da asa com a aplicação de outros elementos finitos, tais como S8 e S8R.

1. Introdução

O Método dos Elementos Finitos é um método numérico para resolver problemas de engenharia e matemática física. Geralmente, o método é utilizado em problemas como análise estrutural, transferência de calor, fluxo de fluido, transporte de massa, e potencial eletromagnético. A formulação de problemas de elementos finitos resulta em um sistema de equações algébricas ao invés de um sistema de equações diferenciais, o que facilita a aplicação de métodos numéricos para se obter valores aproximados das incógnitas. [1]

Ao invés de resolver o problema para todo o corpo em uma operação, o Método dos Elementos Finitos formula as equações para corpos menores e as combina para obter a solução de todo o corpo. Este processo de modelar um corpo dividindo-o em um sistema equivalente de corpos menores ou unidades (elementos finitos) interligados em pontos comuns a dois ou mais elementos (pontos nodais ou nós) e/ou linhas e/ou superfícies de fronteira é chamado discretização. [1]

Devido à sua eficiência e fácil aplicação, o método é estudado por diversas áreas da engenharia tais como a engenharia aeroespacial, a qual o utiliza para estimar o comportamento estrutural de foguetes, aviões ou até mesmo pás de turbinas eólicas sob os efeitos aerodinâmicos. [2]

Um grande desafio na simulação computacional, é determinar a confiabilidade dos dados obtidos. Na introdução de Cook (1995) [2], é proposto que, na tentativa de se resolver um problema complexo, deve-se inicialmente buscar implementar o Método dos Elementos Finitos a uma versão mais simples do mesmo que tenha solução analítica para comparação de dados, e evitar erros envolvidos aos dados de entrada, tais como o tipo de elemento escolhido, as propriedades do material e as condições de contorno. Após isso, a avaliação dos dados do problema em sua versão mais complexa pode ser feita através de análises qualitativas.

Por outro lado, em alguns trabalhos, a confirmação dos dados obtidos é feita através da comparação com resultados experimentais de estudos confiáveis. Uma grande referência para estudos de métodos computacionais estruturais é a asa AGARD 445.6 [3]. No trabalho de Yates (1963) [3], foram realizados experimentos aeroelásticos de uma asa engastada para validar a eficiência de vários métodos computacionais.

Kavukcuo lu (2003) [4], propõe um algoritmo de solução aeroelástica unindo dados de dinâmica de fluido computacional e dados de dinâmica estrutural computacional. O método é aplicado ao caso da asa AGARD 445.6, uma vez que a solução teórica e o trabalho

experimental desta asa estão documentados em detalhe. As frequências e formas modais da estrutura são comparadas com resultados experimentais [3].

No instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) são realizados estudos aeroelásticos de estruturas aeroespaciais. Um dos projetos do IAE tem como objetivo desenvolver um software que realiza análises aeroelásticas através da união de dados de dinâmica de fluido computacional e de dinâmica estrutural computacional, trabalho análogo ao desenvolvido por Kavukcuo lu (2003) [4]. Para a realização das rotinas de análise estrutural, o projeto visa utilizar softwares *open source*, uma vez que a licença dos mesmos permite modificações do código fonte e a criação de trabalhos derivados. Uma possibilidade é o software CALCULIX o qual é um *open source* que aplica o método dos elementos finitos para análise estrutural.

Visto que não há muitos trabalhos que envolvem a utilização do CALCULIX, é necessário, portanto, que se faça uma análise da precisão dos dados deste software, para que o mesmo seja utilizado de forma confiável. Uma forma de avaliação do software é a realização de análises estruturais que possuem solução analítica. Também, pode-se utilizar o CALCULIX para calcular as frequências e formas modais da estrutura da asa AGARD 445.6 e compará-las aos dados experimentais disponibilizados por Yates (1963) [3] assim como foi feito por Kavukcuo lu (2003)[4].

Desta forma, este projeto teve como objetivo o estudo da validação do software CALCULIX.

2. Materiais e métodos

2.1 Análise de uma placa retangular fina

Modelou-se uma placa fina retangular, descrita na figura 1, com três bordas simplesmente apoiadas e uma borda fixada e calculou-se através do CALCULIX as frequências e as formas modais. A placa foi modelada com 200 elementos sendo 10 no sentido de x e 20 no sentido de y . Os resultados obtidos foram comparados com a solução analítica do problema, divulgada por Wang (2014) [6].

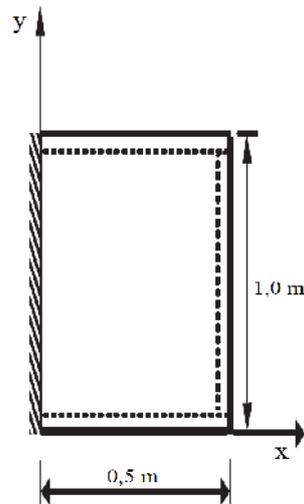


Figura 1- Placa retangular fina com três bordas simplesmente apoiadas e uma borda fixada

2.3 Análise da asa AGARD 445.6

A análise da asa AGARD 445.6 foi realizada para extrair as frequências modais e as formas de modo da estrutura. Os dados extraídos foram comparados com estudos anteriores e dados experimentais. As propriedades geométricas e estruturais da asa são dada por Yates [3]. As dimensões usadas no modelo são descritas na figura 2. Usando essa informação, o modelo de elementos finitos da asa foi criado e a análise modal foi feita com o software CALCULIX.

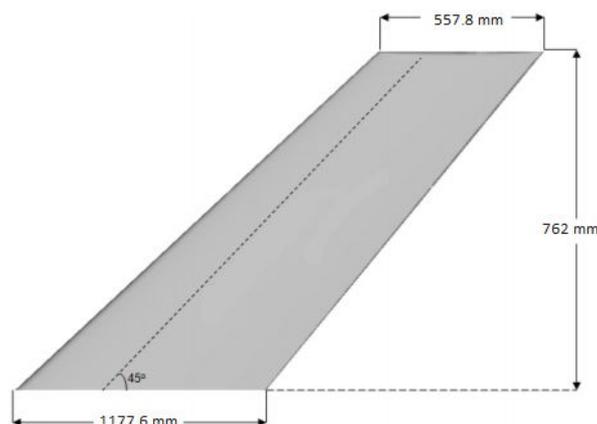


Figura 2- Modelo asa Agard 445-6 e suas dimensões [3]

De acordo com a referência citada, o material da asa usado foi o “ Laminated Mahogany” . Suas propriedades são descritas na seguinte Tab. 1.

Tabela 1- Propriedades mecânicas do material “ Laminated Mahogany” [6]

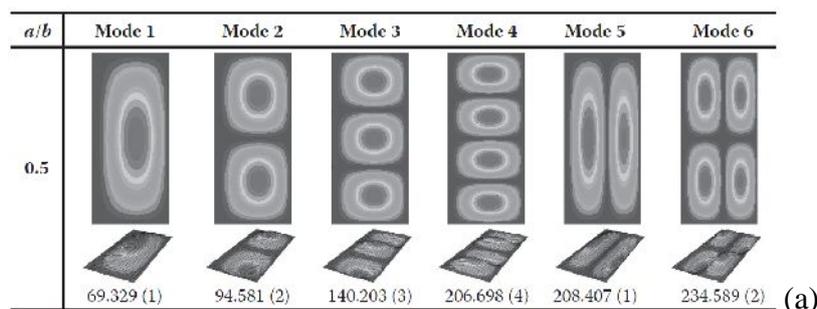
Propriedade do Material	Valor
(Kg/m ³)	397,5
E₁₁ (GPa)	3,1511
E₂₂ (GPa)	0,4162
E₃₃ (GPa)	0,4162
G₁₂ (GPa)	0,4392
G₁₃ (GPa)	0,4392
G₂₃ (GPa)	0,4392
1	0,31
2	0,31
3	0,31

O modelo de elementos finitos da asa foi feito com 11 nós no sentido da corda e 21 nós no sentido da envergadura da asa, criando um total de 200 elementos. Determinou-se elementos do tipo placa S4 com as espessuras dos nós variáveis. Definido o modelo, foi feita a comparação dos resultados obtidos com a literatura [3].

3. Resultados

3.1 Placa retangular fina

As soluções analíticas das frequências naturais da placa retangular fina modelada e as calculadas por CALCUIX são mostradas na Fig. 3. Nota-se que as formas modais obtidas pelo CALCULIX foram satisfatórias para apenas os dois primeiros modos. Nos demais modos, as formas obtidas foram diferentes da literatura.



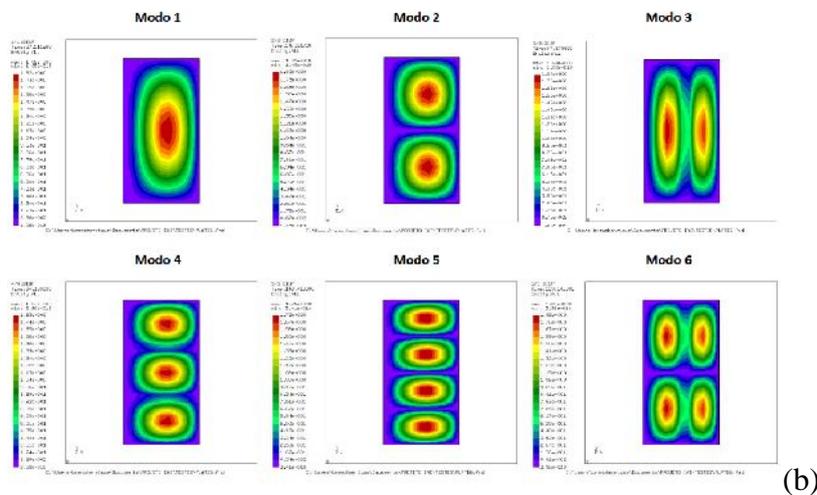


Figura 3- Formais modais da placa retangular e respectivas frequências naturais: extraídos da ref [6] (a) ; calculados pelo programa CALCULIX (b)

Com esse resultado decidiu-se investigar a causa pela qual o CALCULIX não produziu resultados satisfatórios para frequências maiores. Para isso, foram feitos testes com malhas mais refinadas, ou seja, com mais elementos, e com outros tipos de elemento, os quais foram do tipo S8 e S8R. Nestes testes observou-se que quanto maior a frequência modal desejada, maior deverá ser o refinamento da malha.

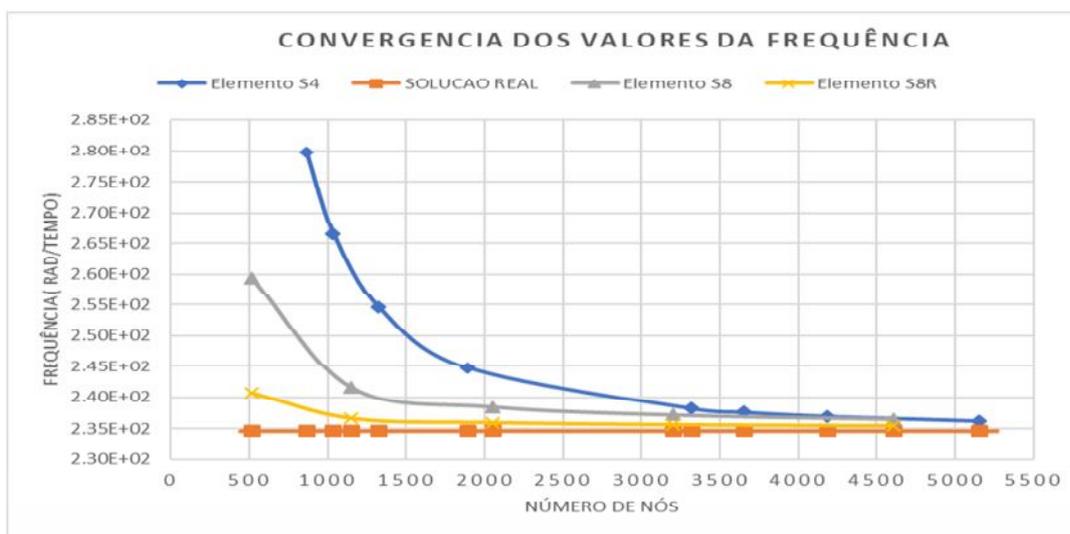


Figura 4- Gráfico de convergência dos valores da frequência do sexto modo da placa retangular de acordo com tipo de elemento e o número de nós.

No gráfico da Figura 5, foi feita uma comparação entre os valores da frequência do sexto modo obtidos por diferentes elementos com variação do número de nós. Nota-se que com a

melhora do refinamento da malha, os valores convergem para a frequência real. Também, é claramente visível que os elementos do tipo S8 e S8R convergem com um número de nós significativamente menor do que o elemento S4. Assumindo-se dez por cento ser um erro percentual satisfatório, observa-se que o elemento S4 atinge a faixa dos dez por cento com aproximadamente 1200 nós, enquanto o elemento S8 necessita de 500 para convergir a faixa satisfatória. O elemento S8R, por sua vez, apresentou o melhor resultado. Em [8] é possível encontrar um gráfico análogo ao da Fig. 5, mostrando a superioridade dos elementos quadráticos, S8 e S8R, em relação aos lineares, S4. No manual do CALCULIX [7], há uma seção de instrução de uso chamada Golden Rules na qual o autor expressa que as funções de forma padrão para elementos quadráticos do software são muito boas. Entretanto, no caso dos elementos lineares, tais funções de forma padrão possuem algumas complicações, como bloqueio por cisalhamento e bloqueio volumétrico. Portanto, a maioria dos programas de elementos finitos modificam as funções de forma padrão de elementos lineares. Entretanto tais modificações não foram publicadas.

3.2 Análise da asa AGARD 445.6

A Figura 6 mostra as formas modais da literatura [3] e as obtidas pelo CALCULIX. A tabela a seguir realiza a mesma comparação para os valores das frequências modais.

Tabela 2- Comparação entre as frequências modais obtidas pelo CALCULIX com os valores da Yates [3].

Frequências modais		
Yates [3] (Hz)	CALCULIX (Hz)	Erro(%)
9.6	9.4	2.5
38.1	44.0	13.8
48.1	57.1	19.1
98.5	117.9	27.0
118.1	139.3	18.0

Na tabela 2, nota-se que o erro percentual cresce com o aumento das frequências. O mesmo observa-se com as formas modais. A quinta forma modal obtida pelo CALCULIX não condiz com a literatura. Sabendo-se que tal fenômeno foi observado no estudo da placa retangular,

conclui-se que é necessário um aumento no número de elementos, ou a aplicação de elementos quadráticos, S8 ou S8R, no modelo da asa para gerar melhores resultados.

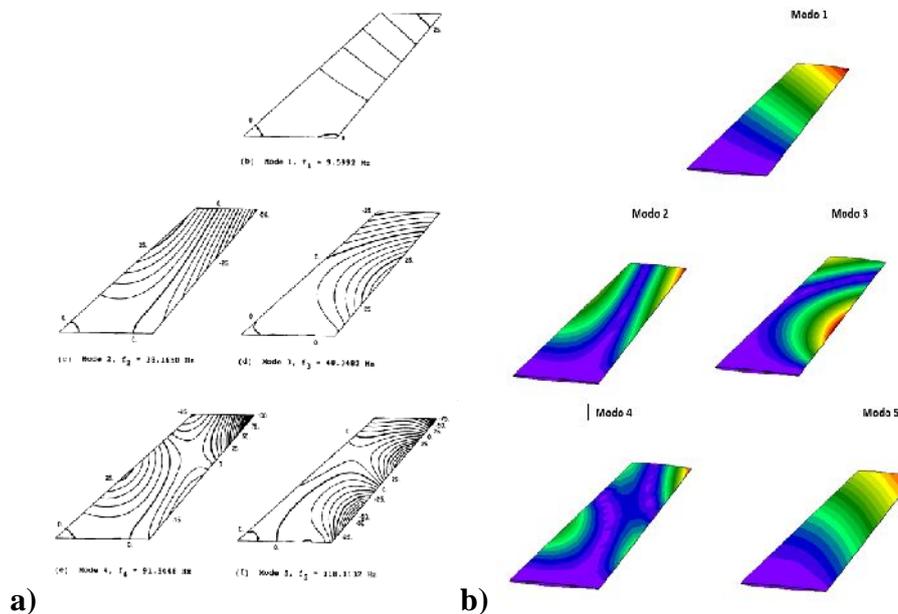


Figura 5- Comparação entre as formas modais divulgadas por Yates [3] (a) com as obtidas pelo CALCULIX (b).

Assume-se que erros percentuais acima de dez por cento são insatisfatórios. Desta forma, apenas o primeiro modo de frequência natural obtido pelo CALCULIX possui um valor considerável.

5. Conclusões

Neste trabalho pode-se avaliar o desempenho do software CALCULIX para a análise modal de uma estrutura. Observou-se que o uso de elementos do tipo S4 no CALCULIX necessitam de um grande número de nós para gerar valores satisfatórios para frequências modais mais altas. Tal fato foi observado no gráfico da figura 5, onde o elemento S4 necessita do dobro do número de nós que o elemento S8 para atingir a faixa satisfatória. Além disso, a superioridade dos elementos quadráticos em relação aos lineares é descrita por Dhondt em [7].

Uma vez que para a placa retangular fina, a utilização dos elementos S8 e S8R gerou bons resultados, é possível concluir que o uso do software CALCULIX é viável para o cálculo das frequências modais de uma estrutura.

Portanto, para trabalhos futuros, espera-se realizar testes do CALCULIX na asa AGARD 445.6 para se descobrir a quantidade de nós necessários para atingir valores satisfatórios utilizando-se do elemento S4. Também, é interessante analisar os resultados da modelagem da asa com a aplicação de outros elementos finitos, tais como S8 e S8R.

Referências

- [1] Logan, D., A First Course in the Finite Element Method, Thomson, USA, Fourth Edition, 2007.
- [2] Cook, R. D. ; Finite Element Modeling for Stress Analysis, John Wiley & Sons, 1995
- [3] Yates, E. C., Jr.; Land, N. S.; and Foughner, J. T., Jr., “Measured and Calculated Subsonic and Transonic Flutter Characteristics of a 45 deg Sweptback Wing Planform in Air and in Freon-12 in the Langley Transonic Dynamics Tunnel,” NASA TN D-1616, March 1963.
- [4] Kavukcuo lu, K., “Wing Flutter Analysis with an Uncoupled Method”, MS Thesis, M.E.T.U., Ankara, 2003.
- [5] Wang, C.Y.; Wang, C.M. Structural Vibration: Exact Solutions for Strings, Membranes, Beams, and Plates, CRC Press, 2014.
- [6] Akgül, M., “Static Aero-Elastic Analysis of a Generic Slender Missile Using a Loosely Coupled Fluid-Structure Interaction Method”, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle-East Technical University, 2015.
- [7] Dhondt, G.; CalculiX CrunchiX User’s Manual, Version 2.9, 2015.
- [8] Simply Supported Beam Model With Solid Elements. Disponível em: <<https://github.com/mkraska/CalculiX-Examples/tree/master/Elements/Solid#simply-supported-beam-model-with-solid-elements>>. Acesso em: 4 julho de 2017.