

Análise de literatura dos materiais compósitos

Caio Cesar Correa Vilela⁽¹⁾; Adriana Amaro Diacenco⁽²⁾

¹Graduando do curso de graduação em Engenharia Mecânica da FEPI – Centro Universitário de Itajubá, caio_vilella@yahoo.com.br

² Professora da FEPI – Centro Universitário de Itajubá, adriana_aadiacenco@yahoo.com.br

RESUMO

Os materiais compósitos são combinações de materiais diferentes e que tem suas propriedades melhoradas e que obter essas mesmas propriedades em um material único seria mais difícil. Os compósitos são devidos em três classes e cada classe podendo ter subclasses ou não, a utilização das variadas classes de compósito varia de acordo com a sua aplicação. Utilizando o método de elementos finitos podemos fazer análises e simulações das estruturas dos compósitos, que pode resolver problemas estruturais. A aplicação dos materiais compósitos é ampla, podendo ser utilizados tanto na construção civil como em aviões ou em carros, assim podendo mostrar que as variedades dos mesmo são eficientes e mais leves comparado ao uso de ligas metálicas, cerâmicas e os polímeros.

Palavras-chave: materiais compósitos, estrutura, propriedades, aplicação, tecnologia.

INTRODUÇÃO

De acordo com (Callister Jr., 2002; Faria, 2006) os materiais compósitos têm sido utilizados cada vez mais em substituição aos materiais convencionais como, por exemplo, os materiais metálicos, os cerâmicos, e os polímeros. Isso se deve às propriedades superiores e/ou específicas desses materiais, dentre as quais, pode-se citar a sua relação resistência/peso muito superior quando comparado aos materiais metálicos tradicionais como aço e alumínio.

Com isso temos uma grande variedade de combinações de componentes para o desenvolvimento de materiais novos com grande aplicações em diferentes áreas, abrindo portas para novas tecnologias e conhecimentos nos quais é muito benéfico para a homem.

Com um grande aumento de pesquisas sobre os materiais compósitos tem o conhecimento que o mesmo são divididos tem três categorias, os compósitos de fibras reforçantes, os compósitos de partículas reforçantes e os compósitos estruturais.

Utilizando o método de elementos finitos (MEF) podemos fazer várias análises, cálculos estruturais e resolver vários problemas para a engenharia.

Os materiais compósitos tem uma grande variedade de aplicações e é muito utilizado na área aeroespacial, naval, automobilística, petrolífera e eletrônica (Callister Jr., 2002).

Segundo Mendonça (2005), um material compósito é a junção de dois ou mais materiais distintos que são combinados visando obter propriedades que nenhum dos materiais isoladamente apresenta.

Os materiais compósitos são divididos em três classes e respectivamente tendo várias subclasses como mostrado na Figura 1.



Figura 1: Classes e subclasses.

COMPÓSITOS REFORÇADOS COM PARTICULAS

Esses materiais são divididos em compósitos com partículas grandes e compósitos reforçados por dispersão. A distinção entre essas subclassificações estão baseadas no mecanismo de reforço ou aumento de resistência, onde a fase particulada é mais dura e mais rígida que a matriz (Diacenco, 2010).

MATERIAIS COMPÓSITOS

Compósitos com partículas grandes são materiais poliméricos que receberam algum enchimento que modificam e melhoram as suas propriedades estruturais e/ou substituem parte do volume do polímero por um material mais barato e não podem ser tratados do ponto de vista atômico ou molecular. Um exemplo é o concreto (mostrado na Figura 2) que é comum no dia a dia e poucas pessoas sabem que é um material compósito.



Figura 2: Exemplificando os compósitos com partículas grandes.

Os materiais compósitos reforçados por dispersão, são compósitos que as suas partículas são pequenas, o diâmetro gira em torno de 0,01 a 0,1 μm . O aumento de resistência tem relação com a interação entre a matriz (material base) e as partículas (material adicionado) que ocorre a nível atômico ou molecular. A Figura 3 mostra um exemplo microscópico de uma estrutura reforçada por dispersão de Alumínio (Al), Silício (Si) e Carbono (C).

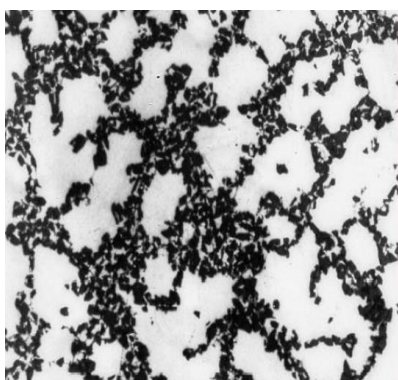


Figura 3: microscópica de Al-SiC

COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Tecnologicamente, os compósitos mais importantes são aqueles em que a fase

dispersa encontra-se na forma de uma fibra. (Callister Jr., 2002).

As características mecânicas de um compósito reforçado com fibras não dependem somente das propriedades da fibra, mas também do arranjo ou orientação das mesmas umas em relação às outras, a concentração delas, e sua distribuição pela matriz (Diacenco, 2010). Esse tipo de compósito possui as fibras contínuas e as fibras descontínuas como ilustrado na Figura 4.

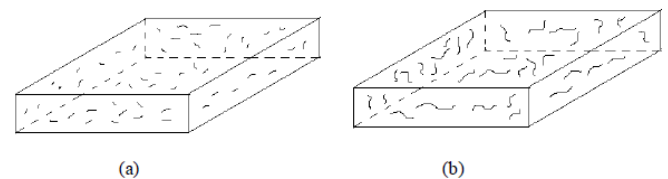


Figura 4 : (a) compósitos com fibras descontínuas; (b) compósitos com fibras contínuas.

Além disso as fibras podem ser unidirecionais, ou seja elas seguem uma única direção, bidimensionais, as fibras são orientadas em duas direções ortogonais (utilizados em tecidos), ou com fibras orientadas aleatoriamente (esteiras), e os tridimensionais no qual eles são orientados em um espaço tridimensional (tecidos multidimensionais).

COMPÓSITOS ESTRUTURAIS

Um compósito estrutural é composto tanto por materiais homogêneos como por materiais compósitos cujas propriedades dependem não somente das propriedades dos materiais constituintes, mas também do projeto geométrico dos vários elementos estruturais (Callister Jr., 2002). Os dois tipos básicos de compósitos estruturais são os compósitos laminares ou laminados e os compósitos tipo sanduiche.

Um compósito estrutural laminar é composto por várias camadas bidimensionais para ter sua estrutura melhorada, para Diniz (2017, p. 12) "onde a resistência varia de acordo com a orientação das fibras em cada lâmina, tendo uma das direções de maior índice de resistência". Tal como encontrado na madeira e em plásticos reforçados com fibras contínuas e alinhadas (Callister Jr., 2002) e para atender o projeto ou fabricação no qual for requisitado. Na Figura 5 um exemplo de compósito laminar.

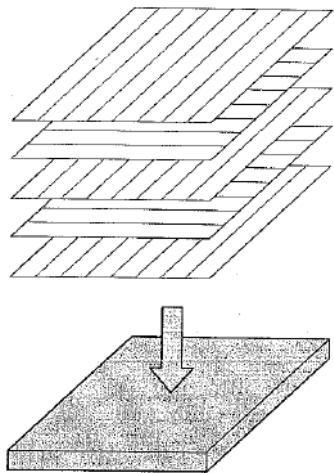


Figura 5: Compósito laminar com fibras bidirecionais.

Projetos de estruturas do tipo sanduíche têm sido concebidos e adotados como um meio de gerar estruturas resistentes, duráveis e de baixo peso. Essas estruturas são especialmente eficientes na transferência de cargas de flexão e compressão (Gagliardo; Mascia, 2010).

As estruturas sanduíches são constituídas por duas ou mais camadas de materiais diferentes, com um adesão bem feita, e a combinação delas faz com que o elemento, como um todo, melhore sua estrutura exponencialmente.

Da mesma forma como ocorreu com os materiais compostos em geral, a aplicação dos elementos do tipo sanduíche começou a se expandir em direção à indústria da construção civil a partir da década de 1990. (Gagliardo; Mascia, 2010). Na Figura 6 mostra as variedades dos núcleos do compósito estrutural do tipo sanduíche.

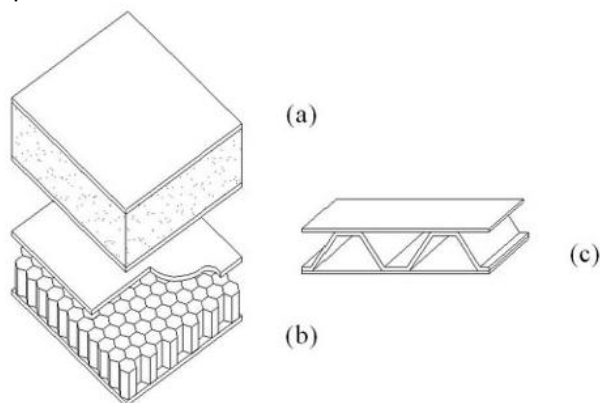


Figura 6: Painéis sanduíches com núcleos: (a) poliméricos, (b) colmeia, (c) corrugado.

DISCUSSÃO

Os compósitos é uma forma de conseguir materiais resistentes e leve do que algumas ligas metálicas, pois utilizando o mesmo temos uma grande variedade de aplicação dos compósitos, em áreas militares, construção civil, automobilística, aeroespacial.

Os compósitos de com partículas varia de acordo com o mecanismo de reforço podendo ser divididas em duas subclasses, as de partículas grandes e partículas de dispersão (diâmetro das partículas varia entre 0,01 a 0,1 μm).

os compósitos reforçados com fibras depende do arranjo e da direção das fibras na qual define a suas propriedades, a fibra de carbono é um compósito de fibra eu é conhecido por ser leve como madeira ou plástico mas com propriedades semelhantes ao do aço.

Os compósitos estruturais como foi citado anteriormente possui duas subclasses, os laminados nos quais é composta por várias camadas bidimensionais, sendo utilizado em rede neurais artificiais que tem o objetivo de determinar a orientação adequada das camadas dos laminados e que tem um importância fundamental em análises futuras, e os compósitos do tipo sanduíche são constituídas de duas ou mais camadas de materiais diferentes para gerar uma estrutura mais resistente e mais leve que é muito utilizado na construção civil.

Nos dias de hoje a utilização de materiais compósitos é importante pois você consegue materiais mais resistentes, mais leves e com uma ampla aplicação, no qual sem eles poderiam ser feitas estruturas mais pesadas mas com a mesma resistência, na área militar os compósitos são muito utilizados nas blindagens de tanques de guerra como nas estruturas de aviões de guerra, um exemplo seria o Lockheed Martin **F-35** "Lightning II" que foram utilizados materiais compósitos na sua estrutura.

CONCLUSÕES

As pesquisas e estudos utilizando os materiais compósitos em aumentando cada vez mais pois a diversidade de combinações que podem ser utilizadas em suas misturas e com aplicações variedades tem ajudado no desenvolvimentos de novas tecnologias.

O uso de compósitos no dia a dia tem aumentando gradativamente, depois de ter feito estudo literário dos compósitos eu acabei

descobrimos que o concreto é um compósito que é utilizado no dia a dia no qual poucas pessoas tem conhecimento disso.

A área dos compósitos é muito abrangente para fazer estudos e pesquisas nos quais quanto mais pesquisa mais interessante fica.

REFERÊNCIAS

- Allen, H. G. **Analysis and Design of Structural Sandwich Panels**. Hungary: Pergamon Press, 1969.
- Azevedo, A.F.M. **MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- Callister, Jr., W.D. **Ciência e Engenharia de Matérias: Uma introdução**. Editora LTC, 5 Ed., Rio de Janeiro, RJ, 2002. ISBN: 85216-1288-5.
- DIACENCO, A. A., **Modelagem por Elementos Finitos de Materiais Compósitos Estruturais Incorporando Material Viscoelástico Para o Controle Passivo de Vibração e Ruído**. Universidade Federal de Itajubá (Dissertação de Mestrado), 2010.
- Faria, A.W. **Modelagem por Elementos Finitos de Placas Compostas dotadas de Sensores e Atuadores Piezoelétricos: implementação computacional e avaliação numérica**. 2006. 152f. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.
- Faria, V.A. **ANÁLISE NUMÉRICA DE FREQUÊNCIA NATURAL DE MATERIAIS COMPÓSITOS HÍBRIDOS COM MEMÓRIA DE FORMA**. 2007
- Gagliardo, D.P.; Macia, N.T **Análise de estruturas sanduíche: parâmetros de projeto**. 2010
- MENDONÇA, P. T. R., **Materiais Compostos & Estruturas-Sanduíche: Projeto e Análise**. Manole. 2005.

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA SEQUÊNCIA DE EMPILHAMENTO DA CAMADA COMPÓSITA DE MATERIAIS COMPÓSITOS LAMINADOS

Katia Gleses Machado Aguiar⁽¹⁾; Adriana Amaro Diacenco⁽²⁾ .

¹Graduanda do curso de graduação em Engenharia Mecânica da FEPI – Centro Universitário de Itajubá, kgm.aguiar@gmail.com

² Professora Doutora, Centro Universitário de Itajubá - FEPI, adriana_aadiacenco@yahoo.com.br

RESUMO

A utilização de materiais compósitos pelo homem pode ser notada desde a antiguidade, onde, os tijolos usados pelas antigas civilizações eram obtidos através da mistura de barro e palha. Nos dias atuais os materiais compósitos ou simplesmente compósitos estão inseridos no nosso cotidiano e no meio industrial, sendo utilizado nas mais diversas áreas da engenharia, a exemplo podemos citar a indústria aeronáutica mais especificamente na fabricação de fuselagens de aviões.

Mesmo tendo sua utilização datada de muito tempo atrás, ainda há muito a que se descobrir sobre os materiais compósitos, razão pela qual tem sido amplamente pesquisados afim de prever danos e falhas nestes materiais e modelar seu comportamento mecânico.

Partindo deste princípio, é de interesse deste trabalho realizar uma avaliação numérica da sequência de empilhamento da camada compósita de compósitos estruturais laminado, tendo em vista a atenuação os níveis de vibração. Utilizando a Teoria da Deformação Cisalhante de Primeira Ordem (FSDT) combinada com o Método de Elementos Finitos (MEF), implementando o modelo do material em ambiente computacional MATLAB®.

Palavras-chave: Compósitos Laminados; Vibração; FSDT; Método de Elementos finitos.

INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos vêm sendo amplamente pesquisados e desenvolvidos para atender prontamente as necessidades mecânicas específicas do projeto, fato que os tornam a solução de maior adequação quando não é possível obter tais propriedades em materiais convencionais (DIACENCO, 2010).

Hoffbauer (2010) cita as indústrias aeronáutica e aeroespacial, de fabricação de material esportivo, a eletrônica, a nuclear, a naval e a automobilística como sendo as indústrias de maior aplicação dos compósitos atualmente, prevê ainda que as áreas de aplicação aumentem futuramente como na construção civil, fabricação de equipamento de escritório e mobiliário, indústrias química, elétrica e eletrônica.

Tita (1999) aponta a dificuldade de prever o modo de falhas nos compósitos como sendo um dos principais obstáculos para a integração desses produtos na indústria moderna, cita também os custos na sua fabricação e a falta

de conhecimento sobre o comportamento do material junto a materiais químicos corrosivos.

As vibrações para a engenharia e mais especificamente estruturas mecânicas é tida como fonte de falhas e danos além de causar desconforto aos usuários (SORIANO, 2014). Tendo em vista que os materiais compósitos vêm sendo cada vez mais utilizados pelas mais diversas indústrias, tem-se a necessidade de prever e corrigir as falhas e danos decorrentes das mais variadas causas, dentre elas a vibração.

No contexto mostrado acima, este trabalho tem como objetivo principal a implementação numérico-computacional utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF) combinado com a Teoria da Deformação Cisalhante de Primeira Ordem (FSDT) tendo em vista a atenuação dos níveis de vibração de materiais compósitos estruturais do tipo laminado reforçados com fibra.

Desta forma, pretende-se modelar o material e prever o comportamento dinâmico de compósitos estruturais do tipo laminado (reforçados com fibras de carbono), por meio,

da obtenção das Funções de Resposta em Frequência (FRFs). Logo analisa-se diferentes sequências de empilhamento, variando as espessuras e orientações das fibras de cada camada das placas.

Desta forma é possível efetuar a avaliação comparativa dos resultados obtidos dentro do contexto da atenuação dos níveis de vibração.

MATERIAIS COMPÓSITOS ESTRUTURAIS

De acordo com Callister Jr. (2002) muitos materiais compósitos são compostos apenas por duas fases; uma é chamada de matriz, que é contínua e envolve a outra fase, chamada frequentemente de fase dispersa. Sua classificação possui três divisões principais que são os compósitos reforçados com partículas, os compósitos reforçados com fibras, e os compósitos estruturais possuindo ainda mais duas subdivisões cada.

Os materiais compósitos estruturais são compostos por sobreposição de camadas ou laminas de compósitos reforçados com fibras e, são divididos em compósito estrutural do tipo laminado e compósito estrutural do tipo sanduiche (DIACENCO, 2016). Segundo Callister Jr. (2002), os compósitos estruturais do tipo laminado são constituídos por laminas bidimensionais que possuem uma direção preferencial de alta resistência.

Segundo Diacenco (2010), os compósitos estruturais do tipo laminado quando comparados às lâminas que os constituem individualmente, devido a versatilidade na sua configuração de confecção podendo variar as orientações das fibras, espessuras e materiais de cada lamina.

Ferreira (2006) cita desvantagens dos compósitos laminados tais como: elevado custo, baixa resistência ao impacto tanto a alta ou a baixas velocidades caracterizando uma extensa zona danificada, que inclui a rotura da matriz e delaminações entre as lâminas com fibras orientadas diferentemente; São difíceis de determinar com rigor as suas propriedades mecânicas e de resistência, devido à sua heterogeneidade e anisotropia; Os modos de falha são em muitas situações difíceis de prever, devido aos complexos estados de tensão que se geram no seu interior.

MATERIAL E MÉTODOS

O Método de Elementos Finitos (MEF) frequentemente é utilizado para a modelagem de estruturas devido a sua fácil implementação numérica podendo ser associada a outras teorias, tais como, a Teoria Clássica dos Laminados (CLT), Teoria da Deformação Cisalhante de Primeira Ordem (FSDT), Teoria

da Deformação Cisalhante de Ordem Superior (HSDT), as quais fazem parte da classe das Teorias da Camada Equivalente Única (DIACENCO, 2010).

Dentre essas teorias, a FSDT é a teoria que tem demonstrado melhor eficiência para a estimação das características mecânicas globais, permiti análises de placas mais espessas além de não exigir um custo computacional tão elevado (FARIA, 2006).

Os campos de deslocamentos da FSDT são expressos através das equações (REDDY, 1997):

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t) &= u_0(x, y, t) + z \psi_x(x, y, t) \\ v(x, y, z, t) &= v_0(x, y, t) + z \psi_y(x, y, t) \\ w(x, y, z, t) &= w_0(x, y, t) \end{aligned} \quad (01)$$

Onde: $u(x, y, z, t)$, $v(x, y, z, t)$ e $w(x, y, z, t)$ representam os deslocamentos nas direções x , y e z respectivamente, ψ_x e ψ_y representam as rotações da seção transversal nas direções (x, y) e (u_0, v_0, w_0) descrevem os deslocamentos na superfície de referência.

Segundo a Teoria de Elementos Finitos para um elemento de placa a matriz elementar de massa é dada conforme a equação:

$$M^{(e)} = \sum_{k=1}^n \int_{z=z_k}^{z_{k+1}} \int_{\xi=-1}^{\xi=+1} \int_{\eta=-1}^{\eta=+1} \rho_k N^T(\xi, \eta) A^T(z) A(z) N(\xi, \eta) \det(J) d\eta d\xi dz \quad (02)$$

Sendo: ρ é a densidade, $N^T(\xi, \eta)$ é a matriz transposta das funções de forma do elemento Serendipity que possui a forma retangular de placa plana com oito nós e cinco graus de liberdade por nó, $N(\xi, \eta)$ é a matriz das funções de forma e $\det(J)$ é o determinante da matriz jacobiana.

A matriz de rigidez elementar é separada em efeito de flexão-membrana e cisalhamento respectivamente (DIACENCO, LIMA e CORREA 2013):

$$K_b^{(e)} = \sum_{k=1}^n \int_{z=z_k}^{z_{k+1}} \int_{\xi=-1}^{\xi=+1} \int_{\eta=-1}^{\eta=+1} B_b^T(\xi, \eta, z) C_b^{(k)}(\theta_k) B_b(\xi, \eta, z) \det(J) d\eta d\xi dz \quad (03)$$

$$K_s^{(e)} = \sum_{k=1}^n \int_{z=z_k}^{z_{k+1}} \int_{\xi=-1}^{\xi=+1} \int_{\eta=-1}^{\eta=+1} B_s^T(\xi, \eta, z) C_s^{(k)}(\theta_k) B_s(\xi, \eta, z) \det(J) d\eta d\xi dz \quad (04)$$

As matrizes $C_b^{(k)}(\theta_k)$ e $C_s^{(k)}(\theta_k)$ estão relacionadas em função do ângulo de orientação das fibras.

As matrizes elementares de massa são calculadas para cada elemento da malha de elementos finitos, afim de se obter a equação global do movimento no domínio do tempo observando a conectividade dos nós de cada elemento da malha do elemento finito através de procedimento padrão de montagem:

$$M\ddot{q}(t) + Kq(t) = f(t) \quad (05)$$

Onde: $M = \bigcup_{e=1}^{nelem} M^{(e)}$ e $K = \bigcup_{e=1}^{nelem} K^{(e)}$
as matrizes de rigidez global e de massa. O símbolo $\bigcup$ indica a matriz de montagem, $q(t)$ é o vetor de deslocamento global e $f(t)$ é o vetor de cargas generalizadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações numérico-computacionais foram realizadas em ambiente MATLAB® utilizando o MEF associado à FSDT. Para as análises, foram consideradas placas de material compósito estrutural do tipo laminado constituído por resina e reforçado por fibras de carbono, com as propriedades fornecidas conforme a Tabela 1 (DIACENCO, LIMA e CORREA, 2013):

Tabela 1 - Propriedades da placa compósita reforçada com fibras.

Propriedades dos materiais	Valores
E_1 (GPa)	172,4
$E_2 = E_3$ (GPa)	6,89
G_{12} (GPa) = G_{13} (GPa)	3,45
G_{23} (GPa)	1,38
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0,25
ν_{23}	0,30
ρ (kg/m ³)	1566

Fonte: o autor.

Foram realizados dois casos, cada um considerando uma placa com cinco camadas e orientações das fibras como descritos na Tabela 2:

Tabela 2 - Geometria das placas analisadas

	h	a (mm)	Orientação das fibras
Caso 1	a/140	0,25 0,35 0,45	45°/0°/45°/0°/45°
Caso 2	a/140	0,25 0,35 0,45	0°/45°/0°/45°/0°

Fonte: O autor.

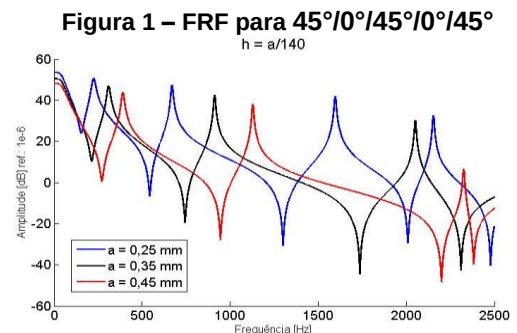
As placas compósitas analisadas possuem as mesmas características diferindo-se apenas com relação a angulação das fibras que reforçam cada uma das suas laminas ou seja, a sequência de empilhamento. Cada caso traz o comparativo entre três diferentes espessuras.

Após a implementação da Teoria da Deformação Cisalhante de Primeira Ordem (FSDT) combinada com o método de elementos finitos, foi possível realizar as

simulações numéricas para a obtenção dos resultados.

CASO 1

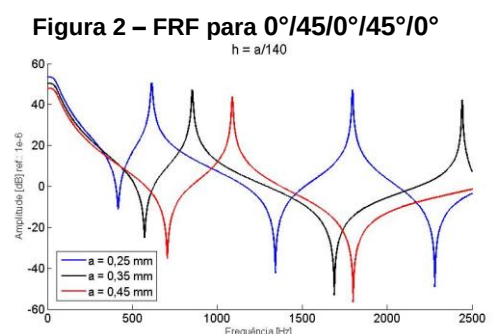
A Figura 1 ilustra as quatro primeiras frequências naturais obtidas, comparando os diferentes valores de espessuras. Nota-se que, quanto maiores os valores das espessuras maiores os valores dos picos de amplitude e maiores frequências das vibrações.



Fonte: O autor

CASO 2

A Figura 2 mostra as frequências naturais para as placas com fibras orientadas a 60°/45°/60°/45°/60°, onde é possível observar que manteve-se o padrão das FRF's, e o mesmo comportamento observado no Caso 1, ou seja, quanto maiores os valores das espessuras maiores os valores dos picos de amplitude e maiores frequências das vibrações.



Fonte: O autor

CONCLUSÕES

Comparando as curvas obtidas para as espessuras correspondentes nos dois casos, é possível afirmar que o Caso 1 apresenta a sequência de empilhamento em que os níveis de vibração estão mais amortecidos em relação ao Caso 2.

Este trabalho demonstrou que a sequência de empilhamento de placas compósitas

laminadas exerce grande influência sobre os níveis de vibração e, demonstrou ainda que é possível através de simulações numérico-computacionais modelar placas que melhor atendam as especificações de projeto tendo em vista níveis aceitáveis de vibração.

REFERÊNCIAS

CALLISTER, Jr., W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. Editora LTC, 5 Ed., Rio de Janeiro - RJ, 2002. ISBN: 85216-1288-5.

DIACENCO, A. A.; LIMA, A. M. G. ; CÔRREA, E. O. **Finite Element Reduction Strategy for Composite Sandwich Plates with Viscoelastic Layers**. *Materiais Research* (São Carlos.Impresso), V. 16, P. 473-480, 2013. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-14392013000200024&script=sci_arttext . Acessado em: 23/06/2018.

DIACENCO, A.A. **Modelagem por elementos finitos de materiais compósitos incorporando material viscoelástico para o controle passivo de vibrações e ruído**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Materiais para Engenharia) – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Itajubá, 2010. Disponível em: <https://saturno.unifei.edu.br/bim/0036327.pdf>. Acessado em: 23/04/2018.

DIACENCO, A. A. **Modelagem de Otimização Aplicada à Topologia de Sensores para Identificação e Localização de Danos em Placa Compósita**. 2016. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá, MG. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/582/tese_diacenco_2016.pdf?sequence=1 Acessado em: 24/08/2018.

FARIA, A. W. **Modelagem por elementos finitos de placas compostas dotadas de sensores e atuadores piezelétricos: implementação computacional e avaliação numérica**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia, 2006. Disponível em: <http://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/15025/1/AWFariaDIS01PRT.pdf>. Acessado em:23/042018.

FERREIRA, L.M.S. **Avaliação do Dano em Compósitos Laminados Devido a Impactos**

de Baixa Velocidade. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) Departamento de Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, 2006. Disponível em: <https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/7548/3/Tese.pdf> . Acessado em:23/04/2018.

HOFFBAUER, L. N. E. **Incertezas nos Compósitos Estruturais: Desenvolvimento de Modelos Numéricos de Análise de Fiabilidade e de Projeto Ótimo**. Tese (Doutorado em Matemática Aplicada) Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2010. Disponível em: http://pdma.up.pt/sites/default/files/content_file_s/05_20110406_LuisaHoffbauer.pdf . Acessado em:23/04/2018.

REDDY, J. N. **Mechanics of Laminated Composite Plates: Theory and Analysis**. 2 ed. Florida: CRC Press, 1997.

SORIANO, H. L. **Introdução à Dinâmica das Estruturas**. 1ªed. Rio de Janeiro – RJ Editora Elsevier, 2014. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=PZKoBQAAQBAJ&pg=PT174&dq=a+influencia+da+vibra%C3%A7%C3%A3o+em+estruturas&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwiaw4uk3_vbAhXIDpAKHQDCCCMQ6AEILTAB#v=onepage&q=a%20influencia%20da%20vibra%C3%A7%C3%A3o%20em%20estruturas&f=false Acessado em: 30/06/2018

TITA, V. (1999). **Análise dinâmica teórica e experimental de vigas fabricadas a partir de materiais compósitos poliméricos reforçados**. São Carlos, 1999. 125p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18135/tde-01062001-171428/en.php> . Acessado em: 21/08/2018.

Análise CFD de um Perfil NACA0012 com diferentes Ângulos de Ataque utilizando modelo de turbulência K- ϵ

Marcos Adriano Aparecido de Paiva⁽¹⁾; Roberto Meira Junior⁽²⁾

⁽¹⁾ Graduando em Engenharia Mecânica do Centro Universitário de Itajubá - FEPI, marcos-kurushii@hotmail.com

⁽²⁾ Professor Mestre, Centro Universitário de Itajubá - FEPI, meirajrp@gmail.com

RESUMO

A aerodinâmica é o ramo de estudos que busca abranger as forças que os fluidos desempenham sobre os corpos que neles estão emersos, sejam eles barcos a vela, automóveis, aviões, turbinas eólicas, seja qual for o corpo que se reposicione no ar. O objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho da modelagem numérica do escoamento em um aerofólio NACA 0012, em diferentes ângulos de ataque. Foi utilizado o ANSYS/CFX[®] para as simulações, adotando o modelo de turbulência K- ϵ , utilizado para analisar escoamentos em aeronaves e turbinas eólicas em geral. A validação desse estudo parte da comparação com dados experimentais apresentados no relatório “*Aerodynamic Characteristic of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines*”. Embora os dados proporcionem coerência entre si nas diferentes posições de ângulo de ataque, há uma pequena divergência com relação aos dados experimentais, o que demonstra uma limitação do modelo utilizado para alguns ângulos, sendo necessários nos casos de maior divergência, modelagens numéricas mais aprimoradas para escoamentos turbulentos.

Palavras-chave: Escoamento turbulento, NACA 0012, CFD

INTRODUÇÃO

De acordo com Mendes (2015), As consequências do uso de combustíveis fósseis pressionam o mundo a assumir como utilidade as fontes de energia renováveis. Neste âmbito, como em qualquer turbina eólica, o perfil das pás tem consequências diretas na sua eficiência, sendo o seu estudo de fundamental importância.

Nesta dissertação são modelados numericamente escoamentos em torno do aerofólio NACA0012, utilizando o software ANSYS/CFX[®]. São feitas simulações para escoamentos com números de Reynolds de 10.000, os ângulos de ataque (α) variam, respectivamente, entre 4°, 6°, 8° e 10°. Após a conclusão da simulação são retirados os resultados das forças de Arrasto e Sustentação, aplicadas no aerofólio. Posteriormente os resultados são comparados com dados experimentais apresentados no relatório “*Aerodynamic Characteristic of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines*”. Estudos numéricos, para análise, bem como para validações de projeto e experimentais de

aerofólios são apresentados em (Patil e Thakare 2015).

O modelo de turbulência adotado nesse estudo foi o K- ϵ . Este modelo é definido pelas equações de transporte da energia cinética turbulenta (k) e pela sua taxa de dissipação (ϵ), o mesmo é aplicado partindo do pressuposto que o escoamento é totalmente turbulento. A escolha desse modelo se dá pelo bom desenvolvimento no estudo de (Patil e Thakare, 2015), que evidenciou resultados precisos comparados com resultados experimentais, considerando toda a gama de condições operacionais em estudo. Adotou-se como referência o perfil NACA0012 em função da vasta bibliografia e simulações já realizadas.

O Coeficiente de sustentação É frequentemente determinado a partir de ensaios em túnel de vento ou em softwares específicos. O mesmo se resume em uma representação da eficiência do perfil em produzir a força de sustentação. Perfis com elevados valores de coeficiente de sustentação são rotulados como eficientes para a geração de sustentação. O coeficiente de sustentação é função do modelo do perfil, do número de Reynolds e do ângulo de ataque. (RODRIGUES, 2014)

De acordo com Luiz Rodrigues (2014), seguindo o mesmo funcionamento do coeficiente de sustentação, o coeficiente de arrasto se resume em uma representação da eficiência do perfil em produzir a força de arrasto. Ao contrário do coeficiente de sustentação, menos valor de coeficiente de arrasto devem ser obtidos para que sejam considerados aerodinamicamente eficientes. Para um perfil, o coeficiente de arrasto também é função do número de Reynolds e do ângulo de ataque.

MATERIAIS E MÉTODOS

A princípio, foi utilizado os pontos da geometria do perfil fornecidos pelo site da *AirfoilTools* (2015), para importação no ANSYS/GEOMETRY®, conforme mostra a figura 1

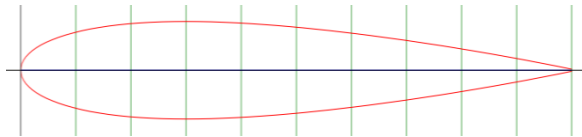


Figura 1 - Geometria do aerofólio NACA0012
(Fonte: *AirfoilTools*, 2015)

Para esse estudo, foram desenvolvidas as condições de contorno, considerando a velocidade de entrada 0,1435 m/s, como mostra na figura 2. O número de Reynolds foi fixado em 10.000, de acordo com o controle do fluxo de velocidade em torno do aerofólio. Para a análise do perfil, foi desenvolvido uma malha no formato “C”, conforme mostra na Figura 3. O semicírculo do domínio possui raio de 7m a partir do centro de momento do aerofólio em direção ao bordo de ataque. A região retangular possui largura de 14m a partir do centro de momento do aerofólio em direção ao bordo de fuga, e altura igual a raio do semicírculo.

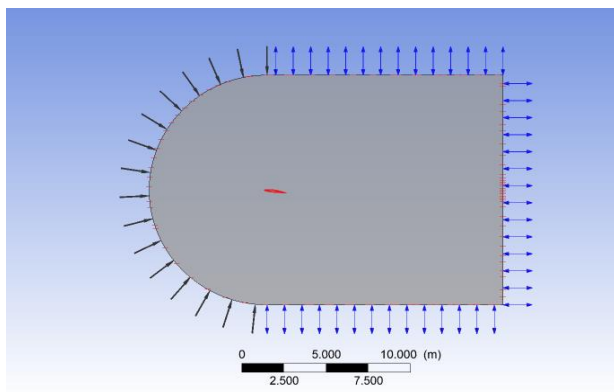


Figura 2 – Condições de Contorno para o perfil NACA0012 (Fonte: O autor)

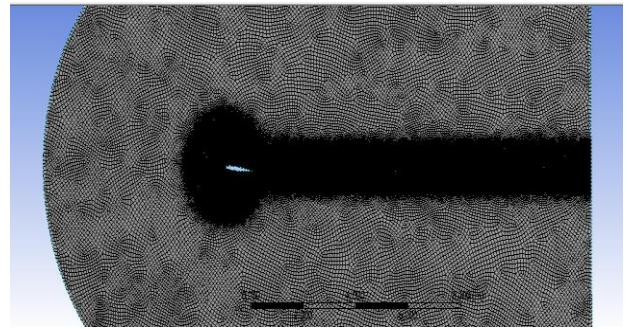


Figura 3 – Malha tipo “C” para o perfil NACA0012 (Fonte: O autor)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A princípio, a análise CFD foi realizada para ângulos de ataque 4°, 6°, 8° e 10°, com número de Reynolds de 10.000, e a entrada de velocidade = 0,1460 m/s. A figura 4 e figura 5 mostram os resultados obtidos para o ângulo de ataque de 4° e 10° respectivamente no contorno de velocidade em torno do aerofólio.

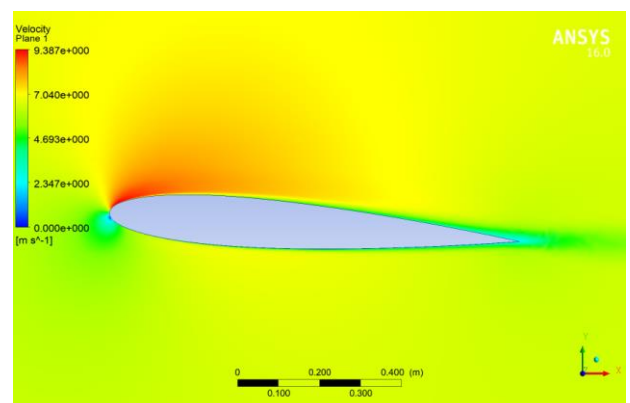


Figura 2 – Simulação do contorno de velocidade no aerofólio com Ângulo de Ataque de 4° (Fonte: O autor)

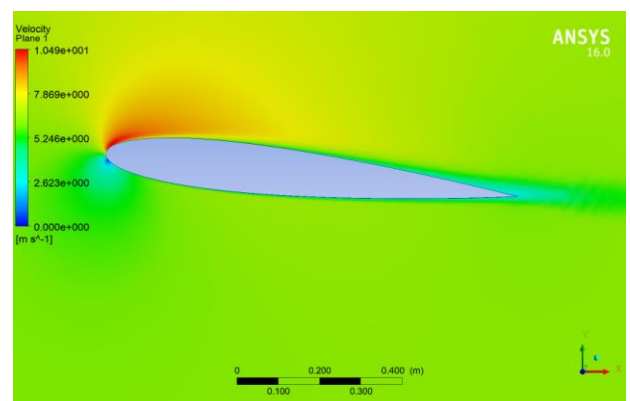


Figura 5 – Simulação do contorno de velocidade no aerofólio com Ângulo de Ataque de 6° (Fonte: O autor)

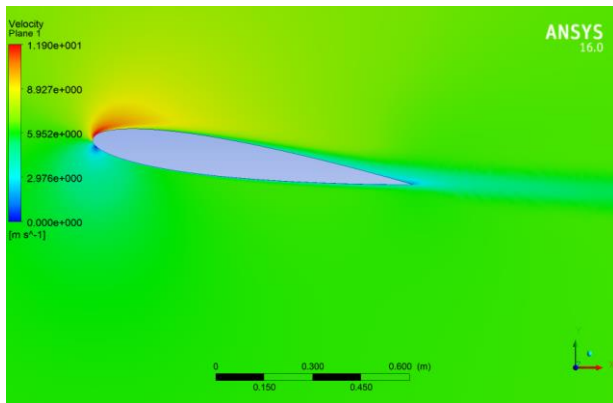


Figura 6 – Simulação do contorno de velocidade no aerofólio com Ângulo de Ataque de 8° (Fonte: O autor)

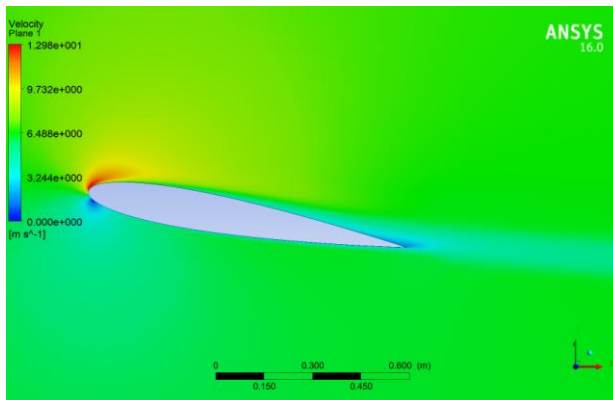


Figura 7 – Simulação do contorno de velocidade no aerofólio com Ângulo de Ataque de 10° (Fonte: O autor)

Os resultados obtidos por simulação no ANSYS/CFX® são apontados nos gráficos 1 e 2, no qual representa a variação do coeficiente de sustentação (CL) e coeficiente de arrasto (CD) em função aos ângulos de ataque. Os resultados obtidos são validados com os resultados experimentais disponíveis no relatório de energia do Sandia National Laboratory (SNL).

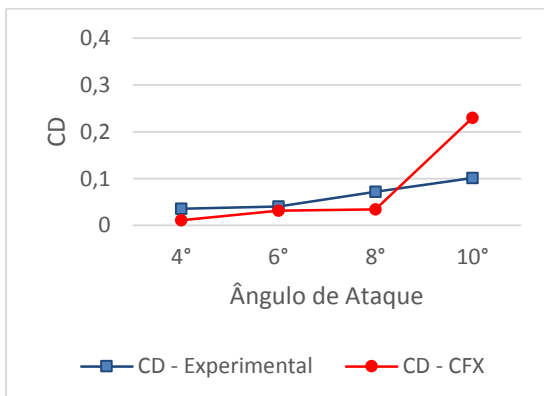


Gráfico 1 - CD vs. Ângulo de Ataque (Fonte: O autor)

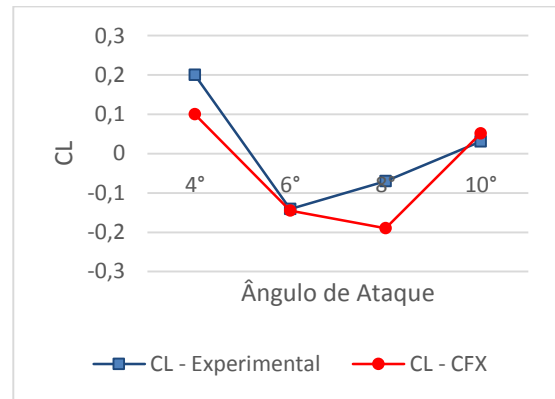


Gráfico 2 - CL vs. Ângulo de Ataque (Fonte: O autor)

A partir do gráfico 1, pode-se concluir que, para o ângulo de ataque 10°, os resultados obtidos a partir de simulações de CFD indicam valores um pouco mais diversificados, o que não acontece no gráfico 2, que representa o coeficiente de sustentação, onde, o ângulo que há maior divergência é de 8°.

Como mostrado no gráfico 1, há consistência nos valores de CD para os ângulos de 4°, 6° e 8°, o que, a princípio, valida o método de simulação no ANSYS/CFX®. Em geral, os valores CD e CL obtidos por simulações de CFD correspondem de perto aos resultados experimentais obtidos no relatório "Aerodynamic Characteristic of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines".

Contudo, o zelo deve ser no coeficiente de sustentação, que, de fato, produz trabalho útil ao sistema e, nessas condições de simulações, os resultados obtidos estão coerentes.

CONCLUSÕES

Observa-se que, a proximidade numérica nos valores de CL e CD é obtido pela análise atual de CFD realizada pelo software ANSYS/CFX®, em comparação com os valores experimentais, o que valida a presente metodologia de análise.

Apesar desse método ter apresentado resultados similares e consistentes em comparação com resultados disponíveis experimentalmente, o número de Reynolds deve ser melhor avaliado, a fim de encontrar possíveis melhorias no resultado. A construção da malha é outro tópico que pode ser refinado, pois fornece maior segurança na simulação do escoamento.

REFERÊNCIAS

Bhushan S. Patil, Hitesh R. Thakare
Computational Fluid Dynamics Analysis of
Wind Turbine Blade at Various Angles of
Attack and Different Reynolds Number
Publicado por Elsevier Ltd. 2015 - disponível
em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815038552>> , acesso em: 21
ago. 2018

MENDES, Fábio Miguel Antunes - Modelação
numérica da aerodinâmica de aerofólios para
aplicação em turbinas eólicas de pequeno porte
– Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra - FCTUC - Coimbra,
setembro, 2015 – disponível em:
<<https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/39002/1/Modelacao%20numerica%20da%20aerodinamica%20de%20aerofolios%20para%20aplicacao%20em%20turbinas%20eolicas%20de%20pequeno%20porte.pdf>> acesso em:19
ago. 2018

Robert E. Sheldahl Aerothermodynamics and
Paul C. Klimas Advanced - Sandia National
Laboratories - Albuquerque, NM 87185,
Aerodynamic Characteristics of Seven
Symmetrical Airfoil Sections Through 180-
Degree Angle of Attack for Use in
Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind
Turbines – 1981.

RODRIGUES, Luiz Eduardo Miranda José,
1973 - Fundamentos da Engenharia
Aeronáutica com Aplicações ao Projeto SAE-
AeroDesign: Aerodinâmica e Desempenho /
Luiz Eduardo Miranda José Rodrigues –
Salto/SP: www.engbrasil.eng.br, 2014.

Modelagem e simulação virtual de hélices para aeronaves leves.

Alex Nivaldo Alcântara Renó⁽¹⁾; Adriana Amaro Diacenco⁽²⁾; Maurício Eduardo Lopes⁽³⁾

¹Graduando do curso de graduação em Engenharia Mecânica da FEPI – Centro Universitário de Itajubá, alexreno10@hotmail.com

² Professora da FEPI – Centro Universitário de Itajubá, adriana_aadiacenco@yahoo.com.br

³ Professor da FEPI – Centro Universitário de Itajubá, mauricioedulopes@yahoo.com.br

RESUMO

Esse trabalho tem a finalidade de apresentar um projeto aerodinâmico de pás de uma hélice de aeronave leve. Deste modo, o estudo tem como objetivo de modelar o comportamento do fluido passando e interagindo com a superfície do rotor, otimizar a distribuição de forças, produzir a tração que se deseja produzir com maior eficiência possível. Para tanto, o trabalho também leva em consideração os requisitos estruturais, ou seja, a análise do comportamento de uma estrutura cuja a geometria, modelo do material e ações aplicadas são a priori conhecidos, serão considerados afim de se determinar o estado de tensão e de deformação da hélice. Os materiais envolvidos na fabricação de hélices aeronáuticas são, em sua maioria, de liga de alumínio, mas podem ser usados outros materiais como a madeira ou materiais compósitos. Para o desenvolvimento da modelagem do ambiente onde a hélice será implementada, utilizaremos o MEF (método dos elementos finitos) para analisar sua estrutura. O desenho da peça será realizada pelo programa SolidWorks, sendo posteriormente importado para software Ansys (CAD-CAE) onde algumas situações reais de voo serão simuladas afim de se prever os esforços e escoamento a qual uma hélice de aeronave leve pode ser submetida. Os critérios que o projeto deve atender, considerando a finalidade de aplicação são, missão, performance em decolagem, cruzeiro e subida, ambiente operacional, manobrabilidade, tamanho e geometria, ruído e custo.

Palavras-chave: hélice de aeronave leve, MEF (método dos elementos finitos), materiais compósitos, programa SolidWorks, software Ansys (CAD-CAE).

INTRODUÇÃO

As hélices são projetadas especificamente para casos de aplicação. Depois da escolha do motor, o projetista deve conseguir uma hélice capaz de atingir eficiência máxima para todas as condições críticas de voo e com o mínimo peso. Diversos problemas da engenharia, física e outras ciências aparecem sobre a forma de equações parciais de Poisson, com uma condição de Dirichlet homogênea associada temos o que chamamos de problema de Dirichlet homogêneo. Dependendo da geometria do domínio a solução do problema pode ser obtida analiticamente na forma de séries de Fourier. No entanto, é preciso recorrer a métodos numéricos caso o domínio se torne mais elaborado. O método MEF pode ser utilizado para resolver não só problemas elípticos e as condições não necessitam ser de Dirichlet, o MEF também é aplicável no caso de condição

de Neumann ou Robin. A ideia central do MEF é discretizar o domínio, representando-o, ainda que de forma aproximada, por uma reunião de um número finito de elementos e resolver não o problema original mas sim um que lhe é associado (GIACCHINI, 2012).

O caso do problema unidimensional é representado conforme equação 1 (GIACCHINI, 2012):

$$\int_0^1 \frac{du}{dx} \frac{dv}{dx} dx = \int_0^1 f v dx. \quad (1)$$

Sendo: o espaço de funções $V = \{v; v \text{ é função}$

contínua em $[0;1]$, $\frac{dv}{dx}$ é limitada e contínua por partes, e $v(0) = v(1) = 0$.

A equação juntamente com a condição de Dirichlet homogênea é a formulação fraca do problema.

O problema bidimensional é representado conforme equação 2 (GIACCHINI, 2012):

$$\int_{\Omega} v \cdot f dV = \int_{\Omega} \langle \text{grad } v | \text{grad } u \rangle dV \quad \forall v \in V. \quad (2)$$

Sendo: f uma função real contínua por partes e limitada, em Ω

Esta equação acrescida da condição de Dirichlet homogênea formam a formulação fraca do problema bidimensional.

MATERIAL E MÉTODOS

A Engenharia Assistida por Computador, também conhecida como *Computer Aided Engineering* (CAE), é uma ferramenta que auxilia as empresas do setor de engenharia no desenvolvimento e aperfeiçoamento de produtos. Os profissionais de engenharia podem criar protótipos virtuais dos produtos. A geometria do item é inicialmente elaborada em um software de **Computer-Aided Design** (CAD) e importada para os sistemas de **CAE**. Uma vez dentro dos sistemas, eles passam por diferentes procedimentos: pré-processamento, processamento e pós-processamento. Na primeira etapa, são definidas características como materiais, interações com elementos externos, forças aplicadas, fixações, temperaturas, entre outras.

Com o avanço da tecnologia cada vez mais as empresas têm se preparado para a etapa de projeto de peças, o que antecede a produção e, para isso, se investe em pesquisas que permitem prever o comportamento de materiais. Através de programas computacionais, como o Ansys (CAD-CAE) onde simulações de esforços são feitas, podendo assim, antever possíveis falhas e corrigir o projeto. Redução de custos, maior eficiência e qualidade do produto, permitir realizar alterações no projeto rapidamente, diminuir o tempo empregado no desenvolvimento do produto/equipamento, eliminar ou reduzir a quantidade de protótipos de testes a serem construídos, auxiliar na verificação do produto quanto à funcionalidade, encaixes e design, permitindo a reavaliação sempre que necessário e o aumento da competitividade são todos princípios de engenharia preventiva, que vem de encontro com as ideias de produção enxuta – Sistema Toyota de Produção (DOS SANTOS, FERREIRA e PIAIA; 2004).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira etapa do trabalho possui o objetivo de descrever as tensões equivalentes que a hélice pode ser submetida em uma situação real de voo. O material escolhido será o compósito, usando as condições de contorno (escoamento do fluido) de literatura específica. A força necessária para girar a hélice é fornecida pelo motor, a rotação provoca uma baixa pressão no dorso da pá, e uma alta pressão na face, gerando a tração e impulsionando a aeronave para frente. A cada volta a hélice avança uma determinada distância chamada de passo. A segunda etapa trata-se da escolha de um perfil NACA para a modelagem de uma pá no programa SOLID WORKS, que posteriormente, é transferido para o programa Ansys, onde as simulações de esforços serão feitas.

CONCLUSÕES

No trabalho será investigado o comportamento das estruturas de componentes de aeronaves, mais especificamente utilizados na fabricação de hélices. Serão realizados testes na máquina de tensão com os materiais compósitos e comparação com a literatura, estudos sobre MEF para aplicabilidade da modelagem das hélices no software Ansys (CAD-CAE) e espera-se que, através das análises dos dados obtidos em todos os processos, ocorra a possibilidade de melhor compreensão do comportamento de componentes de estruturas específicas em condições de uso. Esse trabalho espera entender, através da ciência, o comportamento de uma hélice de aeronave leve em funcionamento, em diferentes condições de ambiente para que se escolha o melhor material, auxiliando na prevenção de eventuais falhas e possibilitando o melhor desempenho do produto final.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG pela Bolsa de Iniciação Científica concedida ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS

Dos Santos, F. R, Ferreira, S. C e Piaia, J. **Computer AIDED Engineering – CAE**. Universidade do estado de Santa Catarina centro de ciências tecnológicas – CCT curso de tecnologia em sistemas de informação. Joinville, 2004.

BRASIL. IAC – **Instituto de Aviação Civil**.
Divisão de Instrução Profissional Matérias
Básicas, tradução do AC 65-9A do FAA
(*Airframe & Powerplant Mechanics-General
Handbook*). Edição Revisada 2002.

Giacchini, B. L. **Uma breve introdução ao
Método dos Elementos Finitos**. Universidade
Federal de Minas Gerais, Janeiro de 2012

Azevedo.A. F.M. **Método dos elementos
finitos**. Faculdade de Engenharia da
Universidade do Porto. 1ª Edição. Abril 2003.
<http://www.fe.up.pt/~alvaro>