

# ANÁLISE DO EFEITO DA INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA NAS FORÇAS AERODINÂMICAS EM UM ESCOAMENTO EXTERNO SOBRE UM ELEMENTO DE PÁ FLEXÍVEL 3D

Franciele Stail Bordin – franciele.bordin@ufrgs.br

Adriane Prisco Petry – adrianep@mecanica.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica

**Resumo.** Elementos de materiais flexíveis são empregados em diversas aplicações na engenharia, como por exemplo, em pás de turbinas eólicas. O comportamento do escoamento é afetado pela alteração na forma da estrutura. Muitas vezes, seu movimento e deformação são induzidos pelas próprias forças aerodinâmicas. Este trabalho apresenta o estudo de um escoamento externo envolvendo a interação fluido-estrutura, com o interesse voltado ao comportamento de pás de turbinas eólicas. Simulações numéricas são realizadas com o intuito de avaliar o efeito que a deformação da estrutura, devido à resposta elástica às forças oriundas do escoamento, tem nas próprias forças aerodinâmicas. A plataforma ANSYS Workbench é utilizada, combinando o software ANSYS CFX para a análise do fluido e o ANSYS Mechanical para a análise da estrutura. O caso escolhido para o presente trabalho é o de um escoamento turbulento sobre um elemento de pá, fixo em uma das suas extremidades e livre na outra. A geometria da pá é retangular com o perfil NACA 0012 e o modelo de turbulência utilizado é o  $k-\omega$  SST. Os resultados demonstram a influência significativa que a deformação da estrutura tem nas forças aerodinâmicas de sustentação e arrasto e concordam com a literatura existente.

**Palavras-chave:** Interação Fluido-Estrutura, Pá Flexível, Forças Aerodinâmicas.

## 1. INTRODUÇÃO

Turbinas eólicas modernas evoluíram de pequenas, simples máquinas, para equipamentos grandes e altamente sofisticados. Conhecimentos científicos e técnicos, juntamente com métodos computacionais, padrões de projeto, métodos de produção e procedimentos de manutenção, auxiliaram para que esses avanços tecnológicos ocorressem (Wiser et al., 2011). A maioria das turbinas eólicas disponíveis comercialmente possui um eixo horizontal e três pás. A energia cinética do escoamento é convertida em energia elétrica através da força de sustentação, que faz com que as pás girem em torno do eixo da turbina. Assim, destaca-se a importância da correta previsão das forças aerodinâmicas para projetos de produção de energia.

Apesar de a tecnologia de turbinas eólicas já ser comercialmente produzida e implantada em grande escala, avanços contínuos são previstos na melhoria de procedimentos de projeto, como o uso mais eficiente de materiais, o aumento da confiança e captação de energia, a redução nos custos de manutenção e componentes com maiores vidas úteis (Wiser et al., 2011).

Turbinas eólicas operam em um ambiente adverso, onde grandes flutuações do escoamento, devido à natureza do vento, podem provocar cargas elevadas na sua estrutura. De acordo com Ahlström (2005), essa variação nas cargas, em conjunto com uma estrutura elástica, cria um terreno perfeito para vibrações induzidas e problemas de ressonância. A necessidade de procedimentos experimentais e computacionais para investigar a estabilidade aeroelástica e a resposta dinâmica tem crescido com a potência nominal e o tamanho das turbinas.

A pá é o componente mais importante em uma turbina eólica (Shokrieh e Rafiee, 2006). Casás et al. (2005) afirmam que a eficiência da pá é determinante para a performance da turbina. A busca da forma ótima da pá e sua composição material é um problema complexo, de acordo com Jureczko et al. (2005), já que a descrição matemática da carga aerodinâmica é complexa e muitos objetivos e restrições devem ser satisfeitos. Tojo (2012) diz que houve melhorias significativas na eficiência de turbinas eólicas, conquistadas por novos projetos que empurram os limites do dimensionamento de estruturas de pás e que para conseguir atingir essas margens reduzidas, um novo grau de sofisticação teve que ser introduzido nesse processo: a análise da interação fluido-estrutura (FSI – Fluid-Structure Interaction).

Problemas envolvendo a interação entre o fluido e a estrutura são problemas mutualmente dependentes. O comportamento do escoamento depende da forma e movimento da estrutura, e o movimento e a deformação da estrutura depende das forças aerodinâmicas agindo na estrutura. A interação fluido-estrutura computacional é um problema multi-físico, envolvendo a análise numérica tanto da mecânica dos sólidos quanto da dos fluidos, mais o acoplamento entre elas.

As simulações numéricas realizadas com o intuito de avaliar as forças aerodinâmicas geralmente não levam em conta o efeito que a deformação na estrutura, causada por essas forças, possui nelas mesmas. O corpo sólido é tirado do

problema, somente o seu contorno é representado como uma parede rígida. Uma análise ideal consideraria a interação fluido-estrutura, mas isso consumiria tempo extra. Dependendo do problema, essa interação pode ser mais ou menos significativa.

Desde o desenvolvimento de turbinas Multi-Megawatt, esse tipo de análise tem se tornado um problema crítico, devido a pás mais longas e flexíveis (Zhang e Huang, 2011). Como afirmam Jensen et al. (2006), o tamanho da pá da turbina eólica tem crescido consideravelmente e devem continuar crescendo no futuro, exigindo um entendimento melhor do seu comportamento estrutural.

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência que a interação fluido-estrutura possui na previsão numérica das forças aerodinâmicas. Sabe-se que as estruturas podem se deformar consideravelmente pela ação da força do escoamento. O propósito desse trabalho é verificar se isso modifica as forças aerodinâmicas significativamente também.

O interesse da investigação é voltado para a conversão de energia eólica. Em uma turbina real, não somente a pá está vibrando, mas também a torre e todos os outros componentes. Esse trabalho tem como objetivo o estudo de um problema mais simples do que o de modelar uma turbina eólica inteira, como o primeiro passo para entender-se melhor o comportamento aerodinâmico quando avaliado considerando-se a interação fluido-estrutura. O caso estudado é um escoamento turbulento de ar sobre um elemento de pá flexível retangular, com uma seção transversal de um aerofólio NACA 0012, engastada em uma das suas extremidades e livre na outra.

## 2. METODOLOGIA

Para atingir o objetivo do trabalho, simulações numéricas foram realizadas com o uso do *software* comercial ANSYS. Esse *software* possui o código de solução MFX-Multiple para solução deste tipo de problema, realizando um acoplamento entre o *software* CFX para a análise do escoamento e o ANSYS Mechanical para a análise estrutural. Simulações numéricas foram realizadas, considerando-se a interação fluido-estrutura e também a negligenciando, a fim de investigar a relevância da sua utilização na previsão das forças aerodinâmicas.

Para realizar uma análise que envolva a interação fluido-estrutura no ANSYS Multi-field, é necessário configurar a parte do problema que envolve o escoamento do fluido no CFX e a parte que envolve a estrutura no ANSYS Mechanical. Além disso, devem ser especificadas as definições de acoplamento no MFX, criando-se interfaces para as transferências de cargas. O CFX envia a distribuição de tensões na interface para o Mechanical, enquanto este envia os deslocamentos da mesma interface para o CFX. Cada campo físico possui o seu próprio domínio, malha e condições de contorno, compartilhando apenas as interfaces.

Durante uma simulação acoplada, o ANSYS Mechanical e o CFX executam a simulação como uma sequência de passos de tempo, cada um consistindo de uma ou mais iterações multi-campo (sub-iterações). Durante cada uma dessas iterações, cada *solver* recolhe os dados necessários do outro *solver* e resolve as suas equações para o passo de tempo atual. Iterações multi-campo são repetidas até que se atinja o número máximo de iterações ou ocorra a convergência entre as quantidades transferidas na interface, além das equações governantes dos dois campos. A análise procede então para o próximo passo de tempo. A Fig. 1 mostra um esquema do funcionamento do processo de solução com interação fluido-estrutura.

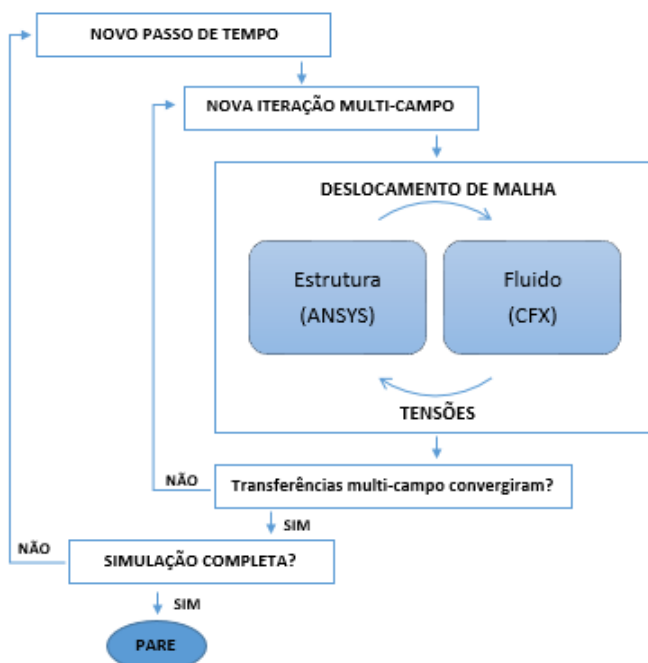


Figura 1 - Esquema do funcionamento do processo de solução com FSI.

Para resolver o escoamento turbulento, o método de volumes finitos baseado em RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes) foi utilizado, com o modelo de turbulência  $k-\omega$  SST. Uma análise não-linear em elementos finitos foi utilizada para a solução estrutural, com a formulação Lagrangeana Arbitrária, o método iterativo de Newton-Raphson e o modelo linear elástico para os materiais.

## 2.1 Definição do problema

O caso analisado é o escoamento turbulento de ar sobre um elemento de pá flexível, fixo em uma extremidade e livre para vibrar na outra. A pá estudada é retangular, com uma razão de aspecto de 6, seção transversal de um aerofólio NACA 0012 de 1 metro de corda e ângulo de ataque de 6 graus. Para simplificar o problema, a pá é composta por um único material, aço, e o amortecimento estrutural é desconsiderado. O número de Reynolds escolhido para o escoamento, em que resultados experimentais sobre aerofólios estão consolidados na literatura, é o de 6 milhões. O problema é representado na Fig. 2 e as propriedades do aço e do ar são apresentadas na Tab. 1.

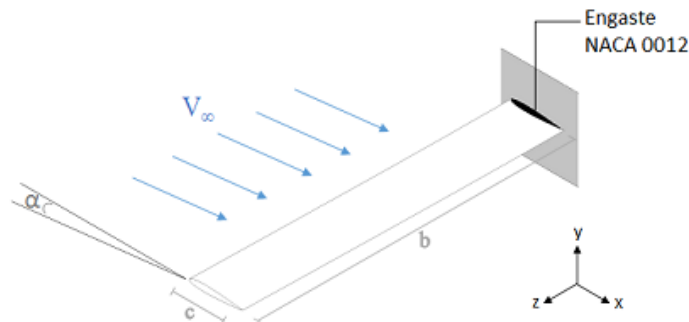


Figura 2 - Descrição do problema.

Tabela 1 – Propriedades do ar e do aço.

Ar	Aço
Massa específica = 1,185 kg/m <sup>3</sup>	Massa específica = 7850 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade = 1,83×10 <sup>-5</sup> Pa	Módulo de Young = 2×10 <sup>11</sup> Pa
Velocidade = 92,7 m/s	Número de Poisson = 0,3
Número de Mach = 0,27	Tensão de escoamento = 2,5×10 <sup>8</sup> Pa
-	Tensão de ruptura = 4,6×10 <sup>8</sup> Pa

## 2.2 Domínio computacional e condições de contorno

Para avaliar o tamanho do domínio, uma análise 2D com o aerofólio NACA 0012 é realizada e a distância de 25 metros entre a pá e todas as direções no plano  $xy$  é escolhida. O tamanho do domínio de 12 metros na direção  $z$  foi escolhido para facilitar a geração da malha, mais refinada no centro, próxima à ponta da pá. O domínio e as condições de contorno da análise do escoamento são apresentados na Fig. 3 e os da análise estrutural na Fig. 4.

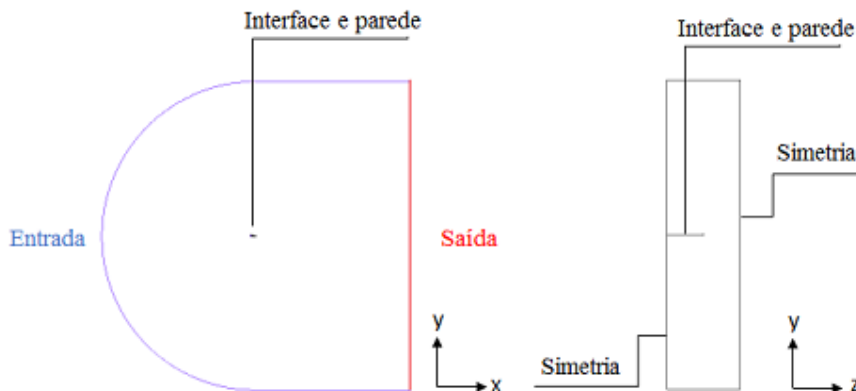


Figura 3 - Domínio e condições de contorno do escoamento.

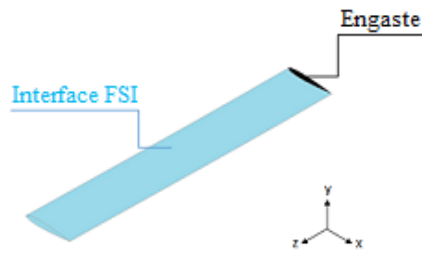


Figura 4 - Domínio e condições de contorno da estrutura.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Qualidade de malha

Estudos para a avaliação de qualidade de malha são realizados tanto para o domínio do escoamento, quanto para o estrutural. Uma simulação numérica com a pá estática é conduzida para a análise do escoamento e seus resultados encontram-se na Fig. 5. Como a força de sustentação é o foco deste estudo e apresenta maior influência na vibração da pá, é com base nela que o estudo de qualidade de malha é realizado.

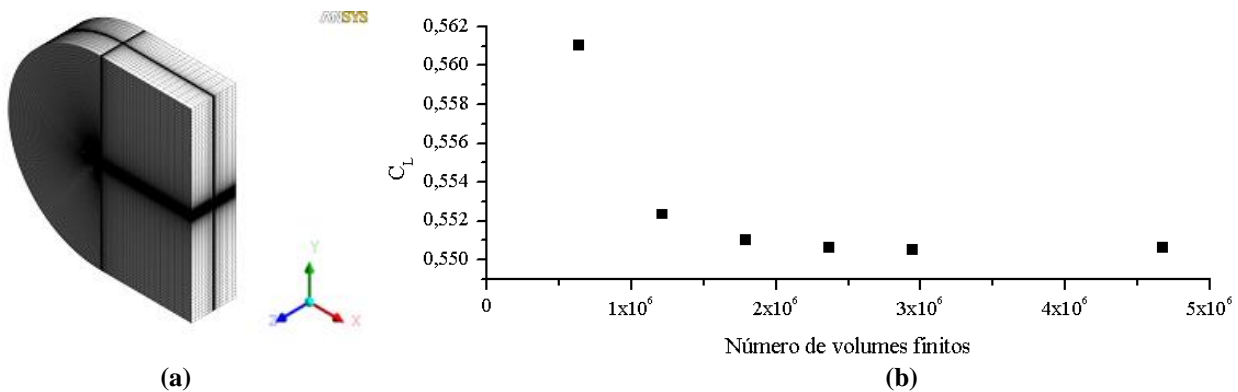


Figura 5 – (a) Malha do escoamento e (b) Coeficiente de sustentação versus do número de volumes finitos.

Diversos estudos apresentam resultados experimentais para as forças fluidodinâmicas de aerofólios, destacando-se Abbott e vonDoenhoff (1959), McCroskey (1988), e Ladson (1988). De acordo com Rumsey (2014), os dados obtidos com arame de tropeço por Ladson (1988), são os mais adequados para comparação com simulações numéricas com condição de transição totalmente turbulenta e um número de Reynolds de 6 milhões.

Todos os aerofólios reais têm extensão finita e possuem menos sustentação e mais arrasto do que os dados de suas seções de aerofólio indicam, de acordo com Fox et al. (2004). De acordo com Abbott e vonDoenhoff (1959), investigações em túneis de vento mostram que as taxas de mudança dos coeficientes de sustentação e arrasto são altamente afetadas pela razão de aspecto do modelo. Os efeitos da razão de aspecto finita podem ser caracterizados como uma redução no ângulo de ataque efetivo.

Como a pá é considerada simétrica em sua extremidade fixa, para a análise do escoamento, os valores para suas forças aerodinâmicas devem ser os de uma pá com razão de aspecto de 12. Utilizando-se o método para a estimativa das forças aerodinâmicas de um aerofólio finito, juntamente com os dados obtidos por Ladson (1988), o coeficiente de sustentação deve ser de aproximadamente 0,54. Percebe-se que os valores encontrados numericamente encontram-se na mesma ordem de grandeza da estimativa para os aerofólios finitos, com uma diferença de aproximadamente 2% na força de sustentação. A malha escolhida, do domínio do escoamento, para a análise considerando a interação fluido-estrutura possui 2.366.109 volumes finitos.

Para a avaliação da qualidade de malha do domínio estrutural, simula-se o primeiro ciclo de vibração com a pá de aço e a tensão aplicada proveniente do escoamento. Compara-se o deslocamento máximo da ponta da pá com o número de elementos finitos. A malha escolhida tem 4.920 elementos finitos. Apesar de existirem outras malhas com menos elementos que satisfazem o critério de convergência, a escolhida é a que corresponde à malha do fluido na interface comum, facilitando, assim, o trabalho do algoritmo de interpolação.

### 3.2 Análise modal da estrutura

Nesta seção são apresentados os resultados da análise modal da estrutura. A Tab. 2 mostra as frequências naturais da pá e a Fig. 6 apresenta as formas dos modos de vibração da estrutura, juntamente com a sua condição inicial indeformada.

Tabela 2 – Frequências naturais da estrutura.

Modo de vibração	Frequência natural [Hz]
1	2,29
2	14,30
3	18,16
4	32,16

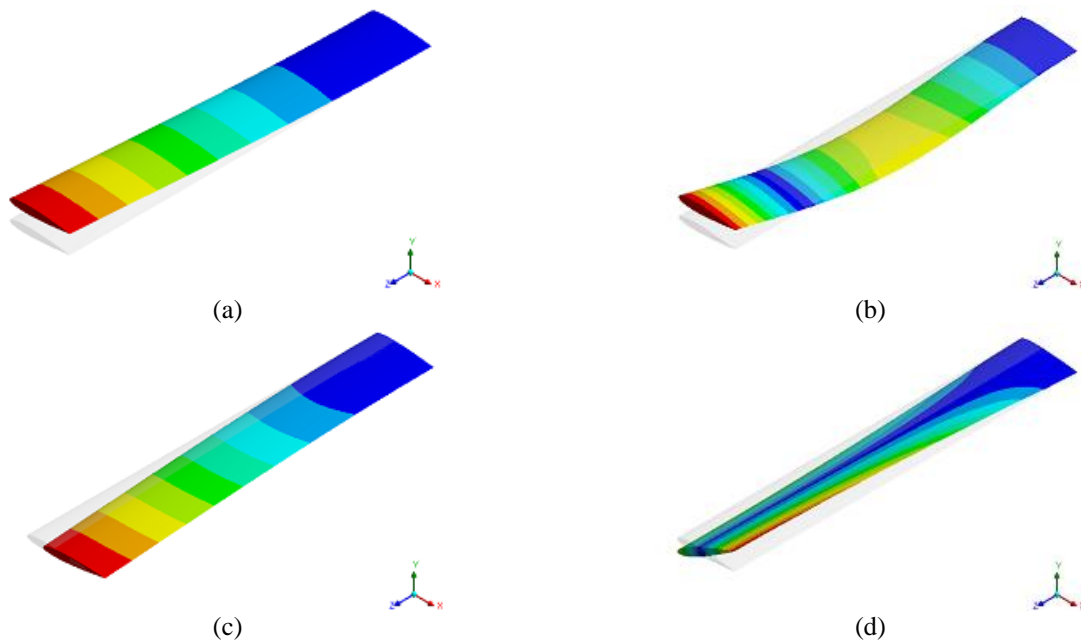


Figura 6 – Modos de vibração da estrutura.

### 3.3 Interação Fluido-Estrutura

Os resultados obtidos na análise considerando a interação fluido-estrutura são apresentados nesta seção. O passo de tempo utilizado para a análise do escoamento é de 0,002 segundo. A condição inicial para o escoamento é o resultado obtido na análise da pá estática. As respostas obtidas para os deslocamentos em y na ponta da pá e do ângulo de ataque na extremidade livre da pá são apresentados nas Fig. 7 e Fig. 8.

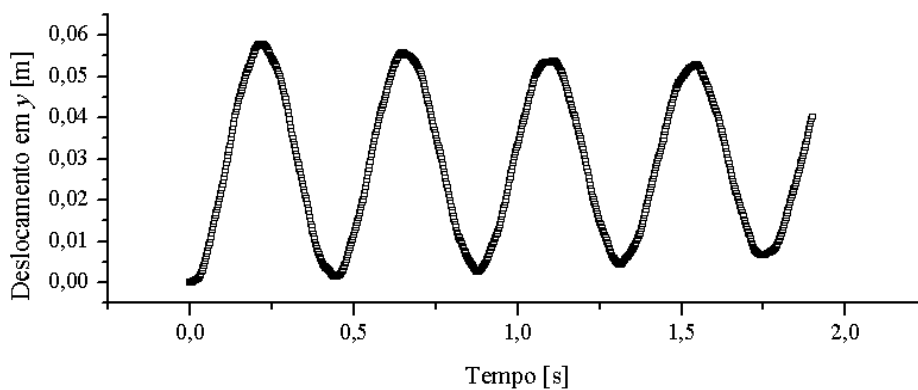


Figura 7 - Deslocamento da extremidade livre da pá de aço com escoamento de ar.

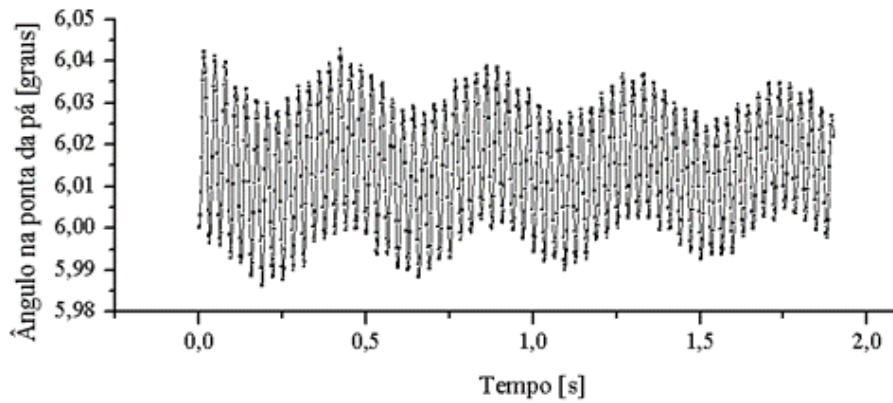


Figura 8 - Ângulo de ataque da extremidade livre da pá de aço com escoamento de ar.

As variações das forças aerodinâmicas no tempo são apresentadas nas Fig. 9 e Fig 10, e as suas diferenças em relação à condição estática na Fig. 11. Percebe-se que a interação fluido-estrutura altera as forças aerodinâmicas com o tempo, adicionando um amortecimento à estrutura e modificando assim, o seu comportamento dinâmico. As máximas diferenças das forças aerodinâmicas no tempo, obtidas considerando-se a interação fluido-estrutura em relação à análise convencional, são de 1,89% acima na força de sustentação e de 4,97% abaixo na força de arrasto.

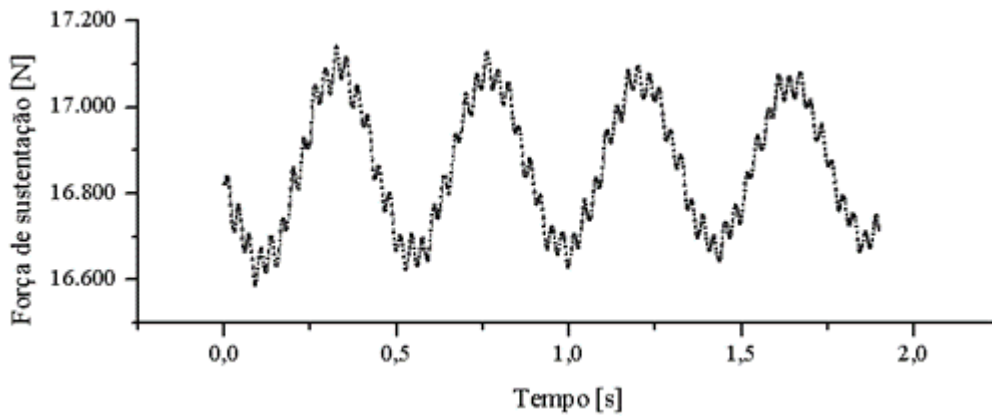


Figura 9 - Força de sustentação para o caso da pá de aço com escoamento de ar.

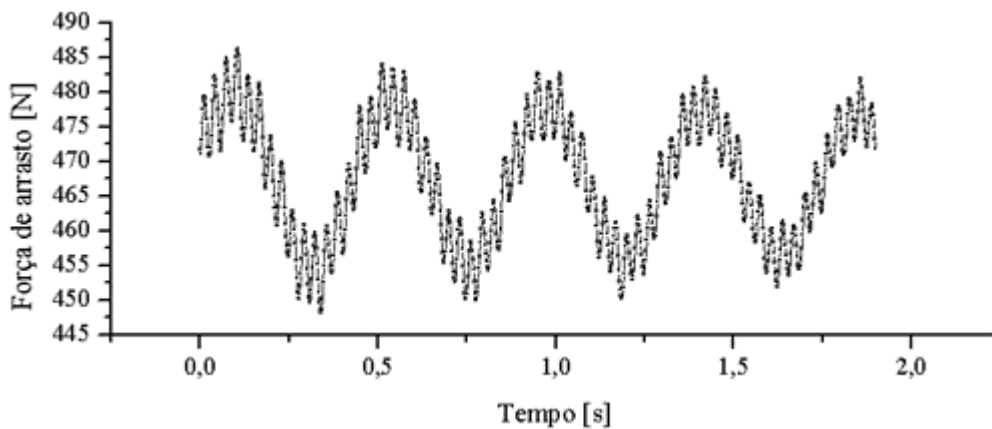


Figura 10 - Força de arrasto para o caso da pá de aço com escoamento de ar.

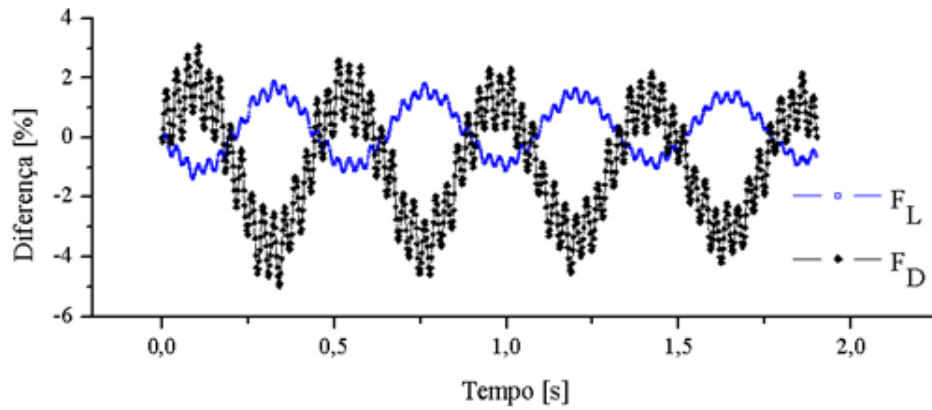


Figura 11 - Diferença percentual das forças obtidas com e sem FSI.

Percebem-se duas frequências na resposta das forças aerodinâmicas, uma coincidente com a frequência dos deslocamentos em  $y$  da ponta da pá e outra maior, coincidente com a frequência de variação no ângulo da ponta da pá. Pode-se verificar que o deslocamento em  $y$  causa um impacto maior nas forças aerodinâmicas, já que a sua amplitude de vibração é maior. Entretanto, é visível a influência que a vibração no ângulo de ataque da ponta da pá possui nos cálculos aerodinâmicos.

A deformação e tensão de von-Mises máximas são de  $3,379 \times 10^{-4}$  m/m e  $6,75 \times 10^7$  Pa no momento de máximo deslocamento em  $y$ . As deformações são pequenas e as tensões não ultrapassam a de escoamento, confirmando a hipótese de que o material apresenta um comportamento linear elástico para este caso.

A Fig. 12 compara as respostas estruturais obtidas com e sem FSI. A frequência de vibração do deslocamento em  $y$  da ponta da pá é de 2,28 Hz e a do ângulo da extremidade livre é de 31,94 Hz. Esses valores se encontram muito próximos aos valores das frequências naturais da pá (Tab. 2). Nota-se que existe uma tendência para a estabilização da pá, apesar de não ter sido alcançada no tempo simulado. A pá atingiu um deslocamento em  $y$  no primeiro ciclo muito próximo ao deslocamento inicial previsto pela análise puramente estrutural, com uma diferença de apenas 1,76%. O fluido, neste caso, age como um amortecedor na estrutura, atenuando a vibração causada pelas suas próprias forças aerodinâmicas.

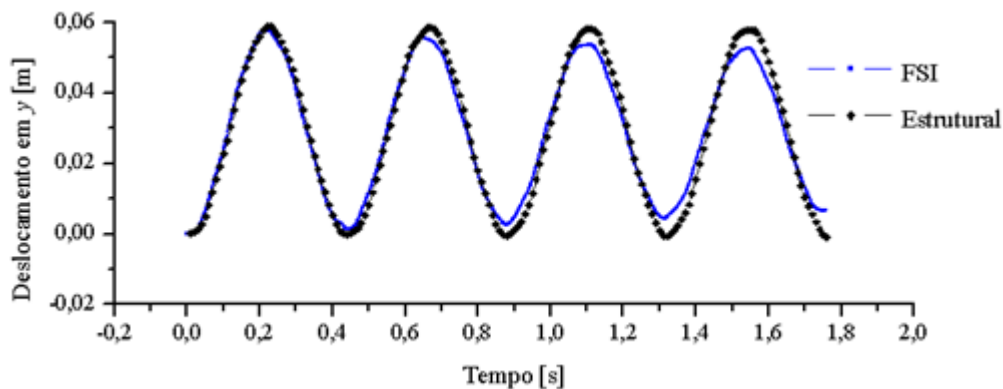


Figura 12 – Deslocamento em  $y$  da ponta da pá com e sem FSI.

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo sobre os efeitos da interação fluido-estrutura sobre as forças aerodinâmicas resultantes de um escoamento turbulento sobre um elemento de pá engastada em uma extremidade e livre na outra. Simulações numéricas foram realizadas através do *software* ANSYS. A relevância em considerar-se a interação fluido-estrutura, de acordo com os dados obtidos neste trabalho, para o escoamento de ar e, portanto, para aplicação em projetos de produção de energia eólica, é pequena. Entretanto, considerando-se o fato de que a pá simulada é menor e menos flexível do que uma pá real, os resultados apontam para uma grande influência em adicionar-se a interação fluido-estrutura no cálculo de projetos de dimensionamento de pás. Apesar das forças aerodinâmicas não sofrerem grandes variações inicialmente, a interação fluido-estrutura altera essas forças com o tempo, adicionando um amortecimento à estrutura e modificando, assim, o seu comportamento dinâmico. Além disso, as variações ao longo do tempo são importantes para a avaliação da vida útil da máquina, em cálculos de fadiga.

## Agradecimentos

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro na forma de bolsa de estudo.

## REFERÊNCIAS

- Abbott, I. H.; vonDoenhoff, A. E., 1959.. Theory of Wing Sections. Dover Publications, New York.
- Ahlström, A., 2005. Aeroelastic Simulation of Wind Turbine Dynamics. PhD Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Benini, G.R., 2002. Modelo numérico para simulação da resposta aeroelástica de asas fixas. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brazil.
- Casas, V., Pena, F., Lamas, A. and Duro, R., 2005. An Evolutionary Environment for Wind Turbine Blade Design. Lecture Notes in Computer Science, vol. 3512, pp. 1188-1196.
- Fox, W. R.; Mc Donald, A.; Pritchard, P. J., 2004. Introdução à Mecânica dos Fluidos. 6. ed., LTC, Rio de Janeiro.
- Gonçalves, R.A., 2013. Análise numérica da interação entre escoamentos a baixos números de Reynolds e cilindros apoiados em base elástica. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, Brazil.
- Jensen, F., Falzon, B., Ankersen, J. and Stang, H., 2006. Structural testing and numerical simulation of a 34m composite wind turbine blade. Composite Structures, vol. 76, pp. 52 – 61.
- Jureczko, M., Pawlak, M. and Mężyk, A., 2005. Optimisation of wind turbine blades. Journal of Materials Processing Technology, vol. 167, pp. 463–471.
- Ladson, C. L., 1988. Effects of Independent Variation of Mach and Reynolds Numbers on the Low-Speed Aerodynamic Characteristics of the NACA 0012 Airfoil Section. Technical Memorandum 4074, NASA.
- McCroskey, W. J., 1988. A Critical Assessment of Wind Tunnel Results for the NACA 0012 Airfoil. Technical Memorandum 100019, NASA.
- Rumsey, C. Turbulence Modeling Resource, NASA Langley Research Center. Disponível em: <<http://turbmodels.larc.nasa.gov/>>. Acesso em: 21 maio. 2014.
- Shokrieh, M.M., Rafiee, R., 2006. Simulation of fatigue failure in a full composite wind turbine blade. Composite Structures, vol. 74, pp. 332 – 342.
- Tojo, B.M.S.A., 2012. Aero-Structural Blade Design of a High-Power Wind Turbine. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- Zhang, P. and Huang, S., 2011. Review of aeroelasticity for wind turbine: current status, research focus and future perspectives. Frontiers in Energy, vol. 5, pp. 419–434.
- Wiser, R. et al., 2011. Wind Energy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)] - Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

## ANALYSIS OF THE FLUID-STRUCTURE INTERACTION EFFECT ON THE AERODYNAMIC FORCES OF AN EXTERNAL FLOW AROUND AN ELEMENT OF A FLEXIBLE 3D BLADE

**Abstract.** *Elements of flexible materials are employed in several engineering applications, for instance, in wind turbine blades. The flow behavior is affected by any change in the shape of the structure. Often, its displacement and deformation are induced by the aerodynamic forces themselves. This paper presents the study of an external flow using fluid-structure interaction (FSI), focused on the behavior of wind turbine blades. Numerical simulations are performed in order to evaluate the effect that the deformation of the structure, caused by the elastic response to the flow forces, has on the aerodynamic forces themselves. The ANSYS Workbench platform is used, combining the software ANSYS CFX for the fluid analysis and ANSYS Mechanical for the structural analysis. The chosen case for this work is a turbulent flow over a 3D blade element, fixed at one end and free at the other. The blade geometry is rectangular with the NACA 0012 profile and the turbulence model used is the  $k-\omega$  SST. The results demonstrate the significant influence that the deformation of the structure has on the aerodynamic lift and drag forces, leading to an agreement with the existing literature.*

**Key words:** *Fluid-Structure Interaction (FSI), Flexible Blade, Aerodynamic Forces.*