



## **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA PÁ DE TURBINA EÓLICA DE 5 MW POR MEIO DE SOFTWARE LIVRE BASEADO NO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

**Renata Silva Lins, renata\_lins@outlook.com<sup>1</sup>**  
**Augusto Salomão Bornschlegell, augustosalomao@ufgd.edu.br<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal da Grande Dourados, Rodovia Dourados/Itahum, Km 12 - Unidade II

**Resumo.** *Objetivo deste trabalho é analisar a influência da aceleração gravitacional e centrífuga em uma pá de turbina eólica de 5MW desenvolvida pela National Renewable Energy Laboratory (NREL), em seu limite de operação, convertendo a velocidade de corte em pressão dinâmica em sua superfície. Será observado os casos em que ela se encontra de modo estático e rotacional, avaliando os campos de tensões principais, tensão de von Mises e os deslocamentos. Para os carregamentos avaliados, os níveis de tensões da estrutura estão abaixo dos limites de escoamento do material.*

**Palavras chave:** *Pás eólicas. FEA. Salome-Meca. Análise estrutural.*

### **1. INTRODUÇÃO**

A transição energética se faz necessária para cumprir as metas climáticas, colaborar com a preservação do meio ambiente e a redução da emissão de gases poluentes provenientes de combustíveis fósseis. Devido a estes fatores, energias renováveis estão sendo consumidas cada vez mais pelos países desenvolvidos e em desenvolvimento, não apenas por questões ambientais, mas pelos recursos inesgotáveis que auxiliam também na economia destes.

O vento é um desses recursos, sendo o principal elemento na geração de energia eólica. A potência extraída deste recurso pode ocorrer em fazendas eólicas instaladas tanto em meio terrestre (*onshore*) quanto marítimo (*offshore*).

As turbinas eólicas, também chamadas de aerogeradores, têm como função converter a energia cinética do vento em energia mecânica que é convertida em energia elétrica através de um gerador elétrico acoplado (Pinto, 2013). Elas podem ser divididas em turbinas de eixo vertical (Vertical Axis Wind Turbine – VAWT) e de eixo horizontal (Horizontal Axis Wind Turbine – HAWT).

O aerogerador do tipo HAWT possui três principais elementos em sua composição: torre, nacela e rotor. A torre é o seu alicerce estrutural. O sistema de transmissão mecânico e o gerador elétrico situam-se dentro da nacela. O rotor é um conjunto composto pelas pás e o hub (cubo), onde este possui o controle de pitch para alterar a angulação das pás de acordo com a variação da direção dos ventos (Fadigas, 2011).

As pás são estruturas extensas e possuem uma complexa distribuição das propriedades dos materiais. Elas passam por longos processos durante seu projeto, pois é necessário realizar métodos tanto numéricos computacionais quanto experimentais, buscando sua otimização aerodinâmica e também estrutural.

No escopo do presente trabalho será avaliada numericamente um modelo de pá de 61,5 metros que faz parte do conjunto de três pás de uma turbina eólica do tipo "*offshore*" de eixo horizontal, com potência 5 MW e que foi desenvolvida pela National Renewable Energy Laboratory (NREL).

### **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

Para simulação foi utilizada como ferramenta o software de código aberto e gratuito, Salome-Meca, no qual permite fazer análise de elementos finitos pela plataforma Code\_Aster.

A estrutura externa da pá foi exportada em formato "STereoLithograph" do Qblade, software para simulação de turbina eólica distribuído gratuitamente sob uma licença GPL, que possui alguns projetos simples em seu banco de dados, incluindo o modelo da pá em questão (Marten, 2013).

Dentro do Salome-Meca foram retiradas as redundâncias e instâncias não pertinentes para a análise da geometria. Esta foi discretizada optando pela modelagem elemento de casca e o sistema foi subdividido em 20492 elementos triangulares com interpolação linear.

Para obter uma espessura real é necessário levar em consideração os diferentes materiais compósitos que são distribuídos ao longo da pá. No entanto para a análise simplificada, foram empregadas 17 seções diferentes ao longo da pá, onde cada seção tem sua espessura estimada em 5% do comprimento de corda de cada aerofólio que a compõe.

A Tabela 1 mostra as propriedades necessárias para reprodução da geometria, bem como as espessuras. As seções 1, 2 e 3, possuem perfis cilíndricos. De 4 à 17, a geometria é composta por aerofólios.

Tabela 1. Propriedades geométricas da pá de 5MW adaptado de Jonkman (2009)

Seção	Raio (m)	Corda (m)	Espessura (m)	Perfil
1	2,8667	3,542	0,1771	Cilíndrico 1
2	5,6000	3,854	0,1927	Cilíndrico 1
3	8,3333	4,167	0,2083	Cilíndrico 2
4	11,7500	4,557	0,2278	DU40 A17
5	15,8500	4,652	0,2326	DU35 A17
6	19,9500	4,458	0,2229	DU35 A17
7	24,0500	4,249	0,2124	DU30 A17
8	28,1500	4,007	0,2003	DU25 A17
9	32,2500	3,748	0,1874	DU25 A17
10	36,3500	3,502	0,1751	DU21 A17
11	40,4500	3,256	0,1628	DU21 A17
12	44,5500	3,010	0,1505	NACA64 A17
13	48,6500	2,764	0,1382	NACA64 A17
14	52,7500	2,518	0,1259	NACA64 A17
15	56,1667	2,313	0,1156	NACA64 A17
16	58,9000	2,086	0,1043	NACA64 A17
17	61,6333	1,419	0,0709	NACA64 A17

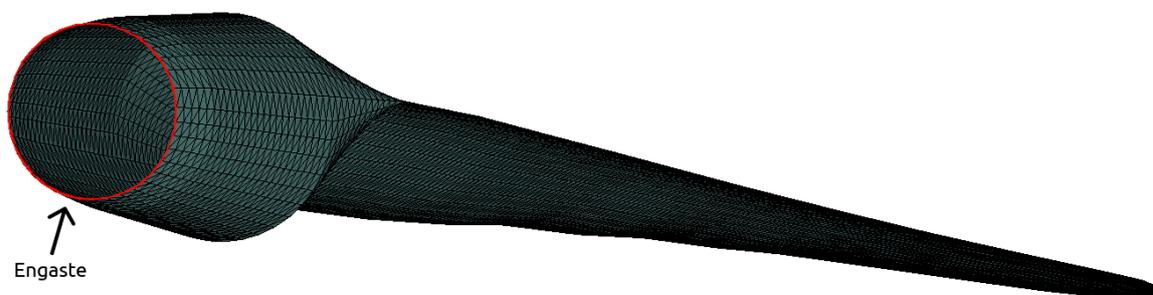
O material utilizado foi um Polímero Reforçado com Fibras Vidro (PRFV), com fração volumétrica de fibras de 60%, que possui um módulo de elasticidade transversal de 12 GPa, um coeficiente de Poisson igual a 0,19 e limite de resistência à tração transversal e longitudinal, 40 e 1020 MPa, respectivamente (Callister, 2012). Este compósito é comumente usado em pás de aerogeradores, pois apresenta elevada resistência, baixa rigidez e massa específica ( $2,1 \text{ g/cm}^3$ ), e como consequência uma maior flexibilidade para suportar os suscetíveis carregamentos.

É importante evidenciar que este material possui fibras contínuas e alinhadas, apresentando um comportamento anisotrópico, ou seja, suas propriedades possuem valores diferentes na direção transversal e longitudinal, sendo que esta possui uma maior resistência aos esforços realizados em seu alinhamento.

No entanto, a abordagem não entrou neste mérito e foi simplificada, tratando o material como linear isotrópico e puramente elástico, levando em conta apenas suas propriedades transversais, nas quais possuem baixa resistência mecânica por estarem alinhadas perpendicularmente as tensões geradas.

Como condição de contorno, conforme observado na Fig. 1, foi empregado o engaste na borda circular da pá, simulando uma conexão com o hub.

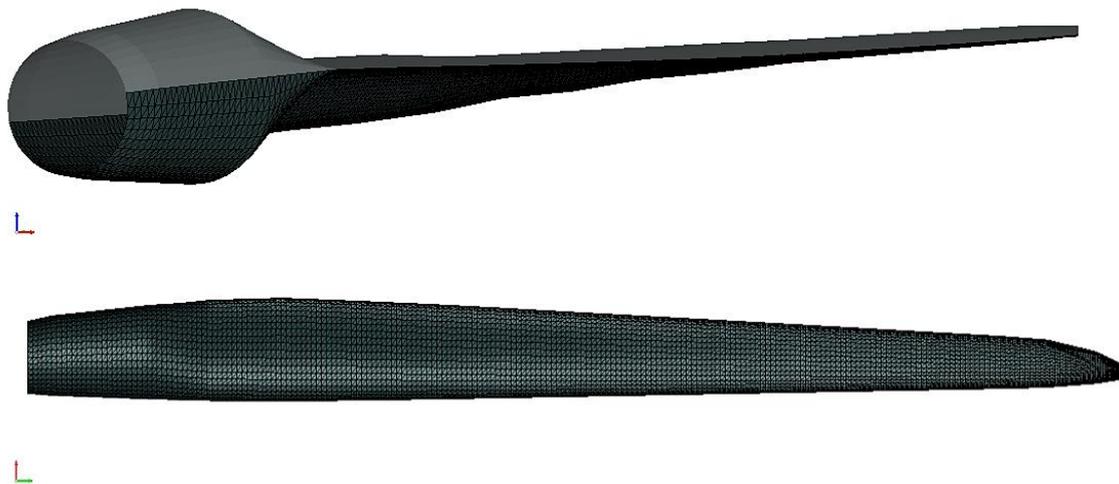
Figura 1. Engaste na borda circular da pá (Fonte: autoria própria)



O carregamento foi atribuído convertendo a energia cinética do vento, na direção axial, em pressão dinâmica distribuída na área projetada da superfície inferior da pá, onde esta foi particionada a partir do comprimento de corda de cada aerofólio.

A porção inferior destacada com a representação da malha, como observado na Fig. 2, representa onde a pressão atua com a normal da face de cada elemento discretizado.

Figura 2. Pá analisada com a superfície inferior sujeita ao carregamento em destaque de malha (Fonte: autoria própria)



A pressão dinâmica ( $P$ ), expressa na Eq. (1), depende da densidade do ar e do quadrado da velocidade (Veritas, 2002).

$$P = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (1)$$

A densidade do ar padrão ao nível do mar ( $\rho$ ) tem um valor de  $1,225 \text{ kg/m}^3$  (Atmosphere, 1975).

A velocidade ( $V$ ) utilizada foi a de corte do vento, com o valor de  $25 \text{ m/s}$  (Jonkman, 2009). Este é o limite de operação para funcionamento da turbina que, quando sujeita a essa circunstância, o controle de pitch é ativado, rotacionando a pá para que seu ângulo de ataque seja mínimo, assim como a sustentação aerodinâmica.

Com esses valores, tem-se a pressão dinâmica de  $382,8 \text{ Pa}$ .

## 2.1. Procedimento

A análise constituiu-se por dois casos, sendo o primeiro estático e o segundo, rotacional em torno do eixo do rotor.

No primeiro caso, a pressão dinâmica age na pá quando ela está parada, junto com a componente da aceleração gravitacional ( $\vec{g}$ ), com um valor de  $9,81 \text{ m/s}^2$ , atuando perpendicularmente em relação ao seu comprimento.

Figura 3. Representação da velocidade angular ( $\omega$ ) e das componentes de aceleração gravitacional ( $\vec{g}$ ) e centrífuga ( $\vec{a}_c$ ) (Fonte: autoria própria)



Para o segundo caso, foi acrescentado uma componente de aceleração centrífuga ( $a_c$ ). Ela possui um vetor na direção longitudinal da pá e é dada pelo produto do quadrado da velocidade angular e o raio (Halliday, 1996).

$$a_c = R\omega^2 \quad (2)$$

Onde o raio ( $R$ ) é a metade do diâmetro do rotor (compreende as pás e o hub) e a velocidade angular ( $\omega$ ). Os respectivos valores, conforme Jonkman (2009), é de 63 metros e 12,1 rpm.

Convertendo a rotação para rad/s, foi encontrado o valor de aceleração centrífuga de 101,15 m/s<sup>2</sup> ou aproximadamente 10 vezes a aceleração gravitacional.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No software Salome-Meca foram simulados os dois casos e visualizado as tensões principais, transversal e longitudinal, assim como o campo de tensões de von Mises e os deslocamentos.

A Tabela 2 contém os resultados da simulação, onde o termo “Cs” é o coeficiente de segurança dado pela razão entre o limite de resistência a tração transversal do material e a tensão de von Mises. A tensão “Principal em X” refere-se ao campo de tensões na transversal da pá e a longitudinal está descrita como “Principal em Y”.

Tabela 2. Resultados das simulações dos casos (Fonte: autoria própria)

Caso	Campo de tensões [MPa]			Cs	Deslocamento máximo [m]
	Principal em X	Principal em Y	von Mises		
1	28,06	20,06	26,9	1,48	1,307
2	3,197	3,26	4,62	8,66	0,3905

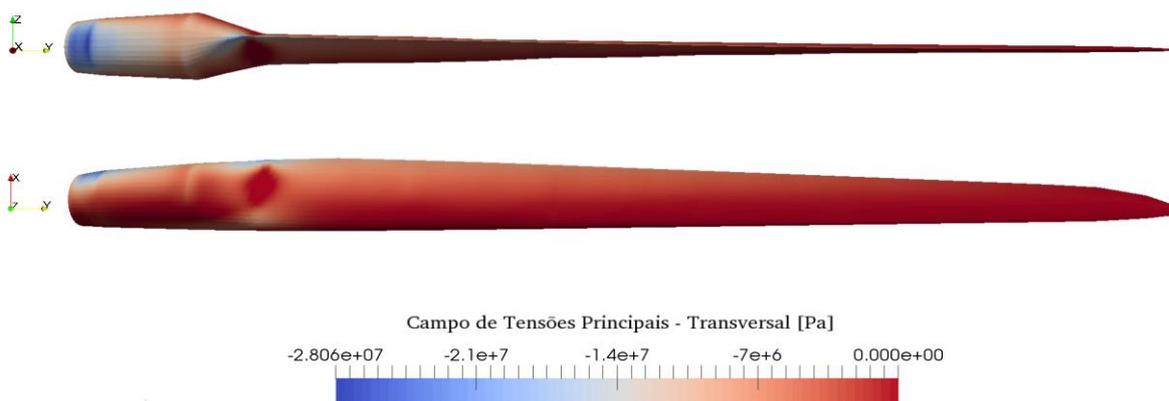
#### 3.1. Campo de tensões

A primeira comparação realizada foi a das tensões principais em X, na direção transversal. Este campo de tensões tende a comprimir a pá, pois elas situam-se no eixo perpendicular ao comprimento dela.

No primeiro caso, visualiza-se as baixas tensões no meio da pá. Por outro lado, há um pequeno acúmulo de tensões máximas de compressão na borda de estreitamento da região que sofre mudança no formato cilindro para aerofólio.

Estas tensões se encontram também próximo ao engaste, como ilustra a vista superior da Fig. 4, por efeito da deflexão sofrida com a pressão aplicada na superfície inferior.

Figura 4. Campo de tensões principais na direção transversal (X) para o “Caso 1” (Fonte: autoria própria)

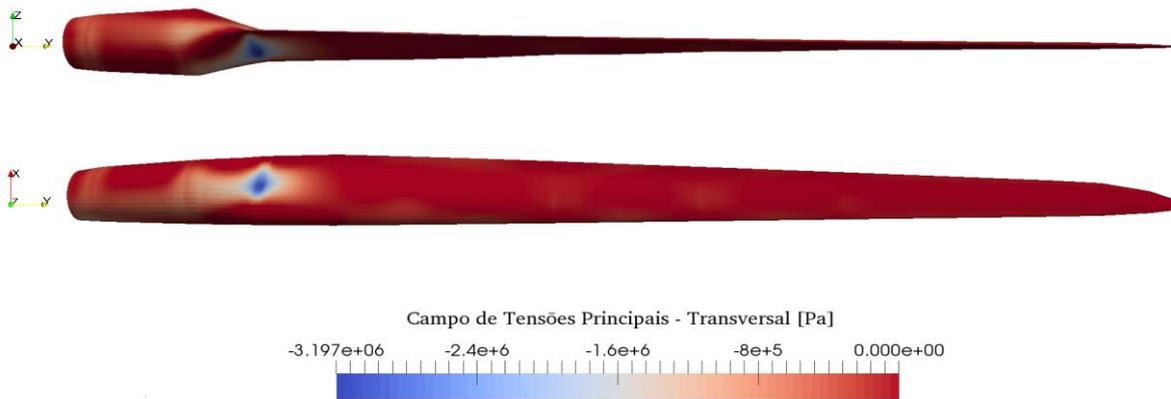


Como pode ser observado a seguir na Fig. 5, é notório que a componente adicionada no segundo caso diminuiu quase 10 vezes a sua intensidade máxima de compressão e como consequência, reduziu drasticamente os campos de tensões no engaste da pá.

A aceleração centrífuga tem um sentido positivo na direção Y e a tensão transversal ocorre na sua perpendicular. A oposição destas componentes centraliza a tensão máxima de compressão na região de mudança de perfil circular para aerofólio.

Nota-se também que as tensões mínimas em volta desta região de compressão máxima citada, que antes eram próximas da compressão nula e não possuíam uma definição, passaram agora a se alongar no eixo Y.

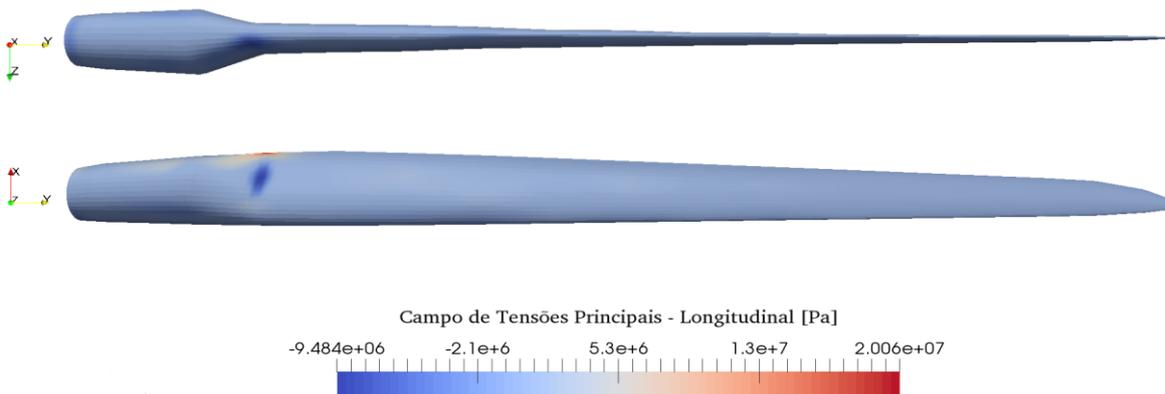
Figura 5. Campo de tensões principais na direção transversal (X) para o “Caso 2” (Fonte: autoria própria)



Nas tensões principais da direção longitudinal há uma tendência de tracionamento da estrutura no eixo Y. Em outras palavras, o campo de tensões está agindo paralelamente ao comprimento da pá.

Para primeiro caso, como mostra a Fig. 6, há pequena uma concentração de tensão de tração máxima na borda de afinamento dos aerofólios na região de mudança de perfis. Neste mesmo local, mas no eixo de aplicação da pressão dinâmica, há uma pequena ocorrência de tensão de compressão como reação a este tracionamento.

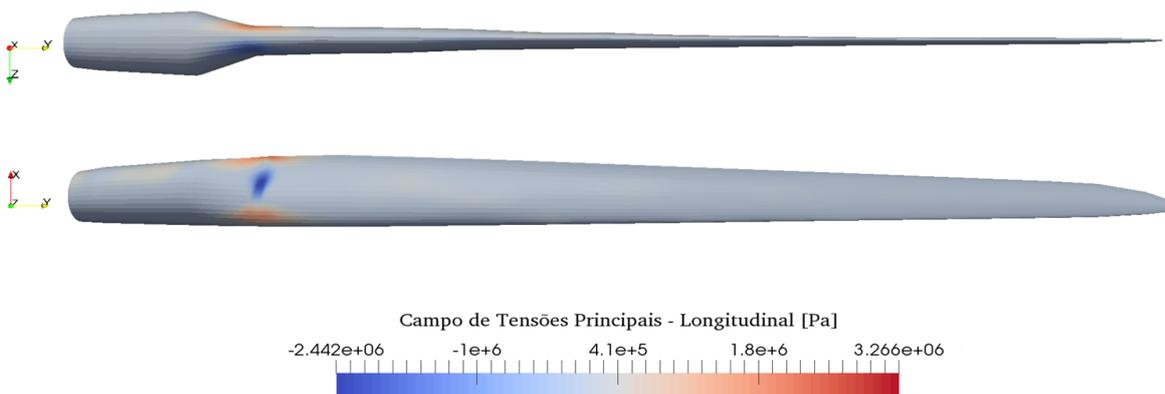
Figura 6. Campo de tensões principais na direção longitudinal (Y) para o “Caso 1” (Fonte: autoria própria)



Já no segundo caso, como mostra a Fig. 7, essa concentração é observada em ambas as bordas. Isto acontece por conta da aceleração centrífuga ter sua componente positivamente situada no eixo Y, que é o mesmo em que do campo de tensões principais na longitudinal.

Desta forma, afirmar-se que apesar da componente da aceleração centrífuga diminuir a magnitude do campo de tensões principais em questão, ela está colaborando com o tracionamento da pá.

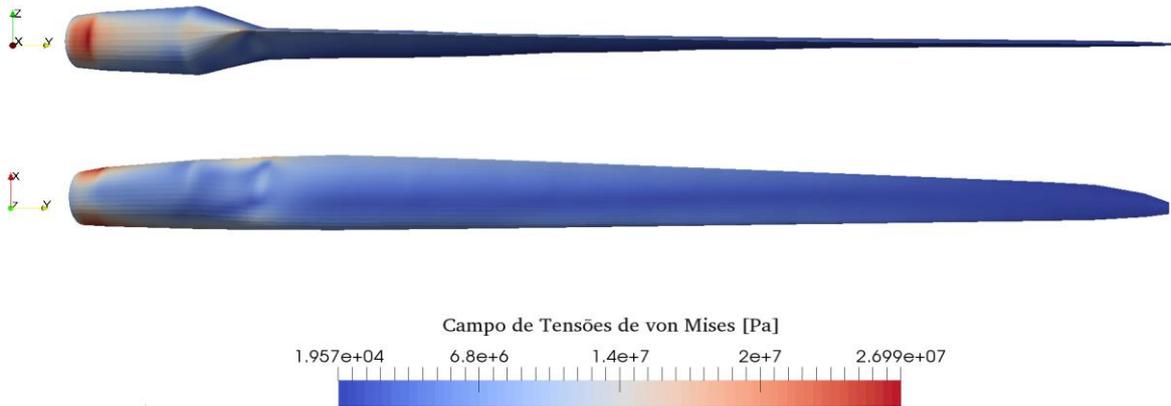
Figura 7. Campo de tensões principais na direção longitudinal (Y) para o “Caso 2” (Fonte: autoria própria)



Para o campo de tensões de von Mises, observa-se que no primeiro caso, ao longo da estrutura há tensões mínimas e um acúmulo situado na primeira seção cilíndrica próxima ao engaste. Esta última, possui uma concentração de tensões máximas devido a espessura dessa região ser menor que a da seção seguinte.

Com isso, tem-se uma maior solitação desta região engastada para suportar os carregamentos gravitacional e de pressão dinâmica que estão atuando na pá.

Figura 8. Campo de tensões de von Mises para o “Caso 1” (Fonte: autoria própria)

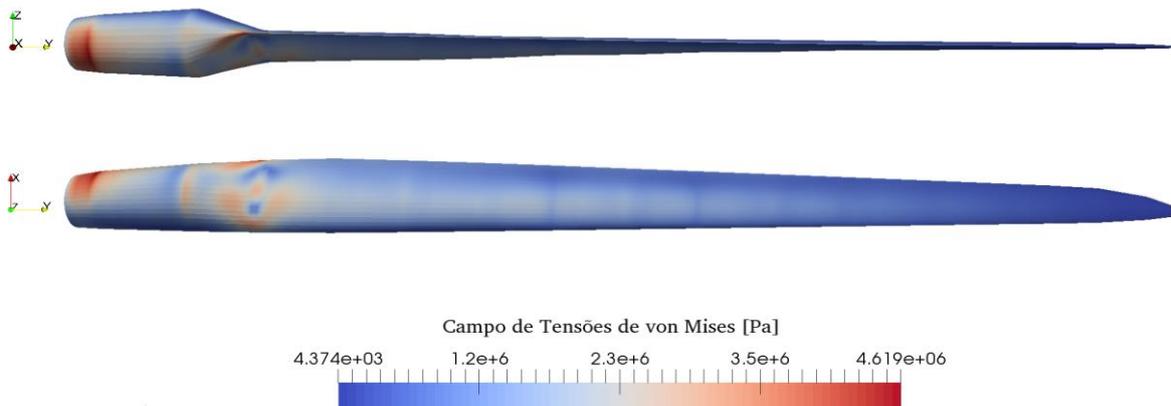


Por conta da aceleração centrífuga possuir uma tendência em tracionar a região fixa quando sujeita a rotação, o segundo caso além de apresentar a concentração de tensões máximas no engaste da pá, obteve visivelmente uma variação de tensões médias e mínimas de von Mises na região de mudança de perfil cilíndrico para aerofólios.

Esta variação é notada também ao longo da estrutura, com as tensões média decrescendo junto à variação da espessura.

Isso ocorre por ação da componente de força inercial centrífuga gerada por esta aceleração, que destina-se a “empurrar” a massa da estrutura na direção radial do eixo do rotor em sentido à ponta da pá.

Figura 9. Campo de tensões de von Mises para o “Caso 2” (Fonte: autoria própria)



A diminuição da espessura da pá ao longo do seu comprimento auxilia na resistência da força inercial gerada pela aceleração centrífuga, pois se a espessura tivesse uma variação crescente, haveria uma maior massa concentrada na ponta da pá e assim, apresentaria um maior momento de inércia.

Com isso, esta última consideração seria inviável para o dimensionamento estrutural da pá, pois ela necessitaria de uma maior energia para rotacionar.

Em todos os campos de tensões avaliados, há uma concentração de tensão na região da mudança abrupta de seção, onde a mesma está variando de um formato circular para um aerofólio assimétrico. Desta forma, a análise estrutural e aerodinâmica se faz necessária para que não comprometa essas regiões mais vulneráveis.

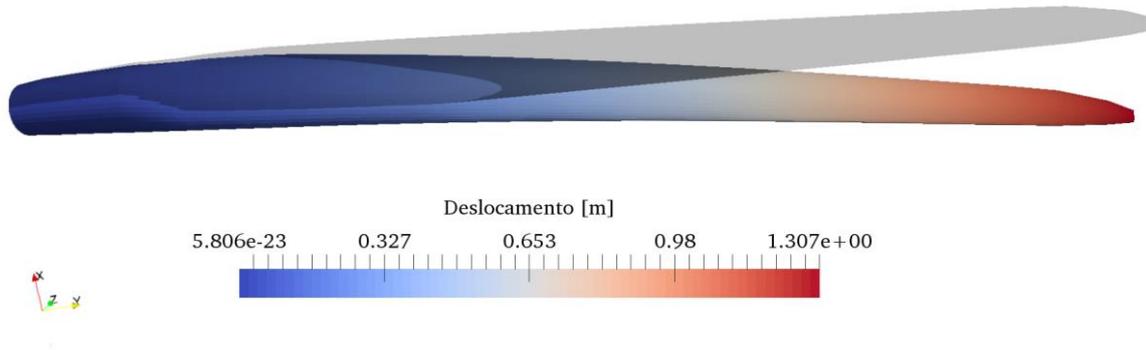
Outro fator importante é que para ambos os casos se têm um coeficiente de segurança positivo. Com isso, a estrutura sujeita a pressão dinâmica em seu estado limite de operação, quando estática ou rotacionando, ainda apresentou uma margem de segurança em relação ao tracionamento máximo exigido do material.

### 3.2. Deslocamento

Para os deslocamentos, no primeiro caso, foi apresentado uma magnitude de 1,307 metro e para melhor visualização, foi aumentada a escala do mesmo em 5 vezes. Este valor corresponde cerca de 2% do comprimento da pá.

O comportamento pode ser explicado devido ao material utilizado apresentar flexibilidade e também por conta da aceleração gravitacional ter sua componente colaborando indiretamente com a atuação pressão dinâmica.

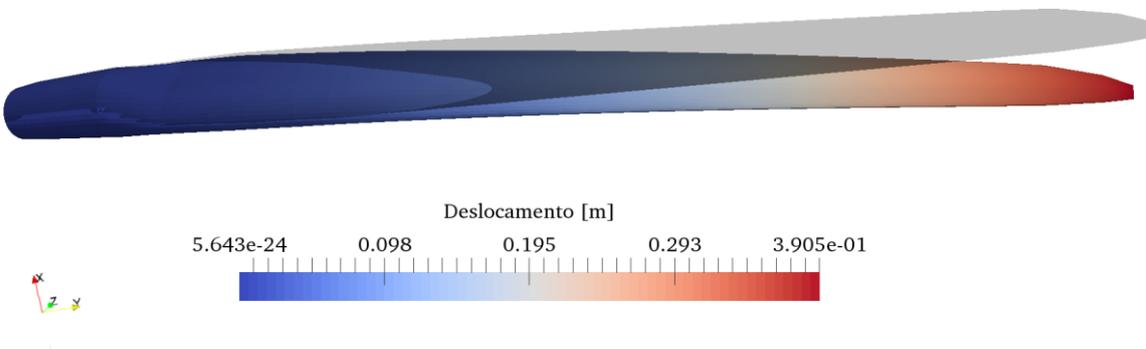
Figura 10. Deslocamento no “Caso 1” amplificada em 5x (Fonte: autoria própria)



Assim como nos campos de tensões, a aceleração centrífuga também demonstrou sua importância no deslocamento, pois ao acrescentá-la no segundo caso, esta componente dificultou a atuação da pressão dinâmica ao longo da pá.

Como ilustrado na Fig. 11, a pá apresentou um valor de 0,3905 metro ou aproximadamente 4 vezes menor que o primeiro.

Figura 11. Deslocamento no “Caso 2” amplificada em 15x (Fonte: autoria própria)



Essa diferença de deslocamento pode ser explicada em virtude da decomposição de forças gravitacionais e centrífugas que tendem a tornar a extensão da pá mais rígida, pois a componente em seu comprimento possui uma maior intensidade e como consequência, a resultante tende a ser mais próxima desta.

Outra questão a ser retomada é que, durante a rotação, a força inercial centrífuga descentraliza o peso na região com maiores espessuras e tende a distribuir a massa da estrutura em direção a ponta da pá.

Desta forma, há uma dispersão ao longo do seu comprimento que colabora também com a sua rigidez e como consequência, a estrutura torna-se mais resistente a deflexão.

### 4. CONCLUSÃO

Conclui-se que mesmo operando em condições extremas, para ambos os casos não foi excedido o limite de resistência a tração do material, ou seja, a estrutura atende as solicitações mecânicas avaliadas no presente modelo.

É importante enfatizar que existem outros carregamentos a serem avaliados bem como a estrutura interna, longarina, na qual não foi incluída no modelo e que diversas considerações foram feitas para formalizar essa análise simplificada.

No entanto, pode-se concluir que a componente de aceleração centrífuga, quando combinada à gravitacional, influencia diretamente na diminuição das tensões e no deslocamento por efeito da pressão aplicada. Auxiliando também no aumento da rigidez do material, mesmo este possuindo um baixo módulo de elasticidade.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte da Universidade Federal da Grande Dourados no desenvolvimento deste trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS

- Atmosphere, Standard. "International organization for standardization." ISO 2533 (1975): 1975.
- Callister Jr, William D., and David G. Rethwisch. Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons, 2012.
- Veritas, Norske. Guidelines for design of wind turbines. Det Norske Veritas: Wind Energy Department, Ris National Laboratory, 2002.
- Fadigas, Eliane A. Faria Amaral. Energia eólica. Barueri: Manole, 2011.
- Halliday, David, Resnik Robert, Krane, Denneth S. Física 1, volume 1, 4 Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. 326 p.
- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., and Scott, G. "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development," National Renewable Energy Laboratory: NREL/TP-500-38060, 2009.
- Marten, D., Wendler, J. (2013), Qblade Guidelines v0.6.
- Pinto, Milton de Oliveira. "Fundamentos de energia eólica." *Rio de Janeiro: LTC* (2013).

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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