



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO

Campus Recife

Coordenação Acadêmica do Curso Superior em Engenharia Mecânica

Engenharia Mecânica

LÍDIA LETÍCIA SALVINO DOS SANTOS SILVA

ESTUDO DE EROÇÃO DE BORDO DE ATAQUE DE PÁS EÓLICAS VIA CFD

Recife

2023

LÍDIA LETÍCIA SALVINO DOS SANTOS SILVA

ESTUDO DE EROSÃO DE BORDO DE ATAQUE DE PÁS EÓLICAS VIA CFD

Trabalho de conclusão de curso apresentada a Coordenação Acadêmica do Curso Superior em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa.

Recife

2023

Ficha elaborada pela bibliotecária Maria do Perpétuo Socorro Cavalcante

S586e

2023 Silva, Lídia Letícia Salvino dos Santos

Estudo de erosão de bordo de ataque de pás eólicas via CFD. / Lídia Letícia Salvino dos Santos. --- Recife: A autora, 2023.
69f. il. Color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Pernambuco, 2023.

Inclui Referências.

Orientador: Professor Dr José Ângelo Peixoto da Costa.

1. Engenharia Mecânica-. 2. Energia eólica.. 3. Erosão. 4. Bordo de ataque. 5. Simulação CFD. 6. Simulação. FSI. 7. Compósitos. I. Costa, José Ângelo Peixoto da (orientadora). II. Instituto Federal de Pernambuco. III. Título.

CDD 532 (21ed.)

LIDIA LETICIA SALVINO DOS SANTOS SILVA

ESTUDO DE EROSÃO DE BORDO DE ATAQUE DE PÁS EÓLICAS VIA CFD

Trabalho aprovado. Local, data.

José Ângelo Peixoto da Costa

Frederico Duarte de Menezes

Guilherme Barbosa Lopes Junior

Recife

2023

A toda a minha família, em especial meu esposo, mãe, pai e irmão que sempre me incentivaram para seguir trilhando a minha jornada acadêmica, vocês são a minha força.

Ao irmão de caminhada acadêmica, Gabriel Santana (in memorian) que perdi há pouco tempo, mas que foi um dos responsáveis por tornar meus dias mais alegres durante a graduação.

AGRADECIMENTOS

Externo meus sinceros e profundos agradecimentos:

Primeiramente a Deus, a quem devo a minha vida, que é o autor da minha fé e meu maior norte, pois sem Ele eu não teria chegado até aqui.

A meu esposo, Tiago, que me incentivou a prestar vestibular no IFPE, sempre acreditou no meu potencial e me deu condições e força para trilhar este percurso.

A meus pais, Lúcia e Samuel, que sempre me motivaram a estudar e me deram condições e meios, sempre investindo em meus estudos, para realizar o meu sonho (de pequena) de ser engenheira.

A meu irmão, Neto, que sempre acreditou em mim.

A meu orientador Ângelo, que segurou em minha mão desde o primeiro período de curso, me permitindo ser bolsista de quatro iniciações científicas, sempre compartilhando suas experiências, às quais sempre levarei para minha vida.

A meus primos, Sinho e Rubinha, por me ajudarem várias vezes durante meu ensino médio e graduação.

Aos irmãos que ganhei durante a graduação tornando-a mais fácil e leve de ser trilhada. Sou grata, por todas os auxílios e trocas de conhecimentos e experiências.

Ao IFPE e CNPQ pelos auxílios financeiros e fomentos das minhas bolsas de iniciação científica.

À presente banca nessa defesa.

A todos que indiretamente ou diretamente me ajudaram na minha jornada acadêmica.

RESUMO

A demanda energética está cada vez mais aumentando em virtude do crescimento da população mundial e conseqüentemente a busca por fontes de energia que sejam inesgotáveis também está crescendo. A emissão de gases de efeito estufa cresce conjuntamente já que os combustíveis fósseis são, ainda, as principais fontes de produção de energia. A energia proveniente dos ventos, chamada de energia eólica, mostra-se como uma das fontes mais promissoras por ser limpa e inesgotável. Os instrumentos utilizados para captar a energia cinética do vento e transformar em energia elétrica são os aerogeradores (turbinas eólicas) e os mais utilizados são os modelos de eixo horizontal de três pás. A pá é um componente que deve ser tratado com muita importância na hora de projetar uma turbina eólica, pois a partir dela é possível saber o quanto de energia será produzido, o objeto de estudo neste trabalho foi a erosão no bordo de ataque, processo que causa perdas na eficiência da produção de energia. Neste trabalho, foi simulado escoamento no perfil aerodinâmico NACA 0012, como forma de validação numérica e a erosão foi estudada no perfil S814 que é utilizado nas pás eólicas. As simulações foram feitas utilizando os modelos de erosão de Finnie e Tabakoff, e foi possível observar que houve alterações nos coeficientes aerodinâmicos, e também nas tensões sofridas pelos esforços dos campos de pressão. Os materiais compósitos se mostraram os mais promissos devido a suas excelentes propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Energia eólica; Erosão; Bordo de ataque; Simulação CFD; Simulação FSI; Compósitos.

ABSTRACT

The energy demand is always increasing due to the growth of the world population and consequently the search for energy sources that are inexhaustible is also growing. The emission of greenhouse gases grows together since fossil fuels are still the main sources of energy production. The energy from the winds, called wind energy, is one of the most promising sources because it is clean and inexhaustible. The instruments used to capture the kinetic energy of the wind and transform it into electrical energy are wind turbines and the most used are the three-blade horizontal axis models. The blade is a component that must be treated with great importance when designing a wind turbine, because from it it is possible to know how much energy will be produced, the object of study in this work was the erosion on the leading edge, a process that causes losses in the efficiency of energy production. In this work, flow was simulated in the aerodynamic profile NACA 0012, as a manner of numerical validation and erosion was studied in the profile S814, which is used in wind blades. The simulations were made using the Finnie and Tabakoff erosion models, and it was possible to observe that there were changes in the aerodynamic coefficients, and also in the tensions suffered by the efforts of the pressure fields. Composite materials showed the most promise due to their excellent mechanical properties.

Keywords: Wind energy; Erosion; Attack board; CFD Simulation; FSI simulation; Composites.

LISTA DE TABELAS/ FIGURAS/ GRÁFICOS

Figura 1. Bordo de ataque de pá eólica erodido.....	16
Figura 2. Moinho desenvolvido por James Blyth.....	18
Figura 3. Primeiras turbinas de La Cour instaladas em 1897.....	18
Figura 4. Matriz elétrica brasileira [posição 17/04/2023].....	20
Figura 5. Ranking Capacidade Total Instalada em 2021.....	20
Figura 6. Ranking Nova Capacidade Instalada em 2021.....	21
Figura 7. Geração de energia eólica por região.....	22
Figura 8. Modelo de turbina Savonius.....	23
Figura 9. Turbina Darrieus.....	23
Figura 10. Componentes de uma turbina eólica.....	24
Figura 11. Representação das forças aerodinâmicas, momento de arfagem e ângulo de ataque.....	26
Figura 12. Aumento do ângulo de ataque.....	27
Figura 13. Conceitos aerodinâmicos em perfil alar.....	28
Figura 14. Constituintes dos compósitos reforçados por fibras.....	29
Figura 15. Partes de uma pá eólica.....	30
Figura 16. Processo erosivo.....	31
Figura 17. Aerofólio NACA 0012.....	34
Figura 18. Perfil S814.....	35
Figura 19. Etapas da simulação CFD.....	36
Figura 20. Modelo computacional.....	39
Figura 21. Domínio para o S814.....	41
Figura 22. Malha 1 (grosseira).....	42
Figura 23. Malha 2 (média).....	42
Figura 24. Malha 3 (refinada).....	43
Figura 25. Modelo computacional - S814.....	44
Figura 26. Setup - modelo de erosão.....	44
Figura 27. Setup - simulação estrutural.....	46
Figura 28. Campo de pressão - sem erosão.....	46
Figura 29. Campos de pressão (modelo Finnie).....	47
Figura 30. Velocidade no aerofólio NACA 0012.....	50
Figura 31. Pressão no aerofólio NACA 0012.....	51
Figura 32. Coeficiente de pressão.....	51
Figura 33. Resultados para velocidade (sem erosão).....	53
Figura 34. Resultados para pressão (sem erosão).....	54
Figura 35. Resultados para erosão (modelo Finnie).....	55
Figura 36. Resultados para pressão (modelo Finnie).....	56
Figura 37. Resultados para velocidade (modelo Finnie).....	57
Figura 38. Resultados para erosão (modelo Tabakoff).....	58
Figura 39. Resultados para pressão (modelo Tabakoff).....	58
Figura 40. Resultados para velocidade (modelo Tabakoff).....	59

Figura 41. Resultados para tensão equivalente de Von-Mises.	61
Figura 42. Resultados para a deformação total (sem erosão).....	62
Figura 43. Resultados para tensão equivalente de Von-Mises (modelo de Finnie).	63
Figura 44. Resultados para a deformação total (modelo de Finnie).	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros para a simulação de escoamento no NACA 0012.....	40
Tabela 2. Parâmetros para a simulação de escoamento no S814.....	43
Tabela 3. Coeficientes de sustentação e arrasto.....	49
Tabela 4. Coeficientes de sustentação e arrasto.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica

ABENDI – Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção

c - corda

CAD – Computed Aided Design

C_D – Coeficiente de arrasto

CFD – Computational Fluid Dynamics

C_L – Coeficiente de sustentação

C_m – Coeficiente do momento de arfagem

C_p – Coeficiente de pressão

D – Força de arrasto

d_p – Diâmetro da partícula

e – Energia específica

ER – Taxa de erosão (*Erosion Rate*)

EbMVF – Método dos Volumes Finitos baseado em Elementos

g – Aceleração da gravidade

GWEC – Global Wind Energy Council

H_p – Dureza da partícula

IFPE – Instituto Federal de Pernambuco

k – Constante experimental

L – Força de sustentação

m – Momento de arfagem

m_p – Massa da partícula

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MVF – Método dos Volumes Finitos

n – Expoente da velocidade da partícula

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NREL – National Renewable Energy Laboratory

ONU – Organização das Nações Unidas

ρ – Densidade

p – Pressão

\bar{P} – Pressão estática local

P_{∞} – Pressão estática de corrente livre

PRFC – Polímero Reforçado por Fibra de Carbono

PRFV – Polímero Reforçado por Fibra de Vidro

\dot{Q} – Quantidade de calor

R_T – Rugosidade relativa

S - área

t – Tempo

TEEV – Turbinas Eólicas de Eixo Vertical

TEEH – Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal

V - Velocidade

V_{∞} – Velocidade do escoamento livre

\dot{W}_v – Trabalho

α – Ângulo de impacto

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Motivação	16
2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo geral	17
2.2 Objetivos específicos	17
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1 Contexto histórico	17
3.2 Energia eólica no Brasil	20
3.3 Conceitos gerais sobre aerogeradores	22
3.4 Aerodinâmica das pás	25
3.5 Materiais utilizados em pás eólicas	28
3.6 Erosão das pás	31
4 METODOLOGIA	34
4.1 Perfil NACA 0012	34
4.2 Perfil S814	35
4.3 Simulação CFD	35
4.3.1 Setup – escoamento no perfil NACA 0012	39
4.3.2 Simulação de erosão no S814	40
4.4 Simulação FSI	45
4.4.1 Setup – Simulação FSI	45
4.5 Propriedades dos materiais	47
5 RESULTADOS e análise	49
5.1 Escoamento no NACA 0012	49
5.2 Perfil S814	52
6 Conclusões	64
REFERENCIAS	66

ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

No primeiro capítulo, será introduzido o tema do trabalho, no qual é falado sobre a importância da utilização de fontes de energia renováveis como, por exemplo, a energia eólica que é o foco deste estudo. Também é apresentado o conceito de aerogeradores e a relevância de estudar sobre a produção de pás eólicas. No segundo capítulo, serão apresentados os objetivos geral e específicos do trabalho. No terceiro capítulo, será abordada a fundamentação teórica, contemplando o contexto histórico da utilização de energia eólica, a matriz energética do Brasil, os conceitos aerodinâmicos, os materiais utilizados na fabricação de pás eólicas e o processo de erosão nas pás eólicas. No quarto capítulo, será apresentada a metodologia do trabalho, onde será mostrado os modelos computacionais e materiais utilizados nas simulações. No quinto capítulo, serão apresentados os resultados obtidos, sendo realizada uma análise que mostra as variações, de alguns parâmetros, relacionadas ao processo erosivo das pás eólicas. No sexto capítulo, serão abordadas as considerações finais do trabalho, onde será mostrado um breve resumo em relação aos materiais que foram utilizados nas simulações e algumas sugestões para futuros trabalhos.

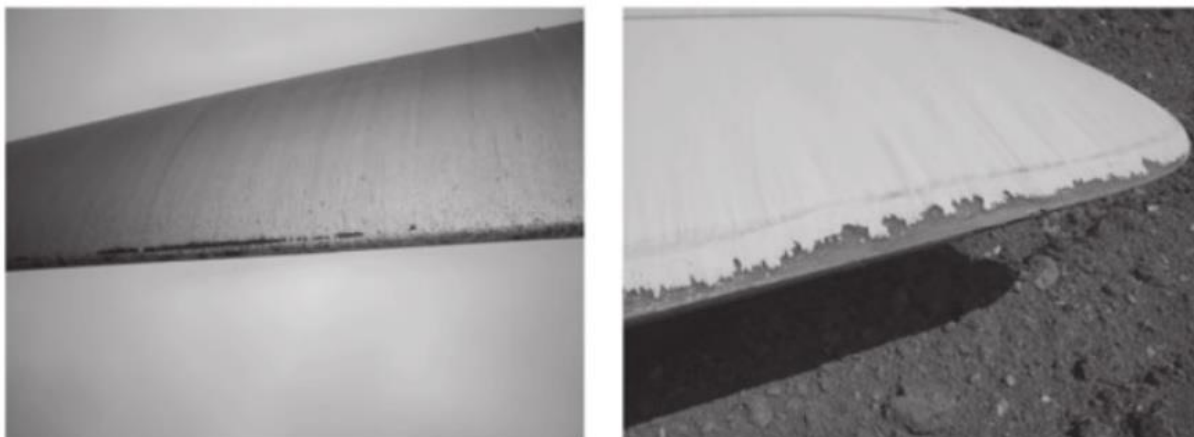
1 INTRODUÇÃO

O vento é definido como o movimento de massas de ar de áreas com alta pressão para áreas de baixa pressão, que se dá devido ao aquecimento de forma inconstante da atmosfera através da radiação solar. Atualmente, é possível converter a energia deste movimento em formas de energia úteis, e assim denomina-se a energia eólica. Este tipo de energia é muito utilizado na produção de eletricidade, em moinhos de vento, veleiros, entre outros.

Existem várias vantagens no uso da energia eólica, dentre as principais estão: disponibilidade, a instalação não precisa ser no local de utilização, regularidade a médio e longo prazo, não ocupam muito espaço, boa eficiência energética na conversão, além de ser uma fonte renovável e limpa (ENEL GREEN POWER S.P.A., 2022). Também possui algumas desvantagens como o impacto sobre as aves da localidade, impacto visual e sonoro. Essas, no entanto, são superadas pelas vantagens.

Os aerogeradores, também chamados de turbinas eólicas, são os equipamentos responsáveis pela captação da energia cinética do vento e conversão em energia elétrica. A quantidade de energia captada depende do tamanho das pás dos aerogeradores, e por isso são componentes bastante críticos, uma vez que precisam ser grandes ao mesmo tempo em que são leves. Essa questão tem resultado em muitas pesquisas na área, com a finalidade de desenvolver materiais que sejam resistentes e tenha baixa densidade. Os materiais compósitos estão sendo muito utilizados por possuírem essas características, como por exemplo a fibra de vidro e fibra de carbono. Além deste ponto, quando já está em operação, as pás sofrem com as intempéries do clima, como por exemplo, a ação da erosão, que pode ser prejudicial a produção de energia (JÚNIOR, 2017). A figura abaixo mostra o bordo de ataque de uma pá erodida.

Figura 1. Bordo de ataque de pá eólica erodido.



Fonte: Sareen, Sapre e Selig, 2021.

É de extrema importância conhecer os materiais utilizados na produção das pás eólicas, para poder prever possíveis defeitos que possam atingir esses componentes. Algumas pás são feitas de materiais que, com a ação do clima se degradam facilmente e, em alguns desses materiais isso pode acontecer de forma microscópica, além de diminuir a eficiência energética pode também causar acidentes (SILVA, 2018).

1.1 Motivação

A utilização de combustíveis fósseis na produção de energia é bastante perigosa tanto para a saúde humana como para o meio ambiente. Conhecidos por não serem renováveis, este grupo de combustível caracteriza, praticamente, 75% da demanda energética mundial e nele estão inclusos: o carvão mineral, dos derivados do petróleo e gás natural (AZEVEDO, 2022).

A queima desses combustíveis resulta na liberação de gases tóxicos que são causadores de problemas respiratórios e poluição atmosférica, o monóxido de Carbono, e chuva ácida, os óxidos de Nitrogênio e dióxido de Enxofre. Além disso, são responsáveis pelo aumento do efeito estufa e aquecimento global (AZEVEDO, 2022).

A alternativa para suprir a demanda energética, diminuindo o uso de combustíveis fósseis, foram as energias provenientes de fontes limpas e renováveis,

como por exemplo a eólica, uma vez que o impacto ambiental destas são bem menores. A ONU (Organização das Nações Unidas) classifica a energia eólica como Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e a priorizou nos investimentos que incentivam à economia verde.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é estudar os efeitos da erosão do bordo de ataque das pás eólicas com o auxílio da simulação computacional fluidodinâmica, realizando um comparativo entre os materiais mais utilizados na produção destas pás.

2.2 Objetivos específicos

- Levantamento bibliográfico acerca dos efeitos do clima sobre as pás eólicas;
- Determinar o local de estudo e obter os dados do clima da região;
- Desenhar em software de CAD o modelo da pá de perfil aerodinâmico S814;
- Realizar simulações computacionais fluidodinâmicas do modelo, adicionando o modelo de erosão;
- Estudo de caso comparando materiais de construção de pás;
- Publicar resultados obtidos em periódicos indexados e congressos nacionais e internacionais da área.

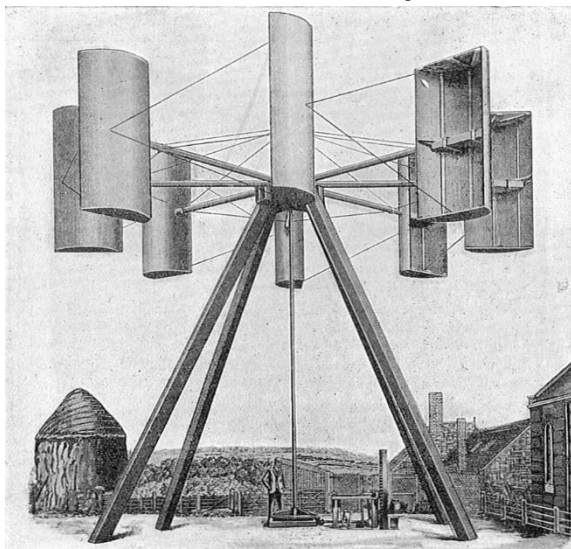
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Contexto histórico

Os moinhos de vento foram os primeiros geradores de energia eólica que existiram. De início produziam apenas energia mecânica e, em meados de julho de 1887 foi desenvolvido o primeiro moinho capaz de produzir eletricidade pelo

engenheiro eletricitista James Blyth (**Figura 2**). Esses moinhos eram muito utilizados para fins de iluminação e aquecimento (PINTO, 2014).

Figura 2. Moinho desenvolvido por James Blyth.



Fonte: PINTO (2014).

Paul La Cour ficou conhecido como o cientista que marcou o ponto de transição entre a geração de energia elétrica através dos moinhos de vento e da mais moderna tecnologia. La Cour teve sua primeira turbina instalada em 1897, na cidade de Askov (**Figura 3**). Após isso, vários modelos de turbinas eólicas foram desenvolvidos e, de início, eram utilizados para abastecer os locais que ainda não estavam ligados à rede elétrica, como por exemplo as áreas rurais (PINTO, 2014).

Figura 3. Primeiras turbinas de La Cour instaladas em 1897.



Fonte: MARCOLIN (2007).

Após a Segunda Guerra Mundial, os valores do petróleo e carvão caíram e com isso a disponibilidade de combustível para geração de energia elétrica não era problema, e também, a temática de preservação do meio ambiente era negligenciada. Isso resultou na diminuição dos estudos voltados para a energia eólica, que se tornou inviável para a época devido aos custos elevados (PINTO, 2014).

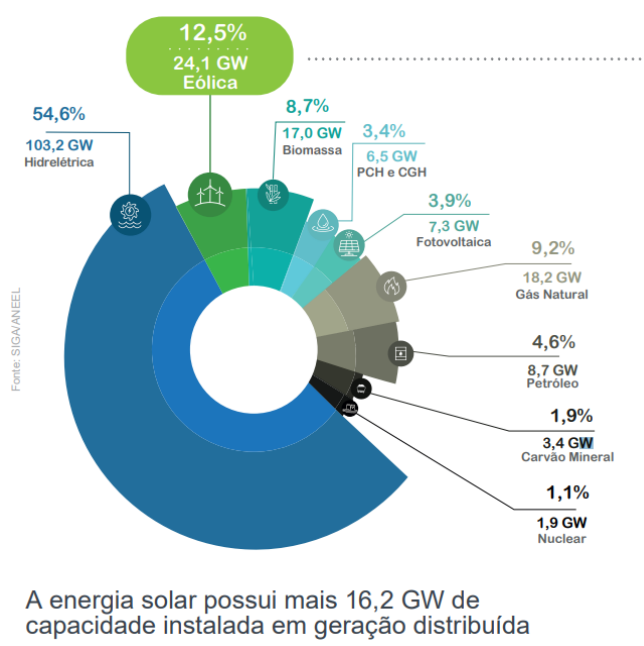
A crise do petróleo, em 1973, colocou novamente a energia dos ventos de volta ao mercado energético, principalmente nos Estados Unidos que era muito dependente do combustível, neste mesmo ano, o governo americano desenvolveu o programa de energia eólica juntamente com a *Nacional Aeronautics and Space Administration* (NASA), no qual foram criados diversos modelos (PINTO, 2014).

Através da crise energética de 1973 diversos países buscaram produzir energia com fontes alternativas ao petróleo, a exemplo da eólica (como foi dito no parágrafo anterior) e análogo a isso, as discussões acerca do futuro do Planeta Terra cresceram, uma vez que sua preservação e as condições de vida dependeriam das ações realizadas para diminuição da poluição. As primeiras ações políticas voltadas para o tema de preservação do meio ambiente e energias renováveis, aconteceram na Conferência Mundial do Meio Ambiente, em 1974 na cidade de Estocolmo, localizada na Suécia (PINTO, 2014).

3.2 Energia eólica no Brasil

Segundo dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), atualmente [posição 17/04/2023] o Brasil possui 869 parques eólicos em 12 estados, com mais de 9770 aerogeradores em funcionamento, resultando numa capacidade de instalação igual a 24,13 GW. A energia eólica é a segunda fonte mais utilizada no país, sendo responsável por 12% produção energética (**Figura 4**).

Figura 4. Matriz elétrica brasileira [posição 17/04/2023].



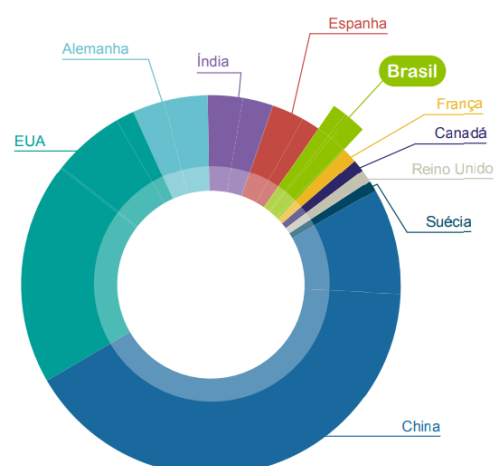
Fonte: ABEEOLICA (2023).

O Brasil terminou o ano de 2021 em 6º lugar no Ranking Mundial de capacidade acumulada, e em 3º no ranking de nova capacidade instalada no ano, de acordo com o *Global Wind Energy Council* (GWEC), conforme mostram as figuras abaixo.

Figura 5. Ranking Capacidade Total Instalada em 2021.

Ranking Capacidade Total Instalada Onshore

POSIÇÃO	PAÍS	Capacidade total instalada onshore (GW)
1	China	310,6
2	EUA	134,3
3	Alemanha	56,8
4	Índia	40,0
5	Espanha	28,3
6	Brasil	21,5
7	França	19,1
8	Canadá	14,2
9	Reino Unido	14,0
10	Suécia	10,0

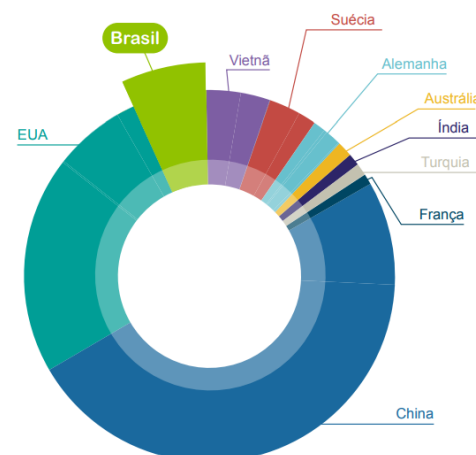


Fonte: ABEEOLICA (2022).

Figura 6. Ranking Nova Capacidade Instalada em 2021.

Ranking Nova Capacidade Instalada de Eólica em Onshore em 2021

POSIÇÃO	PAÍS	Nova capacidade onshore instalada no ano (GW)
1	China	30,7
2	EUA	12,7
3	Brasil	3,8
4	Vietnã	2,7
5	Suécia	2,1
6	Alemanha	1,9
7	Austrália	1,7
8	Índia	1,5
9	Turquia	1,4
10	França	1,2



Fonte: ABEEOLICA (2022).

O Brasil terminou o ano de 2021 com 795 usinas instaladas, totalizando um potencial eólico de 21,57 GW, representando um aumento equivalente a 21,53% quando relacionado a dezembro de 2020, no qual a potência instalada era igual a 17,75 GW. O Nordeste é a região que mais se destaca na produção de energia através dos ventos, compreendendo, aproximadamente, 89% da energia gerada em todo o Brasil, comparando os boletins dos anos 2020 e 2021, a região apresentou um aumento de 34% (**Figura 7**).

Figura 7. Geração de energia eólica por região.

Região	2020		2021		% de crescimento
	Geração (TWh)	Representatividade	Geração (TWh)	Representatividade	
Sudeste	0,05	0,1%	0,06	0,1%	4%
Sul	6,33	11,5%	6,20	8,7%	-2%
Nordeste	47,00	85,6%	63,20	88,7%	34%
Norte	1,50	2,7%	1,76	2,5%	17%
Total	54,89	100%	71,22	100%	29,7%

Fonte: ABEEOLICA (2022).

Segundo a presidente da ABEEólica, Elbia Gannoum, o grande potencial energético da região Nordeste deve-se a seus ventos fortes, constantes e unidirecionais, além da velocidade que supera a necessária para a geração de energia. Gannoum diz, ainda, que no mundo um aerogerador tem uma eficácia entre 28% e 30%, no Brasil 50%, e o Nordeste chega a atingir 83% (BARIFOUSE; SCHREIBER, 2023).

3.3 Conceitos gerais sobre aerogeradores

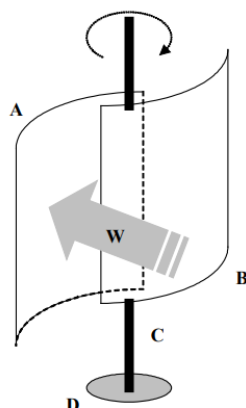
Os aerogeradores são os componentes utilizados para converter a energia cinética proveniente dos ventos em outras fontes de energia úteis, como por exemplo, a energia elétrica. Esses equipamentos podem ser de eixo vertical (TEEV) ou eixo horizontal (TEEH).

As TEEV, como o nome já diz, são caracterizadas por terem as pás instaladas em torno de um eixo vertical. Estas turbinas são conhecidas por possuírem uma melhor performance onde há ventos muito turbulentos, além de emitirem ruídos mais baixos quando comparadas com as turbinas de eixo horizontal. O princípio de funcionamento deste tipo de turbina consiste em usar a força de arrasto promovendo a rotação do rotor (PURIFICAÇÃO; DELLA FONTE, 2012).

Os principais tipos de turbinas eólicas de eixo vertical são: Savonius e Darrieus. A Savonius é composta um eixo [C] e duas pás [A e B] semicirculares posicionadas perpendicularmente a direção do vento [W] (**Figura 8**). Esta turbina é conhecida por conseguir captar o vento em qualquer direção e possuir o eixo conectado direto no gerador, tirando a necessidade de ter uma caixa de engrenagens. A Savonius, no

entanto, possui uma baixa eficiência, quando comparada com outros modelos, porque enquanto as pás estão se movendo, uma acaba freando a outra (ARRIGONE; MUTTI, 2009).

Figura 8. Modelo de turbina Savonius.



Fonte: ARRIGONE, MUTTI (2009).

A turbina Darrieus (**Figura 9**) possui aerofólios, os quais são responsáveis por dar mais sustentação durante a movimentação. Diferente da Savonius possui uma caixa de engrenagens que fica no solo juntamente com o gerador elétrico tornando, assim, a turbina mais leve. O fato de captar energia em qualquer direção do vento é uma vantagem da Darrieus, porém possui algumas desvantagens, como por exemplo, a necessidade de um sistema adicional para a partida. Entretanto, a turbina Darrieus devido a seus aerofólios, é mais eficiente que a Savonius (ARRIGONE; MUTTI, 2009).

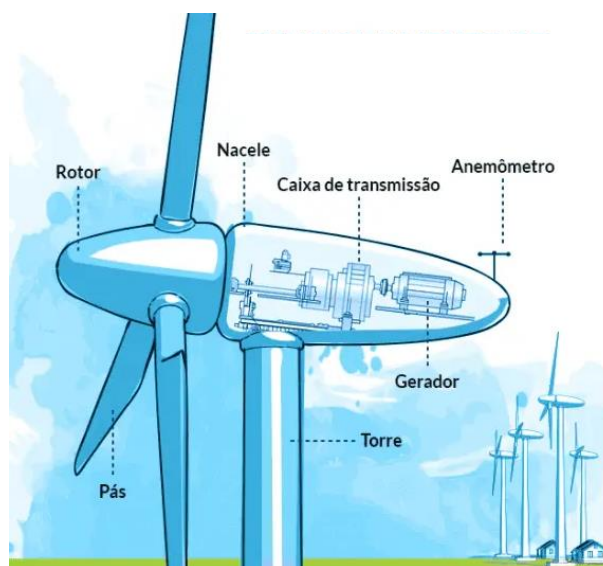
Figura 9. Turbina Darrieus.



Fonte: STROSKI (2019).

As turbinas de eixo horizontal são os modelos mais utilizados na geração de energia, uma vez que possui uma combinação de alta eficiência e custo benefício. Os aerogeradores horizontais são formados por: torre, pás, nacele, rotor, eixo, caixa de engrenagens e gerador (CRUZ, 2019). A figura abaixo ilustra os componentes mencionados.

Figura 10. Componentes de uma turbina eólica.



Fonte: CRUZ (2019).

As pás são responsáveis por captar a energia do vento e transportá-la para o rotor, este tem a função de transmitir a energia adquirida para o eixo da turbina. Dentro da nacele está presente algumas partes da turbina, como por exemplo a caixa de transmissão, onde ocorre a multiplicação da velocidade advinda do rotor, nesta etapa a energia cinética é convertida em energia mecânica. O gerador também é um componente que é alojado no interior da nacele, e é responsável pela conversão da energia mecânica em elétrica. O anemômetro é usado para medir a velocidade do vento (CRUZ, 2019).

3.4 Aerodinâmica das pás

A secção transversal das pás de turbinas eólicas possui uma geometria característica para exercer sua função com a maior eficiência possível, chamada de aerofólio ou perfil alar. Presente em aviões, veículos de corrida e outros, os aerofólios são perfis aerodinâmicos utilizados para produzir forças mecânicas e diminuir a turbulência do vento. As forças geradas pelas pás de uma turbina eólica são: força de sustentação e de arrasto (PINTO, 2014).

Quando o vento passa pela parte superior da pá ele percorre uma maior distância por unidade de tempo, fazendo com que a pressão nessa área seja menor do que na parte inferior da pá, essa diferença de pressão origina uma força aerodinâmica. A força de sustentação é a componente, desta força que é perpendicular ao fluxo de entrada do vento e a força de arrasto, é paralela ao fluxo de entrada do vento e, é uma força de resistência. Com isso, para se obter um projeto de pá eficaz, é necessária uma relação sustentação-arrasto relativamente elevada, tendo como objetivo potencializar a produção de energia (MACHADO, 2015).

O ângulo formado entre a corda do perfil aerodinâmico e o escoamento do ar é chamado de ângulo de ataque. Então, para um corpo ser denominado como um perfil aerodinâmico, ele precisa produzir uma força de sustentação maior que a de arrasto e um momento de arfagem a um determinado ângulo de ataque (KURCEWICZ, 2017 apud ROSKAM, 1997). A **Figura 11** mostra a representação dos conceitos citados em um perfil alar.

Os coeficientes de sustentação (C_L), arrasto (C_D) e momento (C_m) podem ser calculados a partir das equações (1), (2) e (3), respectivamente.

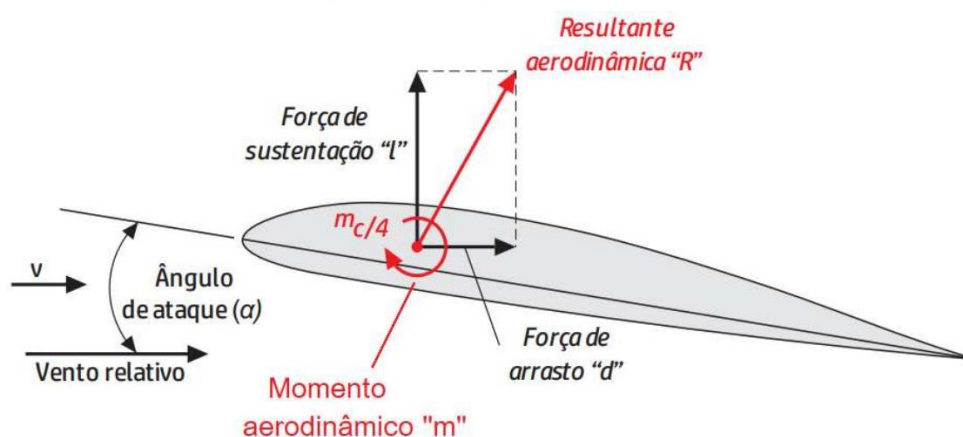
$$C_L = \frac{2L}{\rho S V^2} \quad (1)$$

$$C_D = \frac{2D}{\rho S V^2} \quad (2)$$

$$C_m = \frac{2m}{\rho S V^2 c} \quad (3)$$

Onde L e D são, a força de sustentação e arrasto, respectivamente, em N, m é o momento de arfagem, em N.m, ρ é a densidade do fluido, em kg/m³, V é a velocidade média do fluido, em m/s, S é a área da asa, em m² e, c é a corda do perfil, em m.

Figura 11. Representação das forças aerodinâmicas, momento de arfagem e ângulo de ataque.



FONTE: CARVALHO (2019).

Uma outra equação importante nas análises aerodinâmicas é a do coeficiente de pressão (4). Para um escoamento incompressível, o coeficiente de pressão, C_p , no ponto de estagnação equivale a 1, uma vez que, a pressão de estagnação é igual a pressão estática da corrente livre. Isso indica o valor máximo para o coeficiente de pressão, C_p (DONINI, 2014).

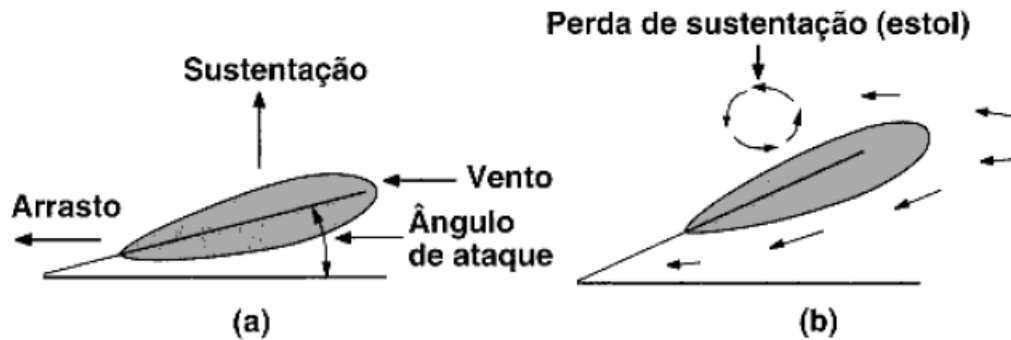
$$C_p = \frac{\bar{P} - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2} \quad (4)$$

Onde \bar{P} é a pressão estática local, em Pa, P_∞ é a pressão estática de corrente livre, em Pa, ρ_∞ é a massa específica da corrente livre, em kg/m³ e V_∞ é a velocidade do escoamento livre, em m/s.

A relação entre as forças aerodinâmicas e o ângulo de ataque é bastante criteriosa, pois este ângulo é capaz de aumentar a força de arrasto ao mesmo tempo em que aumenta a força de sustentação. Se esse ângulo fica grande demais, o vento entra numa região chamada de estol (**Figura 12**). Quando isso acontece a força de

sustentação diminui e a força de arrasto aumenta de uma maneira muito rápida e drástica, fazendo com que a pá não tenha sustentação (PINTO, 2014).

Figura 12. Aumento do ângulo de ataque.

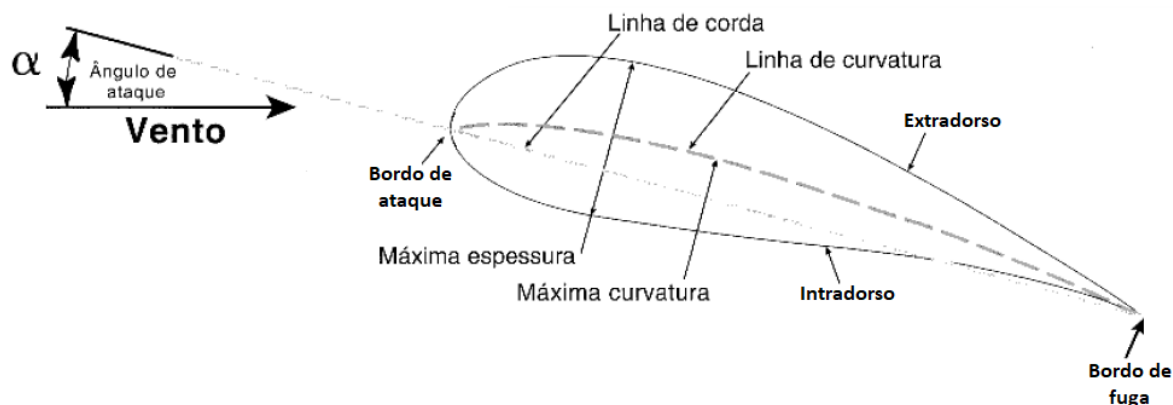


Fonte: PINTO (2014).

De acordo com Oliveira e Lopes (2007, citado por SILVA, 2018), além dos citados acima, há ainda outros conceitos responsáveis pela representação de um aerofólio, são eles: bordo de ataque e de fuga, extradorso, intradorso, linha de curvatura, linha de corda e corda (**Figura 13**). Esses são definidos como:

- Bordo de ataque: parte dianteira do aerofólio (a que entra em contato com o ar primeiro);
- Bordo de fuga: limite traseiro do aerofólio;
- Extradorso: superfície superior;
- Intradorso: superfície inferior;
- Linha de curvatura (ou linha média): linha curva imaginária que é responsável pela definição da curvatura do aerofólio e possui a mesma distância do extradorso e intradorso;
- Linha de corda: linha reta imaginária que tem referência com o ângulo de ataque e liga o bordo de ataque ao bordo de fuga.
- Corda: distância (referente a linha de corda) entre o bordo de ataque e bordo de fuga.

Figura 13. Conceitos aerodinâmicos em perfil alar.



Fonte: Adaptado: PINTO (2014).

3.5 Materiais utilizados em pás eólicas

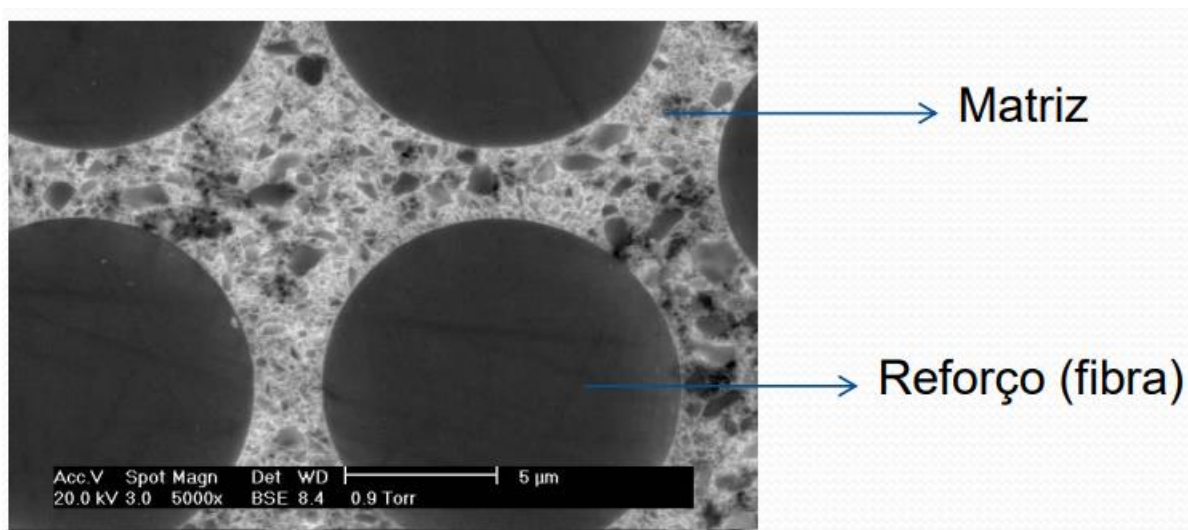
Até o ano de 1915, as pás eólicas eram feitas de madeira cobertas com algum tipo de tecido, porém, algumas dificuldades relacionadas a esse material foram descobertas como, por exemplo, a durabilidade devido à decomposição e a manutenção. No final do 1960, já existiam alguns compostos de fibra de qualidade na indústria aeroespacial, porém até 1980 o material mais utilizado na produção de pás eólicas era o aço, este foi visto como um recurso temporário para o desenvolvimento de turbinas de grande porte. O alumínio foi apresentado, em 2008, pela Enercon (empresa alemã que fabrica aerogeradores) na turbina E-20 de 100kW, e a mesma alegou que o material possui a vantagem de ser reciclável facilmente e de diminuir riscos de incêndios (PINTO, 2014).

Para se obter a máxima eficiência nas pás eólicas, o material de fabricação precisa possuir uma alta resistência, baixa densidade, resistir à fadiga e a danos que possam atingir o equipamento. Devido a isso, atualmente os principais materiais utilizados na confecção de pás eólicas são os compósitos de fibra de vidro (tipo E) e fibra de carbono em forma de reforço, e as matrizes mais usuais são as de polímero de poliéster, epóxi ou vinil-éster. Para a alma da pá, também chamado de painel sanduíche, a madeira balsa e espuma de PVC são os materiais mais usados (SØRENSEN et al, 2010 apud RICCI, 2012).

Os compósitos são uma combinação de materiais de natureza diferentes que possuem suas características melhores quando comparadas aos materiais que o

formam (CALLISTER, 2016). Este tipo de material, geralmente, é formado por duas fases, a matriz e o reforço (**Figura 14**), que apresentam suas propriedades originais e a combinação resulta em características superiores. A matriz (fase contínua) tem a função de aderir as fibras orientando-as e protegendo-as de possíveis danos que possam ser causados por intempéries, agentes químicos ou umidade. O reforço (fase dispersa), constituído de fibras, é responsável pela resistência a cargas, que são transferidas entre as fibras (ZANCHETTA, s.d.).

Figura 14. Constituintes dos compósitos reforçados por fibras.

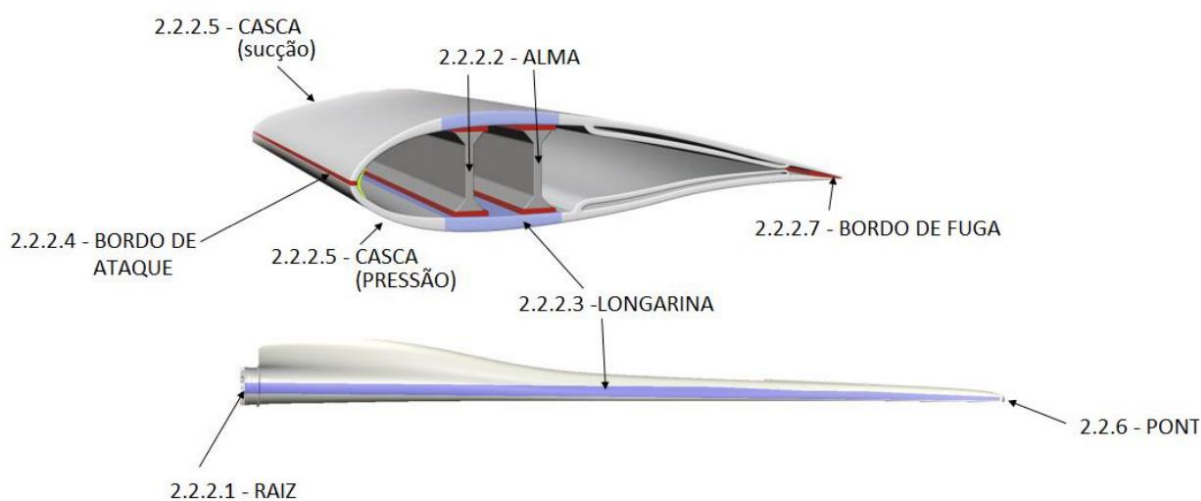


Fonte: ZANCHETTA (s.d).

Os compósitos de matrizes poliméricas, como já mencionado antes, são muito utilizados no ramo da energia eólica, pois esses materiais possuem várias vantagens que resultam no bom desempenho das pás dos aerogeradores. Algumas dessas vantagens são: a baixa densidade, alta resistência mecânica, alta resistência à corrosão e fadiga, facilidade na fabricação, estabilidade dimensional, entre outras (MARINUCCI, 2012).

As pás das turbinas eólicas horizontais, são formadas pelos seguintes componentes: alma, bordo de ataque, bordo de fuga, casca (sucção e pressão), longarina, pont e raiz (ABENDI, 2020). A figura a seguir, mostra como é a formação de uma pá eólica.

Figura 15. Partes de uma pá eólica.



Fonte: ABENDI (2020).

De acordo com a ABENDI (2020), os componentes citados acima podem ser estabelecidos como:

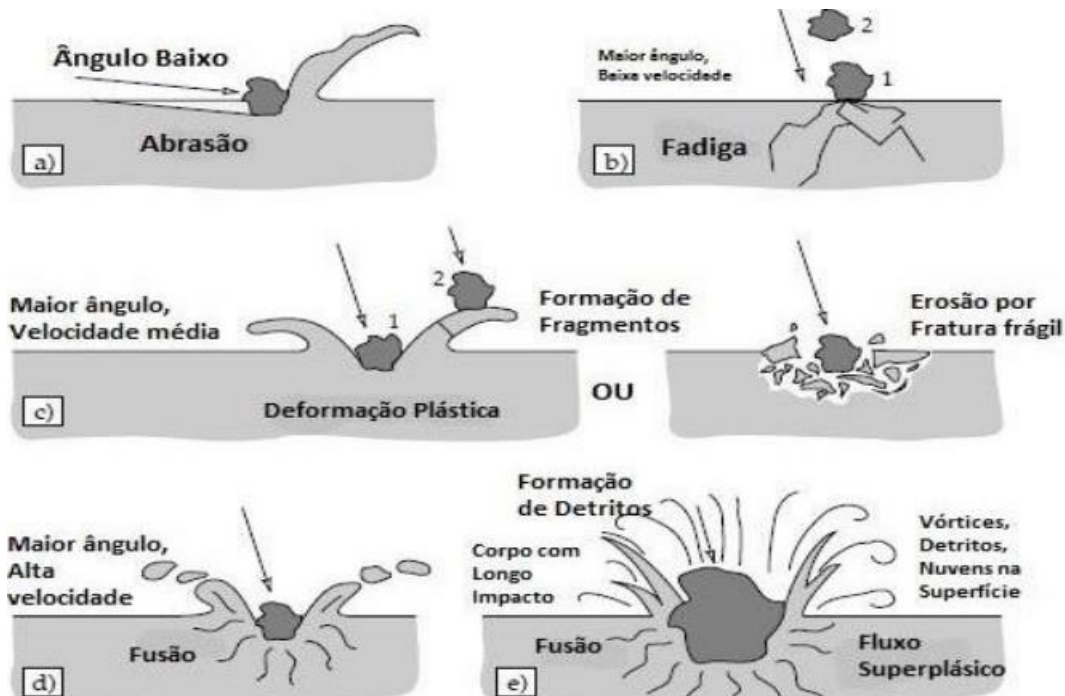
- Alma: Também chamado de painel sanduíche, a alma são vigas que reforçam a pá. É conectado através de adesivos, na região da longarina e a quantidade e forma depende da necessidade do projeto. Como mencionado antes, geralmente é feito de madeira balsa ou espuma de PVC;
- Casca (sucção e pressão): As cascas compõem a estrutura aerodinâmica da pá. Para a formação da pá, são necessárias duas cascas, uma de sucção e uma de pressão, cujos lados são os que se obtém a menor e maior pressão aerodinâmica, respectivamente. Em diversos projetos utiliza-se o PRFV;
- Longarina: São lâminas que ficam agregadas às cascas da pá, geralmente feitas de PRFC ou PRFV e são unidas através da alma;
- Pont: Parte que possui a menor secção transversal da pá, de lado contrário a raiz;
- Raiz: Local que permite a conexão da pá com o cubo do rotor do aerogerador.

3.6 Erosão das pás

Como foi visto no item 3.5, o bordo de ataque de uma pá eólica, é a parte que entra primeiro em contato com o ar. Devido a isso, essa região é bem crítica pois está exposta a diversas intempéries como, por exemplo, chuva, ventos fortes, raios, acúmulo de poeira, entre outros, que desgastam o equipamento resultando na diminuição da eficiência energética do aerogerador, uma vez que a aerodinâmica é afetada (SILVA, 2018).

De acordo com Silva (2018) existem diversos tipos de mecanismos que são responsáveis pelo desgaste de pás eólicas, o erosivo é um deles. O atrito e/ou impacto repetitivo de partículas levadas pelo vento causam a degradação da estrutura cristalina do material (STACHOWIAK, 2013 apud SILVA, 2018). A figura abaixo, mostra alguns comportamentos de partículas atingindo o componente e os efeitos causados, os quais nem sempre podem ser vistos de forma macroscópica.

Figura 16. Processo erosivo.



Fonte: SILVA, 2018.

Um estudo realizado por Sareen, Sapre e Selig (2014) citado por Melo Júnior (2017) mostrou que a perda energética anual pode ser de 5% a 25%, em casos de pequenas e mais graves, respectivamente, quantias de erosão. O trabalho foi feito simulando, no bordo de ataque de um aerofólio com comprimento igual a 85 cm, três números de Reynolds diferentes e três tipos de erosão, sendo a primeira alguns furos de 0,51 mm de profundidade/diâmetro, a segunda ranhuras de 2,54 mm de profundidade/diâmetro e a terceira processos de laminação com 3,81 mm de profundidade/diâmetro.

Ainda neste estudo, também foram considerados cinco etapas de gravidade, com a finalidade de verificar o crescimento do desgaste com o tempo. O resultado, através de gráficos $C_L \times C_D$, evidenciou diversas variações nestes coeficientes que, correspondem em perdas na potência gerada pelo aerogerador.

A erosão é um processo bastante complexo que depende de alguns fatores, podendo serem citados os parâmetros de partícula e de fluxo. Os parâmetros de partículas podem incluir: a forma, quanto menos esférica a partícula maior será a erosão causada, tamanho (4) e dureza da partícula erosiva (5) (ANSYS, 2017).

$$(ER) \propto (d_p)^n, \quad \text{com } 0,3 \leq n \leq 2 \quad (5)$$

$$ER \propto H_p, \quad \text{com } H_p < 700 HV \quad (6)$$

Onde ER é a taxa de erosão dada em erosão por unidade de massa de partícula impactante, d_p é o diâmetro da partícula, n é o expoente da velocidade e H_p é a dureza Vickers da partícula.

Os parâmetros de fluxo determinam uma maior quantidade de variáveis que influenciam diretamente na erosão, são elas: a concentração, o ângulo e velocidade de impacto das partículas. Através do uso da simulação CFD, o processo de erosão começou a ser mais compreendido, uma vez que a ferramenta computacional permite realizar os modelos de forma precisa do trajeto das partículas e fluxo do fluido. A literatura, atualmente, consta com diversos modelos experimentais de erosão como, por exemplo, o modelo de Grand e Tabakoff e o modelo de Finnie (ANSYS, 2017). A seguir, estão as equações os modelos de erosão citados.

- **Modelo de Grand e Tabakoff:** Este modelo é bastante complexo, pois depende de diversas variáveis constantes. Isto, porque ele combina dois mecanismos de desgaste (corte e deformação), para ângulos de impacto baixos e altos, em apenas uma única equação (6). A vantagem deste modelo é o fato de poder utilizar em uma equação considerando os dois mecanismos de desgaste, para o caso de um ângulo de impacto intermediário (HANKELN; RIEDELBAUCH, 2019).

$$ER = m_p k_1 f(\alpha) V^n \cos^2 \alpha [1 - R_T^2] + g(V) \quad (7)$$

$$f(\alpha) = \left[1 + k_2 k_{12} \sin\left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right) \right]^2 \quad (8)$$

$$R_T = 1 - k_4 V \sin \alpha, \quad k_2 = 1 \text{ se } \alpha \leq 2\alpha_0 \quad (9)$$

$$g(V) = k_3 (V \sin \alpha)^4, \quad k_2 = 0 \text{ se } \alpha > 2\alpha_0 \quad (10)$$

Onde m é a massa da partícula, k_1, k_{12}, k_2, k_3 e k_4 são constantes experimentais, $f(\alpha)$ é uma função empírica do ângulo de impacto, V é a velocidade do fluido, n é o expoente da velocidade, R_T é a rugosidade relativa, $g(V)$ é uma função geral para calcular a erosão devido à componente de velocidade normal V e α_0 é o ângulo de impacto para o dano máximo por erosão, geralmente está entre 20° e 25° .

- **Modelo de Finnie:** Este foi um dos primeiros modelos desenvolvidos para prever o desgaste por erosão. O modelo de Finnie é um dos mais utilizados para materiais dúcteis. As equações (11) e (12) dependem do ângulo de impacto para serem usadas na equação (10). Como são utilizadas equações separadas para prever o desgaste por corte e por deformação, o resultado se torna bastante preciso (HANKELN; RIEDELBAUCH, 2019).

$$ER = m_p k V^n f(\alpha) \quad (11)$$

$$f(\alpha) = \frac{1}{3} \cos^2 \alpha, \quad \tan \alpha > \frac{1}{3} \quad (12)$$

$$f(\alpha) = \sin(2\alpha) - 3 \sin^2 \alpha, \quad \tan \alpha \leq \frac{1}{3} \quad (13)$$

Onde k é uma constante experimental e as outras variáveis já foram apresentadas no modelo de Tabakoff e Grand.

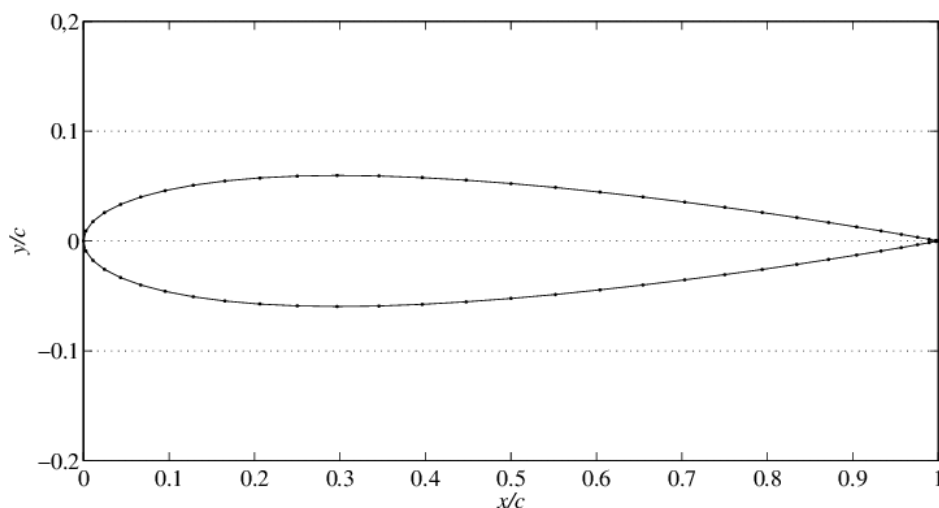
4 METODOLOGIA

4.1 Perfil NACA 0012

A NACA é uma série americana, cujos aerofólios são classificados através de um sistema de código que contém as informações referentes à geometria e dados aerodinâmicos. Os códigos podem ir de quatro a oito dígitos, para turbinas eólicas, geralmente são quatro, onde o primeiro dígito se refere a taxa de curvatura máxima em relação a corda, o segundo dígito é a localização da curvatura, em décimos do comprimento da corda e, o terceiro e quarto dígitos representam a taxa de espessura máxima em relação à corda (PINTO, 2014).

O NACA 0012 é um aerofólio simétrico, uma vez que o 00 mostra que não há curvatura, e o 12 uma proporção de 12% de espessura máxima da corda. As coordenadas do perfil NACA 0012 foram obtidas através do site Airfoil tools, onde estão disponíveis diversos modelos de aerofólios. A **Figura 17** mostra o aerofólio em questão, na qual é possível observar sua simetria.

Figura 17. Aerofólio NACA 0012.



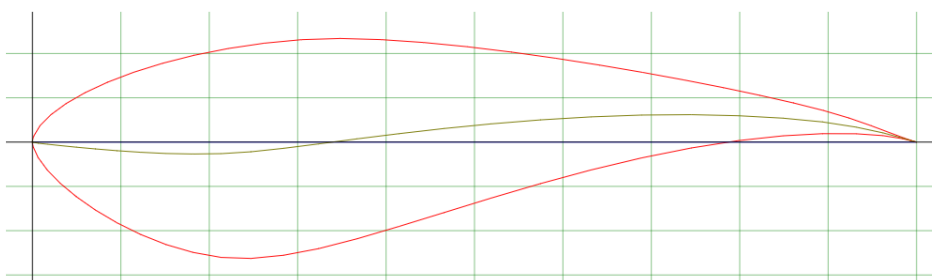
Fonte: MATIAS ET AL, 2011.

4.2 Perfil S814

O modelo de aerofólio escolhido para realização do estudo de erosão em pás eólicas foi o S814, devido ao fato do mesmo ser utilizado em aerogeradores. A NREL desenvolveu o código Eppler (S8XX), no qual, a família SERI (comumente abreviada pela letra “S”) faz parte. Os aerofólios SERI são bastante usados em turbinas de médio e grande porte. É válido afirmar que uma pá eólica é formada por mais de um tipo de aerofólio, porém este trabalho foi utilizado apenas um, para diminuir tempo de máquina e simplificação do problema (ROCHA, 2018).

A **Figura 18** mostra o perfil do aerofólio S814.

Figura 18. Perfil S814.



Fonte: AIRFOIL TOOLS, 2023.

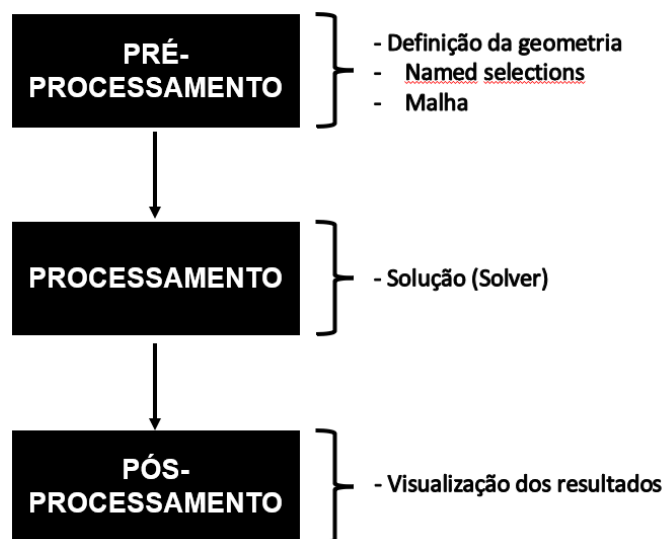
4.3 Simulação CFD

A ferramenta CFD é bastante utilizada atualmente para simular alguns processos físicos como, por exemplo, o escoamento de fluidos, e funciona através da resolução de equações sobre uma determinada área de estudo, considerando condições de contorno já conhecidas. As simulações computacionais deste trabalho foram feitas utilizando o ANSYS-CFX, software que é baseado no Método de Volumes Finitos (MVF). O MVF funciona separando a área de estudo em várias subáreas, chamadas de volumes de controle e assim, as equações são discretizadas e resolvidas para cada uma (SILVA, 2019).

Silva (2019), mostra que a simulação CFD possui três etapas (**Figura 19**), são elas:

- Pré-processamento: Nesta etapa é definida a geometria, denomina-se as regiões de estudo de acordo com as condições de contorno, através do comando *Named Selection* e, é gerada a malha computacional;
- Processamento: O solver é a ferramenta que resolve o problema em questão, sem interação com o usuário, aplicando as equações sobre cada volume de controle. Como as equações não são lineares, a etapa de processamento é iterativa, e quando a solução vai se aproximando, significa que ela está convergindo;
- Pós-processamento: Esta é a etapa onde é possível visualizar os resultados obtidos nas simulações, pode ser visto através de gráficos, vetores de direção, entre outros.

Figura 19. Etapas da simulação CFD.



Fonte: AUTORA, 2023.

O ANSYS-CFX é baseado no EbMVF, esta técnica divide o domínio físico em vários elementos, os quais são divididos, dependendo do número de vértices, em subelementos (ou sub-volumes de controle). E então, as equações são aplicadas a cada um desses sub-volumes de controle na resolução do problema. A conservação da massa, segunda Lei de Newton e primeira Lei da Termodinâmica são a base da

mecânica dos fluidos. Desenvolvendo o princípio da conservação da massa obtém a equação da continuidade. A equação da quantidade de movimento é fornecida através da segunda Lei de Newton aplicada a um fluido. E a conservação de energia é gerada por meio da primeira Lei da Termodinâmica (FOX, 2008 apud FERNANDES, 2018).

A equação da continuidade (14) afirma que não a massa do fluido não pode variar. O nome continuidade se dá devido ao fato dela não exigir nenhum pressuposto, com exceção da massa específica e velocidade serem funções contínuas (WHITE, 2018).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (14)$$

Onde u , v e w são as componentes do vetor velocidade, t é o tempo, e x , y e z são as coordenadas do sistema de referência, que para o caso das equações citadas é o euleriano.

A equação abaixo diz respeito a quantidade de movimento e, como está na íntegra, serve para qualquer tipo de fluido que esteja em qualquer movimento.

$$\begin{aligned} \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} &= \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} &= \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} &= \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

Onde g é a aceleração da gravidade e τ é o tensor de tensões viscosas.

A equação abaixo se refere ao princípio da conservação de energia no escoamento de um fluido, que é a aplicação da primeira Lei da Termodinâmica em um sistema.

$$\dot{Q} - \dot{W}_v = \left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \zeta) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \zeta) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \zeta) \right] dx dy dz \quad (16)$$

$$\zeta = e + \frac{p}{\rho}$$

Onde \dot{Q} e \dot{W}_v são o calor trocado entre o meio e o sistema, respectivamente, e é a energia específica do fluido, e p é a pressão do fluido.

Como a erosão é o tema deste trabalho, foi necessário entender também sobre o escoamento multifásico, que como o nome já diz consiste em fluxo que contém duas fases, uma líquida e uma particulada (ou dispersa) como, por exemplo, partículas de areia na água. Existem diversos tipos de abordagens para as simulações CFD de escoamento multifásico como, por exemplo a de Euler-Langrange e a de Euler-Euler. A diferença entre essas duas abordagens é que na langrageana o escoamento é analisado a partir do rastreamento de partículas através de um fluxo de partículas e, na abordagem euleriana o estudo do escoamento é baseado em um elemento de volume finito (PALADINO, 2005).

Neste trabalho foi utilizada a abordagem de Euler-Langrange com o método DPM. No modelo Euler-langrageano, para a fase contínua é resolvido um sistema de equações de conservação, e através dos campos de velocidade, são obtidas as forças aplicadas sobre as partículas dispersas, e com isso, a trajetórias das partículas são determinadas. O método DPM é usado quando se quer estudar o escoamento na visão langrageana (PALADINO, 2005). Segundo Costa (2019) são características do método DPM:

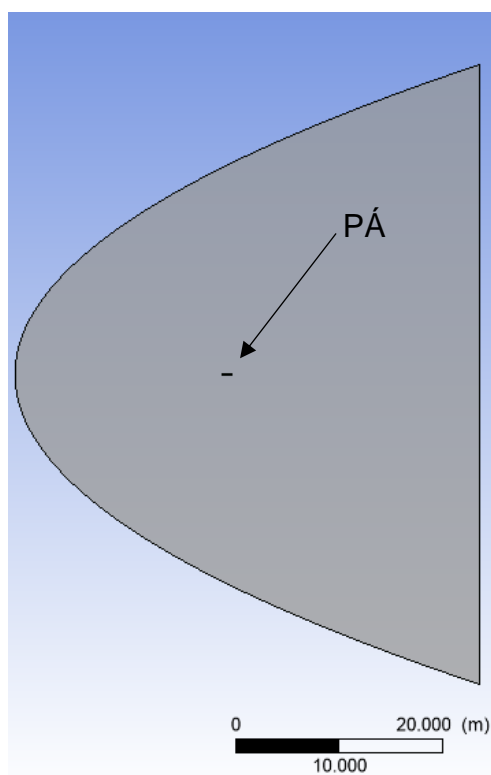
- O movimento das partículas é rastreado conforme elas escoam no fluido;
- As partículas são tratadas de forma isolada;
- É limitado para escoamentos diluídos, com fração volumétrica menor que 10%;
- A interação entre as fases contínua e dispersa pode ser realizada através de um acoplamento de uma ou duas vias.

Para a simulação foi utilizada um acoplamento de uma via (One-way coupling), este serve para a situação de o movimento das partículas não afetar o fluxo da fase contínua, porém o inverso acontece (COSTA, 2019).

4.3.1 Setup – escoamento no perfil NACA 0012

As primeiras simulações realizadas neste trabalho, foram do aerofólio NACA 0012 com a finalidade de verificar o comportamento do escoamento e comparar os resultados obtidos com resultados experimentais já existentes. Então, na ferramenta ANSYS-CFX foi adicionado o arquivo de malha, caracterizado pelo meio que envolve a pá, também chamado de domínio, conforme mostra a **Figura 20**.

Figura 20. Modelo computacional.



Fonte: AUTORA, 2023.

Para se obter bons resultados nas simulações é importante que o domínio seja grande o suficiente para que não haja interferências com as condições de contorno, as quais podem ser causadas pelas agitações instigadas pela geometria, neste caso, a pá. Quando a distância entre as paredes é muito pequena, os resultados da análise do fluxo podem ser afetados pelas condições de contorno definidas. Isso acontece porque o algoritmo é projetado para fazer com que o fluxo se ajuste às condições de contorno especificadas (AMARAL, 2020 apud NOGUEIRA, 2023).

O fluido utilizado na simulação foi o ar, como gás ideal, em um escoamento isentrópico, ou seja, sem variação de energia, no qual a troca de calor e atrito são iguais a zero. A pá foi definida como *wall*, uma vez que ela é uma barreira impede o escoamento do ar. A face, do domínio, correspondente ao lado do bordo de ataque e bordo de fuga foram caracterizadas como *inlet*, ou seja, entrada do ar e, *outlet* (saída do ar), respectivamente. E foi definido uma condição de contorno de simetria nas duas faces maiores do domínio, uma vez que isso é uma boa prática da simulação computacional que serve para diminuir tempo de processamento e otimização de resultados. A simulação foi feita para três ângulos de ataque diferentes: 0° , $1,55^\circ$ e 4° .

A **Tabela 1** mostra os parâmetros utilizados na simulação.

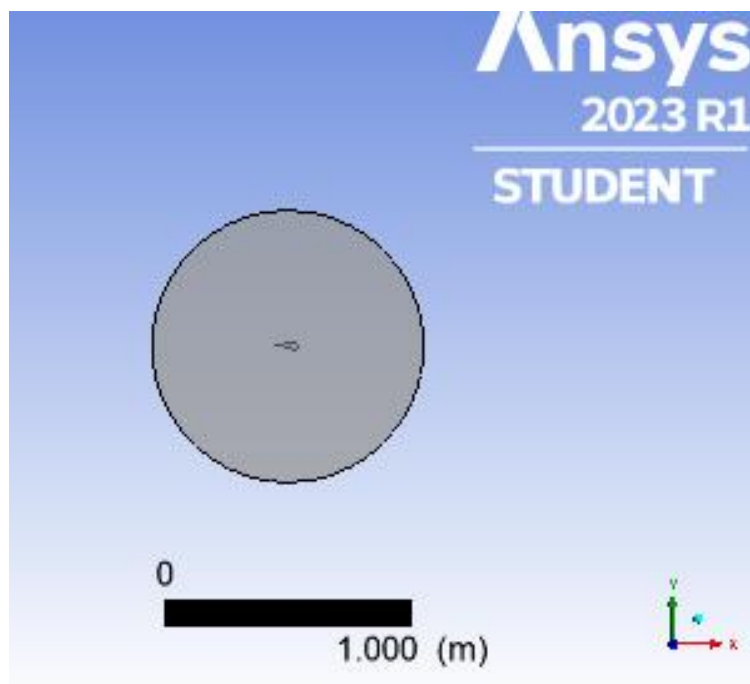
Tabela 1. Parâmetros para a simulação de escoamento no NACA 0012.

Pressão de referência	73048 Pa
Velocidade (inlet)	238 m/s
Temperatura estática	10,19 °C
Wall	Adiabático
Regime de fluxo (outlet)	Subsônico
Pressão relativa (outlet)	0 Pa

Fonte: AUTORA, 2023.

4.3.2 Simulação de erosão no S814

A configuração do setup para verificação do comportamento do escoamento no perfil S814 foi, basicamente a mesma do perfil NACA 0012. O domínio foi considerado, desta vez, circular e grande para evitar as interferências nos resultados, conforme mostra a figura abaixo.

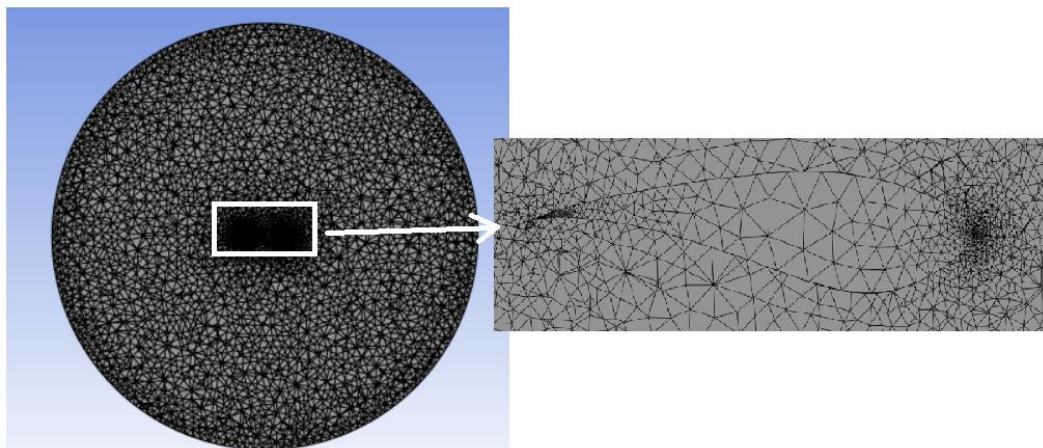
Figura 21. Domínio para o S814.

Fonte: AUTORA, 2023.

Uma etapa muito importante para a realização da simulação computacional é a geração da malha. A malha computacional é uma grade numérica que define os volumes de controle e os nós, onde são alojadas as variáveis que serão resolvidas. (SILVA, 2019). Quando se tem uma malha que atenda de forma eficiente a simulação, erros de discretização podem ser evitados. Para este trabalho foram utilizadas 3 malhas diferentes conforme as figuras abaixo mostram.

A **Figura 22** mostra a primeira malha gerada, que foi a automática do Ansys Meshing. Essa malha possui 67128 nós e 301922 elementos.

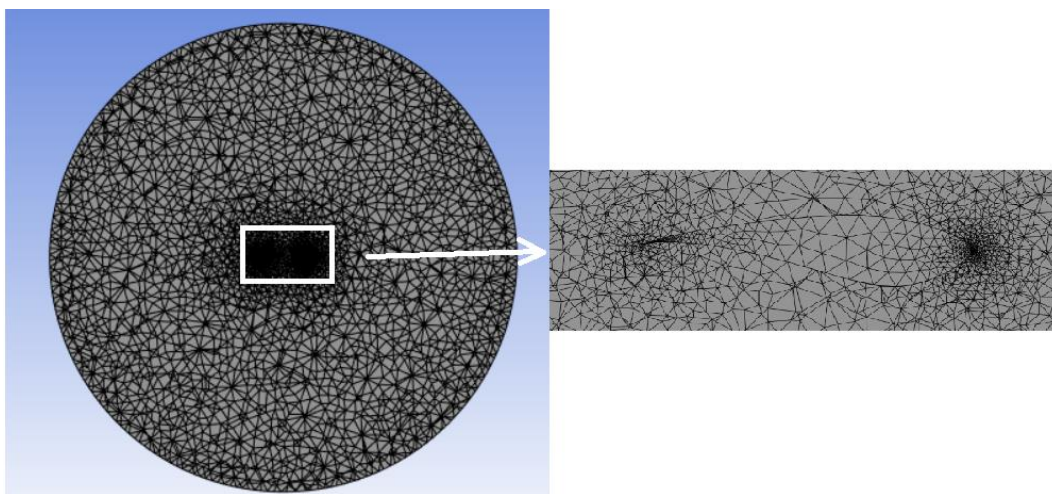
Figura 22. Malha 1 (grosseira).



Fonte: AUTORA, 2023.

A **Figura 23** mostra segunda malha com um maior refino, essa contém 71830 nós e 363469 elementos.

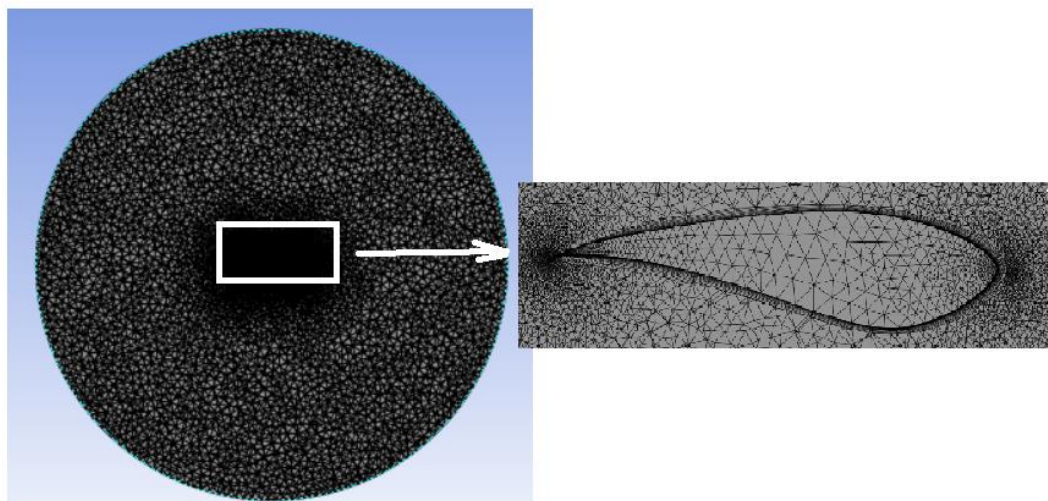
Figura 23. Malha 2 (média).



Fonte: AUTORA, 2023.

A imagem abaixo mostra a malha 3, a mais refinada, com 474183 nós e 2388337 elementos. Nesta malha também foi adicionado a ferramenta *inflation* ao redor do aerofólio, que trouxe um refino ainda maior na área.

Figura 24. Malha 3 (refinada).



Fonte: AUTORA, 2023.

A simulação foi feita considerando o ângulo de ataque igual a 0° e os demais dados estão na tabela abaixo. A velocidade do vento foi obtida no site Windy.com para a região de Caetés, que faz parte do Complexo de São Clemente juntamente com Capoeiras, Pedrosa e Venturosa, cidades do Agreste de Pernambuco.

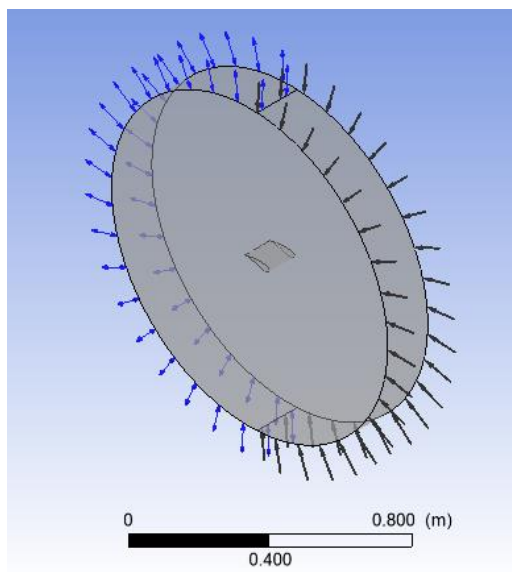
Tabela 2. Parâmetros para a simulação de escoamento no S814.

Velocidade (inlet)	8 m/s
Regime de fluxo (inlet)	Subsônico
Escoamento	k-Epsilon
Pressão de referência (outlet)	0 [Pa]
Wall	Adiabático
Fluido	Ar a 25°C

Fonte: AUTORA, 2023.

A figura a seguir mostra a distribuição das condições de contorno na geometria, onde as setas pretas indicam a entrada de ar (inlet) e as setas azuis indicam a saída de ar (outlet).

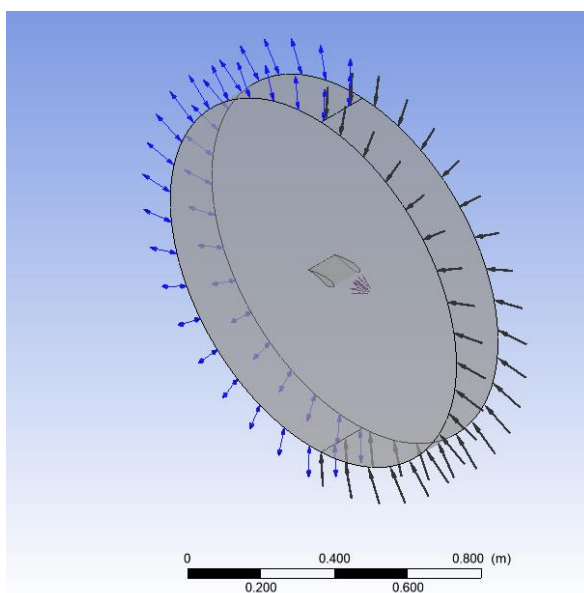
Figura 25. Modelo computacional - S814.



Fonte: AUTORA, 2023.

Também foram realizadas simulações utilizando modelo de Grand e Tabakoff e Finnie, no setup destas simulações foi colocado um fluxo de areia/ar atingindo a região do bordo de ataque do aerofólio, conforme mostra a imagem abaixo.

Figura 26. Setup - modelo de erosão.



Fonte: AUTORA, 2023.

Para os modelos de erosão, a representação da areia foi feita utilizando o concreto como material (já existente na biblioteca da ANSYS), com faixa de diâmetro entre 50 e 500 micrometros, o modelo de turbulência foi o k-epsilon. Em relação a partícula foi considerado um ângulo de 25°, a uma velocidade de 1m/s e vazão mássica 0,01 kg/s.

4.4 Simulação FSI

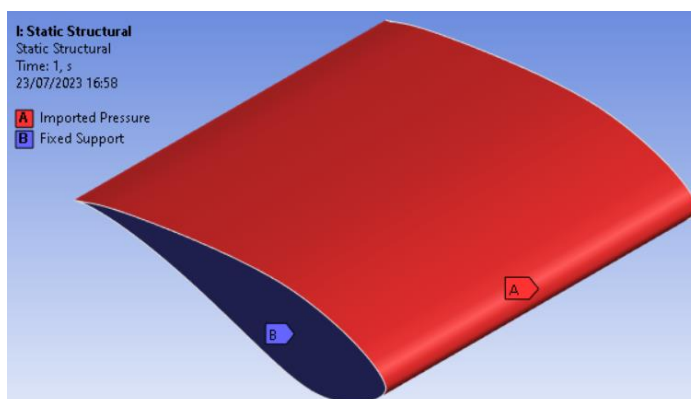
A interação fluido-estrutura (FSI) é a junção de leis físicas, principalmente as da dinâmica dos fluidos e da mecânica estrutural. A simulação FSI é feita através da obtenção dos campos de pressão ou térmico obtidos na análise CFD e os efeitos desses esforços na análise estrutural (AMARAL, 2016).

Os estudos FSI podem ser feitos de duas formas: FSI 1 Way (interação fluido-estrutura de uma via) e FSI 2 Way (interação fluido-estrutura de duas vias). No FSI 1 Way, a simulação CFD é feita em um software e os resultados são exportados pra um programa de simulação estrutural, esse acoplamento é usado para casos em que o movimento do fluxo de um fluido tem influência sobre uma estrutura sólida, mas a resposta do sólido sobre o fluido é irrelevante. No FSI 2 Way a análise CFD é feita e os resultados são exportados para a análise estrutural, este é usado quando o movimento do fluxo do fluido influi em um sólido e simultaneamente o fluido é influenciado pelo corpo do sólido (RAJA, 2012).

Neste trabalho o método utilizado foi o FSI 1 Way e foram exportados da simulação CFD os campos de pressão obtidos para as simulações do escoamento sem erosão e com o modelo de Finnie com malha refinada, para fazer um estudo de caso sobre os materiais utilizados na construção das pás eólicas.

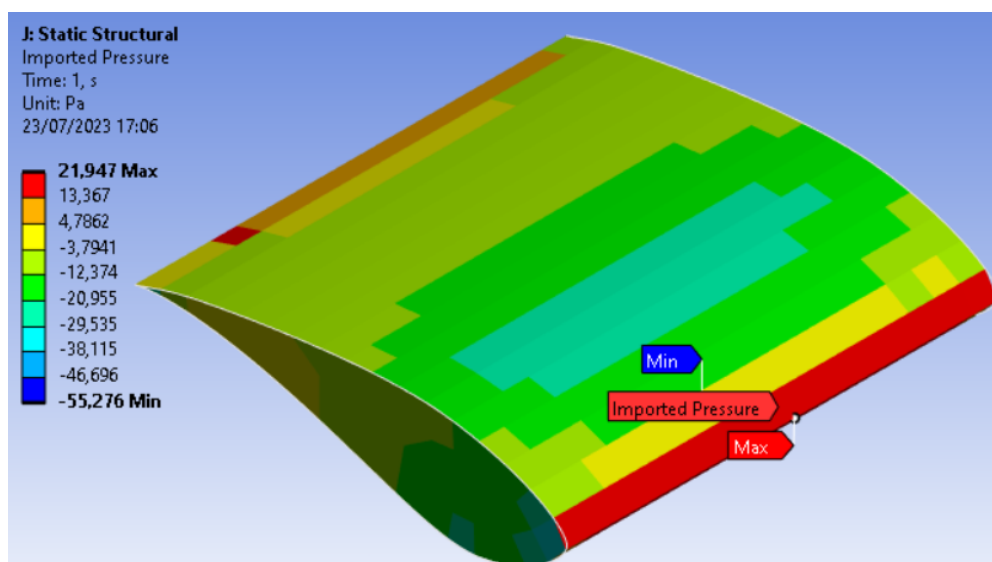
4.4.1 Setup – Simulação FSI

Para a realização da simulação estrutural, como já mencionado anteriormente, foram exportados os campos de pressão obtidos na simulação CFD em toda a região da pá e adicionado um fixed support em uma das faces, conforme mostra a **Figura 27**.

Figura 27. Setup - simulação estrutural.

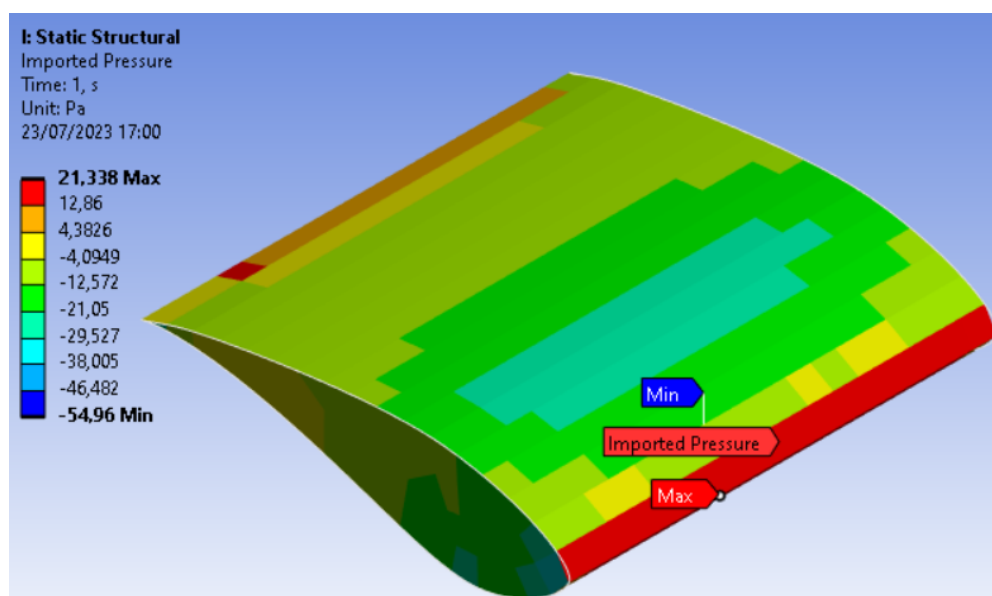
Fonte: AUTORA, 2023.

A figuras abaixo mostram os campos de pressão obtidos para as simulações sem erosão e com o modelo de Finnie. É possível observar que o índice de maior pressão está no bordo de ataque, cuja região é que entra primeiro em contato com o ar e conseqüentemente com as partículas erosivas, sendo 21,95 Pa para a pá em perfeito estado (**Figura 28**) e 21,34 Pa (**Figura 29**) para a pá erodida. Essa diminuição na pressão acontece devido a alteração na geometria do aerofólio.

Figura 28. Campo de pressão - sem erosão.

Fonte: AUTORA, 2023.

Figura 29. Campos de pressão (modelo Finnie).



Fonte: AUTORA, 2023.

4.5 Propriedades dos materiais

As simulações estruturais foram realizadas utilizando 4 tipos de materiais, o aço carbono, alumínio, fibra de vidro (tipo E) e fibra de carbono. Segue abaixo, as propriedades de cada material utilizado, que foram retiradas da biblioteca da ANSYS. Algumas informações que não estavam disponibilizadas na biblioteca, foram obtidas através de tabelas disponíveis na internet, cujas propriedades se aproximavam das disponíveis no ANSYS.

O aço Carbono é muito utilizado na indústria devido ao fato de ter uma boa durabilidade, alta resistência, baixo ponto de fusão, boa soldabilidade e maleabilidade, e um bom custo-benefício. Atualmente, este material é muito utilizado para confecção de tubos e chapas, por exemplo. As propriedades do aço carbono utilizado neste trabalho foram:

- Densidade: 7850 kg/m³;
- Módulo de Young: 2,124 x 10⁵ MPa;
- Coeficiente de Poisson: 0,29;
- Limite de escoamento: 350 MPa;
- Resistência a tração: 420 MPa.

O Alumínio é conhecido por sua baixa densidade e facilidade em ser moldado, também é um material econômico, e tem uma boa resistência a corrosão. Uma de suas principais vantagens é o fato de ser reciclável. Abaixo estão as características do aço inox que foi usado no trabalho.

- Densidade: 2770 kg/m^3 ;
- Módulo de Young: $7,1 \times 10^5 \text{ MPa}$;
- Coeficiente de Poisson: 0,33;
- Limite de escoamento: $\sim 130 \text{ MPa}$;
- Resistência a tração: $\sim 220 \text{ MPa}$.

O compósito reforçado por fibra de carbono é muito usado devido a sua alta resistência ao mesmo tempo em que sua densidade é baixa. Nest trabalho foi utilizado o epóxi reforçado por fibra de carbono cujas principais propriedades estão descritas abaixo:

- Densidade: 1451 kg/m^3 ;
- Módulo de Young: $5,916 \times 10^4 \text{ MPa}$ (direção X), $5,916 \times 10^4 \text{ MPa}$ (direção Y), $7,5 \times 10^3 \text{ MPa}$ (direção Z);
- Coeficiente de Poisson: 0,04 (XY), 0,3 (YZ), 0,3 (XZ);
- Limite de escoamento: 230 GPa;
- Resistência a tração: $\sim 3350 \text{ MPa}$.

A fibra de vidro com matriz de epóxi é um compósito que, assim como a fibra de carbono, possui uma baixa densidade e alta resistência mecânica. É um material filamentosos de vários fios de vidro superfinos. As principais propriedades são:

- Densidade: 1850 kg/m^3 ;
- Módulo de Young: $3,5 \times 10^4 \text{ MPa}$ (direção X), $9,0 \times 10^3 \text{ MPa}$ (direção Y), $9,0 \times 10^3 \text{ MPa}$ (direção Z);
- Coeficiente de Poisson: 0,280 (XY), 0,4 (YZ), 0,28 (XZ);
- Limite de escoamento: $\sim 90 \text{ GPa}$;
- Resistência a tração: $\sim 4310 \text{ MPa}$.

5 RESULTADOS E ANÁLISE

5.1 Escoamento no NACA 0012

A **Tabela 3** mostra os valores obtidos para os coeficientes de sustentação e arrasto, para os ângulos de ataque iguais a 0° , $1,55^\circ$ e 4° , através da simulação de escoamento no aerofólio NACA 0012. Observa-se que para o ângulo de 4° o coeficiente de arrasto ficou negativo, isso significa que a força de arrasto não está sendo uma força de resistência ao vento.

Tabela 3. Coeficientes de sustentação e arrasto.

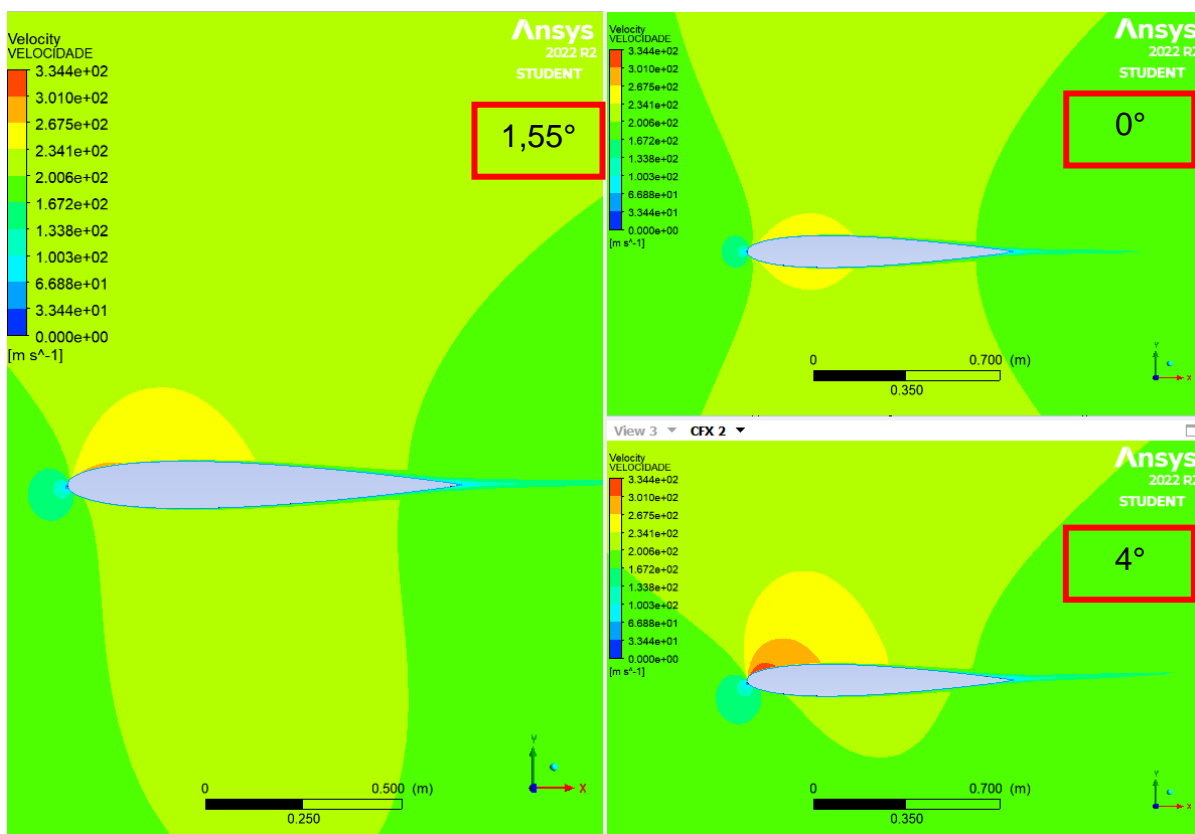
	0°	$1,55^\circ$	4°
COEFICIENTE DE SUSTENTAÇÃO (C_L)	0,00028	0,27678	0,68723
COEFICIENTE DE ARRASTO (C_D)	0,00853	0,00927	-0,00790
C_L/C_D	0,03283	29,85761	-86,99114

Fonte: AUTORA, 2023.

Observa-se ainda, através da tabela acima, os valores para as razões entre os coeficientes de sustentação e arrasto. É importante que essa razão $\frac{C_L}{C_D}$ seja a maior possível, porém de uma forma equilibrada, para evitar que a pá entre na região de estol, que equivale à perda de sustentação.

A **Figura 30** mostra os resultados obtidos para a velocidade no aerofólio, NACA 0012 para os três ângulos de ataque (0° , $1,55^\circ$ e 4°). Nela é possível observar que os maiores índices de velocidade estão no extradorso do aerofólio, e quanto maior o ângulo de ataque maior é a velocidade na região logo acima do bordo de ataque do aerofólio. Observa-se também, que se forma um rastro de baixa velocidade na região do bordo de fuga.

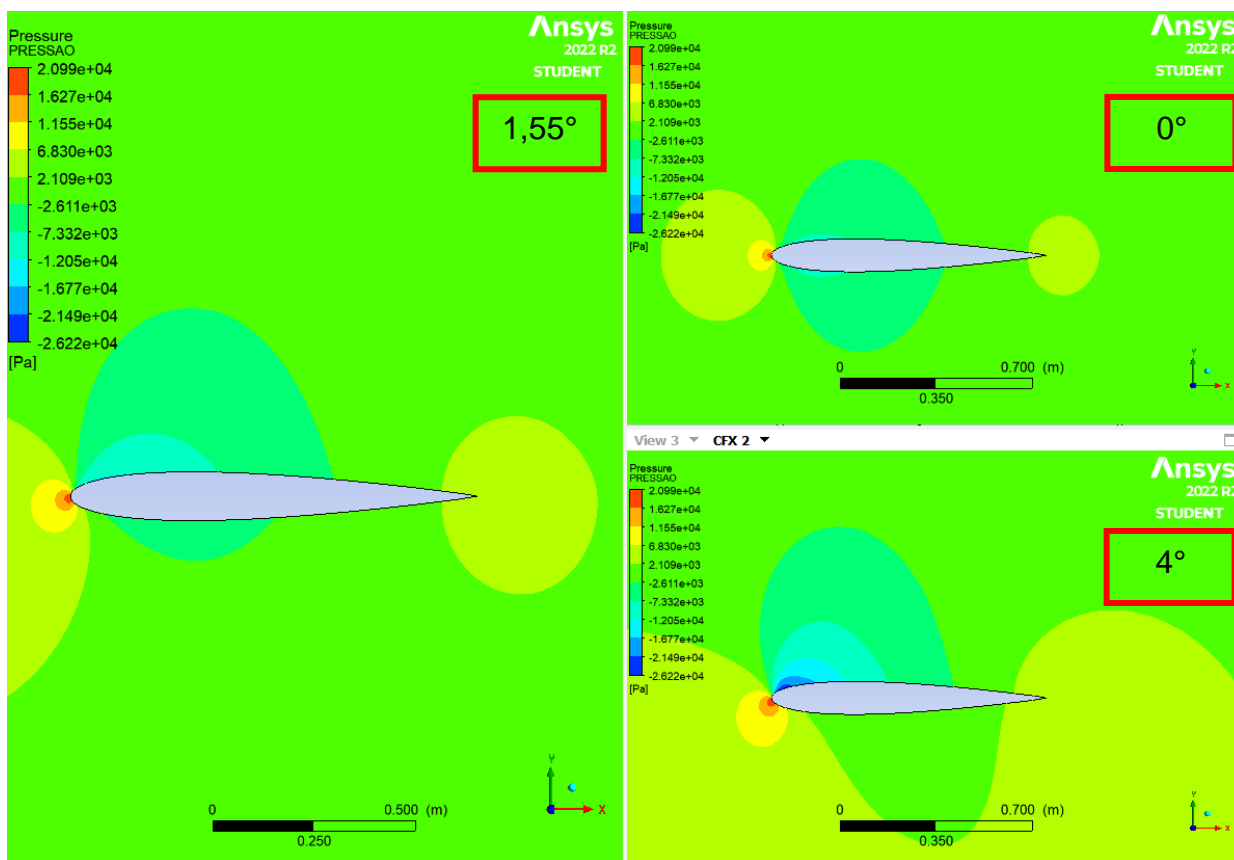
Figura 30. Velocidade no aerofólio NACA 0012.



Fonte: AUTORA, 2023.

Na **Figura 31**, observa-se os resultados para a pressão no aerofólio. Conforme os parâmetros aerodinâmicos, o bordo de ataque se mostra sendo a região mais crítica, uma vez que é a região de primeiro contato da pá eólica com o ar. Conforme o ângulo de ataque vai aumentando, a pressão na região logo acima do bordo de ataque fica cada vez menor.

Figura 31. Pressão no aerofólio NACA 0012.

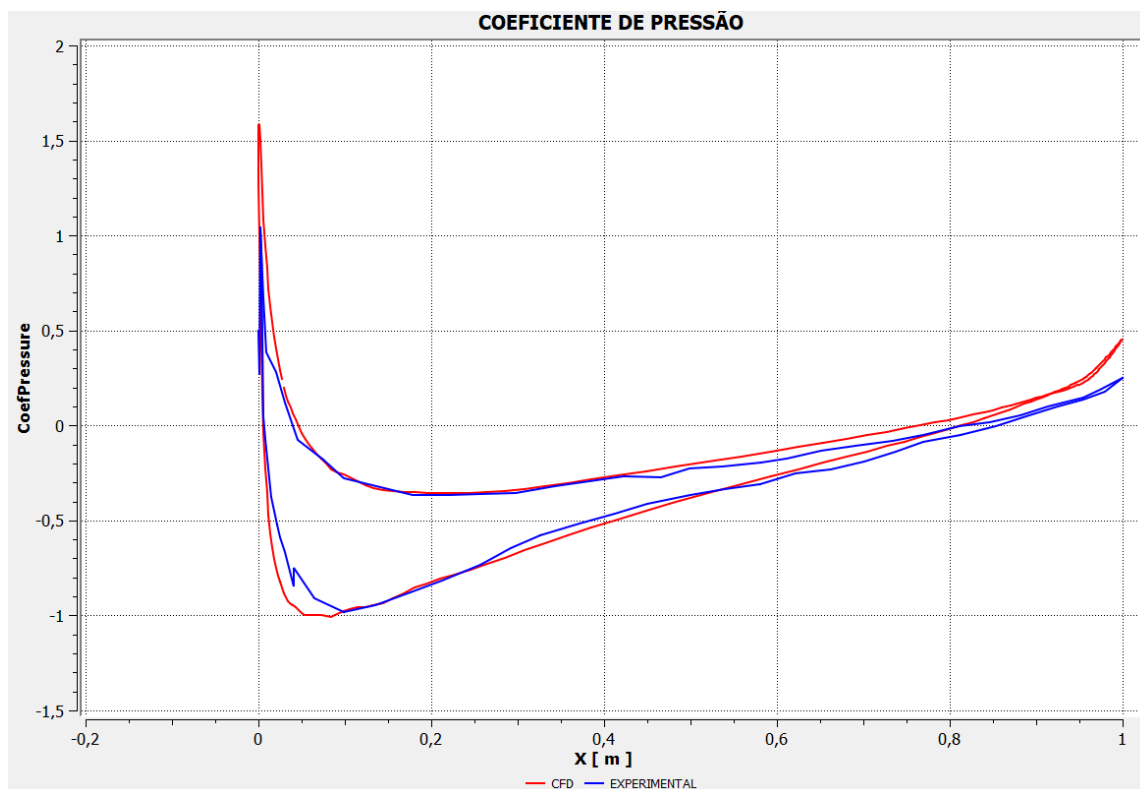


Fonte: AUTORA, 2023.

A

Figura 32 mostra um gráfico comparativo entre a simulação CFD (linha vermelha) e os resultados experimentais (linha azul) para um ângulo de ataque igual a $1,55^\circ$. Na imagem é possível ver que a variação entre os resultados é bem pequena, significando que a modelagem das condições de contorno foi realizada de forma correta. Ainda no gráfico é possível observar que a região de baixa pressão se desloca na direção do bordo de ataque, onde o valor de C_p é igual a zero, indicando que a pressão nesta região está se aproximando do mesmo valor da pressão estática da corrente livre.

Figura 32. Coeficiente de pressão.



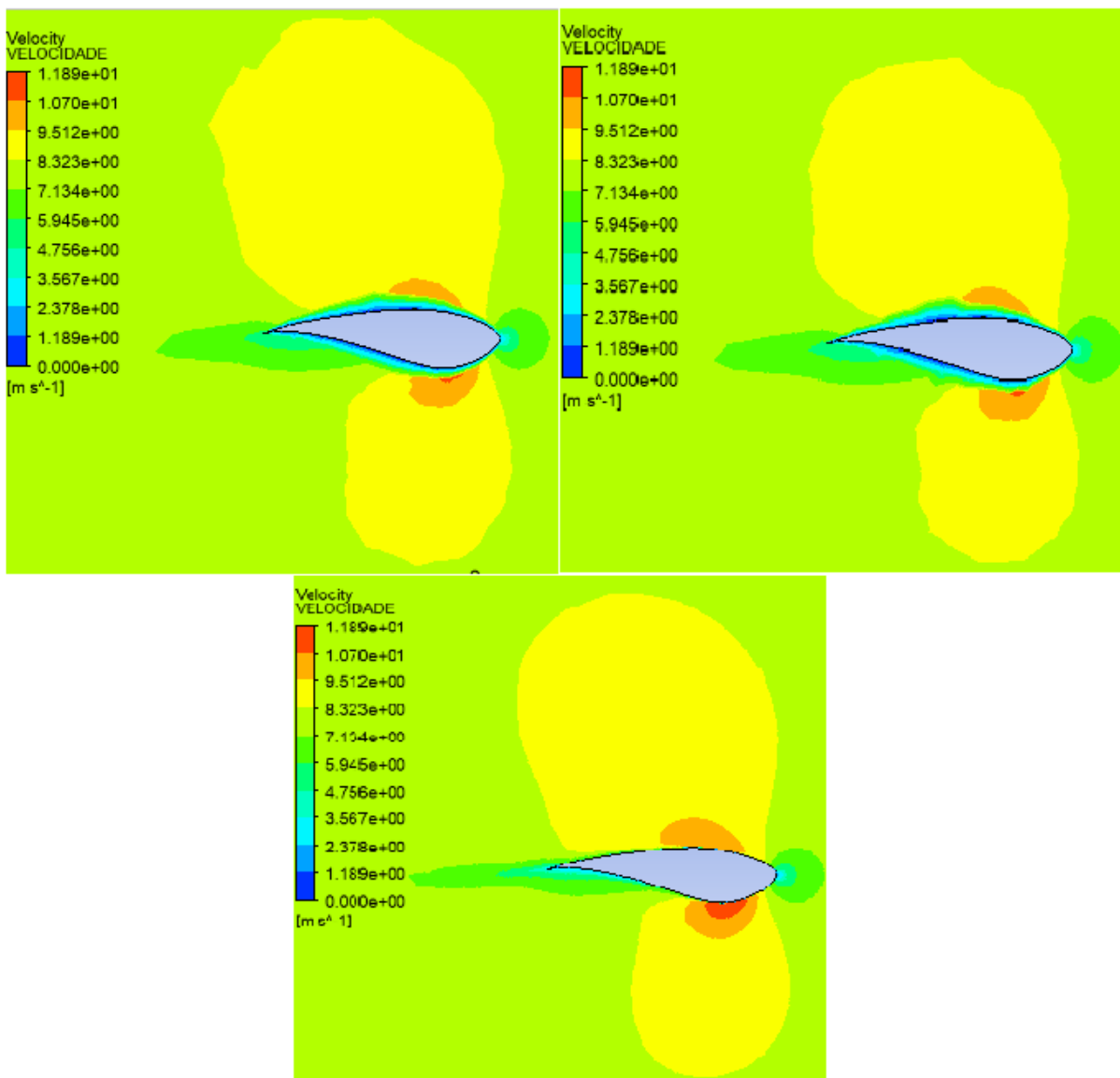
Fonte: AUTORA, 2023.

5.2 Perfil S814

As figuras abaixo mostram os resultados obtidos para o escoamento no perfil aerodinâmico S814, para pressão, velocidade e erosão referente às três malhas, anteriormente citadas. A ordem dos resultados nas figuras são: malha 1, malha 2 e malha 3.

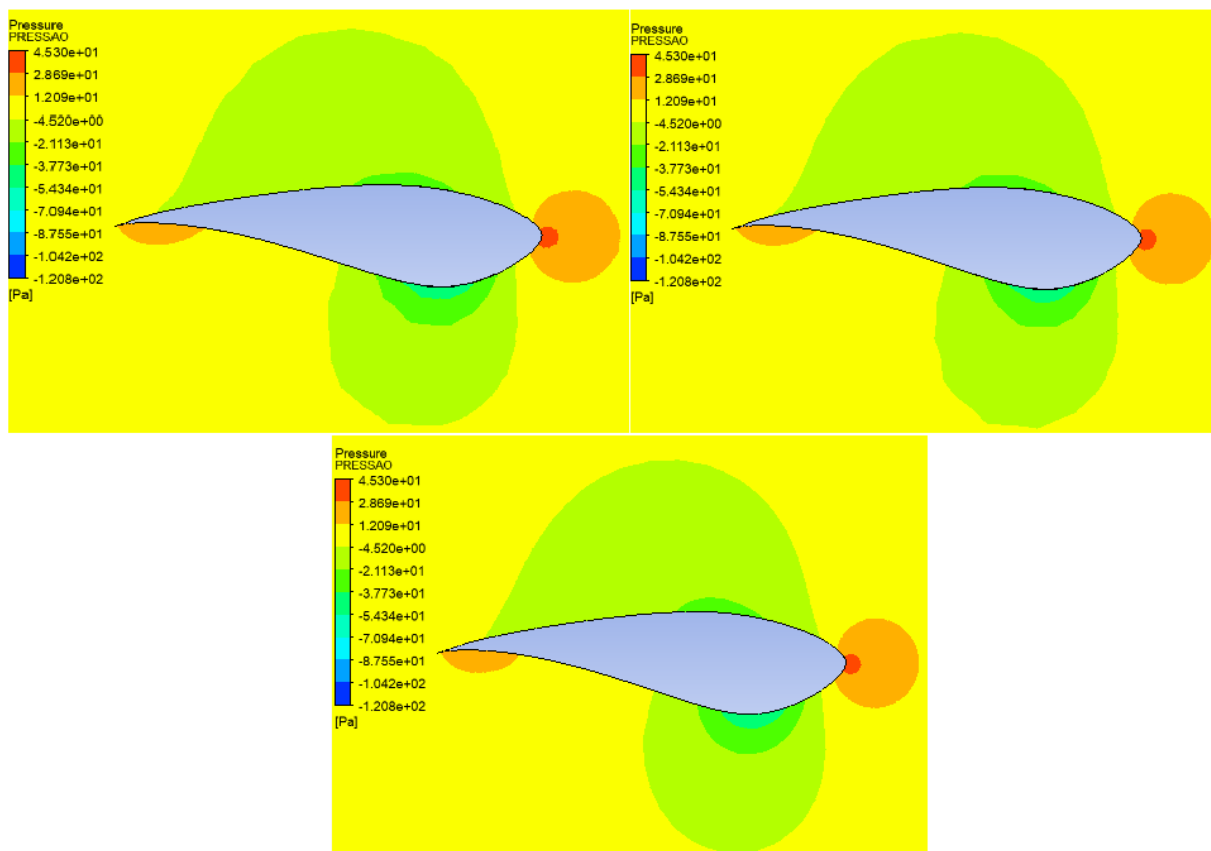
Na **Figura 33**, é possível ver que a velocidade é maior na região do extradorso e, no intradorso até a região da maior espessura e passando deste ponto, a velocidade é baixa assim como no bordo de ataque, porém nota-se que conforme o vento passa o aerofólio, forma-se um rastro com um aumento de velocidade. Nota-se, também, a diferença entre as malhas, na 1 e na 2 na região do intradorso e extradorso tem uma camada de baixa velocidade que, na malha 3 está presente apenas nos bordos de ataque e de fuga. Já na **Figura 34**, observa-se que a região do bordo de ataque sofre os maiores índices de pressão, que diminuem ao longo do aerofólio, e os contornos são mais precisos para a malha refinada.

Figura 33. Resultados para velocidade (sem erosão).



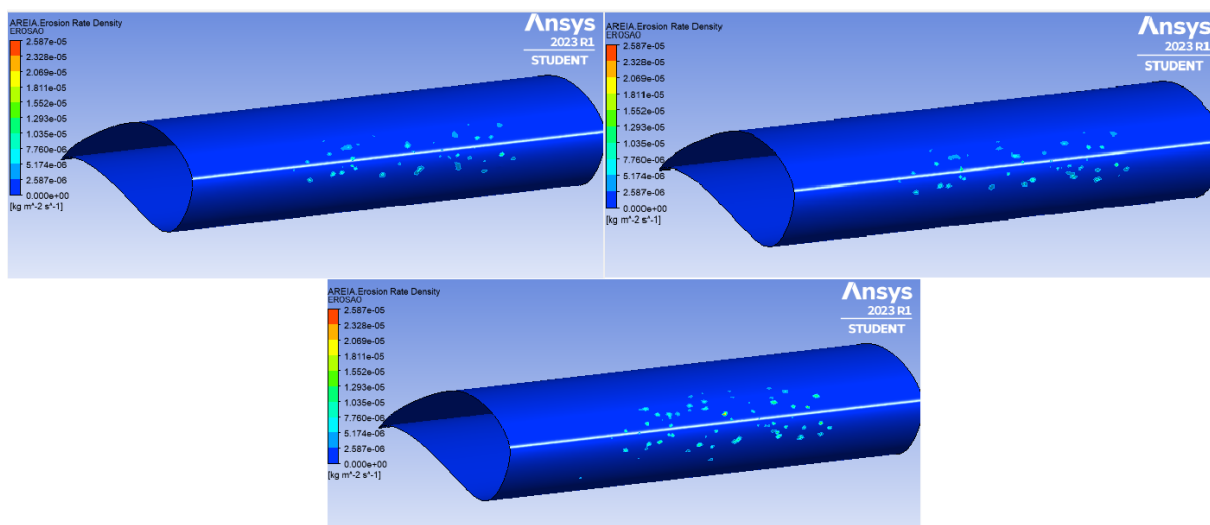
Fonte: AUTORA, 2023.

Figura 34. Resultados para pressão (sem erosão).



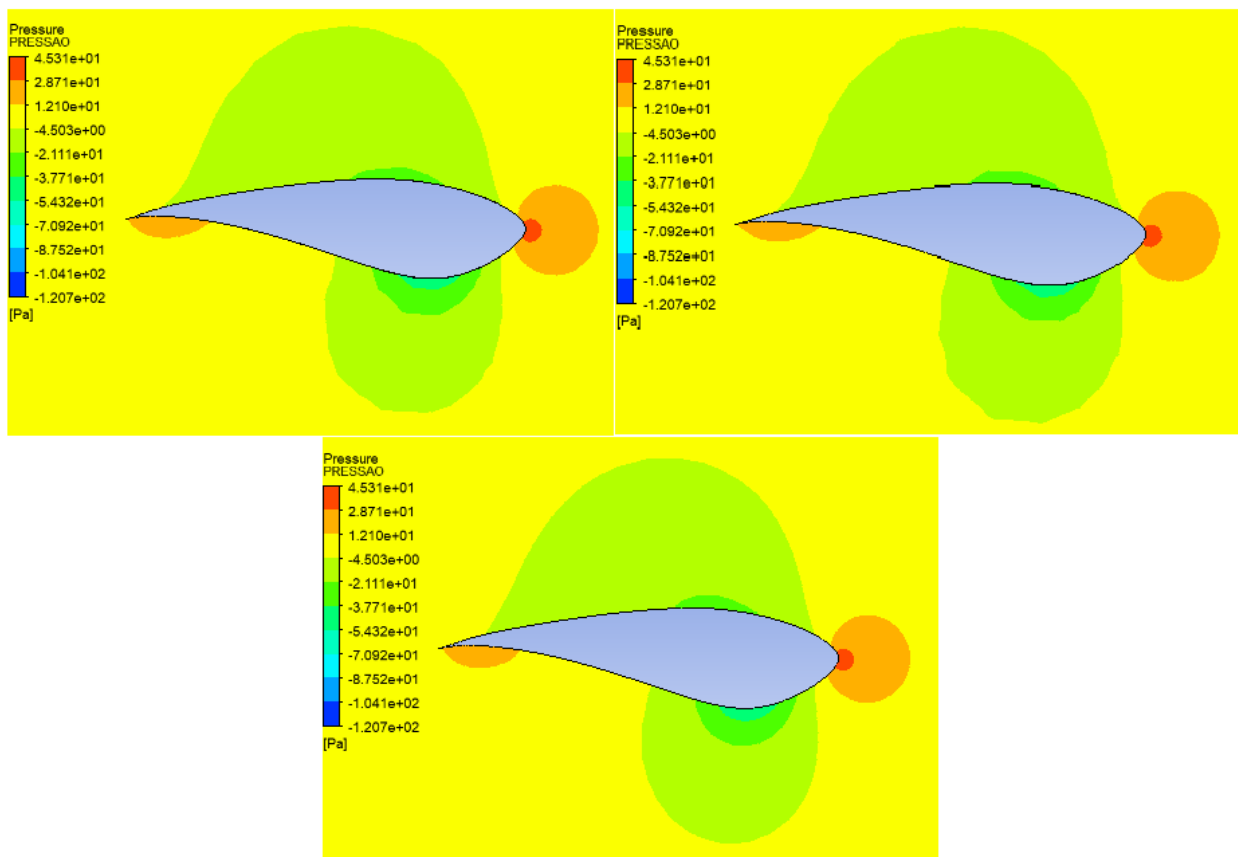
Fonte: AUTORA, 2023.

Na **Figura 35**, estão os resultados para a erosão no modelo de Finnie, decorrentes do fluxo de partículas de diâmetro entre $50\mu\text{m}$ e $500\mu\text{m}$. Pode-se observar que a região central do bordo de ataque sofreu alguns picos de erosão, e na malha mais refinada é possível ver uma maior acurácia.

Figura 35. Resultados para erosão (modelo Finnie).

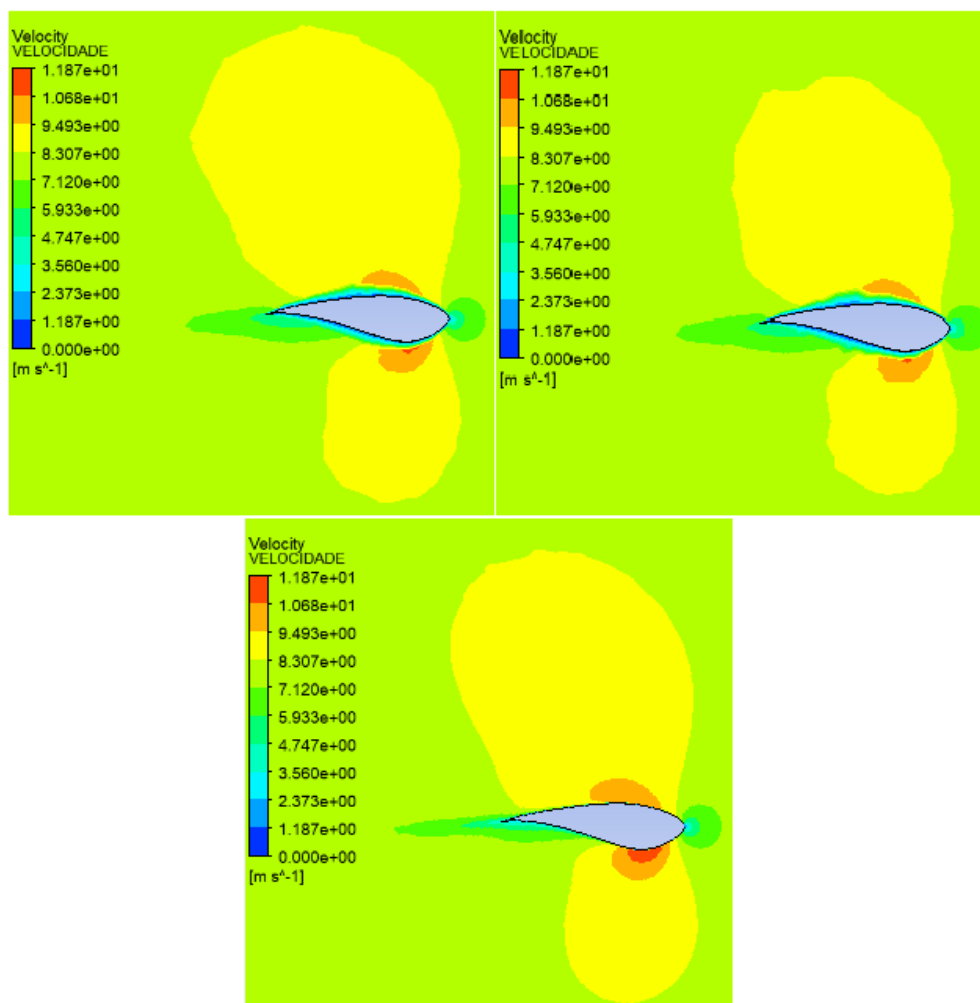
Fonte: AUTORA, 2023.

Nas figuras abaixo estão os resultados para pressão e velocidade, utilizando o modelo de Finnie. Com relação a pressão (**Figura 36**), não foram obtidas variações visíveis quando comparadas à simulação sem modelo de erosão. Já para a velocidade (**Figura 37**), foi possível notar uma diminuição nos valores, o que significa que o aerofólio perdeu um pouco da capacidade de captação de vento, como consequência da erosão sofrida.

Figura 36. Resultados para pressão (modelo Finnie).

Fonte: AUTORA, 2023.

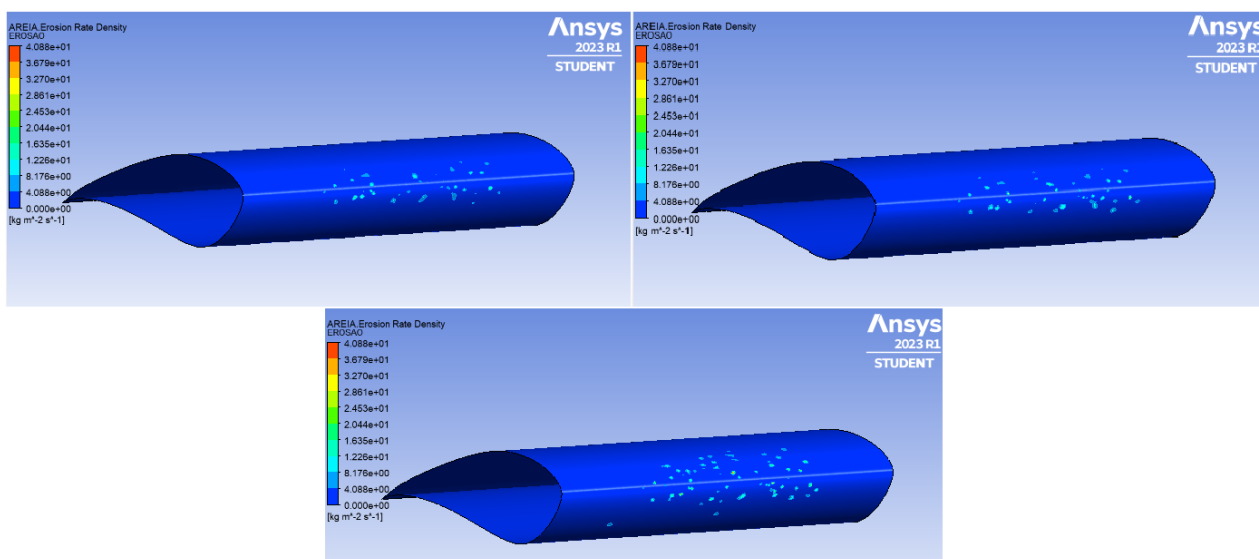
Figura 37. Resultados para velocidade (modelo Finnie).



Fonte: AUTORA, 2023.

No modelo de erosão de Tabakoff, por meio da **Figura 38**, pode-se observar uma diferença bastante notável dos resultados para a densidade da taxa de erosão entre este modelo e o modelo de Finnie. O modelo de erosão de Tabakoff apresentou uma maior erosão na pá.

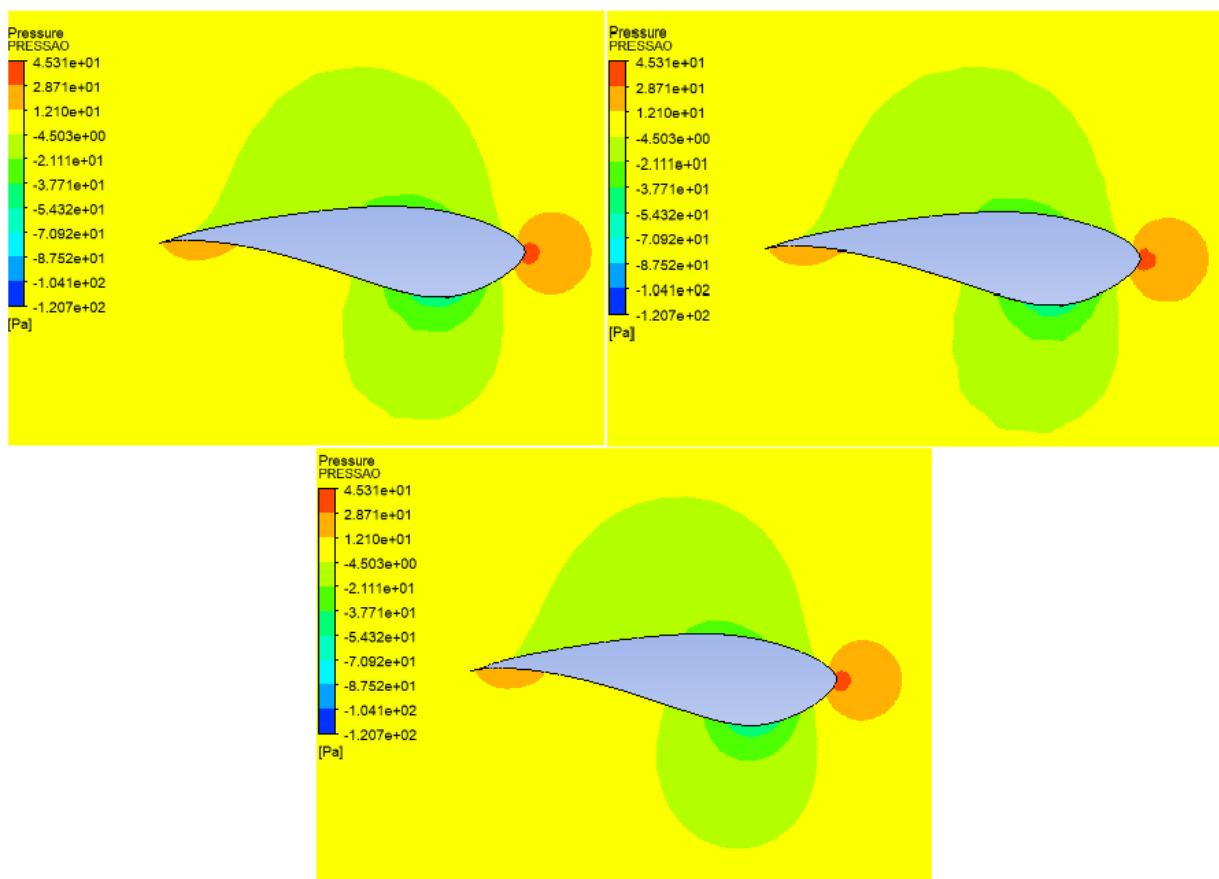
Figura 38. Resultados para erosão (modelo Tabakoff).



Fonte: AUTORA, 2023.

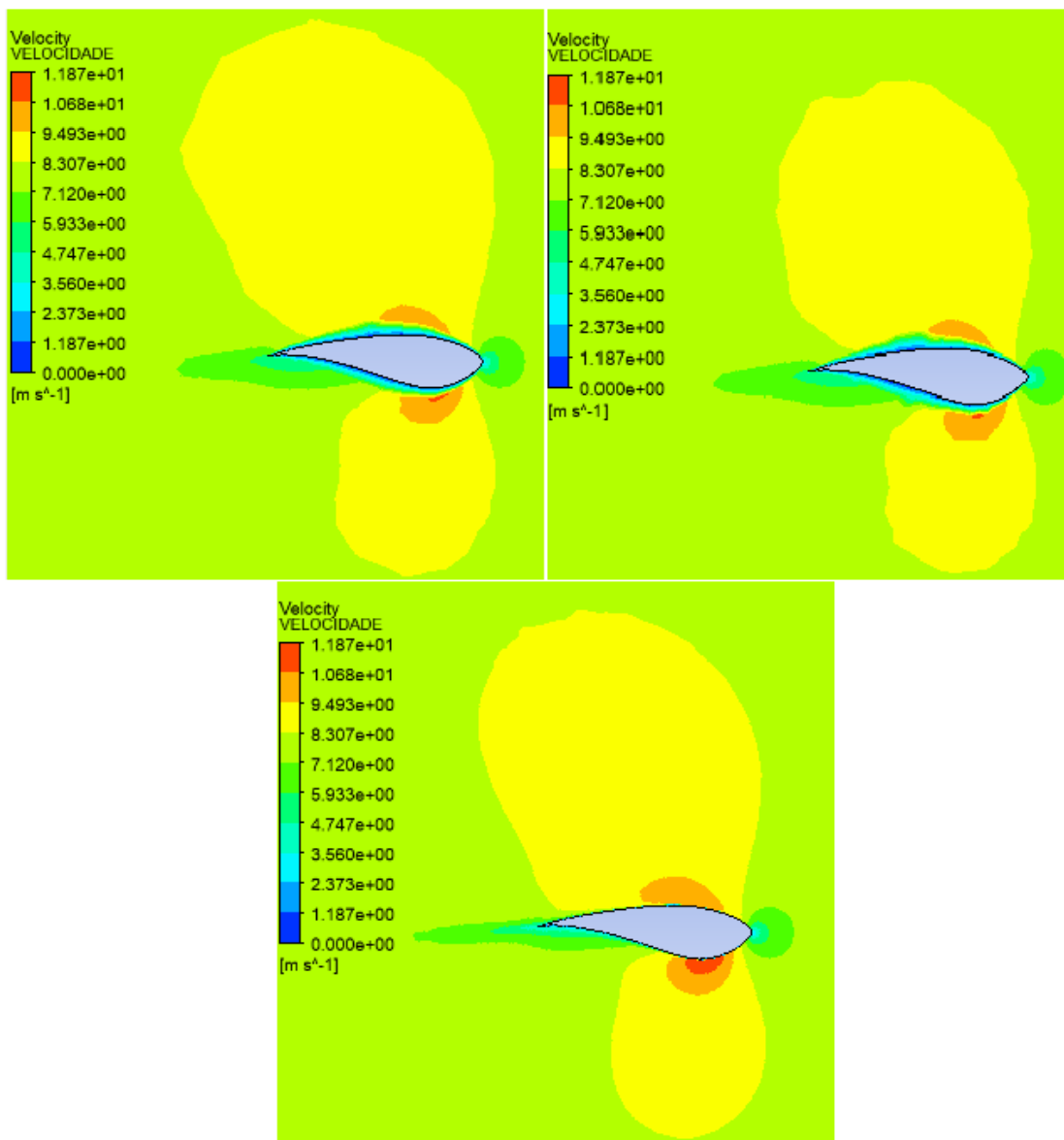
As figuras abaixo mostram os gráficos para pressão (**Figura 39**) e velocidade (**Figura 40**) obtidos para o modelo de erosão de Grand e Tabakoff. Neles, observa-se que estes dois resultados não tiveram variação quando comparados ao modelo de Finnie.

Figura 39. Resultados para pressão (modelo Tabakoff).



Fonte: AUTORA, 2023.

Figura 40. Resultados para velocidade (modelo Tabakoff).



Fonte: AUTORA, 2023.

Nas simulações foram colocados dois monitores, um para o coeficiente de sustentação e outro para o coeficiente de arrasto. A tabela abaixo mostra os resultados para as simulações sem erosão e com erosão utilizando os modelos de Finnie e Grand e Tabakoff.

Na tabela nota-se que os valores obtidos nas malhas 1 e 2, tiveram uma diferença considerável quando comparados aos da malha 3, a qual teve um refino maior na região do contorno do aerofólio. Como já mencionado antes, a relação $C_l \times$

C_d precisa ser bastante controlada, para evitar o estol (a perda de sustentação) e maximizar a eficiência de captação do vento pela pá. Na tabela, é possível observar que não houve variação entre os modelos de erosão, que pode ser pelo fato de alguns parâmetros terem ficado padrão no setup, porém o coeficiente de sustentação entre os modelos sem erosão e com erosão tiveram aumento, enquanto que o coeficiente de arrasto diminuiu.

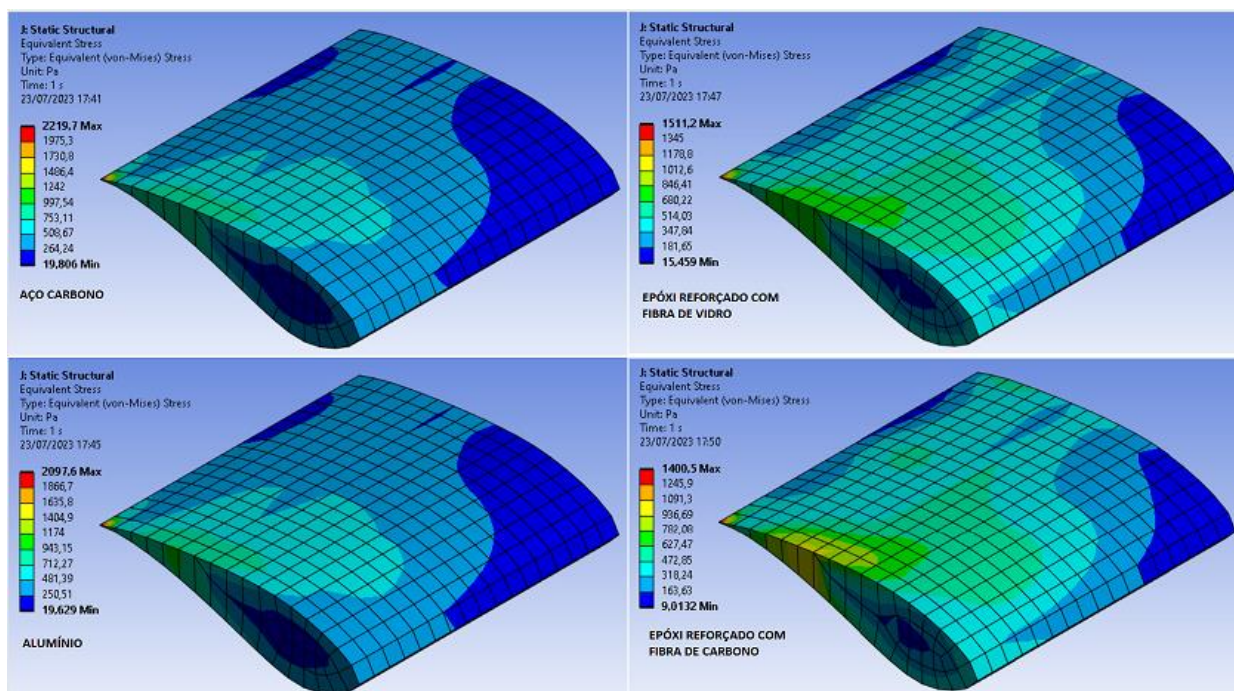
Tabela 4. Coeficientes de sustentação e arrasto.

	SEM EROSÃO	MODELO DE FINNIE	MODELO DE GRAND E TABAKOFF
MALHA 1	C_l : 2,4265	C_l : 2,5940	C_l : 2,5940
	C_d : 1,2108	C_d : 1,2085	C_d : 1,2085
MALHA 2	C_l : 2,4119	C_l : 2,5809	C_l : 2,5809
	C_d : 1,2122	C_d : 1,2099	C_d : 1,2099
MALHA 3	C_l : 2,3123	C_l : 2,4801	C_l : 2,4801
	C_d : 0,9175	C_d : 0,9163	C_d : 0,9163

Fonte: AUTORA, 2023.

As figuras abaixo mostram os resultados obtidos para as simulações, sem erosão, para os materiais já citados. A **Figura 41** apresenta os resultados para a tensão equivalente de Von-Mises. Os picos de maiores tensões ficaram localizados na região central da pá, e o ponto máximo no bordo de fuga do aerofólio no lado que foi fixado. Entretanto, em nenhuma simulação o limite de escoamento foi atingido, significando que os resultados foram satisfatórios. Ainda é possível observar, que os materiais compósitos obtiveram os menores valores para tensão equivalente de Von-Mises, o que é consequência devido às suas propriedades que superam as do aço Carbono e Alumínio.

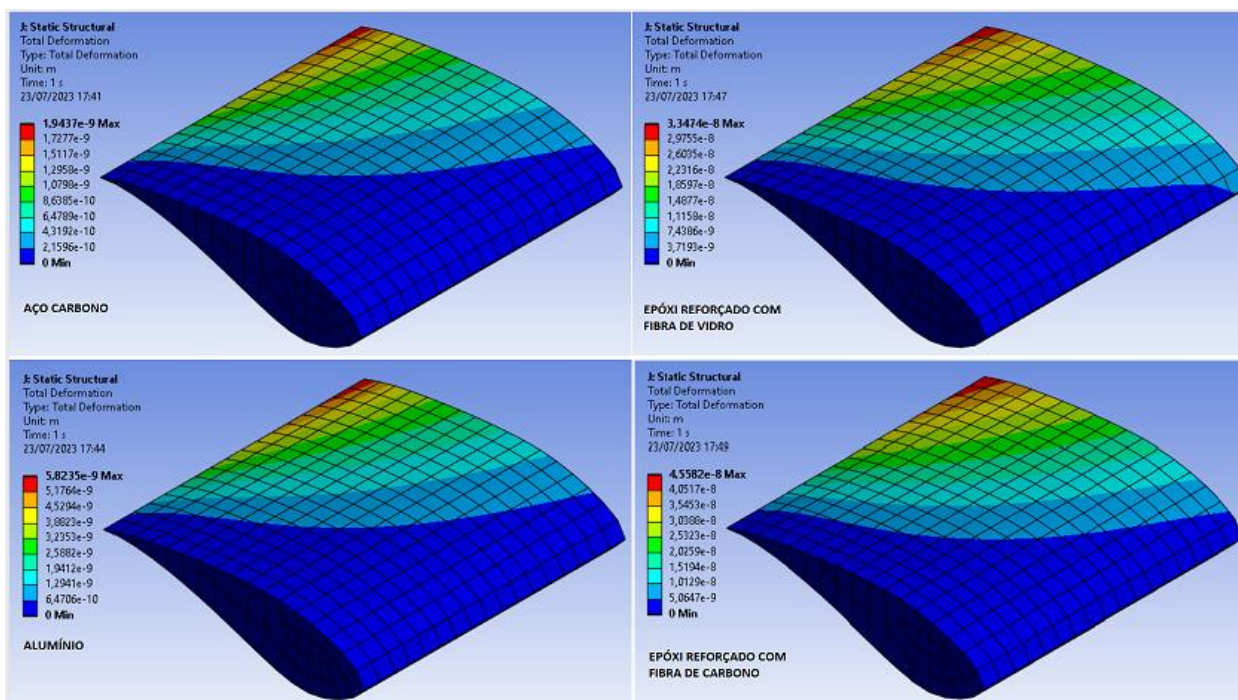
Figura 41. Resultados para tensão equivalente de Von-Mises.



Fonte: AUTORA, 2023.

Na **Figura 42**, estão apresentados os resultados para a deformação total da pá, sob ação dos campos de pressão. Em todas as simulações a deformação foi mínima. O compósito de epóxi reforçado por fibra de vidro foi o que obteve os menores valores de deformação.

Figura 42. Resultados para a deformação total (sem erosão).

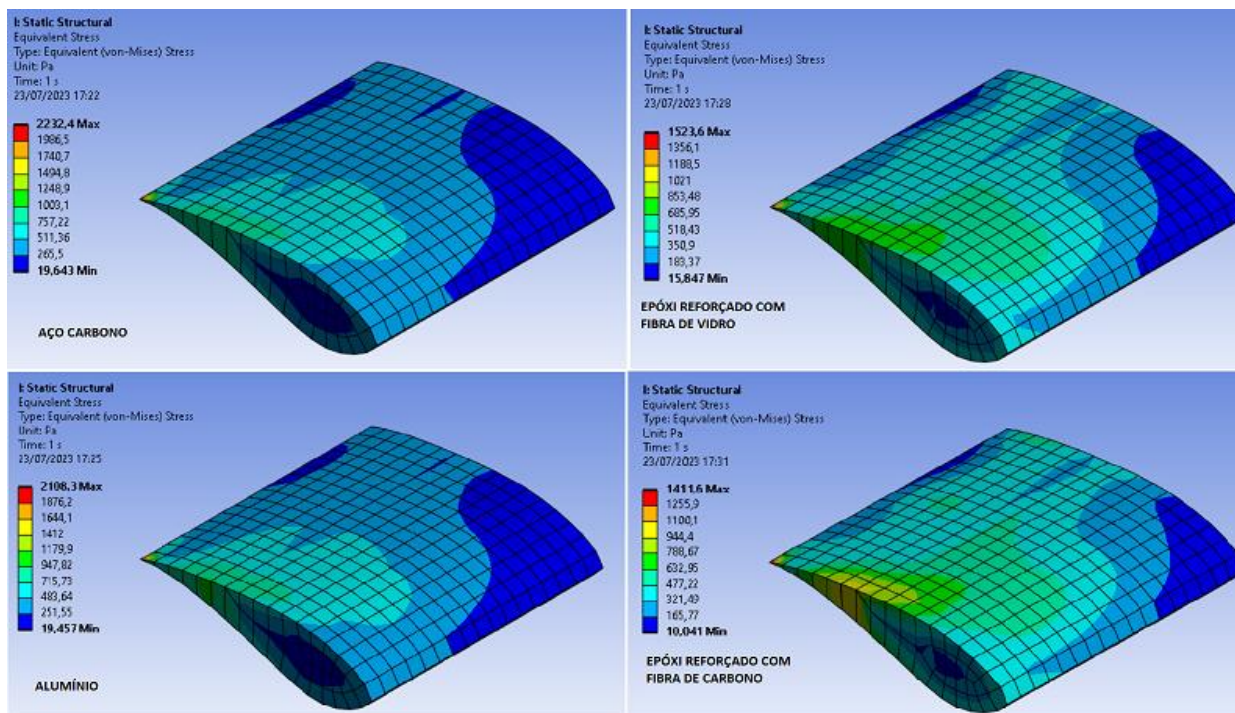


Fonte: AUTORA, 2023.

As figuras a seguir mostram os resultados para a tensão equivalente de Von-Mises e deformação total, que sofreram ação dos campos de pressão, no modelo de erosão de Finnie.

Na **Figura 43**, são apresentados os resultados para a tensão equivalente de Von-Mises, os quais não ultrapassaram os limites de escoamento, porém tiveram um aumento em relação a simulação da pá em perfeito estado. Isso acontece porque a distribuição das cargas é alterada, conforme a geometria sofre de erosão.

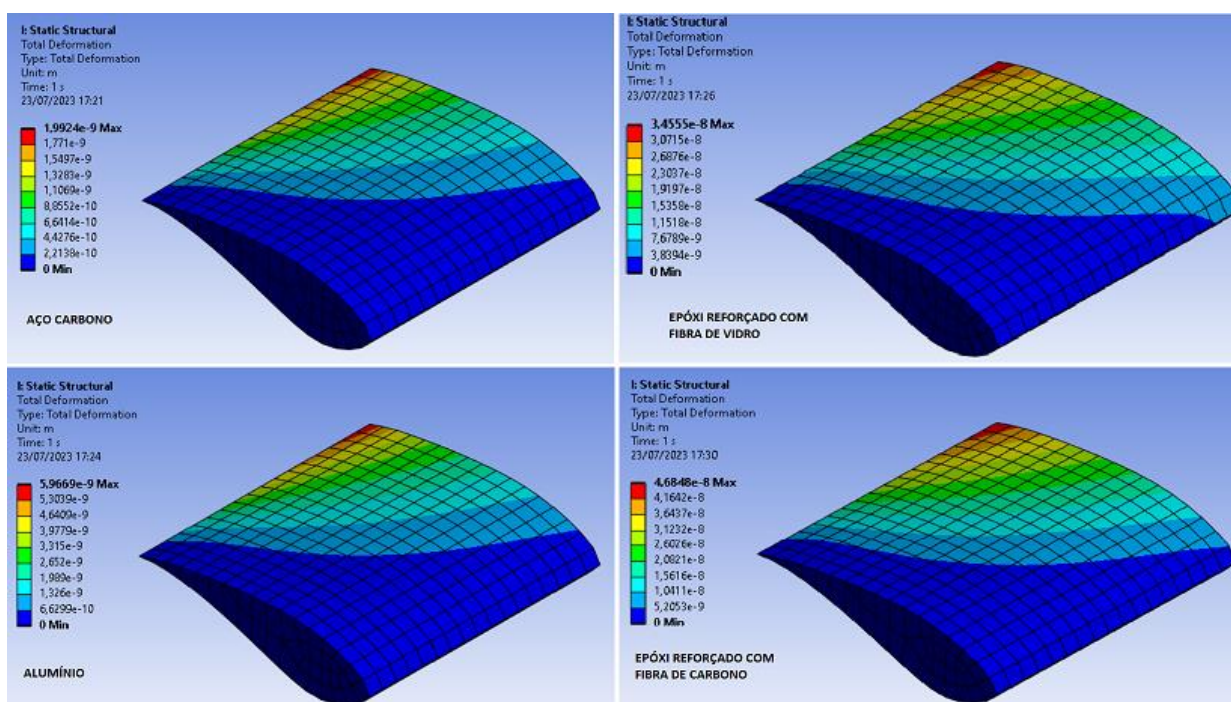
Figura 43. Resultados para tensão equivalente de Von-Mises (modelo de Finnie).



Fonte: AUTORA, 2023.

Na **Figura 44**, são mostrados os resultados para a deformação total das pás erodidas. Assim como nas simulações sem erosão, as deformações não foram críticas, mas também foram maiores.

Figura 44. Resultados para a deformação total (modelo de Finnie).



Fonte: AUTORA, 2023.

6 CONCLUSÕES

Com esse trabalho foi possível observar a importância em estudar o processo de erosão no bordo de ataque de pás eólicas, que é uma das regiões mais críticas pois é a primeira que entra em contato com o escoamento do ar e pode ter sua geometria aerodinâmica alterada, podendo prejudicar a produção de energia. Foi mostrado que os coeficientes aerodinâmicos sofrem alterações que podem implicar em perdas energéticas nos aerogeradores.

É válido ressaltar também que uma pá erodida tem também sua estrutura prejudicada devido ao aumento das tensões sofridas, uma vez que podem causar algumas falhas como, por exemplo, trincas e fissuras que, se não forem corrigidas podem causar catástrofes.

Com relação aos materiais é notável a superioridade que os materiais compósitos apresentaram quando comparados com o aço Carbono e Alumínio. O aço Carbono é um material que não é indicado para a fabricação de pás eólicas porque é bastante pesado e não pode ser moldado facilmente. O Alumínio possui baixa densidade, propriedade que é necessária para a confecção de pás eólicas, entretanto

é um material mais propenso a sofrer fadiga, tem uma menor resistência mecânica, pode ser mais difícil de reparar e podem ter um maior custo, tudo isso quando é comparado aos materiais que são utilizados hoje em dia, como por exemplo os compósitos de fibra de vidro e fibra de carbono.

Os compósitos, atualmente, se apresentam como os melhores materiais para serem utilizados na fabricação de pás eólicas, porque possuem alta resistência mecânica, baixa densidade, podem ser moldados facilmente em geometrias complexas, como as dos aerofólios. Estes materiais também apresentam uma boa relação de peso-resistência à fadiga, que é muito importante pois as pás eólicas estão submetidas à repetidos ciclos, devido as mudanças de direção do vento.

Para futuros trabalhos, as simulações podem ser feitas modelando uma pá em modelo real, aplicando diversos ângulos de ataque para estudar também o processo de estol da pá, e também variando a velocidade estudando possíveis situações críticas de erosão. Estes estudos podem acrescentar, também, as fitas protetivas que, atualmente, estão sendo utilizadas para aumentar a resistência à erosão.

REFERENCIAS

AMARAL, Luiz. **Interação Fluido-Estrutura: o que é?** 2016. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/interacao-fluido-estrutura-o-que-e/>. Acesso em: 05 mai. 2023.

ANSYS. **Better Particle Erosion Fluid Dynamics Modeling in Ansys Fluent**. 2017. Disponível em: <https://www.ansys.com/blog/erosion-fluid-dynamics-modeling>. Acesso em: 01 jun. 2023.

ARRIGONE, Giovanni Maria; MUTTI, Cristine do Nascimento. **TURBINA EÓLICA PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO LATAS DE ALUMÍNIO**. In: **III ENCONTRO DE SUSTENTABILIDADE EM PROJETO**, 3., 2009, Santa Catarina. III ENSUS. Santa Catarina: Página UFSC, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO. **PRE-004: Terminologia Básica Aplicável aos Componentes do Aerogerador**. São Paulo: Comitê Técnico Setorial de Energia Eólica, 2020. 10 p. Disponível em: https://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/consulta_publica/pre-004_rev00_terminologia-setor-eolico.pdf. Acesso em: 06 jun. 2023.

AZEVEDO, Julia. **Combustíveis fósseis: tipos e impactos**. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/combustiveis-fosseis/#:~:text=Impactos%20causados%20pelos%20combust%C3%ADveis%20f%C3%B3sseis,-A%20queima%20de&text=Outro%20impacto%20negativo%20do%20uso,atmosfera%20C%20como%20di%C3%B3xido%20de%20carbono..> Acesso em: 15 out. 2022.

BARIFOUSE, Rafael; SCHREIBER, Mariana. **Como o Nordeste virou principal polo da energia eólica no Brasil**. Disponível em: https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/11/151110_energia_eolica_nordeste_rb. Acesso em: 17 abr. 2023.

CALLISTER, William. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2016.

CARVALHO, Prince Azsemergh Nogueira de. **OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO DE PERFIS AERODINÂMICOS UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO**. 2019. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do

Rio Grande do Norte, Natal, 2019. Disponível em:

https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/28512/1/Otimizacaomultiobjetivoperfis_Carvalho_2019.pdf. Acesso em: 06 jun. 2023.

COSTA, Tuana Maria de Medeiros. **ESTUDO DA FLUIDODINÂMICA DE UM LEITO FLUIDIZADO EMPREGANDO O MODELO DE FASE DISCRETA DENSA**. 2019. 71 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019. Disponível em:

<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/28261/1/TUANA%20MARIA%20DE%20MEDEIROS%20COSTA%20-%20DISSERTA%C3%87%C3%83O%20PPGEM%20CCT%202019.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2023.

CRUZ, Talita. Energia Eólica dá certo no Brasil? Descubra suas vantagens e desvantagens. 2019. Disponível em: <https://www.vivadecora.com.br/pro/energia-eolica/>. Acesso em: 19 abr. 2023.

DONINI, Mariovan Sabino. **ESCOAMENTO SOBRE O PERFIL AERODINÂMICO NACA 4412**. 2014. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2014. Disponível em:

<https://dspace.unipampa.edu.br/bitstream/riu/911/1/Escoamento%20sobre%20o%20perfil%20aerodin%C3%A2mico%20NACA%204412.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2023.

HANKELN, Fabian; RIEDELBAUCH, Stefan. COMPARISON OF DIFFERENT MODELS FOR DETERMINATION OF EROSION WEAR IN CENTRIFUGAL PUMPS. In: EUROPEAN CONFERENCE ON TURBOMACHINERY FLUID DYNAMICS & THERMODYNAMICS, 13., 2019, Lausanne. **Proceedings [...]**. Lausanne: Etc13, 2019. Disponível em: <https://www.euroturbo.eu/paper/ETC2019-037.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2023.

KURCEWICZ, Felipe Caumo. **OTIMIZAÇÃO DE PERFIL AERODINÂMICO PARA AERONAVES DE COMPETIÇÃO SAE AERODESIGN POR ALGORITMO EVOLUTIVO**. 2017. 25 f. Monografia (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/174267/001061204.pdf?sequence=1>. Acesso em: 08 maio 2023.

MACHADO, Miguel José Antunes. **Projeto e fabrico de pás em compósito de resina epóxi reforçada por fibra de vidro para mini turbina eólica.** 2015. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletromecânica, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2015.

MARCOLIN, Neldson. Energia de cataventos. **Pesquisa Fapesp**, São Paulo, v. 135, n. 5, p. 8-9, maio 2007.

MARINUCCI, Gerson. **Desenvolvimento e inovação em materiais compósitos poliméricos.** São Paulo: USP, 2012. 36 slides, color.

MELO JÚNIOR, Francisco Erivan de Abreu. **AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DAS PÁS DE UMA TURBINA EÓLICA EM ESCALA: APLICAÇÃO DA DFA COMBINADA COM TÉCNICAS DE RECONHECIMENTO DE PADRÕES DOS SINAIS DE VIBRAÇÃO.** 2017. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

NEOENERGIA (ed.). **ENERGIA EÓLICA: VENTOS DO NORDESTE.** Disponível em: <https://www.neoenergia.com/pt-br/te-interessa/meio-ambiente/Paginas/energia-eolica-ventos-do-nordeste.aspx>. Acesso em: 10 mar. 2023.

NOGUEIRA, Rafael dos Santos. **SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO ESCOAMENTO SOBRE UM AEROFÓLIO NREL S809.** 2023. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/37725/1/SimulacaoComputacionalEsc oamento.pdf>. Acesso em: 08 maio 2023.

PALADINO, Emilio Ernesto. **Estudo do escoamento Multifásico em Medidores de Vazão do tipo Pressão Diferencial.** 2005. 263 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/102015>. Acesso em: 13 jul. 2023.

PINTO, Milton de Oliveira. **Fundamentos de Energia Eólica.** Rio de Janeiro: Ltc, 2014.

PURIFICAÇÃO, Luerles Silva da; DELLA FONTE, Rodrigo Borges. **ESTUDO DE TURBINAS EÓLICAS VERTICAIS COM EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO DE UMA TURBINA EÓLICA DARRIEUS PARA APLICAÇÃO EM EDIFÍCIOS.** 2012.

102 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

ROCHA, Iago D'andrade Ribeiro da. **PROJETO AERODINÂMICO DE AEROGERADORES DO TIPO HAWT ACOPLANDO A TEORIA CLÁSSICA COM A TEORIA DE ASAS 3D**. 2018. 215 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em:

<http://www.repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10023055.pdf>. Acesso em: 08 maio 2023.

RICCI, Ricardo Pedroso. **DESENVOLVIMENTO DE CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DE ADESIVOS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS**. 2012. 129 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Ciência e Tecnologia de Materiais, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2012. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/99677/ricci_rp_me_bauru.pdf;sequence=1. Acesso em: 01 jun. 2023.

SILVA, Cristiano Vitorino da. **Introdução ao Ansys CFX**. 2019. 44f. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões. Disponível em: https://www.uricer.edu.br/cursos/arq_trabalhos_usuario/3782.pdf. Acesso em: 25 abr. 2023.

SILVA, Ranaldo Gomes da. **ESTUDO DO EFEITO DE INTEMPÉRIES REGIONAIS NA DETERIORAÇÃO DE PÁS EÓLICAS**. 2018. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

STROSKI, Pedro Ney. **Turbinas Darrieus**. 2019. Disponível em: <https://www.electricalibrary.com/2019/03/12/turbinas-darrieus/>. Acesso em: 19 abr. 2023.

ZANCHETTA, André. **Materiais compósitos**: características, propriedades e aplicações. São Paulo: USP, s.d.. 66 slides, color. Disponível em: <https://graduacao.iqsc.usp.br/files/Materiais-Comp%C3%B3sitos-2.pdf>. Acesso em: 19 maio 2023.