

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

TIAGO FELIPE GAIGUER FARIAS

**INTERAÇÃO FLUIDO ESTRUTURA DE UM GERADOR EÓLICO COM PÁS
INTELIGENTES**

CURITIBA

2022

TIAGO FELIPE GAIGUER FARIAS

**INTERAÇÃO FLUIDO ESTRUTURA DE UM GERADOR EÓLICO COM PÁS
INTELIGENTES**

Fluid structure interaction of an eolic generator with smart blades

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do DAMEC, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Tavares da Silva

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

TIAGO FELIPE GAIGUER FARIAS

**INTERAÇÃO FLUIDO ESTRUTURA DE UM GERADOR EÓLICO COM PÁS
INTELIGENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 20 de junho de 2022

Cláudio Tavares da Silva
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Laercio Javarez Junior
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ana Paula Carvalho da Silva Ferreira
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2022

A jornada do (auto)conhecimento é a
máxima da humanidade.

RESUMO

Um estudo de projeto é conduzido sobre o efeito de acoplamento flexão-torção na potência de geradores eólicos com eixo horizontal. Fazendo uso de uma sequência de laminação específica de fibras de carbono unidirecionais em matriz epóxi, obtém-se um compósito laminado cujas tensões mecânicas são acopladas flexo-torcionalmente. Em face aos esforços aerodinâmicos sobre a pá durante sua operação, tensões mecânicas surgem no material que, por culpa de seu acoplamento flexão-torção, conforma-se elasticamente adaptando sua geometria ao escoamento. O estudo da conformação aeroelástica aplicada às pás de geradores eólicos pode trazer um novo potencial prático de aproveitamento da energia intrínseca ao vento, em especial por favorecer a instalação de aerogeradores em centros urbanos e pequenos sítios com rendimento aprimorado. Uma pá é dimensionada segundo alguns parâmetros específicos utilizando a Teoria de Momento de Elemento de Pá. Os efeitos de acoplamento flexão-torção no material são analisados por interação fluido-estrutura. A partir de uma análise qualitativa entre três pás com diferentes sequências de laminação, *ceteris paribus*, obtém-se um aprimoramento de 3,42% na potência extraída com um número menor de lâminas, o que desperta também uma vantagem econômica.

Palavras-chave: Conformação. Aeroelástica. Pás. Inteligentes. Gerador. Eólico. Simulação. FSI.

ABSTRACT

A design study is conducted on the effect of bend-twist coupling over the power of horizontal axis wind turbines. Using a specific unidirectional carbon-epoxy lamination sequence, a laminated composite is obtained whose mechanical stresses are coupled in its bending and twisting. Given the aerodynamic forces on the blade during its operation, mechanical stresses emerge in the material which, due to its bend-twist coupled behavior, conforms elastically, adapting its geometry to the flow. The tailoring of aeroelastic effects can be applied to wind turbine blades, bringing a new practical potential for the use of intrinsic wind energy, especially by favoring improved performance of wind turbines in urban areas and small sites. A blade is designed according to some specific parameters using the Blade Element Moment Theory. The effects of bend-twist coupling in the material are analyzed by fluid-structure interaction. From a qualitative analysis between three blades with different lamination sequences, *ceteris paribus*, an improvement of 3,42% in the extracted power is obtained with a smaller number of blades, which also brings an economic advantage.

Keywords: Aeroelastic. Tailoring. Smart. Blades. Eolic. Generator. FSI. Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Turbina eólica desenvolvida por James Blyth em 1887	13
Figura 2: Evolução da geração eólica em território nacional.....	14
Figura 3: Capacidade total instalada na matriz energética nacional em JUN 21	15
Figura 4: Atlas eólico brasileiro da média anual	19
Figura 5: Ilustração do disco atuante em um campo de escoamento para turbinas tipo HAWT	21
Figura 6: Representação do disco atuante perante a extração energética.....	22
Figura 7: Ilustração do ponto de descontinuidade da pressão através do disco atuante	23
Figura 8: Representação gráfica do coeficiente de potência em função do fator de indução axial da velocidade.....	26
Figura 9: Ilustração da rotação na esteira de turbulência	27
Figura 10: Ilustração das diferenças do coeficiente de potência considerando, ou não, a rotação na esteira de turbulência.....	28
Figura 11: Ilustração dos fatores de indução em função da posição radial relativa no rotor.....	29
Figura 12: Ilustração de um aerofólio e suas partes interessantes	30
Figura 13: Ilustração das principais forças e momentos atuantes sobre um aerofólio	30
Figura 14: Ilustração de escoamento sobre perfil de aerofólio, considerando o fluxo no bordo de entrada em regime laminar.....	31
Figura 15: Ilustração da perspectiva de análise segundo a teoria do elemento de pá	32
Figura 16: Ilustração do triângulo de velocidades em um elemento de pá. À esquerda (a) vislumbram-se as velocidades e , à direita (b), as forças resultantes	33
Figura 17: Ilustração das três principais categorias de compósitos.....	36
Figura 18: Projeção gráfica dos módulos e resistência específicos de materiais diversos.....	37
Figura 19: Ilustração da direção e contagem das lâminas em um laminado	38
Figura 20: Ilustração de um material compósito laminado com orientações laminares distintas	40
Figura 21: Grau de anisotropia e planos de simetria	42
Figura 22: Representação das tensões e deformações em um laminado heterogêneo.....	45
Figura 23: Ilustração dos deslocamentos em um laminado genérico	46
Figura 24: Representação das coordenadas e espessuras das lâminas em um laminado.....	48
Figura 25: Representação das forças e momentos atuantes em uma lâmina ...	48

Figura 26: Organograma do fluxo de trabalho vinculado à metodologia escolhida	53
Figura 27: Ilustração do perfil NACA 4412 traçado por interpolação tipo <i>spline</i>	55
Figura 28 – Fluxograma da construção da geometria e domínios.....	56
Figura 29: Fluxo de trabalho no ANSYS Workbench para o estudo preliminar de laminação.....	61
Figura 30: Fluxo de trabalho no ANSYS Workbench para a análise estrutural preliminar e FSI	62
Figura 31: Curvas do comprimento de corda e torção do perfil ao longo do comprimento da pá	65
Figura 32: Projeção da nuvem de pontos que compõe a pá em uma malha correspondente	65
Figura 33: Geometria (lisa) da pá adaptada e <i>Hub</i>	66
Figura 34: Dimensões da pá e <i>Hub</i>	66
Figura 35: Representação gráfica polar de algumas propriedades da lâmina utilizada.....	67
Figura 36: Ilustração das orientações das lâminas e <i>offset</i> de espessura na pá (laminado <i>L0</i>).....	68
Figura 37: Representação gráfica polar de algumas propriedades dos laminados configurados.....	69
Figura 38: Dimensões principais do túnel de vento para a pá modelada	69
Figura 39: Aspecto geral da malha construída para o túnel de vento	70
Figura 40: Métricas de <i>Skewness</i> para a malha do campo fluídico	70
Figura 41: Localização dos elementos mais distorcidos nas regiões periféricas da pá.....	71
Figura 42: Aspecto geral da malha construída para a pá	72
Figura 43: Métricas de <i>Skewness</i> para a malha na superfície da pá	72
Figura 44: Métricas de <i>Ortogonalidade</i> para a malha na superfície da pá	73
Figura 45: Valores de Y^+ ao longo das linhas de corrente a partir da pá e na superfície	75
Figura 46: Distribuições de pressão na superfície da pá	76
Figura 47: Linhas de corrente geradas a partir da superfície da pá	76
Figura 48: Destaque da distribuição de pressão e recirculação nas regiões próximas da pá.....	77
Figura 49: Apresentação das tensões sobre a pá ao fim da simulação	78
Figura 50: Apresentação dos deslocamentos na pá ao fim da simulação ($U_\infty = 20\text{m/s}$)	79
Figura 51: Deflexões máximas na pá (vista superior).....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos empregos na energia eólica e suas características	16
Tabela 2 – Comparação das principais vantagens e desvantagens entre geradores eólicos de eixo horizontal e vertical, e controle de velocidade fixa e variável.....	17
Tabela 3 – Codificação de compósitos laminados	38
Tabela 4 – Tipos de isotropias e algumas de suas características	42
Tabela 5 – Proporções dimensionais do túnel de vento conforme a geometria da pá	59
Tabela 6 – Parâmetros de qualidade para uma malha	59
Tabela 7 – Coeficientes aerodinâmicos do perfil NACA 4412	63
Tabela 8 – Parâmetros de entrada para o cálculo de dimensionamento da pá ..	64
Tabela 9 – Configuração de laminação dos três laminados avaliados	67
Tabela 10 – Propriedades mecânicas dos três laminados avaliados	68
Tabela 11 – Sumarização dos torques e potências obtidas para cada pá	80
Tabela 12 – Pontos de coordenadas do perfil NACA 4412	87
Tabela 13 – Parâmetros construtivos geométricos da pá	90
Tabela 14 – Principais configurações no ANSYS <i>Fluent</i>	93

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	DESENVOLVIMENTO EM ESCALA NACIONAL	14
1.2	VANTAGENS ECONÔMICAS E SUSTENTABILIDADE	15
1.3	GERADORES EÓLICOS E SUAS CLASSIFICAÇÕES	16
1.4	ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO	19
1.5	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	TUBO DE ESCOAMENTO E DISCO ATUANTE	21
2.2	TEORIA DO MOMENTO	23
2.2.1	Coeficiente de Potência	24
2.2.2	Limite de Betz	25
2.2.3	Teoria do Momento Incluindo a Rotação	26
2.3	CARACTERIZAÇÃO DE UM PERFIL DE AEROFÓLIO	29
2.4	TEORIA DO ELEMENTO DE PÁ	32
2.5	TEORIA DO MOMENTO DE ELEMENTO DE PÁ	34
2.6	MATERIAIS COMPÓSITOS LAMINADOS	36
2.6.1	Nomenclatura e Codificação de Laminados	38
2.6.2	Sequência de Laminação e Anisotropia	39
2.6.3	Análise Macro Mecânica de Uma Lâmina	40
2.6.4	Análise Macro Mecânica de um Laminado	45
2.7	SIMULAÇÃO COMPUTADORIZADA	50
2.7.1	Dinâmica dos Fluidos Computadorizada	50
2.7.2	Configurações e Etapas de uma Simulação	51
3	METODOLOGIA	53
3.1	SELEÇÃO DO PERFIL DE AEROFÓLIO	54
3.2	CONSTRUÇÃO DA GEOMETRIA DA PÁ	55
3.3	DEFINIÇÃO DA SEQUÊNCIA DE LAMINAÇÃO	57
3.4	PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS VIRTUAIS	58
3.4.1	Construção e discretização dos domínios	58
3.4.2	Preparação do ambiente CFD	59
3.4.3	Preparação dos laminados avaliados	60
3.4.4	Preparação da análise estrutural	61
3.5	OBTENÇÃO DA POTÊNCIA EXTRAÍDA	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1	CARACTERÍSTICAS DO PERFIL DE AEROFÓLIO	63
4.2	GEOMETRIA FINAL DA PÁ	64
4.3	PROPRIEDADES DA LÂMINA E LAMINADOS	66
4.4	DOMÍNIOS E MALHAS GERADAS	69
4.4.1	Malha do domínio fluídico	70

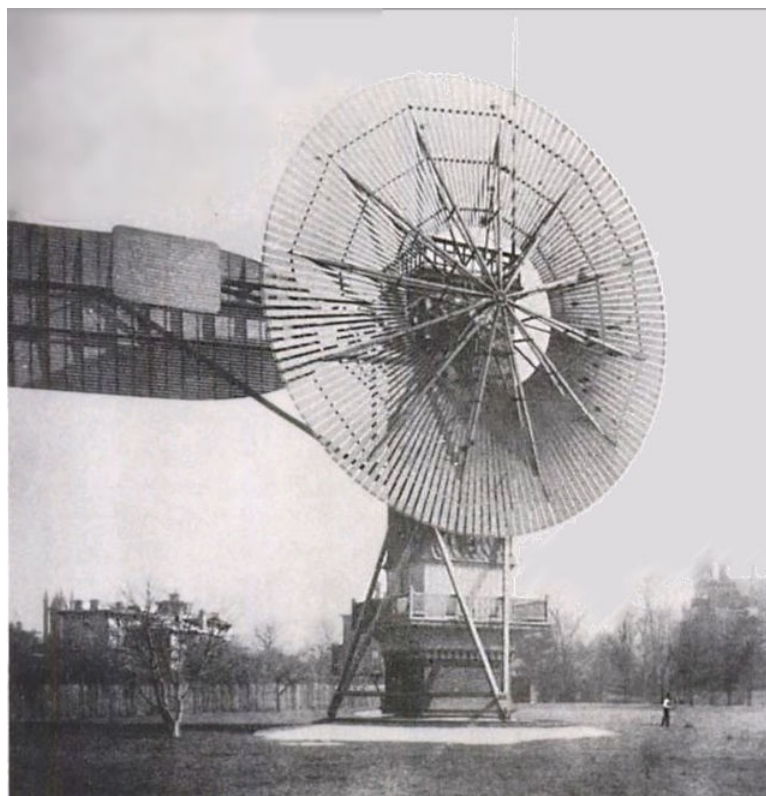
4.4.2	Malha do domínio sólido.....	71
4.5	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	73
4.5.1	Resultados do CFD	74
4.5.2	Resultados da análise estrutural	77
4.6	POTÊNCIA EXTRAÍDA E ANÁLISE DE DESEMPENHO	80
5	CONCLUSÕES	81
	REFERÊNCIAS.....	82
	ANEXO A – PONTOS DE COORDENADAS DO PERFIL NACA 4412	86
	ANEXO B – PARÂMETROS CONSTRUTIVOS GEOMÉTRICOS DA PÁ	89
	ANEXO C – CONFIGURAÇÕES NO ANSYS FLUENT	92
	ANEXO D – RELATÓRIO DE FORÇAS E MOMENTOS	95

1 INTRODUÇÃO

A humanidade tem feito uso da energia eólica há milênios, registros apontam utilização da energia aproveitada do vento para impulsionar botes há mais de 7000 anos no Sul da Mesopotâmia. No entanto, apenas em tempos recentes com a perspectiva da carência de disponibilidade de combustíveis fósseis, em meados do século XX, que se iniciaram maiores desenvolvimentos na geração elétrica a partir do vento (SWIFT-HOOK, 2012)

Em 1887, James Blyth – Professor da *Anderson's College* em Glasgow, Escócia – desenvolveu a primeira turbina eólica destinada à geração de energia elétrica. A energia era utilizada para carregar acumuladores, cujas cargas elétricas eram direcionadas para iluminação de sua cabana, fazendo-a a primeira no mundo a ter sua energia suprida por geração eólica. A turbina produzia energia suficiente para sustentar até dez bulbos de luz de 25V em uma “brisa moderada” (SHAHAN, 2014).

Figura 1: Turbina eólica desenvolvida por James Blyth em 1887

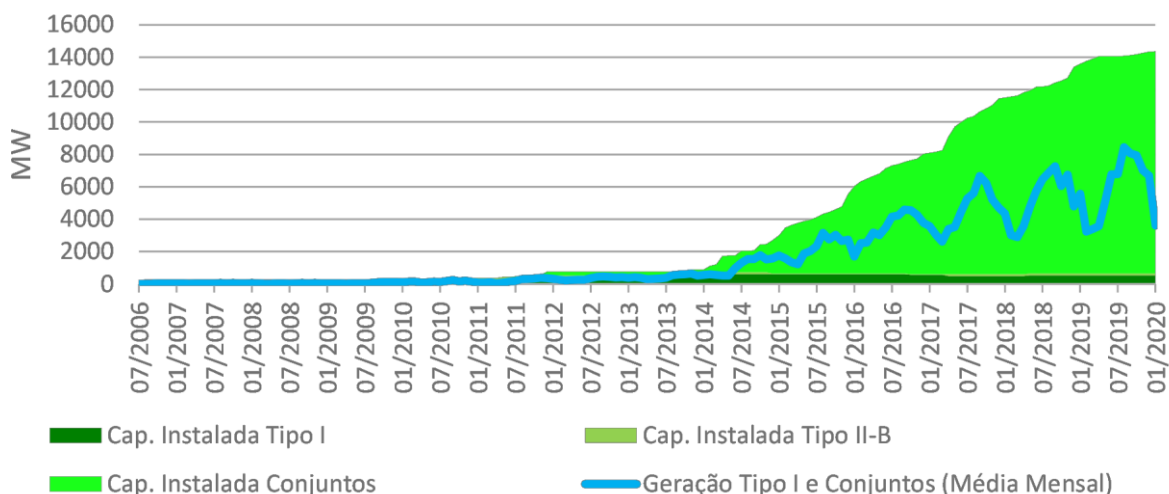


Fonte: SHAHAN, 2014

1.1 DESENVOLVIMENTO EM ESCALA NACIONAL

No Brasil, o aproveitamento do potencial eólico em território nacional começou a ter maior participação a partir de 2015, em especial após a Lei nº 10.438/2002, que cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) (BRASIL, 2021).

Figura 2: Evolução da geração eólica em território nacional



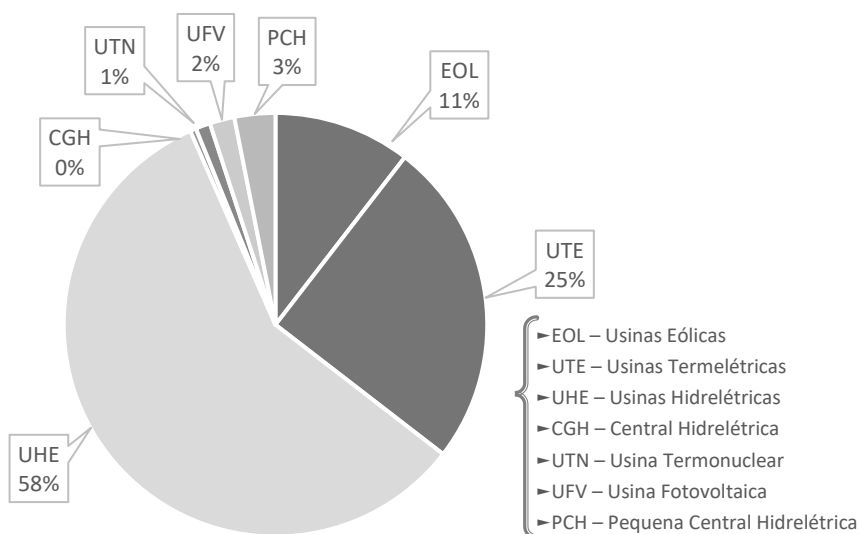
Fonte: ONS, 2021

Na Figura 2 acima, vislumbra-se a evolução da capacidade instalada de usinas eólicas e geração eólica verificada no SIN (Sistema Integrador Nacional); os dados contemplam apenas usinas em operação comercial. Os tipos de capacidade instaladas referem-se à natureza e condições de operação, conforme esplandecido pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) dispõe, em seu domínio eletrônico, relatórios a respeito da matriz energética nacional. Sabe-se que o Brasil faz grande aproveitamento de seu potencial hidráulico, porém o potencial hidrelétrico nacional se aproxima de seu limite e novas soluções se tornam alvo de interesse para prover a energia necessária ao funcionamento socioeconômico do país (MACINTYRE, 1997).

Dentre as fontes de energias apontadas pela ANEEL, destacam-se predominantemente unidades termelétricas (UTE), hidrelétricas (UHE) e eólicas (EOL). Percebe-se que a contribuição da parcela eólica ao suprimento de energia à matriz nacional não é de nada irrisória, ultrapassando os 10%. Usinas hidrelétricas, as quais constituem a maior parcela, aproximam-se dos 60%.

Figura 3: Capacidade total instalada na matriz energética nacional em JUN 21



Fonte: ANEEL, 2021

Relata-se também a capacidade máxima instalada para geração de energia no país fiscalizada pela ANEEL, que ultrapassam 176GW, correspondendo a um potencial eólico instalado de mais de 17,6GW. Os dados apontados correspondem até o dia primeiro de julho de 2021 (ANEEL, 2021).

Com isto, nota-se não só o potencial eólico já em operação no país, mas também a tendência crescente para esta fonte de energia sustentável, dando ainda mais motivos para tornar pesquisas voltadas a este ramo interessantes.

1.2 VANTAGENS ECONÔMICAS E SUSTENTABILIDADE

Segundo o GWEC (*Global Wind Energy Council*), houve uma expansão de aproximadamente 93GW na capacidade de produção energética eólica a nível mundial em 2020, não obstante as dificuldades impostas pela pandemia COVID-19 no período, que afetou todos os setores econômicos e em escala mundial. Comparado a um crescimento de 51GW em 2018, isto reflete a resiliência deste mercado e um parâmetro atrativo para investimento (GEWEC, 2019).

Em outra perspectiva, o GWEC estipula que, para evitar os piores impactos climáticos nas próximas décadas, o setor eólico deverá triplicar em sua expansão.

O desenvolvimento sustentável é fundamental à perpetuação da existência humana. A Organização das Nações Unidas (ONU) define o desenvolvimento sustentável sobre algumas premissas e, em meio aos Imperativos Estratégicos, destacam-se as necessidades básicas humanas:

O principal desafio ao desenvolvimento é atender às necessidades e aspirações de uma população mundial em expansão e desenvolvimento. A mais básica de todas as necessidades é para o sustento: isto é, emprego. (*Our Common Future*, United Nations, 1987).

A geração de empregos e a injeção de capital mais outros investimentos, enquanto frutos da implementação de parques eólicos, têm, portanto, contribuição ditosa na economia, desde o desenvolvimento de tecnologias associadas até a construção e manutenção posterior das torres.

Numerosos estudos foram conduzidos acerca dos impactos socioeconômicos em escala regional – particularmente sobre a geração de empregos – atrelados a investimentos e instalações de fontes de energias renováveis (SASTRESA, 2010; SIMAS, 2013). A sumarização dos dados levantados consta na tabela a seguir.

Tabela 1 – Classificação dos empregos na energia eólica e suas características

Categoria	Volume de empregos	Localização dos empregos	Natureza temporal	Nível de especialização
Desenvolvimento tecnológico	Médio	De não local para local	Estável	Muito alta
Instalação e descomissionamento	Alto	De local para não local	Temporário	Alta
Operação e manutenção	Baixo	Local	Estável	Média

Fonte: adaptado de SASTRESA (2010) e SIMAS (2013)

As vantagens econômicas e de desenvolvimento se dispõem conjuntamente acolá da preservação do meio ambiente e problemas relacionados à escassez de recursos naturais. Investir em fontes renováveis de energia, seja na questão tecnológica ou operacional, caminha a humanidade rumo a um futuro mais próspero e afortunado.

1.3 GERADORES EÓLICOS E SUAS CLASSIFICAÇÕES

Classificam-se os tipos de turbinas eólicas de acordo com a orientação do eixo do rotor e de seu modo de operação: eixo vertical ou horizontal e; com ou sem controle de velocidade (i.e., velocidade de operação fixa ou variável).

Turbinas com eixos verticais – HAWT, *Horizontal Axis Wind Turbine* – têm maior eficiência na extração da energia intrínseca ao vento, além de acesso a ventos mais fortes devido à possibilidade de construir torres mais elevadas. Em contrapartida, turbinas com eixo vertical – VAWT, *Vertical Axis Wind Turbine* – podem operar independentemente da direção do vento, com a desvantagem de apresentarem menor eficiência e maiores flutuações nos esforços da estrutura, que podem ainda despertar problemas envolvendo harmônicos (SORIANO, 2013).

Tratando-se já da forma de operação das turbinas, pode-se sub classificá-las de acordo com o método de controle de velocidade ou potência. Turbinas com velocidade de operação variável – sem sistema de controle de velocidade – são mais baratas e têm seus custos de manutenção diminutos, com a inconveniência de apresentarem maiores flutuações na conversão energética e estresses mecânicos mais significativos. Por outro lado, turbinas com velocidade de operação fixa – com controle de velocidade – apresentam eficiência aprimorada e menores esforços estruturais, enquanto demandam alto custo de fabricação e futura manutenção, fruto da maior complexidade construtiva exigida pelo sistema.

Tabela 2 – Comparação das principais vantagens e desvantagens entre geradores eólicos de eixo horizontal e vertical, e controle de velocidade fixa e variável

(continua)

Turbina	Vantagens	Desvantagens
HAWT eixo horizontal	<p>Maior eficiência na conversão da energia intrínseca ao vento</p> <p>Acesso a ventos de maiores intensidades devido às dimensões da torre</p>	<p>Orientação do vento deve ser predominante em direção única</p> <p>Maiores custos de produção, instalação e manutenção</p>
VAWT eixo vertical	<p>Menores custos de instalação e manutenção facilitada</p> <p>Conversão energética independente da direção do vento</p>	<p>Maiores flutuações nos esforços aplicados ao gerador e seus componentes</p> <p>Menor eficiência na conversão da energia intrínseca ao vento</p>

Tabela 2– Comparação das principais vantagens e desvantagens entre geradores eólicos de eixo horizontal e vertical, e controle de velocidade fixa e variável

		(conclusão)
VSWT velocidade variável	Simple, robusto, confiável	Menor eficiência na conversão energética
	Baixo custo, manutenção facilitada	Estresses mecânicos mais pronunciados Flutuações no fornecimento de energia à rede
FSWT velocidade fixa	Maior eficiência na conversão energética	Maiores custos de produção, instalação e manutenção
	Potência aprimorada e com maior qualidade	Sistema de controle muito mais complexo
	Estresses mecânicos reduzidos	Custos adicionais e perdas nos conversores

Fonte: adaptado de SORIANO (2013)

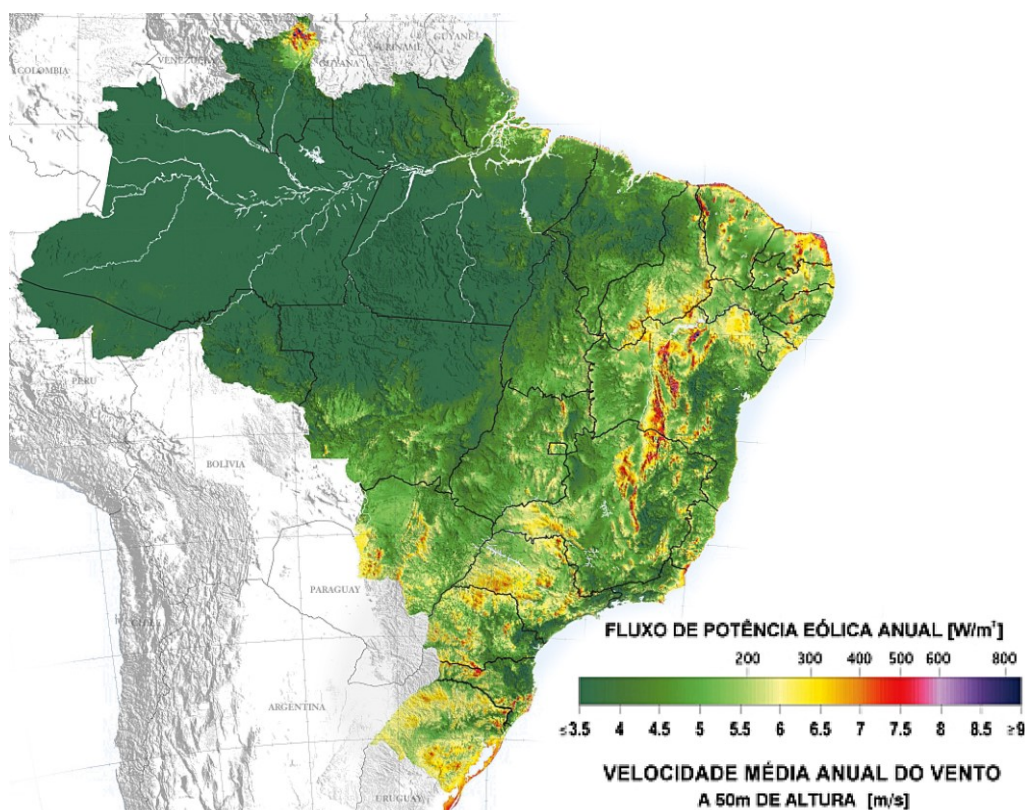
Neste trabalho, foca-se em turbinas com eixo horizontal sem controle velocidades (HAWT/VSWT). Para compensar as cargas mecânicas mais pronunciadas e as flutuações na conversão de energia, desenvolve-se um controle passivo do ângulo de arfagem das pás do gerador a partir do acoplamento torção-flexão de seu material. Desta forma, reduzem-se os esforços, adequa-se a estrutura à resposta aerodinâmica e aprimora-se a curva de potência do gerador.

Objetiva-se provar a exequibilidade da construção das pás com materiais compósitos inteligentes, visando trazer as vantagens de sistemas FSWT para geradores VSWT, sem a necessidade de implementar mecanismos complexos e a consequente elevação no custo de fabricação e posterior manutenção.

1.4 ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO

Refere-se ao mapa eólico brasileiro para estipular a velocidade nominal do vento para o gerador estudado. As principais referências para obtenção destes dados são o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (2001) e Atlas do Potencial Eólico Brasileiro-Simulações 2013. O último é uma complementação do primeiro, realizado em 2013 por simulações numéricas e tomando como referência o mapeamento de 2001.

Figura 4: Atlas eólico brasileiro da média anual



Fonte: adaptado de CRESESB (2001)

Na publicação de 2001, o CRESESB também dispõe uma tabela com o potencial eólico-elétrico estimado do Brasil, calculado pela integração de áreas nos mapas temáticos. Os dados apontados pelos mapas eólicos nas publicações de 2001 e 2013, mais o estudo de GRILLO (2019), são as principais referências para a definição da velocidade nominal do gerador.

Complementarmente, um estudo realizado por Leonardo Hussni em 2021 aponta o potencial de aproveitamento eólico em grandes centros urbanos como São Paulo, tendo em vista a instalação de aerogeradores em topos de prédios nos grandes centros (FERREIRA, 2021). Hussni afirma que uma grande dificuldade na disseminação desta solução energética se dá ao fato de muita da tecnologia ser ainda

importada. Além disso, dentre os poucos fornecedores em território nacional, muitos não dispõem das curvas de potência necessárias para o estudo prévio à instalação dos aerogeradores.

O estudo realizado por Hussni demonstra uma grande oportunidade para o desenvolvimento de pequenos aerogeradores nacionais, especialmente otimizados para ventos de baixas velocidades e instalação em topos de edifícios (FERREIRA, 2021).

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho é dedicado ao estudo aplicado de materiais compósitos destinados à construção de pás de micro geradores eólicos visando obter uma curva de potência otimizada para ventos de baixa intensidade. O estudo é conduzido a partir de dados extraídos de pesquisas anteriores acerca do tema e simulações por interação fluido-estrutura.

Com a implementação de uma regulagem passiva do ângulo de arfagem das pás e conseqüentemente aumentando a faixa de velocidades operantes para o gerador se amplia a oportunidade de disseminação desta fonte renovável de energia em circunstâncias antes desfavoráveis, em especial se aliado a um custo de produção atraente.

Objetiva-se neste trabalho, também, demonstrar que a utilização de materiais compósitos na construção de pás para turbinas de micro geradores eólicos com eixo horizontal tem alto potencial de aprimoramento na conversão da energia intrínseca ao vento em elétrica.

Geradores de alta potência utilizam regulagem ativa do ângulo de arfagem. No entanto, por apresentarem alto custo de implementação, geradores de baixa potência têm ângulos de arfagem fixos, restringindo a faixa de velocidades dentre as quais possui bom desempenho.

Para fins de referência e categorização a ANEEL estabelece, na Resolução Normativa nº 482/2012, a elevação da potência limite para mini e micro geração de 1MW para 5MW (ou 3MW para fontes hídricas) (ANEEL, 2012). Este limite ainda é aplicável na data da redação deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Em meio aos desafios atrelados ao aprimoramento da geração eólica se destacam questões envolvendo a cadeia de suprimento, regularidade contratual, e tecnologia. A WWF (*World Wide Fund for Nature*), em seu relatório de 2015, elabora sobre algumas destas questões, em especial aquelas relacionadas à cadeia de distribuição e fabricação (WWF, 2015).

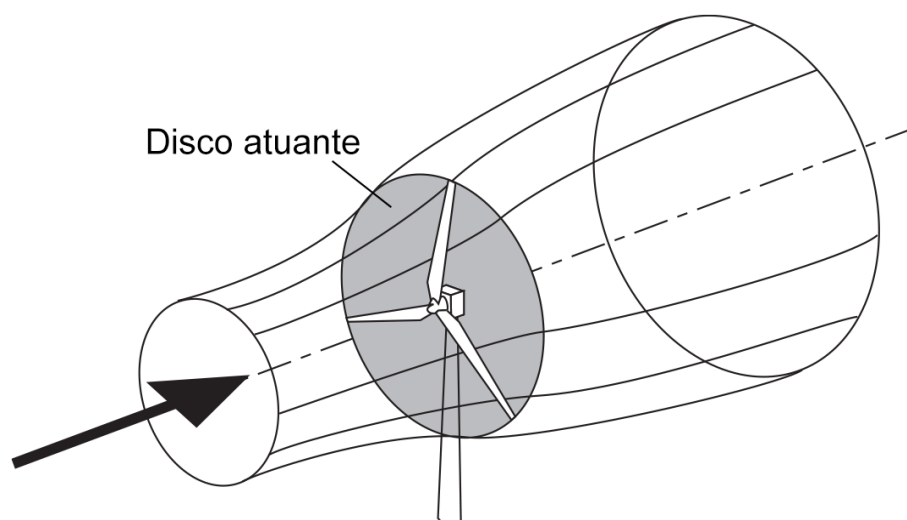
Sob outra perspectiva, o estudo e compreensão do sistema de um aerogerador e a análise dos fenômenos aerodinâmicos que ali preponderam também são nada triviais. Desta forma, o desenvolvimento tecnológico assume papel fundamental neste quesito.

A fundamentação teórica deste trabalho busca esclarecer alguns conhecimentos básicos para o desenvolvimento do estudo e alcance dos objetivos aqui estabelecidos.

2.1 TUBO DE ESCOAMENTO E DISCO ATUANTE

Uma forma de modelar o campo de escoamento a ser analisado para turbinas tipo HAWT é através do conceito do disco atuante do gerador.

Figura 5: Ilustração do disco atuante em um campo de escoamento para turbinas tipo HAWT



Fonte: adaptado de BURTON (2001)

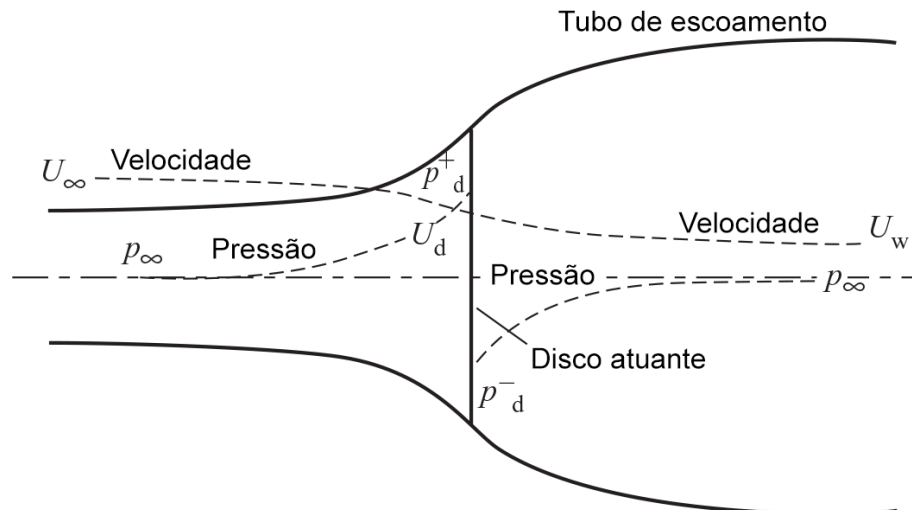
Um gerador eólico trabalha primordialmente sob a ideia da conversão da energia cinética do vento em mecânica para, por fim, transformá-la em elétrica a partir de um gerador e fornecer a liquidez energética final à matriz.

Ao cruzar o disco atuante – uma representação do rotor do gerador –, o escoamento flúídico acarretará um decremento no módulo de sua velocidade. Sendo o fluido modelado como incompressível, prevalece a relação:

$$\nabla \vec{V} = -\nabla \vec{P} \quad (1)$$

Onde P e V representam a pressão e a velocidade, respectivamente. Isto implica dizer que uma variação na velocidade induz uma variação oposta, e de igual intensidade, na pressão do escoamento (PRITCHARD, 2011). Igualmente, devido à conservação da massa, uma diminuição na pressão corresponde a um aumento proporcional do volume e daí a uma expansão do tubo de escoamento após atravessar o disco atuante.

Figura 6: Representação do disco atuante perante a extração energética



Fonte: adaptado de BURTON (2001)

Realizando um balanço de massa ao longo do tubo de escoamento, obtém-se:

$$\rho U_\infty A_\infty = \rho U_d A_d = \rho U_w A_w \quad (2)$$

Onde U_∞ é a velocidade de corrente livre; U_d , a velocidade no disco atuante; U_w , a velocidade na esteira de turbulência (*wake*, em inglês); A , as áreas de seus respectivos subscritos; e ρ , a densidade do fluido.

É usual considerar que o disco atuante infere uma alteração na velocidade, a qual pode ser superposta à de corrente livre (BURTON, 2001). Esta velocidade superposta tem a forma $-aU_\infty$ de modo que, ao computar a velocidade no disco atuante, obtém-se:

$$U_d = U_\infty(1 - a) \quad (3)$$

Reescrevendo se isolando a :

$$a = \frac{U_\infty - U_d}{U_\infty} \quad (4)$$

Introduz-se, assim, o *fator de indução axial da velocidade*, designado por a , um valor fracionário representativo da redução na velocidade entre os planos transversais nos pontos de corrente livre e do rotor (DEILMANN, 2008).

2.2 TEORIA DO MOMENTO

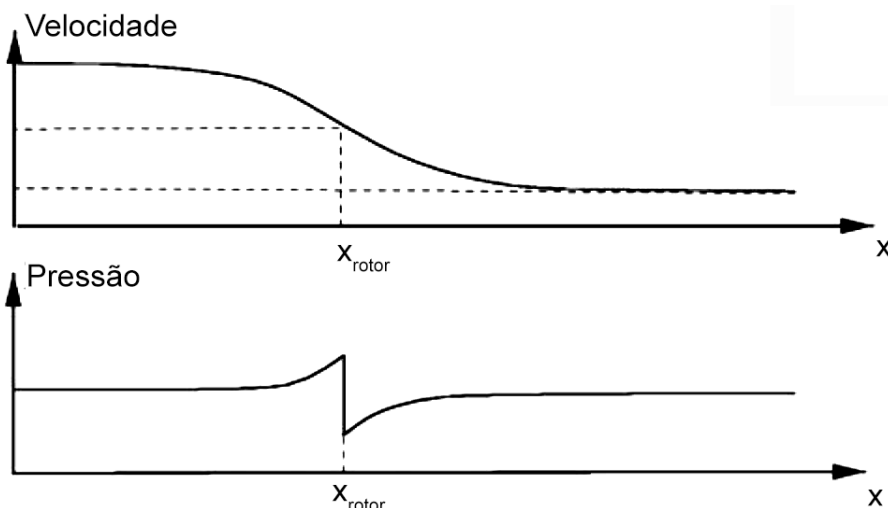
O ar tem sua velocidade alterada ao longo do tubo de escoamento. Esta variação de velocidade, uma vez multiplicada pela vazão mássica, fornece a taxa de variação no momento do elemento fluídico (BURTON, 2001).

A Teoria do Momento – MT, *Momentum Theory* – estabelece que a variação no momento fluídico se iguala à variação do momento no rotor da turbina:

$$(p_d^+ - p_d^-)A_d = (U_\infty - U_w)\rho A_d [U_\infty(1 - a)], \quad \begin{cases} p_d^+ = \lim_{x \rightarrow x_{rotor}^-} p \\ p_d^- = \lim_{x \rightarrow x_{rotor}^+} p \end{cases} \quad (5)$$

Onde p_d^+ e p_d^- remetem ao limite unilateral da pressão no ponto de descontinuidade do disco atuante, à esquerda e à direita, respectivamente.

Figura 7: Ilustração do ponto de descontinuidade da pressão através do disco atuante



Fonte: adaptado de HANSEN (2008)

A Figura 7 ilustra a variação de velocidade e pressão em relação à localização do disco atuante (x_{rotor}).

A fim de se obter a variação de pressão através do disco, utiliza-se a equação de Bernoulli, aplicada separadamente nas parcelas à montante e à jusante do escoamento em relação à turbina.

$$\frac{p}{\rho} + \frac{U^2}{2} + gz = cte \quad (6)$$

Onde g é a gravidade local e z a altura relativa ao campo gravitacional de referência. Entretanto, considera-se que a variação da energia potencial gravitacional é desprezível e, portanto, a terceira parcela da equação pode ser desprezada nesta análise:

$$z_{\infty} = z_d = z_w \therefore \Delta z = 0 \quad (7)$$

Da mesma forma, devido à hipótese de incompressibilidade do fluido, a densidade do ar (ρ) permanece constante. Por fim, aplicando a equação de Bernoulli em uma linha de corrente à montante e à jusante do disco atuante, obtém-se, respectivamente:

$$\frac{p_d}{\rho} + \frac{U_d^2}{2} = \frac{p_{\infty}}{\rho} + \frac{U_{\infty}^2}{2} \quad (8)$$

$$\frac{p_d}{\rho} + \frac{U_d^2}{2} = \frac{p_w}{\rho} + \frac{U_w^2}{2}, \quad p_w \rightarrow p_{\infty} \quad (9)$$

Subtraindo-se as equações 8 e 9, e substituindo em 5, pode-se chegar a uma relação entre as velocidades no disco atuante e na esteira de turbulência:

$$U_w = U_{\infty}(1 - 2a) \quad (10)$$

Isto implica que metade da redução na velocidade de corrente se dá à montante, e metade à jusante do disco atuante (BURTON, 2001).

2.2.1 Coeficiente de Potência

A extração integral da energia intrínseca ao vento é, na prática, ainda impossível. Isto se deve ao fato de que o patamar tecnológico humano atual não prevê soluções, ainda, para as limitações conceituais dos modelos de geradores eólicos.

Um gerador eólico trabalha sobre a ideia da conversão de energia cinética em mecânica. Se toda a energia cinética fosse convertida em mecânica, as moléculas

atingiriam velocidade zero no disco atuante, que atuaria como um sorvedouro permanente, contradizendo a lei da conservação da massa.

O coeficiente de potência é definido, portanto, como a razão entre a potência extraível em relação à total intrínseca ao vento:

$$C_p = \frac{\text{potência extraída}}{\text{potência disponível}} \quad (11)$$

Simultaneamente, estabelece-se:

$$\text{potência extraída} = (p_d^+ - p_d^-) A_d U_d \quad (12)$$

$$\text{potência disponível} = \frac{\partial m}{\partial t} \left(\frac{U_\infty^2}{2} \right), \quad \frac{\partial m}{\partial t} = \rho U_\infty A_d \quad (13)$$

Onde $\frac{\partial m}{\partial t}$ representa a vazão mássica. E conjuntamente às equações 3, 5 e 10, obtém-se:

$$C_p = \frac{\rho U_\infty^3 A_d 2a(1-a)^2}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^3 A_d} \quad (14)$$

Simplificando a expressão acima, chega-se ao seguinte resultado:

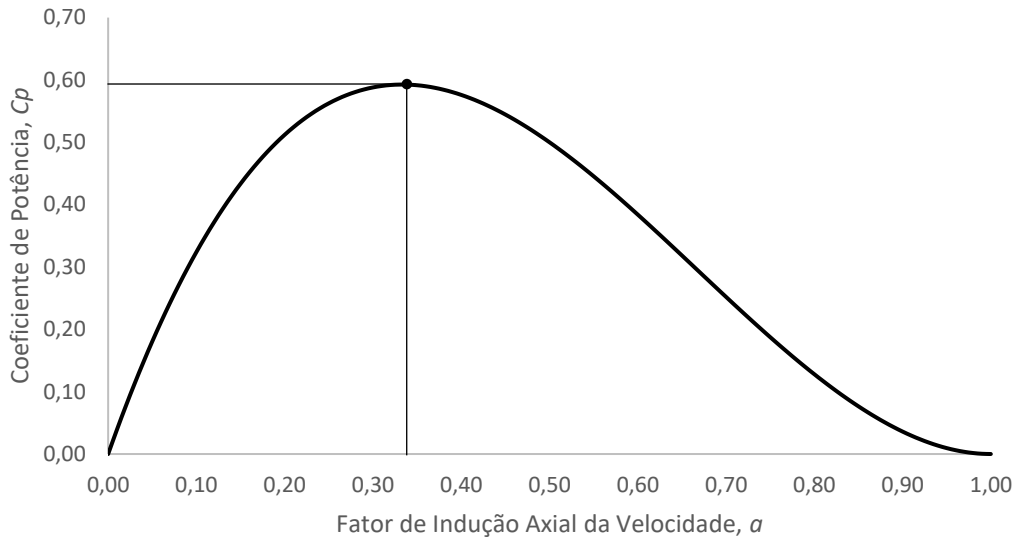
$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (15)$$

Está definido, assim, o coeficiente de potência em função exclusivamente do fator de indução axial da velocidade.

2.2.2 Limite de Betz

Realizando o *plot* gráfico do coeficiente de potência em função do fator de indução axial da velocidade, percebe-se uma função polinomial com um ponto de máximo em sua concavidade negativa.

Figura 8: Representação gráfica do coeficiente de potência em função do fator de indução



axial da velocidade

Fonte: o autor

Este valor máximo pode ser determinado pelo ponto onde uma reta tangente apresenta inclinação zero, obtida pela derivada de C_p quando nula:

$$\frac{\partial C_p}{\partial a} = 0 \therefore a = 1/3 \quad (16)$$

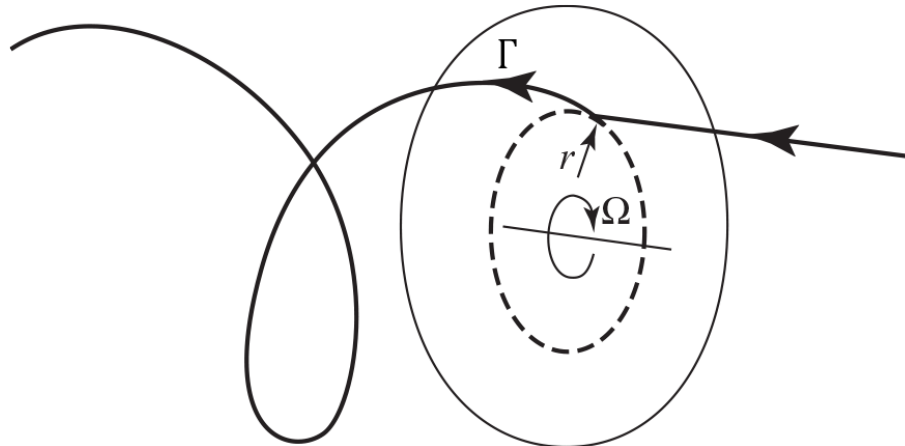
$$C_p (a = 1/3) = C_{p_{máx}} = 16/27 \quad (17)$$

O valor máximo de C_p seria, portanto, aproximadamente 59,3%. Este valor é conhecido como o *Limite de Betz*.

2.2.3 Teoria do Momento Incluindo a Rotação

A teoria do momento apresentada anteriormente desconsidera quaisquer efeitos de rotação na esteira de turbulência. No entanto, o rotor também induz uma variação incremental no momento angular do escoamento na esteira de turbulência, reduzindo a potência máxima extraível do tubo de escoamento (VERMEER, 2003).

Figura 9: Ilustração da rotação na esteira de turbulência



Fonte: adaptado de BURTON (2001)

Essa rotação induzida, Γ , no escoamento à jusante do disco atuante ocorre pelo movimento rotativo das pás e, para manter o equilíbrio, esta rotação deve ser contrária ao sentido do torque no rotor.

Analogamente ao fator de indução axial da velocidade, pode-se avaliar a velocidade da esteira de turbulência no bordo de fuga como uma superposição à velocidade tangencial Ωr do elemento de pá. Esta superposição leva em consideração o fator de indução tangencial a' , fornecendo:

$$\Gamma = 2a'\Omega \quad (18)$$

Entretanto, a fim de se realizar as devidas manipulações algébricas, faz-se também necessário introduzir dois novos parâmetros definidos pela razão entre a velocidade tangencial do elemento de pá e a velocidade axial da corrente livre, estes são a *razão de velocidade local*, λ_r , e a *razão de velocidade de ponta de pá*, λ :

$$\lambda_r = \frac{\text{velocidade tangencial local}}{\text{velocidade axial da corrente livre}} = \frac{\Omega r}{U_\infty}, \quad r \in [r_0; R] \quad \therefore \quad \lambda = \frac{\Omega R}{U_\infty} \quad (19)$$

O torque no rotor, Q , pode ser então expresso como o produto da vazão mássica com a variação da velocidade tangencial a uma distância r do centro:

$$\partial Q = \partial \dot{M}(\Gamma r)r = (\rho U_a 2\pi r dr)(\Gamma r)(r) \quad (20)$$

Combinando com 3 e 18, simplifica-se a expressão acima:

$$\delta Q = (2a'\Omega r^2)\rho U_\infty(1-a)2\pi r dr \quad (21)$$

Considerando a equação 11 na forma diferencial:

$$\delta C_p = \frac{\delta P}{\delta P_\infty} = \frac{\Omega \delta Q}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^3 \pi R^2} \quad (22)$$

Substituindo δQ e simplificando novamente:

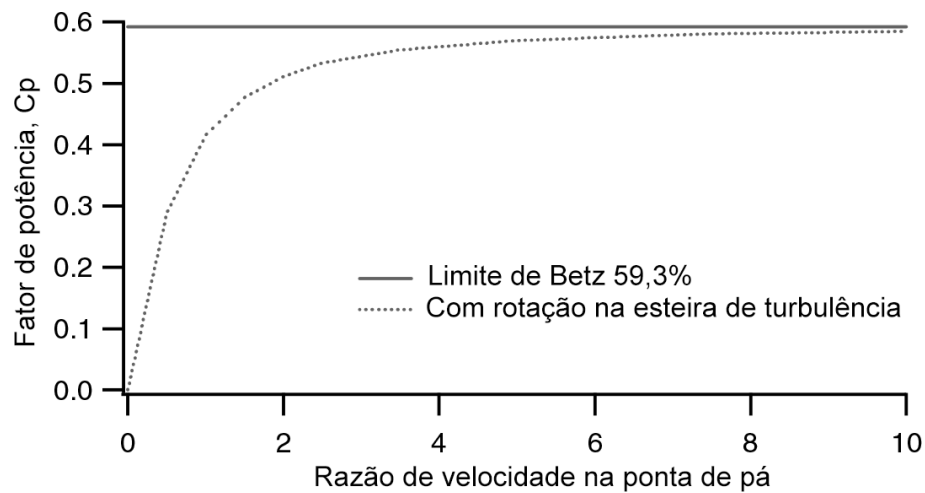
$$\frac{\partial C_p}{\partial r} = \frac{8a'(1-a)}{R^2} \lambda_r^2 r \quad (23)$$

Ultimamente, unindo as equações acima e fazendo algumas manipulações se obtém:

$$\frac{\partial C_p}{\partial \mu} = 8a'(1-a)\lambda^2 \mu^3, \quad \mu = r/R \quad (24)$$

Com isto, pode-se avaliar o comportamento do coeficiente de potência considerando a rotação na esteira de turbulência, assim como os fatores de indução axial e tangencial em relação à posição radial relativa no rotor.

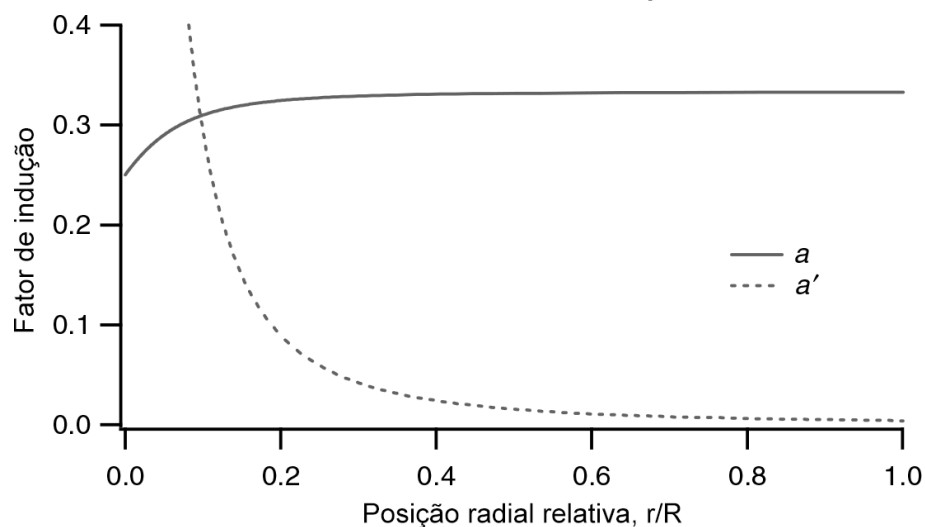
Figura 10: Ilustração das diferenças do coeficiente de potência considerando, ou não, a



rotação na esteira de turbulência
Fonte: adaptado de MANWELL (2009)

A Figura 10 ilustra o novo limite do coeficiente de potência considerando a rotação na esteira de turbulência.

Figura 11: Ilustração dos fatores de indução em função da posição radial relativa no rotor



Fonte: adaptado de MANWELL (2009)

Adicionalmente, o comportamento sobreposto dos fatores de indução axial e tangencial é apresentado na Figura 11. Percebe-se que esta rotação infere uma redução no coeficiente de potência calculado por Alfred Betz, pois parte da energia cinética do escoamento será convertida em momento angular da esteira de turbulência ao invés de ser absorvida pelo gerador, ainda que a velocidade angular induzida, Γ , seja diminuta em relação à do rotor, Ω (BURTON, 2001).

2.3 CARACTERIZAÇÃO DE UM PERFIL DE AEROFÓLIO

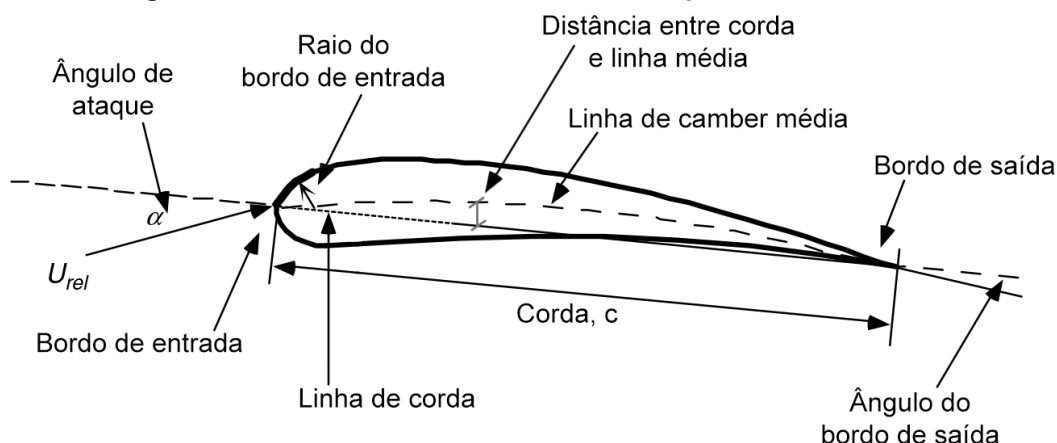
Aerofólios são elementos estruturais cujo propósito é de gerar forças mecânicas resultantes do movimento relativo de um fluido em seu perímetro. Em um gerador eólico, essas forças são usadas para armazenar e converter energia mecânica em elétrica, a qual poderá ser destinada para outra aplicação qualquer.

Torna-se importante, portanto, conhecer as partes de um aerofólio que definem suas propriedades aerodinâmicas:

- Raio do bordo de ataque;
- Corda (c);
- Linha média, ou *camber*;
- Distância entre a linha de corda e a linha média;
- Ângulo de ataque (α).

As partes principais de um aerofólio são ilustradas na sequência.

Figura 12: Ilustração de um aerofólio e suas partes interessantes

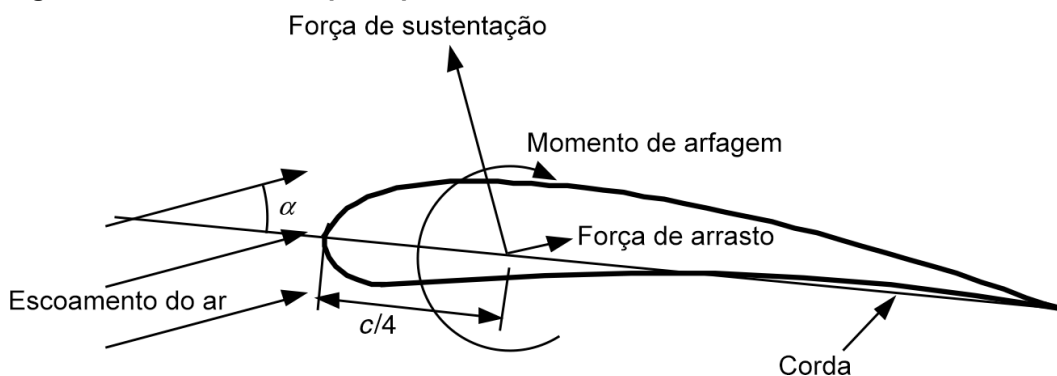


Fonte: adaptado de MANWELL (2009)

O princípio de funcionamento de um aerofólio está diretamente ligado à diferença de velocidades nas partes superior e inferior. Retomando a equação de Bernoulli (equação 6) e o princípio da reciprocidade nos campos de pressão e velocidade (equação 1), uma diferença de velocidade implica uma diferença de pressão. Esta diferença é responsável pela força de sustentação.

Sob outra análise, as forças de arrasto podem ser justificadas pelas forças viscosas cisalhantes na interface do aerofólio com o escoamento somada à força de pressão estagnação no bordo de ataque.

Figura 13: Ilustração das principais forças e momentos atuantes sobre um aerofólio

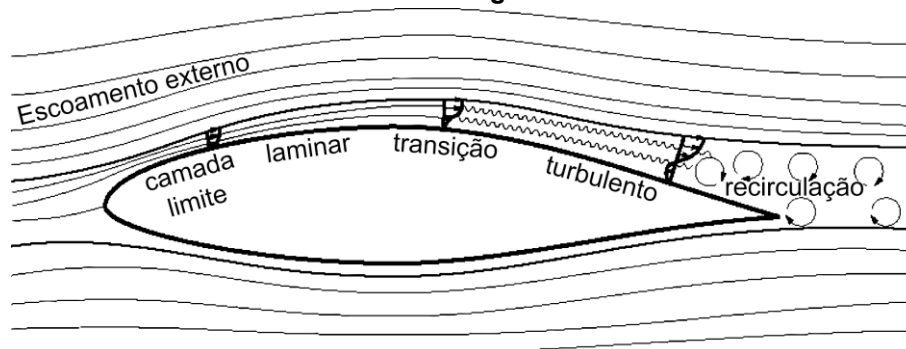


Fonte: adaptado de MANWELL (2009)

O centro de atuação das forças geralmente está localizado a uma distância $c/4$ do bordo de ataque, sobre a linha da corda. Neste mesmo ponto, seu centroide aerodinâmico, atua-se o momento de arfagem.

Aerodinamicamente, a grande maioria dos aerofólios utilizados em geradores eólicos são classificados como *aerofólios laminares*. Estes aerofólios são caracterizados por apresentarem baixíssimo coeficiente de arrasto para uma ampla faixa de ângulos de ataque (HAU, 2013).

Figura 14: Ilustração de escoamento sobre perfil de aerofólio, considerando o fluxo no bordo de entrada em regime laminar



Fonte: adaptado de HAU (2013)

Aerofólios laminares permitem maior eficiência na conversão energética, pois uma parte significativamente menor da energia intrínseca ao vento não é perdida em correntes advectivas da zona turbulenta. No entanto, aerofólios laminares têm tolerâncias geométricas e superficiais muito mais restritas, tornando o processo fabril mais complexo e custoso. A Figura 14 traz uma ilustração do desenvolvimento da camada limite na parte superior de um perfil de aerofólio, incluindo as zonas laminares, de transição e turbulenta.

Os aerofólios mais comuns da aviação se encontram compilados em catálogos. Os primeiros desenvolvimentos sistemáticos na aviação tomaram parte no início do século XX no instituto germânico de pesquisa – *Aerodynamische Versuchsanstalt* – em Göttingen. No entanto, ainda que outras instituições tenham séries de perfis de aerofólios também catalogados, grande parte dos aerofólios utilizados atualmente são da série NACA estadunidense (*National Advisory Committee for Aeronautics*).

Os catálogos de aerofólios fornecem pontos sobre os quais se pode desenhar a geometria por interpolação tipo *spline*, assim como possivelmente os coeficientes de arrasto e sustentação para uma faixa de números de Reynolds e ângulo de ataque.

Se forem dispostas apenas os pontos para construção geométrica, os coeficientes podem ser estipulados por simulação computadorizada, ainda que dados empíricos tenham uma precisão e confiabilidade muito mais pronunciada.

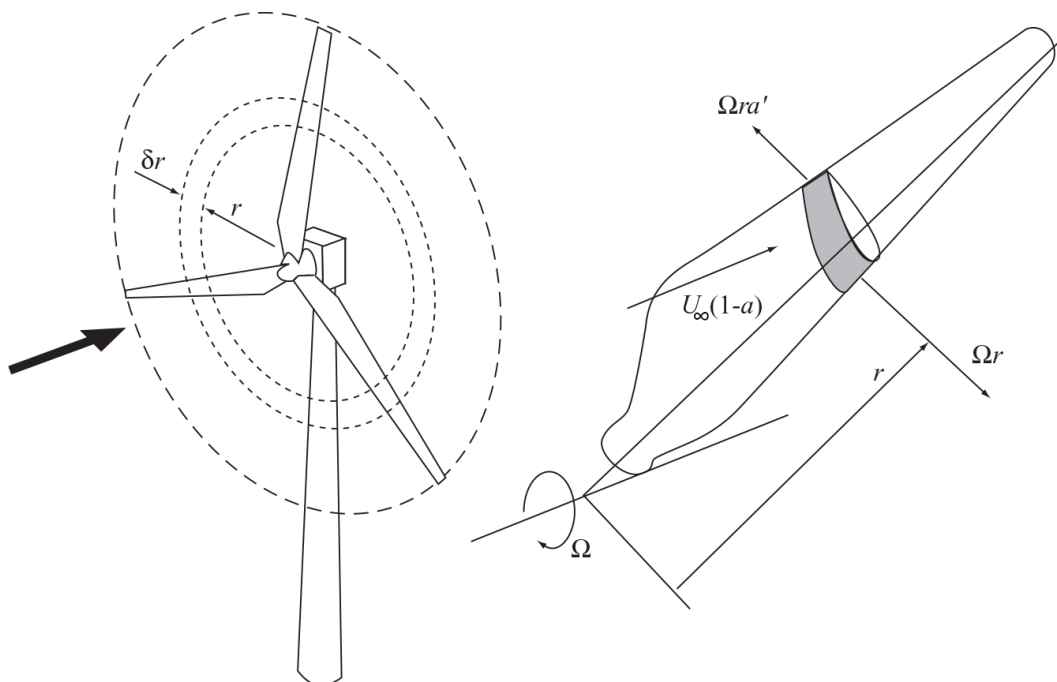
2.4 TEORIA DO ELEMENTO DE PÁ

A Teoria do Elemento de Pá – BET, *Blade Element Theory* – traz uma forma simplificada de analisar os fenômenos aerodinâmicos que ocorrem instantaneamente na interação do escoamento fluídico com a pá do gerador em função da localização ao longo de seu *span*.

A teoria toma como hipótese fundamental a ideia de que cada seção anular não interage com as adjacentes, aceitável para pequenas variações do fator de indução axial da velocidade ao longo da pá (BURTON, 2001).

De acordo com esta teoria, subdivide-se o rotor em seções diferenciais anulares e, portanto, as pás do gerador em seções bidimensionais que refletem o perfil do aerofólio em certa localização ao longo do comprimento da pá.

Figura 15: Ilustração da perspectiva de análise segundo a teoria do elemento de pá



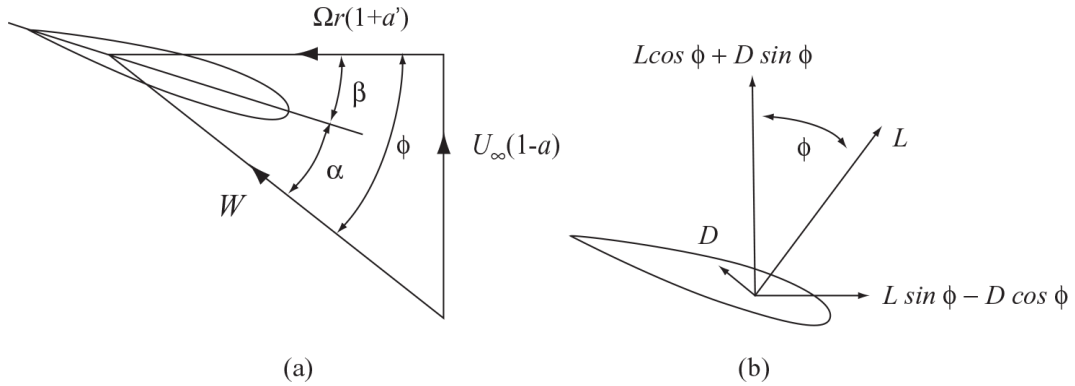
Fonte: adaptado de BURTON (2001)

Tomando-se um elemento de pá com um ângulo de inclinação β e ângulo de ataque α , o ângulo ϕ entre a velocidade relativa W e a corda do aerofólio pode ser expresso como:

$$\phi = \alpha + \beta \quad (25)$$

Unindo-se os efeitos de geometria da pá com a direção do escoamento de corrente livre – assumida, aqui, como puramente axial em relação ao rotor – é possível desenvolver o triângulo de velocidades para um elemento de pá.

Figura 16: Ilustração do triângulo de velocidades em um elemento de pá. À esquerda (a) vislumbram-se as velocidades e, à direita (b), as forças resultantes



Fonte: adaptado de BURTON (2001)

A inclinação ϕ toma espaço a partir do instante que o rotor entra em movimento. Quanto maior a velocidade angular Ω do rotor, maior a inclinação ϕ , que pode ser definida como:

$$\phi = \text{sen}^{-1} \left[\frac{U_{\infty}(1-a)}{W} \right] = \text{cos}^{-1} \left[\frac{\Omega r(1+a')}{W} \right] \quad (26)$$

Simultaneamente, a velocidade relativa W também pode ser escrita como:

$$W = \sqrt{U_{\infty}^2(1-a)^2 + \Omega^2 r^2(1-a')^2} \quad (27)$$

Finalmente, os esforços de arrasto e sustentação são também calculados:

$$\delta L = \frac{1}{2} \rho W^2 C_L c \delta r \quad (28)$$

$$\delta D = \frac{1}{2} \rho W^2 C_D c \delta r \quad (29)$$

Onde C_L e C_D são os coeficientes de sustentação e arrasto, respectivamente, os quais têm base empírica ou provêm de simulações e métodos numéricos (HANSEN, 2008).

2.5 TEORIA DO MOMENTO DE ELEMENTO DE PÁ

A Teoria do Momento de Elemento de Pá – BEMT, *Blade Element Momentum Theory* – é um amálgama da teoria do elemento de pá (BET) e a teoria do momento (MT).

Esta teoria combina as características do campo de escoamento e as propriedades aerodinâmicas das pás do rotor em funções singulares que fornecem as forças resultantes e, por fim, a eficiência da turbina estudada (DESHMUKH, 2016).

No entanto, cabe ressaltar que as equações resultantes não têm solução analítica, visto que os coeficientes de arrasto e sustentação são obtidos empiricamente ou são aproximados por simulação computadorizada (DEILMANN, 2008).

A hipótese básica da BEMT é a de que quaisquer esforços ocasionados às pás do gerador são provenientes da alteração no momento do escoamento do ar que cruza a área diferencial anular do disco do rotor, varrida pelo elemento de pá. É tomada como aceitável, também, a hipótese da independência radial entre anéis adjacentes, não obstante raramente o fator de indução axial ser uniforme (BURTON, 2001).

Combinando as equações da BET com a conservação do momento linear e angular, busca-se obter expressões para os fatores de indução axial e tangencial nas pás de acordo com os esforços resultantes do triângulo de velocidades. Ao realizar este cálculo, chega-se aos seguintes resultados (BURTON, 2001):

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma_r}{4 \sin^2 \phi} \left[C_x - \frac{\sigma_r}{4 \sin^2 \phi} C_y \right] \quad (30)$$

$$\frac{a}{1+a'} = \frac{\sigma_r C_y}{4 \sin \phi \cos \phi} \quad (31)$$

Onde σ_r é a solidez de corda, e C_x e C_y são formas simplificadas de representar a influência dos coeficientes de sustentação e arrasto, conforme segue:

$$\sigma_r = \frac{Nc}{2\pi r} \quad (32)$$

$$C_x = C_D \sin \phi + C_L \cos \phi \quad (33)$$

$$C_y = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi \quad (34)$$

Onde N é o número de pás. Entretanto, estudos realizados acerca do tema argumentam que a parcela contribuinte do coeficiente de arrasto é irrisória e que não afeta a queda de pressão através do disco do rotor (WILSON e LISSAMAN, 1974). Isto abre janela para grande simplificação das equações 30 e 31, que podem ser reescritas como:

$$a = \frac{\sigma_r C_L \cos \phi}{1 + 4 \sin^2 \phi} \quad (35)$$

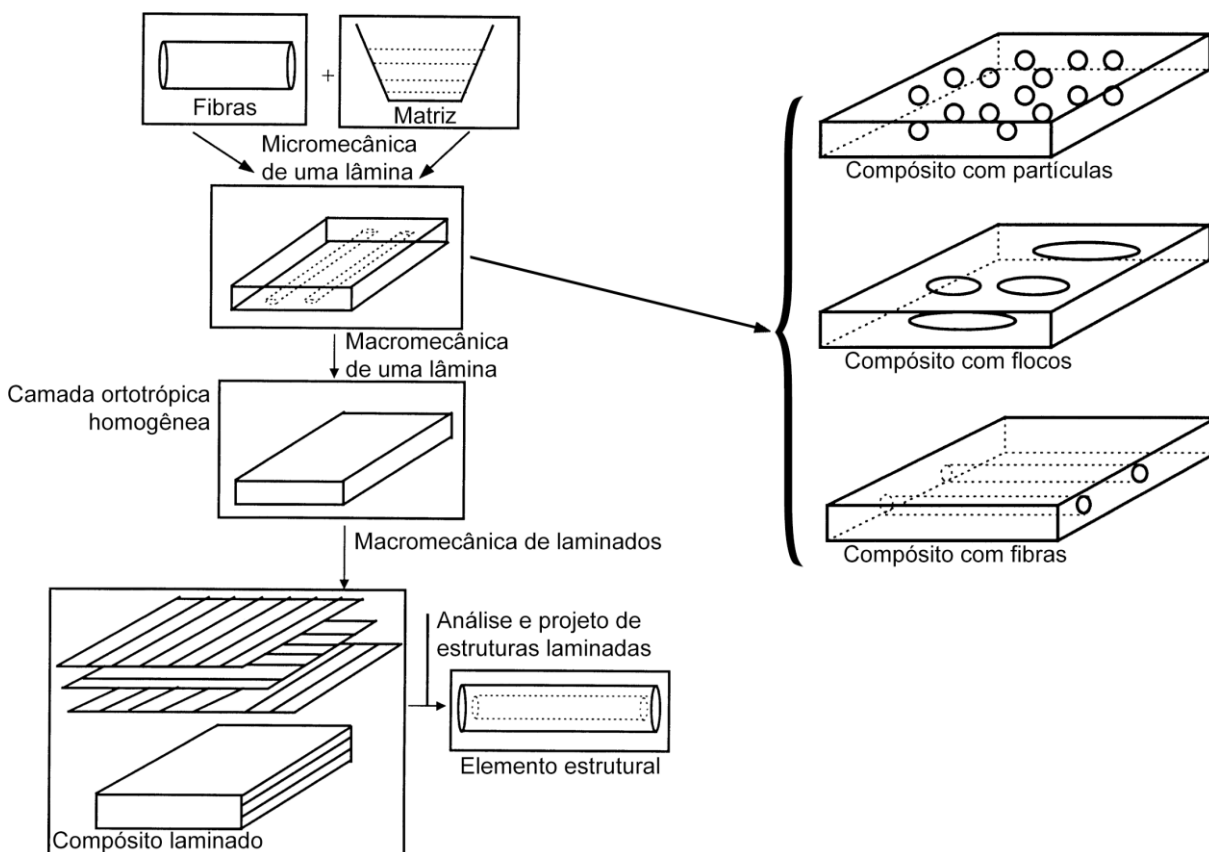
$$a' = \frac{1}{\frac{4 \cos \phi}{\sigma_r C_L} - 1} \quad (36)$$

O erro induzido pela simplificação do coeficiente de arrasto se torna muito pequeno para razões de velocidade de ponta de pá, λ , superiores a 3 (BURTON, 2001).

2.6 MATERIAIS COMPÓSITOS LAMINADOS

Dada uma aplicação, a seleção de materiais geralmente é baseada em suas propriedades ou características que podem ser de importância crítica ou secundária ao projeto (EAGAR, 1991). Um material compósito consiste de dois ou mais constituintes, combinados em escala macroscópica e insolúveis relativamente um ao outro. Estes constituintes podem ser separados entre o material resistente, ou fase dispersa, e a matriz, ou fase envolvente. A fase dispersa pode ser formada por fibras, partículas ou flocos, enquanto que a matriz é geralmente contínua (KAW, 2006).

Figura 17: Ilustração das três principais categorias de compósitos



Fonte: adaptado de KAW (2006)

De acordo com os estudos sobre resistência dos materiais, define-se a deflexão axial, δ , de uma barra como:

$$\delta = \frac{P_x L}{AE} \quad (37)$$

Onde P_x seria a carga axial aplicada; L , o comprimento da barra; A , a área da seção transversal; e E , o módulo elástico de Young. Simultaneamente, a massa, m , pode ser definida como:

$$m = \rho AL \quad (38)$$

Onde ρ é a densidade do material. Combinando as duas equações, pode-se reescrever a função da massa como:

$$m = \frac{P_x L^2}{4} \frac{1}{E/P_x} \quad (39)$$

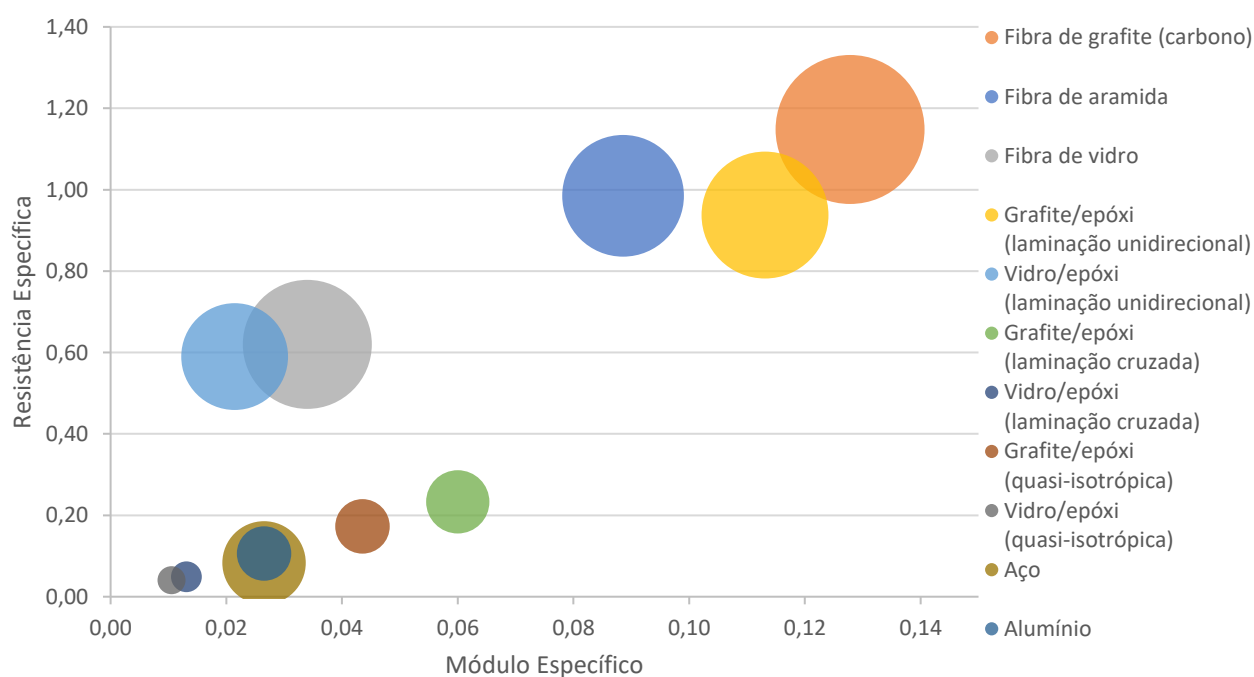
Isto fornece dois parâmetros de análise e caracterização do material de trabalho, definido como *resistência específica* e *módulo específico*:

$$\text{Módulo específico} = \frac{E}{\rho} \quad (40)$$

$$\text{Resistência específica} = \frac{\sigma_{ut}}{\rho} \quad (41)$$

Onde σ_{ut} é o limite de resistência do material. Estes parâmetros desenvolvem grande interesse à visão da engenharia, pois, preservando a massa, quanto maior o módulo específico, maior a capacidade do material em absorver energia perante dada deformação (enquanto elástica) e; quanto maior a resistência específica, maior sua capacidade de suportar certo esforço antes da ruptura ou falha (DOWLING, 2013).

Figura 18: Projeção gráfica dos módulos e resistência específicos de materiais diversos



Fonte: adaptado de KAW (2006)

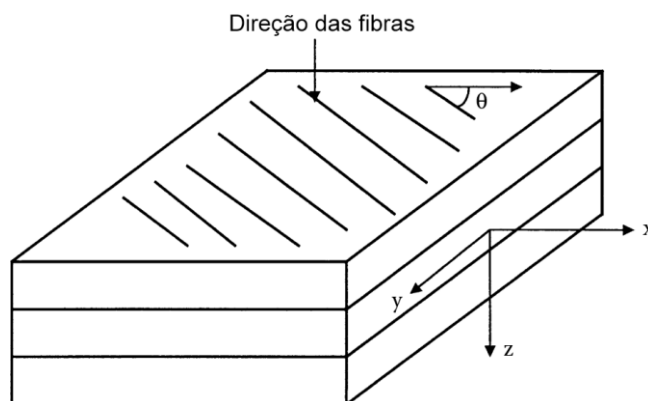
A Figura 18 apresenta os módulos e resistências específicas de cada material de acordo com sua posição no gráfico, onde os diâmetros se referem aos respectivos

limites de resistência. Com isso, percebe-se que em face a materiais clássicos como o aço ou alumínio, os materiais compósitos de fato apresentam maiores resistências e módulos específicos, tornando-os extremamente interessantes para aplicações onde se almeja massa reduzida.

2.6.1 Nomenclatura e Codificação de Laminados

Compósitos laminados podem ser representados com uma designação específica, a qual informa a sequência e direção de laminação em cada camada. Por padrão, toma-se a primeira camada como a de referência na face superior do laminado. Assim sendo, as aplicáveis designações tomarão como referência, primeiramente, sempre a camada superior no laminado.

Figura 19: Ilustração da direção e contagem das lâminas em um laminado



Fonte: adaptado de KAW (2006)

A Figura 19 apresenta a referência na direção de laminação, nota-se que o eixo z cresce positivamente na direção abaixo do laminado. Visando sumarizar rapidamente as nomenclaturas aplicáveis, a Tabela 3 apresenta alguns exemplos específicos:

Tabela 3 – Codificação de compósitos laminados

(continua)

Disposição das lâminas	Codificação	Comentário
0	[0/- 45/90/60/30]	Codificação padrão, cada número remete ao ângulo de laminação das lâminas
-45		
90		
60		
30		

Tabela 3 – Codificação de compósitos laminados

		(conclusão)	
0	$[0/-45/90_2/60/0]$	Codificação padrão, exceto pelo subscrito no terceiro número, implicando que esta camada é posta sequencialmente em duplicidade	
-45			
90			
90			
60			
0			
0	$[0/-45/60]_S$	Codificação padrão para laminados simétricos com número par de camadas, onde a camada central é disposta em duplicidade.	
-45			
60			
60			
-45			
0			
0	$[0/-45/\overline{60}]_S$	Codificação padrão para laminados simétricos com número ímpar de camadas (nota-se a barra sobre o último número), onde a camada central se dispõe uma única vez	
-45			
60			
-45			
0			
0			
Grafite/epóxi	0	$[0^{Gr}/\pm 45^B]_S$	Codificação com designação dos materiais distintos de cada lâmina. A denotação ± 45 implica que as lâminas são alternadas entre $+45^\circ$ e -45°
Boro/epóxi	45		
Boro/epóxi	-45		
Boro/epóxi	-45		
Boro/epóxi	45		
Grafite/epóxi	0		

Fonte: adaptado de KAW (2006) e NETTLES (1994)

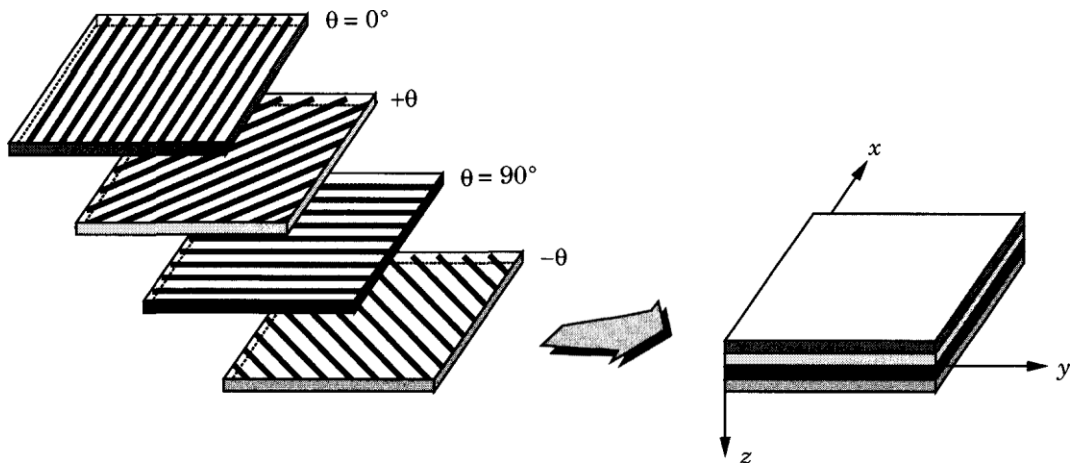
Dessa forma, ao se selecionar a configuração do laminado a ser utilizado neste estudo, sua designação é informada de acordo com a Tabela 3.

2.6.2 Sequência de Laminação e Anisotropia

Tendo em vista a utilização de materiais ortótropos para fabricação das pás do gerador, busca-se atingir este objetivo com a utilização de materiais compósitos laminados.

Considerando que cada lâmina é formada por uma fase dispersa e uma matriz envolvente, seu comportamento mecânico é diferente em cada direção. Este fenômeno é descrito pelo grau de anisotropia do material, o qual pode ser classificado de acordo com o número de planos de simetria na microestrutura do material. Materiais ortotrópicos têm dois planos de simetria e, portanto, apresentam comportamento mecânico diferente em duas direções (KAW, 2006).

Figura 20: Ilustração de um material compósito laminado com orientações laminares distintas



Fonte: adaptado de REDDY (2003)

Ao variar a sequência e laminação, tendo conhecimento do comportamento de cada lâmina, pode-se estipular o comportamento final do material laminado.

2.6.3 Análise Macro Mecânica de Uma Lâmina

A caracterização de um material completamente anisotrópico e com comportamento não linear é extremamente complexo. A matriz de rigidez de um material neste grau de complexidade pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (42)$$

Onde σ representam as tensões normais, τ as tensões cisalhantes, ε as deformações normais e γ as deformações de cisalhamento. As variáveis C_{ij} são os elementos da matriz rigidez, $[C]$, as quais constituem 36 variáveis desconhecidas e 6 equações distintas.

No entanto, uma vez assumida a hipótese de linearidade no acoplamento tensão-deformação (Lei de Hooke), algumas manipulações podem ser realizadas para simplificar o modelo matemático (NETTLES, 1994).

Tomando a matriz $[C]$ da equação 42 como referência, pode-se escrevê-la como:

$$\sigma_i = \sum_{j=1}^6 C_{ij} \varepsilon_j, \quad i = 1 \dots 6 \quad (43)$$

Onde, por uma questão de simplificação, *sigma* quatro, σ_4 , a *sigma* seis, σ_6 , representam as tensões cisalhantes *tal*, τ ; similarmente, *épsilon* quatro, ε_4 , a *épsilon* seis, ε_6 , representam as deformações de cisalhamento *gamma*, γ .

Considerando que a energia de deformação armazenada no material por unidade de volume, W_ε , pode ser expressa como:

$$W_\varepsilon = \frac{1}{2}(\sigma_1\varepsilon_1 + \sigma_2\varepsilon_2 + \sigma_3\varepsilon_3 + \tau_{23}\gamma_{23} + \tau_{31}\gamma_{31} + \tau_{12}\gamma_{12}) \quad (44)$$

Reescreve-se:

$$W_\varepsilon = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^6\sum_{j=1}^6 C_{ij}\varepsilon_j \varepsilon_i \quad (45)$$

A expressão acima pode ser reformulada na forma diferencial:

$$\frac{\partial W_\varepsilon}{\partial \varepsilon_i \partial \varepsilon_j} = C_{ij} \text{ ou } \frac{\partial W_\varepsilon}{\partial \varepsilon_j \partial \varepsilon_i} = C_{ji} \quad (46)$$

No entanto, tendo em mente a propriedade de simetria em derivadas de segunda ordem:

$$C_{ij} = C_{ji} \quad (47)$$

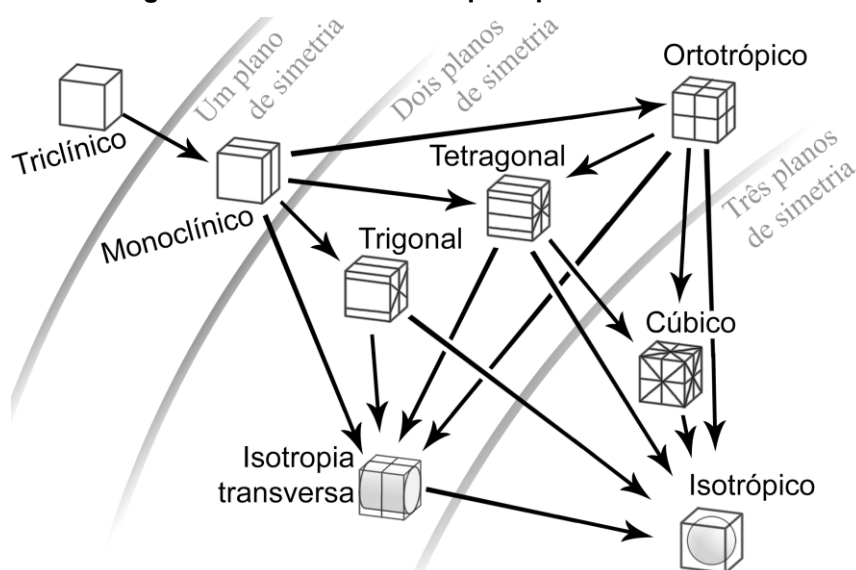
Assim, a matriz da equação 42 pode ser reescrita como:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (48)$$

Onde os itens simplificados na matriz foram destacados em cinza. Com isso, reduz-se o número total de variáveis independentes para 21 (vinte e uma).

2.6.3.1 Anisotropia de uma lâmina

Um material linearmente elástico pode ainda apresentar respostas de deformação diferentes em direções distintas, dependendo do seu grau de isotropia. Essa característica é definida de acordo com os planos de simetria de seu comportamento mecânico, tomando como referência um sistema de coordenadas cartesiano (COWIN, 2013).

Figura 21: Grau de anisotropia e planos de simetria

Fonte: adaptado de COWIN (2013)

A Figura 21 apresenta brevemente uma relação entre o número de planos de simetria e os tipos e graus de isotropia de um material.

Naturalmente, quanto maior a isotropia de um material, menos complexa será sua modelagem matemática. Isto é, mais simplificada será sua matriz de rigidez representativa. A Tabela 4 abaixo apresenta sucintamente o número de variáveis independentes da matriz de rigidez para alguns tipos de materiais, conservando a hipótese de elasticidade linear.

Tabela 4 – Tipos de isotropias e algumas de suas características

Tipo de material	Simetria	Variáveis independentes na matriz de rigidez
Anisotrópico	Zero	21
Monoclínico	Um plano	13
Ortotrópico	Dois planos	9
Isotrópico transverso	Simetria axial, dois planos	5
Isotrópico	Simetria esférica, três planos	2

Fonte: adaptado de KAW (2006)

Com isso, pode-se perceber o quanto a isotropia influencia na complexidade da resolução do problema matemático que descreve o comportamento de um dado material.

2.6.3.2 Matriz de rigidez para uma lâmina ortotrópica

Grande parte dos compósitos laminados utilizados atualmente em processos produtivos, que sejam viáveis economicamente e com bom desempenho mecânico, são ortotrópicos. Incluem-se aqui compósitos com fibras longas unidirecionais ou com fibras curtas unidirecionais ou cruzadas (ortogonais).

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (49)$$

A equação 49 apresenta a matriz de rigidez para um material ortotrópico em três dimensões. No entanto, tomando a hipótese de um estado plano de tensões em uma lâmina delgada, pode-se reescrever:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (50)$$

Onde os elementos Q_{ij} são os constituintes a matriz de rigidez reduzida, $[Q]$. Esses elementos podem ser reescritos em função das propriedades mecânicas do material (KAW, 2006):

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1-\nu_{21}\nu_{12}} \quad (51)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{21}\nu_{12}} \quad (52)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1-\nu_{21}\nu_{12}} \quad (53)$$

$$Q_{66} = G_{12} \quad (54)$$

Onde E é o módulo elástico de Young, ν é o coeficiente de Poisson e G o módulo de cisalhamento. Com isso, é possível obter a matriz de rigidez para cada lâmina a partir de suas propriedades mecânicas, as quais podem ser extraídas de tabelas e gráficos ou por ensaios experimentais.

2.6.3.3 Tensões locais e globais de uma lâmina ortotrópica

Conforme elaborado na seção 2.6.1, um compósito laminado pode variar a direção de suas lâminas. Com isso, torna-se necessário correlacionar as tensões locais e globais; isto é, na referência da lâmina e do laminado, respectivamente. Essas tensões podem ser correlacionadas a partir do ângulo da lâmina, θ .

Tomando como hipótese um material linearmente elástico ortotrópico, as tensões locais e globais podem ser associadas da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (55)$$

Onde os subscritos numéricos representam as tensões locais e os alfabéticos, os globais; a matriz $[T]$ seria a matriz de transformação, escrita como:

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2sc \\ s^2 & c^2 & 2sc \\ sc & -sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix}, \quad \begin{cases} c = \cos \theta \\ s = \sin \theta \end{cases} \quad (56)$$

Se definirmos as tensões locais como o produto da matriz rigidez da lâmina com sua matriz deformação, podemos reescrever a equação 55 em função das deformações locais.

Após algumas manipulações matemáticas, obtém-se a matriz de rigidez transformada:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (57)$$

Onde os elementos \bar{Q}_{ij} são os constituintes da matriz de rigidez reduzida transformada, $[\bar{Q}]$. Esses elementos são escritos em função dos elementos da matriz de rigidez reduzida, $[Q]$, e funções trigonométricas do ângulo de laminação da lâmina, θ .

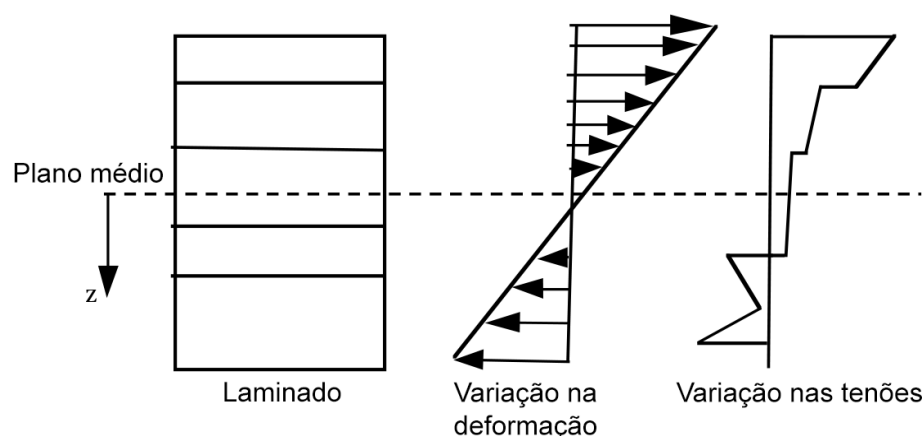
Isso implica que a matriz de rigidez transformada de cada lâmina pode ser escrita no sistema global de coordenadas fazendo uso apenas do ângulo de laminação e das propriedades mecânicas da lâmina.

2.6.4 Análise Macro Mecânica de um Laminado

Até então foram apresentadas as modelagens matemáticas para apenas uma lâmina específica. Tratando-se de um laminado como um todo, deve-se considerar o comportamento conjunto de todas as lâminas que compõem o material.

As relações de tensão e deformação em um laminado, devido às suas possíveis variações nos ângulos de laminação, podem ser diferentes em cada lâmina.

Figura 22: Representação das tensões e deformações em um laminado heterogêneo



Fonte: adaptado de KAW (2006)

A Figura 22 ilustra a distribuição de tensões em um laminado para uma deformação uniformemente distribuída. Como se pode perceber, ainda que mantendo comportamento linear em cada lâmina isoladamente, as tensões são inconstantes ao longo da seção transversal do laminado. Torna-se necessário, portanto, obter as tensões e deformações equivalentes para todo o laminado.

As tensões equivalentes podem ser obtidas através da matriz de rigidez transformada apresentada na seção 2.6.3.3. No entanto, para tal, é preciso ter em mãos as deformações no material em primeiro lugar. Isso pode ser feito a partir das propriedades do material e seus deslocamentos.

2.6.4.1 Deslocamentos e deformações em um laminado

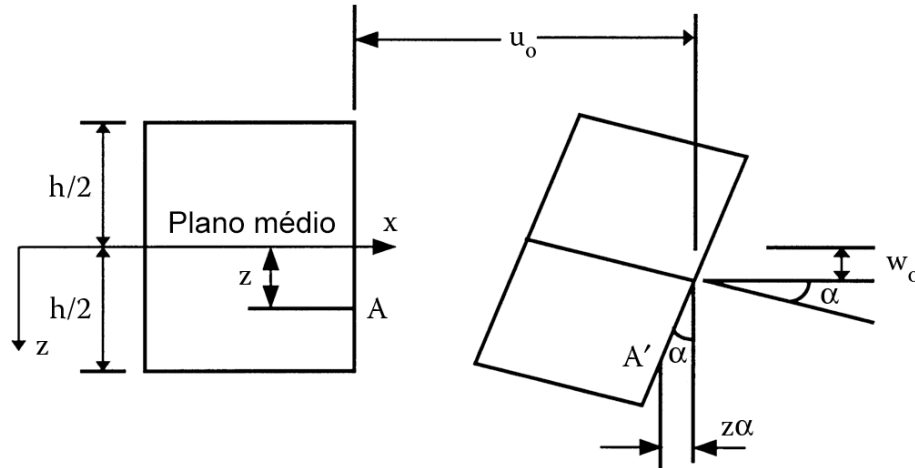
Preservam-se aqui as hipóteses de linearidade elástica e isotropia ortotrópica em cada lâmina. Acolá, considera-se também:

- a) Uma reta normal à superfície média permanece normal a ela, mesmo durante a deformação ($\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$);

- b) É assumido estado plano de tensões no laminado ($\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$);
- c) Os deslocamentos no material são irrisórios em face a sua espessura;
- d) Não ocorre deslizamentos entre as interfaces das lâminas.

Com isso, elabora-se uma análise geométrica no comportamento de um laminado em sua deformação:

Figura 23: Ilustração dos deslocamentos em um laminado genérico



Fonte: adaptado de KAW (2006)

A Figura 23 apresenta uma ilustração dos deslocamentos em um laminado, onde u_0 , v_0 e w_0 são os deslocamentos no plano médio e u , v , e w em qualquer ponto ao longo da espessura, tomando como referência o sistema de coordenadas global do laminado. Assim, pode-se concluir:

$$\alpha \approx \sin \alpha, \text{ se } \alpha \ll 1 \therefore u = u_0 - z\alpha \quad (58)$$

$$\alpha = \frac{\partial w_0}{\partial x} \therefore u = u_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (59)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{cases} \quad (60)$$

A equação 60 acima pode ser reescrita na forma matricial, fornecendo:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (61)$$

Considerando que se podem definir as deformações no material a partir de seu plano médio na forma:

$$[\varepsilon] = [\varepsilon_0] + z[\kappa] \quad (62)$$

Onde $[\kappa]$ é a matriz cujos elementos constituem as curvaturas do plano de deformação. Definem-se, portanto, as deformações do plano médio:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (63)$$

E as curvaturas do plano médio:

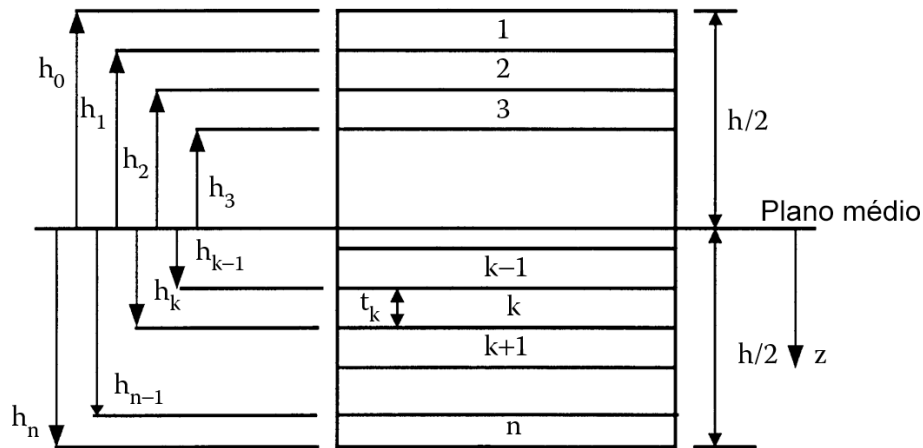
$$\begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (64)$$

Com isso, ficam estabelecidos os deslocamentos e deformações, assim como as curvaturas, no plano médio de um laminado.

2.6.4.2 Tensões em um laminado

As tensões no laminado podem ser computadas a partir dos esforços aplicados fazendo uso das deformações no plano médio e das matrizes de rigidez transformadas para cada lâmina. Com isto, somam-se as integrais das tensões em cada lâmina ao longo de suas respectivas espessuras.

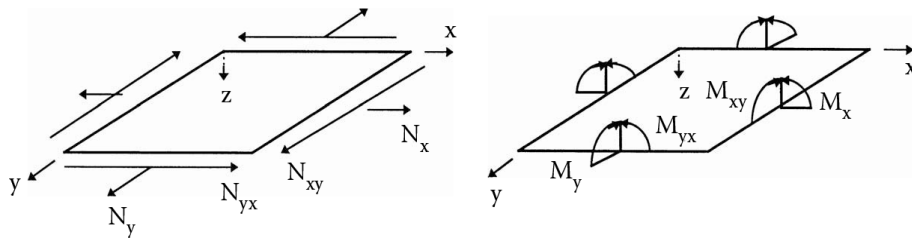
Figura 24: Representação das coordenadas e espessuras das lâminas em um laminado



Fonte: adaptado de KAW (2006)

A Figura 24 apresenta uma ilustração das lâminas e suas respectivas espessuras em um compósito laminado genérico. Em complementação, a Figura 25 traz uma representação das forças e momentos atuantes em uma lâmina.

Figura 25: Representação das forças e momentos atuantes em uma lâmina



Fonte: adaptado de KAW (2006)

Essas forças e momentos atuantes, segundo o algoritmo e hipóteses propostas, podem ser escritas como:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} dz \quad (65)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} z dz \quad (66)$$

Onde N e M são as forças e momentos equivalentes em uma lâmina, respectivamente. Considerando as hipóteses até então levantadas, as tensões no laminado seriam equivalentes ao somatório das tensões individuais em cada lâmina:

$$[N] = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}]_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} dz + \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}]_k \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} z dz \quad (67)$$

$$[M] = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}]_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} z dz + \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}]_k \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} z^2 dz \quad (68)$$

Vale notar que, nas equações 67 e 68 acima, as matrizes de rigidez são constantes para cada lâmina e as deformações e curvaturas no plano médio independem de z . Assim, podem-se reescrever as expressões acima:

$$[N] = \left\{ \sum_{k=1}^n [\bar{Q}]_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} dz \right\} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \left\{ \sum_{k=1}^n [\bar{Q}]_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \right\} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (69)$$

$$[M] = \left\{ \sum_{k=1}^n [\bar{Q}]_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \right\} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \left\{ \sum_{k=1}^n [\bar{Q}]_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z^2 dz \right\} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (70)$$

Simultaneamente, tomando como referência a Figura 24, percebe-se que:

$$\int_{h_{k-1}}^{h_k} dz = (h_k - h_{k-1}) \quad (71)$$

$$\int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz = \frac{1}{2} (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (72)$$

$$\int_{h_{k-1}}^{h_k} z^2 dz = \frac{1}{3} (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad (73)$$

Por fim, as tensões podem ser escritas em uma expressão única, levando em conta a configuração e composição do laminado juntamente aos esforços aplicados:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (74)$$

Onde a matriz de rigidez extensora $[A]$ relaciona os esforços no estado plano de tensões às deformações; a matriz de rigidez defletora $[D]$ os momentos às curvaturas e; a matriz de acoplamento $[B]$, destacada em cinza, representa o acoplamento entre forças e momentos ou deformações e curvaturas (NETTLES, 1994).

Com isso, pode-se estudar o acoplamento entre as deformações e deflexões provocadas em um material linearmente elástico ortotrópico, uma vez que os esforços aplicados sejam fornecidos.

2.7 SIMULAÇÃO COMPUTADORIZADA

Problemas envolvendo turbulência e fluidodinâmica representam um forte desafio à ciência e à engenharia há milênios, desde pelo menos os primeiros estudos realizados por Arquimedes de Siracusa na Era Clássica. Ainda assim, apenas muito recentemente a humanidade pode obter uma compreensão melhor do comportamento fluídico, em especial com o advento da tecnologia digital, que propiciou o uso de simulações computadorizadas.

2.7.1 Dinâmica dos Fluidos Computadorizada

CFD (*Computational Fluid Dynamics*) consiste na análise de sistemas envolvendo fluidodinâmica, transferência de calor e outros fenômenos como reações químicas por meio de simulação computadorizada (VERSTEEG, 1996). O objetivo último do campo da análise CFD é a compreensão dos eventos físicos que ocorrem ao redor e dentro de objetos designados (PULLIAM, 1999).

Uma análise CFD consiste em várias etapas, que envolvem: a preparação da geometria; discretização do domínio; estabelecimento de condições de contorno; critérios de convergência; dentre outras etapas mais, como toda a parte de pós processamento, análise e validação de dados. É importante manter em mente que uma simulação não substitui um ensaio real ou prototipagem. A análise CFD propõe uma mera ferramenta no auxílio ao desenvolvimento de novas tecnologias e produtos ou serviços. O maior fruto de seu exercício é sempre a maior compreensão do comportamento de um sistema, não obstante seus resultados serem por vezes questionáveis.

Por fim, os erros potencialmente induzidos pelas limitações na computação de métodos numéricos, para fins de engenharia, são permissíveis até certo patamar. Patamar, este, que deverá ser definido de acordo com os próprios objetivos e requisitos do problema a ser solucionado, assim como custo e tempo disponíveis para

conduzir a análise. O sucesso de uma simulação depende fortemente do discernimento e correta seleção das equações e modelos físicos baseados na especificação do problema em mãos (PULLIAM, 1999).

2.7.2 Configurações e Etapas de uma Simulação

Toda simulação é constituída por três partes principais: pré-processamento, resolução e pós-processamento. O pré-processamento envolve a inserção de variáveis, preparação de domínios e da estrutura de dados a ser utilizada. A resolução consiste no processamento desses dados, na execução dos métodos estabelecidos de acordo com as condições e parâmetros fornecidos. O pós-processamento pode ser descrito como a etapa de interpretação dos dados obtidos, os quais são submetidos à análise e validação.

2.7.2.1 Pré-processamento de dados

O pré-processamento consiste na preparação da geometria de análise e sua leitura e interpretação pelo programa. Sua correta execução é fatídica ao sucesso da simulação, seja em termos de convergência numérica ou de confiabilidade.

Dentre as principais tarefas associadas ao pré-processamento inclui-se a geração da malha, ou discretização do domínio. Uma malha eficiente consegue trazer resultados precisos com um menor custo computacional. Para atingir esse objetivo, um conhecimento prévio, ainda que especulativo, do comportamento do fluido toma papel importante na preparação da malha.

O estabelecimento das propriedades fluídicas e condições de contorno, assim como a modelagem de eventos físico-químicos que ocorrem no sistema estudado fazem parte do pré-processamento. Modelos de turbulência, definição da equação de energia, descrição de processos químicos (como em caso de câmaras de combustão), programação de malha adaptável; todas essas configurações fazem parte do rol de opções disponíveis na modelagem do sistema.

2.7.2.2 Processamento ou solução do problema

Grande parte dos códigos CFD utilizam o FVM (*Finite Volume Method*) como base para desenvolvimento de sua solução. O FVM surgiu paralelamente ao FEM e é um dos métodos mais bem estabelecidos e validados para o uso em CFD (VERSTEEG, 1996).

Este método consiste na integração formal das equações que regem o escoamento em todos os elementos do domínio, seguido dos processos de discretização (pela substituição e aproximação das variáveis nas equações primitivas obtidas em cada controle de volume) e solução ulterior das equações algébricas obtidas por iteração numérica (VERSTEEG, 1996).

Uma vez obtida a solução das equações algébricas, pode-se realizar a interpolação dos dados em cada elemento. Tendo em vista que essas interpolações não são necessariamente lineares, além de outros recursos como as opções de visualização dos dados (e.g. representações gráficas, escalas cromáticas, animações e preparação de imagens), essas funções são praticadas em outra etapa: a de pós-processamento.

2.7.2.3 Pós-processamento de dados

O pós-processamento de dados consiste na interpolação interelementos dos dados computados durante a solução do problema, juntamente a diversos outros recursos que auxiliam na visualização dos dados obtidos.

A etapa de pós processamento toma papel importantíssimo na validação e publicação dos dados e, assim como diversas ferramentas CAE que se beneficiaram com os avanços de processamento gráfico de computadores, os recursos de pós-processamento nos códigos CFD revolucionaram a comunicação de ideias com não especialistas (VERSTEEG, 1996).

3 METODOLOGIA

Tendo em vista o objetivo de comprovar a exequibilidade da utilização de materiais compósitos laminados ortotrópicos para a adaptação passiva do ângulo de arfagem nas pás de micro geradores eólicos, a metodologia do presente trabalho é dividida em cinco fases distintas, a saber:

- 1) Seleção do perfil de aerofólio e cálculo preliminar de suas propriedades aerodinâmicas;
- 2) Dimensionamento e construção da geometria da pá de acordo com alguns parâmetros de projeto, como configuração do rotor e potência almejada do gerador;
- 3) Definição das sequências de laminação do compósito visando construir dois modelos de estudo: um aerofólio laminado isotrópico, outro anisotrópico;
- 4) Computação das deformações da pá e efeitos do acoplamento flexo-torcional, no caso da pá anisotrópica, quando submetida aos esforços aerodinâmicos. Esta etapa é realizada para todas as pás;
- 5) Análise dos resultados e discussão.

Figura 26: Organograma do fluxo de trabalho vinculado à metodologia escolhida



Fonte: o autor

Todas as etapas pertinentes ao método aplicado são descritas em maiores detalhes nesta seção.

3.1 SELEÇÃO DO PERFIL DE AEROFÓLIO

O perfil de aerofólio para a construção do modelo da pá pode ser selecionado de acordo com diversos parâmetros ou objetivos. Tratando-se de um estudo envolvendo simulações computadorizadas se torna válida a seleção de um perfil com ampla disponibilidade de dados para construção do modelo matemático e validação.

Adicionalmente, as condições do escoamento têm forte influência no desempenho do perfil selecionado. Tendo em vista a aplicação almejada – i.e. microgeradores eólicos – e o mapa eólico brasileiro, considera-se um aerofólio projetado para baixos números de Reynolds. O número de Reynolds é formulado como:

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (75)$$

Onde μ é a viscosidade cinemática e L o comprimento característico de referência. Percebe-se que, mesmo variando os parâmetros de projeto, não se obteria uma diferença significativa em Re . Alterações na pá impactariam predominantemente no comprimento característico, pela corda do aerofólio, que varia com pequena amplitude e não traz mudanças significativas ao número de Reynolds; alternativamente, a velocidade do vento também não sofre variações proporcionalmente grandes o suficiente para justificar a escolha de outro perfil. Especialmente considerando uma zona de transição laminar-turbulenta em aproximadamente $Re = 5 \cdot 10^5$ (quinhentos mil), tomando como referência escoamentos externos em uma placa plana.

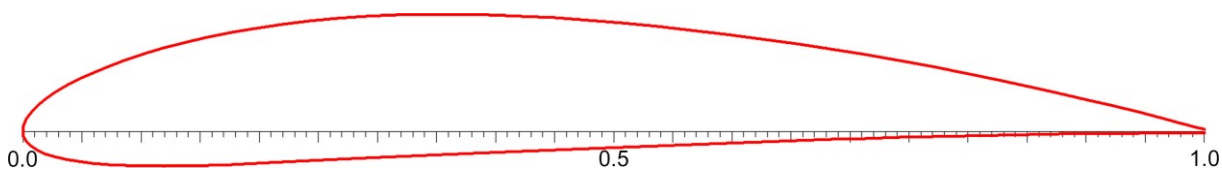
O perfil de aerofólio NACA 4412 é um perfil desenvolvido para escoamentos de baixo número de Reynolds. Complementarmente, os dados disponíveis para validação e comparação são relativamente abundantes, tanto ensaios laboratoriais como o *NACA Report No. 460*, quanto outras simulações e estudos comparativos são encontrados em repositórios acadêmicos e científicos. Seleciona-se, portanto, este perfil para a modelagem da pá.

3.2 CONSTRUÇÃO DA GEOMETRIA DA PÁ

Inicialmente, obtêm-se os parâmetros geométricos tridimensionais da pá segundo o BEMT em um programa escrito no Matlab (*Matrix Laboratory*) – desenvolvido pelo Professor Doutor Cláudio Tavares na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – e modelado no software QBlade.

O modelo tridimensional da pá é construído tendo como base o perfil NACA 4412; seus pontos de coordenadas são apresentados no ANEXO A. Com estes pontos, pode-se realizar uma interpolação tipo *spline* – onde as derivadas de primeira e segunda ordem se conservam entre cada segmento, o que garante uma superfície com curvaturas suaves –, pode-se traçar o perfil em um plano.

Figura 27: Ilustração do perfil NACA 4412 traçado por interpolação tipo *spline*



Fonte: o autor

A Figura 27 ilustra o perfil NACA 4412, a qual foi gerada no QBlade, software *open source* desenvolvido pelo Instituto Hermann Föttinger da Universidade Tecnológica Berlin (*Hermann Föttinger Institute, Technische Universität Berlin*).

Este software é utilizado para modelar e dimensionar a pá sob a hipótese de total rigidez e fazendo uso da teoria do momento de elemento de pá (BEMT). Uma análise FSI é conduzida na ferramenta ANSYS para computar os efeitos de acoplamento flexão-torção e avaliar o impacto em seu desempenho.

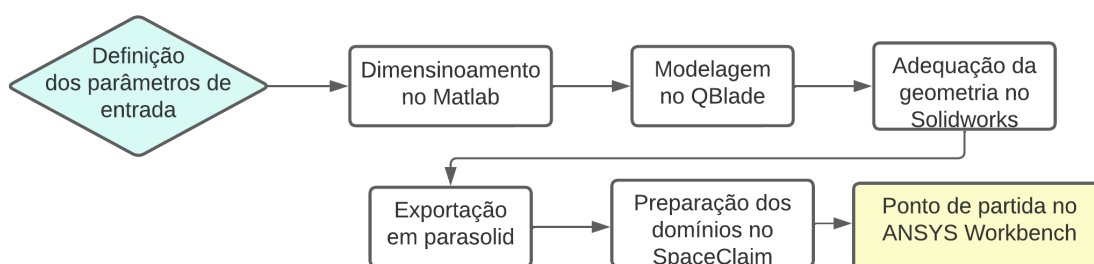
O dimensionamento da pá consiste na solução das equações do BEMT, as quais são apresentadas nas seções 2.4 e 2.5. Isto é realizado a partir do estabelecimento de algumas variáveis iniciais de projeto. As variáveis selecionadas são:

- Perfil de aerofólio (que deverá fornecer C_D e C_L);
- Razões de aspecto geométricos (comprimento de corda e *span*);
- A rotação dos elementos de pá ao longo do eixo longitudinal;
- A velocidade ótima teórica do vento e a razão de velocidades na ponta (λ);

Com essas variáveis, pode-se solucionar as equações (35), (36), (27), (26), (28) e (29). A solução dessas equações fornece uma nuvem de pontos juntamente a algumas outras variáveis de projeto – ditosamente as forças de sustentação e arrasto –, esta nuvem apresenta resultados que variam em $\{\phi \in [0,360)^\circ\}$ e valores fixos para a rotação do rotor, assumindo $\{\Omega = \lambda U_\infty / R, \lambda > 3\}$. O estudo pode ser conduzido em configurações distintas das variáveis de entrada, tanto em seus valores, quanto em seus parâmetros, contanto que o sistema de equações resultante disponha uma solução possível.

A geometria exportada a partir do QBlade é facetada e, visando manter maior fidelidade, a distribuição de elementos foi realizada na mesma proporção dos dados obtidos no Matlab. Com isto, o número elevado de facetas na geometria final torna a etapa de discretização dificultosa e com elevada demanda computacional. Um programa é desenvolvido em Python e VBA para fazer a leitura dos dados obtidos no Matlab e QBlade e gerar uma nova geometria lisa, com número reduzido de faces. O programa faz o processamento e preparação dos dados, invoca o Solidworks e executa uma sub rotina em VBA para criação da geometria. Alguns ajustes finais são realizados manualmente (como o abaulamento da ponta da pá) antes da exportação final à ferramenta ANSYS. Uma análise de diagnóstico de geometria é executada no Solidworks e no SpaceClaim para garantir que a geometria não apresenta falhas (e.g. faces desconectadas ou distorcidas).

Figura 28 – Fluxograma da construção da geometria e domínios



Fonte: o autor

As etapas para definição da geometria e construção dos domínios da simulação são apresentadas na Figura 28.

3.3 DEFINIÇÃO DA SEQUÊNCIA DE LAMINAÇÃO

A sequência de laminação é definida com base em outros trabalhos realizados anteriormente. Ditosamente, os trabalhos de BORGES e FOFANO (2016) e de LEITE e FERREIRA (2019) mais a publicação de DELLAROZA (2022) compõem as principais referências para definição do material das lâminas e a sequência de laminação.

As lâminas são constituídas de carbono-epóxi unidirecional prepreg¹ e o *layup* é configurado conforme os resultados que apresentaram maior acoplamento flexão-torção. Ressalta-se que, conforme apontado por BORGES e FOFANO (2016), compósitos laminados simétricos cujas lâminas centrais são orientadas a 90° e as lâminas externas a 30° ou 60° apresentam melhor desempenho no acoplamento flexo-torcional.

Utilizando os resultados obtidos por BORGES e FOFANO (2016) como ponto de partida para a definição da sequência de laminação, realizou-se o estudo de várias orientações e espessuras distintas, de forma a utilizar aquela que apresentasse a maior torção no eixo longitudinal da pá (referente ao centroide aerodinâmico nas seções transversais ao longo do *span*).

Três objetos de estudo são construídos utilizando a mesma geometria da pá, variando-se o material nas seguintes configurações:

- a) **Laminado L0**: assimétrico não balanceado, visando obter os efeitos de acoplamento flexão-torção;
- b) **Laminado L1**: simétrico e balanceado três camadas, visando obter um material com o menor grau de anisotropia possível na mesma espessura;
- c) **Laminado L2**: simétrico e balanceado, obtendo um material isotrópico no estado plano de tensões, ainda que com número superior de camadas.

Na constituição de um projeto, todo processo de seleção de materiais deve considerar não apenas as propriedades de interesse – e.g. mecânicas, térmicas, químicas, elétricas, ópticas – mas também outros aspectos de importância, como econômicos, logísticos, ou até estéticos. Tendo em vista que o processo de fabricação de um componente pode influenciar no seu comportamento em regime de trabalho, considera-se neste estudo que o procedimento de laminação e construção da pá não influencia nos coeficientes da matriz $[ABD]$ da equação (74).

¹ *prepreg*: compósito pré-impregnado com fibras ou filamentos em matriz parcialmente polimerizada.

3.4 PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS VIRTUAIS

Os ensaios virtuais auxiliam na validação dos dados levantados no software QBlade inicialmente e são utilizados para computar as deformações resultantes dos esforços aerodinâmicos na pá. Esta última parte é posta em prática uma vez que a geometria tridimensional da pá é definida e a configuração do laminado é estabelecida. A avaliação dos dados finais é realizada por comparação a partir dos objetos de estudo configurados: com a mesma geometria da pá e condições do escoamento, variam-se os materiais constituintes da pá, de forma a analisar potenciais melhorias no desempenho do novo gerador.

Após modelada a pá no QBlade, uma análise é conduzida no próprio software com o modelo tridimensional; sua performance é avaliada em maiores detalhes na ferramenta ANSYS. As propriedades dos laminados são definidas e utilizadas para conduzir as simulações FSI, que auxiliam na avaliação de desempenho da pá perante suas deformações.

Todas as simulações FSI são executadas utilizando o mesmo fluxo de trabalho no ANSYS Workbench, alterando-se única e exclusivamente o material. Ademais, o ponto de partida das simulações CFD foram os mesmos, visto que provém da solução em regime permanente (mais detalhes são apresentados na seção 3.4.2).

3.4.1 Construção e discretização dos domínios

Os domínios são construídos considerando uma periodicidade de 120° ; isto é realizado visando a redução no custo computacional das simulações e tendo em vista a composição do rotor por três pás igualmente distribuídas angularmente.

As dimensões do túnel de vento são feitas conforme uma proporção mínima do *span* da pá. As proporções do túnel segundo a geometria da pá são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Proporções dimensionais do túnel de vento conforme a geometria da pá

Parâmetro	Proporção	Valor de referência
Diâmetro / largura	5x (mín.)	<i>span</i>
Comprimento (à jusante)	10x (mín.)	<i>span</i>
Comprimento (à montante)	5x (mín.)	<i>span</i>
Periodicidade angular	120°	eixo central

Fonte: o autor

Uma vez realizada a construção do domínio, realiza-se sua discretização (geração da malha). Sabe-se que a malha deve atender a alguns requisitos de qualidade, cujos quais têm uma referência disposta no manual da ANSYS. Os requisitos e recomendações de qualidade são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros de qualidade para uma malha

Tipo	Excelente	Muito Bom	Bom	Aceitável	Ruim	Péssimo
SKEW	0	0,25	0,50	0,80	0,95	0,98
	0,25	0,50	0,80	0,94	0,97	1,00
ORTO	1,00	0,95	0,69	0,20	0,14	0,001
	0,95	0,70	0,20	0,15	0,001	0

Fonte: adaptado de ANSYS

A geometria da pá é extraída para do domínio sólido e inserida em outro componente, na mesma montagem, de forma a garantir que a mesma geometria seja avaliada na análise estrutural e fluídica. A discretização da região sólida segue os mesmos parâmetros de qualidade que o domínio fluídico.

3.4.2 Preparação do ambiente CFD

A simulação CFD é realizada no ANSYS *Fluent*. As condições do escoamento são estabelecidas conforme os parâmetros de entrada no programa Matlab e em uma situação de sobrecarga, com velocidade do vento acima da nominal para o gerador; a velocidade de sobrecarga utilizada é de 20m/s.

As principais configurações no ANSYS *Fluent* para início das simulações são dispostas no ANEXO C. As regiões de acoplamento entre a simulação CFD e estrutural são divididas entre a pá e o *Hub*. Como o *Hub* é apenas representativo e

não é alvo deste estudo, estabelece-se uma condição de zero cisalhamento em sua superfície, de forma que os efeitos viscosos não se desenvolvem nas vizinhanças de suas paredes (i.e. não há formação de camada limite). A pá, em contrapartida, é configurada como uma região de não deslizamento.

A simulação CFD é dividida em dois estágios:

- Regime permanente;
- Regime transiente.

A análise em regime permanente configura o ponto de partida para a transiente, de forma a obter maior estabilidade numérica na solução e rápida convergência. Adicionalmente, os resultados da solução em regime permanente são utilizados para a análise preliminar do laminado utilizado. A validação dos dados é feita qualitativamente.

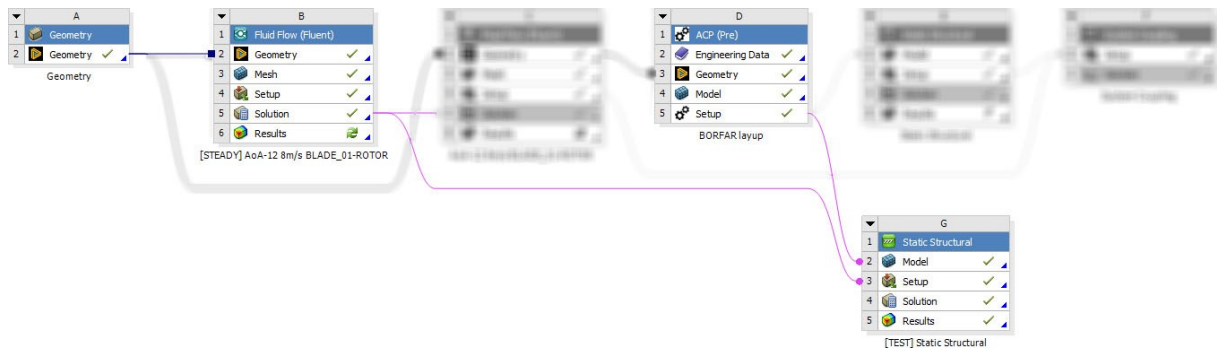
3.4.3 Preparação dos laminados avaliados

As propriedades das lâminas e dos laminados são computadas a partir do ACP (*ANSYS Composite PrepPost*), módulo da ferramenta ANSYS dedicado à aplicação da teoria clássica de laminados. Assim, pode-se estipular o comportamento do material e os efeitos do acoplamento flexão-torção durante a simulação FSI, uma vez que a geometria da pá é definida.

A pá é dividida entre extradorso e intradorso e as laminações são configuradas para cada superfície, de forma a se obter maior controle entre as direções das fibras de cada lâmina. O modelo final é exportado com elementos de casca e o *offset* da espessura é definido na direção interna da pá.

Diversas configurações de laminação são estudadas fazendo uso da distribuição de pressão obtida a partir da análise em regime permanente no CFD. Dentre as configurações avaliadas, seleciona-se a que apresenta maior torção para alívio das cargas aerodinâmicas. Adicionalmente, o número de lâminas também é estabelecido conforme a rigidez final da pá.

Figura 29: Fluxo de trabalho no ANSYS Workbench para o estudo preliminar de laminação



Fonte: o autor

A Figura 29 apresenta o fluxo de trabalho no ANSYS Workbench para a seleção do laminado utilizado na construção da pá.

3.4.4 Preparação da análise estrutural

A análise estrutural é preparada levando em conta o efeito de rotação da pá no rotor, as fixações da geometria, as distribuições de pressão na pá (oriundas da simulação CFD), assim como as propriedades do laminado obtido a partir do ACP. O efeito de rotação da pá é calculado considerando que há uma perda na projeção linear na razão de velocidades da ponta da pá (λ). Idealmente, a rotação é definida como:

$$\Omega = \frac{\lambda U_{\infty}}{R} \quad (76)$$

Onde Ω é calculado em radianos por segundo. No entanto, esta relação não se conserva na prática. Tomando como base o trabalho de LEITE e FERREIRA (2019), calcula-se uma perda proporcional na rotação do rotor, especialmente para velocidades do vento acima da nominal. Para a configuração do sistema e condições do escoamento utilizadas (i.e. $U_{\infty} = 20$; $\lambda = 8$; $s = 1,163m$), prevê-se uma redução de 71,6% se comparado à relação linear da equação 76. Isto é válido na simulação estrutural e na configuração dos parâmetros do CFD.

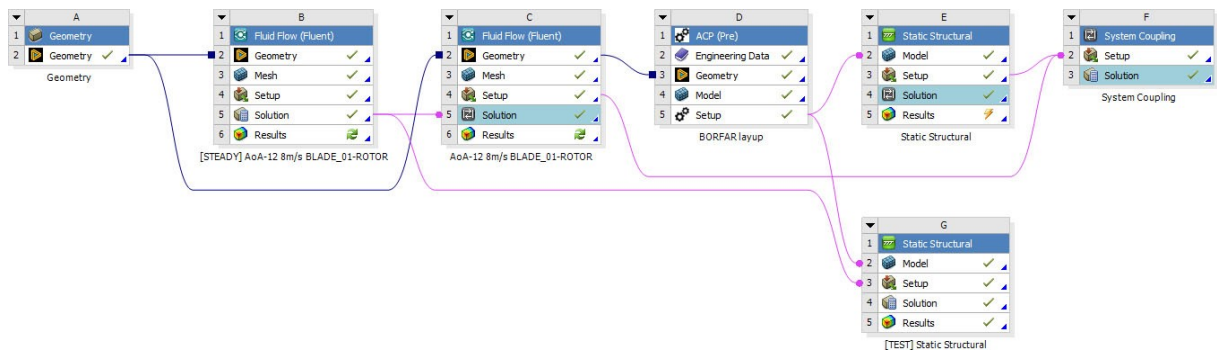
A fixação da geometria é realizada considerando zero deformação nas faces do *Hub*, assim como na aresta de fixação à base da pá (conexão entre *Hub* e pá).

Dois componentes do *Static Structural* são configurados:

- Análise preliminar da sequência de laminação;
- Análise final da pá na simulação FSI.

Durante a análise preliminar, utiliza-se o carregamento da pressão distribuída ao longo da pá proveniente da simulação CFD em regime permanente. Assim, pode-se obter uma estimativa das deformações na pá e selecionar o laminado com melhor desempenho. Durante a análise final, os carregamentos provêm do *System Coupling* ao longo da simulação FSI. As fixações e o efeito de rotação na pá são equivalentes em ambas as análises (preliminar e final).

Figura 30: Fluxo de trabalho no ANSYS Workbench para a análise estrutural preliminar e FSI



Fonte: o autor

A Figura 30 apresenta o fluxo de trabalho no ANSYS Workbench para as análises estruturais preliminar e via FSI.

3.5 OBTENÇÃO DA POTÊNCIA EXTRAÍDA

A potência extraída pelos geradores de cada pá avaliada é computada a partir da integração das forças ao longo da pá, de forma a se obter o torque total no eixo central do sistema. Multiplicando-se o torque pela rotação e número de pás, pode-se obter a potência teórica total de cada gerador e, assim, avaliar seu desempenho.

$$\mathcal{P} = \left(\int_0^{sh} F dy \right) n_{Hz} N = T n_{Hz} N \quad (77)$$

Onde \mathcal{P} é a potência do gerador, sh é a distância entre o eixo central do rotor e a extremidade da pá (comprimento de *span mais o raio do Hub*), n_{Hz} a rotação em Herz e N o número de pás. A integração das forças em y ao longo da pá fornece o torque (T) no eixo central.

A equação da potência, acima, é resolvida após atingir convergência na simulação FSI para cada configuração de laminado ($L0$, $L1$ e $L2$) na velocidade de sobrecarga $U_\infty = 20 \text{ m/s}$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados finais das simulações realizadas são apresentados nesta seção. Para garantir a confiabilidade dos dados, cada componente do sistema é avaliado e discutido. Incluem-se, aqui, o dimensionamento da pá e a subsequente construção dos domínios (sólido e fluídico) para as simulações, a análise dos resultados individuais de cada componente e, por fim, o cálculo do ganho de potência final do gerador.

4.1 CARACTERÍSTICAS DO PERFIL DE AEROFÓLIO

A geometria da pá é construída utilizando o perfil NACA 4412 como base e as curvas dos coeficientes de sustentação e arrasto, assim como as distribuições de pressão no perímetro do perfil de aerofólio, são fornecidas via computação numérica no software QBlade.

Tabela 7 – Coeficientes aerodinâmicos do perfil NACA 4412

Parâmetro	Valor
Número de pontos no perfil	35
Coef. arrasto	0,0572
Coef. sustentação	1,38

Fonte: o autor

A Tabela 7 apresenta os coeficientes aerodinâmicos do NACA 4412 de acordo com o obtido no software QBlade.

4.2 GEOMETRIA FINAL DA PÁ

Uma vez o perfil selecionado, utiliza-se o programa em Matlab para dimensionar a geometria tridimensional da pá. O dimensionamento é realizado segundo alguns parâmetros de engenharia, os quais são estabelecidos como variáveis de entrada no algoritmo do programa e são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros de entrada para o cálculo de dimensionamento da pá

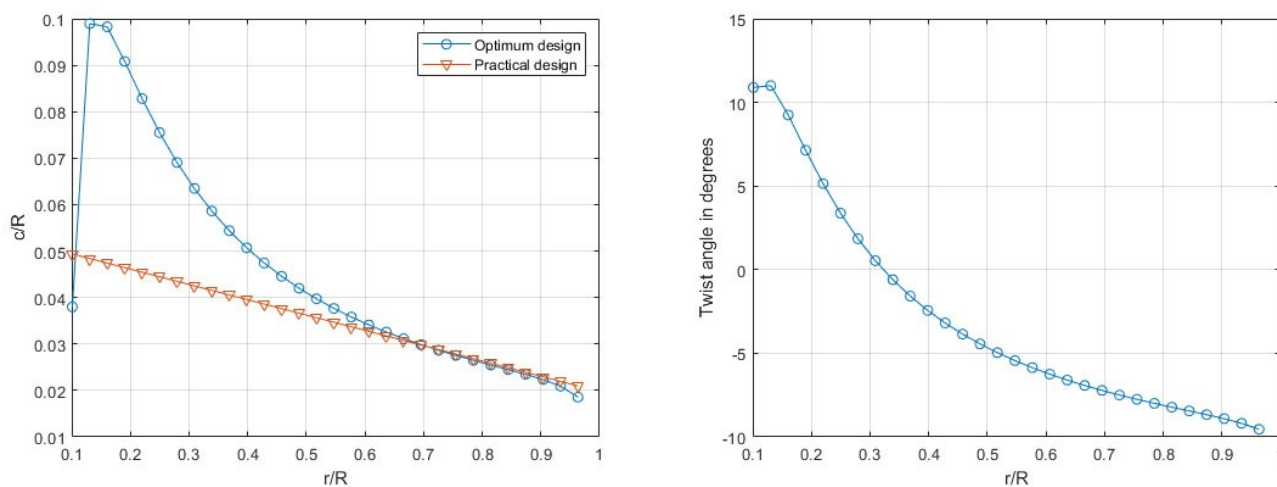
Parâmetro	Valor	Comentário
Potência (teórico)	660 W	Referente ao potencial do rotor
Velocidade nominal do vento	8 m/s	Velocidade nominal de corrente livre
Densidade do ar	1,184 kg/m ³	Estipulado conforme pressão e temperatura (97kPa e 16°C)
Razão de velocidade de ponta de pá	8	—
Razão diametral do cubo	0,10	Razão entre os diâmetros do cubo e do rotor
Número de pás	3	—
Coefficiente de sustentação	1,38	Definido de acordo com o aerofólio
Coefficiente de arrasto	0,0572	Definido de acordo com o aerofólio
Ângulo de ataque máximo	14 °	Estipulado de acordo com o ângulo de <i>stall</i> previsto
Eficiência eletromecânica	0,90	Eficiência na conversão eletromecânica do gerador
Número de elementos (BEMT)	30	Número de elementos ao longo do comprimento de pá

Fonte: o autor

Vale ressaltar que a potência nominal almejada é de 600W, porém, tendo em vista as perdas eletromecânicas previstas, estabelece-se inicialmente um incremento de 10% para o valor teórico inicial. As perdas eletromecânicas são compensadas no cálculo do comprimento final da pá.

O algoritmo fornece, em meio a uma coletânea de resultados, as curvas de comprimento de corda e torção ao longo do *span*. Estes resultados são utilizados para gerar uma nuvem de pontos, a qual constitui a geometria tridimensional da pá.

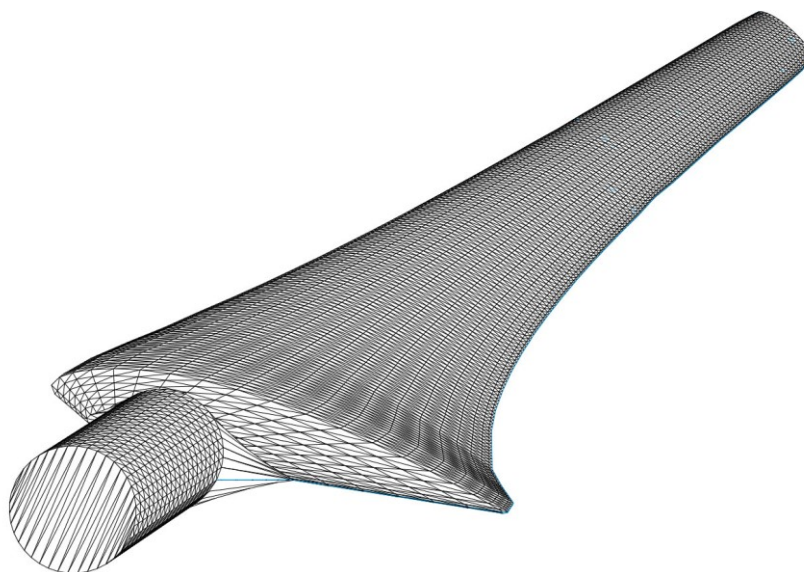
Figura 31: Curvas do comprimento de corda e torção do perfil ao longo do comprimento da pá



Fonte: o autor

A Figura 31 apresenta as curvas de comprimento de corda e torção do perfil de aerofólio em seu centroide aerodinâmico, exclui-se nessas curvas o perfil cilíndrico em sua base. A nuvem de pontos é então utilizada para a modelagem 3D.

Figura 32: Projeção da nuvem de pontos que compõe a pá em uma malha correspondente

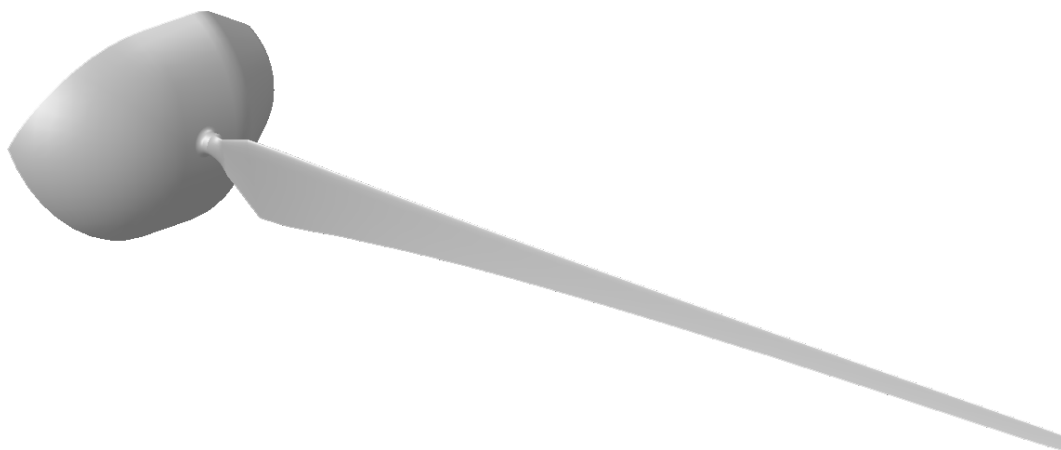


Fonte: o autor

A Figura 32 apresenta a malha da nuvem de pontos que constitui a geometria da pá. Vale ressaltar, no entanto, que para garantir a boa fidelidade do modelo geométrico, o número de elementos ao longo da corda e *span* da pá resulta num total de 29 957 facetas. Este número elevado de facetas torna o processo de discretização árduo e com alta demanda computacional. No entanto, a partir de um programa desenvolvido pelo autor em Python e VBA, pode-se reduzir este número para apenas 122 faces, isto ainda considerando superfícies distintas para o extradorso e intradorso

(para uma superfície única no extra e intradorso, a redução cai para 62 faces). Ademais, uma representação do *Hub* foi modelada juntamente à pá, de forma a obter resultados mais fiéis ao cenário real.

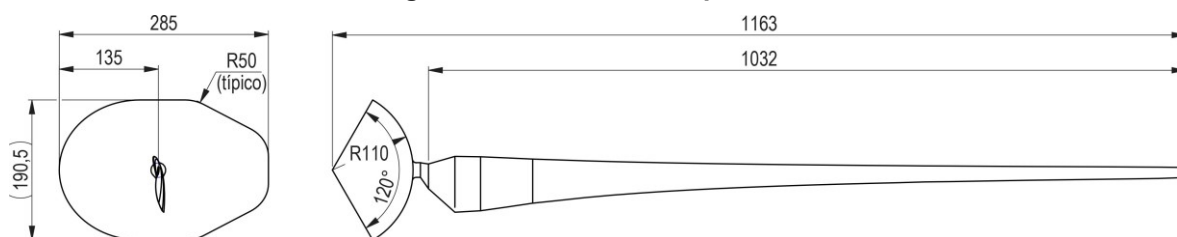
Figura 33: Geometria (lisa) da pá adaptada e *Hub*



Fonte: o autor

A Figura 33 apresenta a nova geometria da pá, com número reduzido de faces, mais o *Hub*. As dimensões da pá e *Hub* são apresentadas na Figura 34.

Figura 34: Dimensões da pá e *Hub*



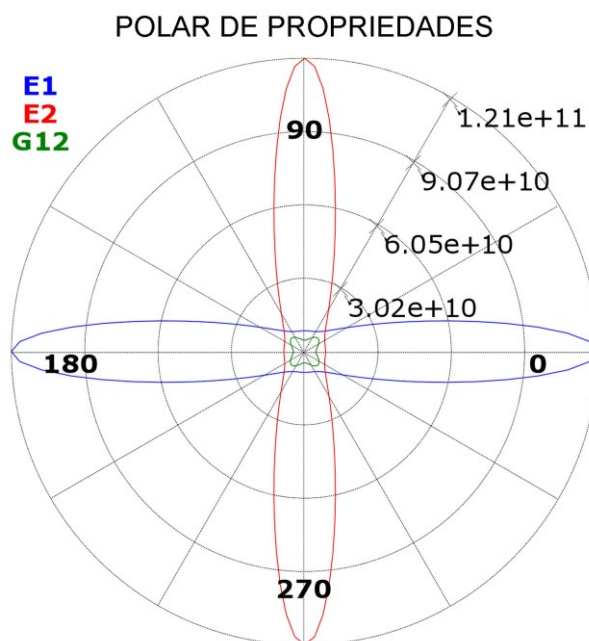
Fonte: o autor

O *Hub* é apenas representativo e suas dimensões não necessariamente correspondem ao modelo real. Suas dimensões exageradas e com menores curvaturas foram construídas para amenizar efeitos de turbulência na interface entre pá e *Hub*.

4.3 PROPRIEDADES DA LÂMINA E LAMINADOS

As propriedades de cada lâmina e dos laminados configurados são obtidas a partir do ACP. A Figura 35 a seguir apresenta o módulo elástico de Young e o módulo de cisalhamento para apenas uma lâmina. Estas lâminas, alterando-se os ângulos de laminação, constituem propriedades mecânicas particulares para o laminado como um todo. Assume-se que cada lâmina tem espessura total de 0,8mm.

Figura 35: Representação gráfica polar de algumas propriedades da lâmina utilizada



Fonte: o autor

As matrizes de rigidez resultantes, calculadas através do ACP, são alimentadas ao componente *Static Structural*, que as utilizam para computar as tensões e deformações do material. As configurações de laminação dos três laminados são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Configuração de laminação dos três laminados avaliados

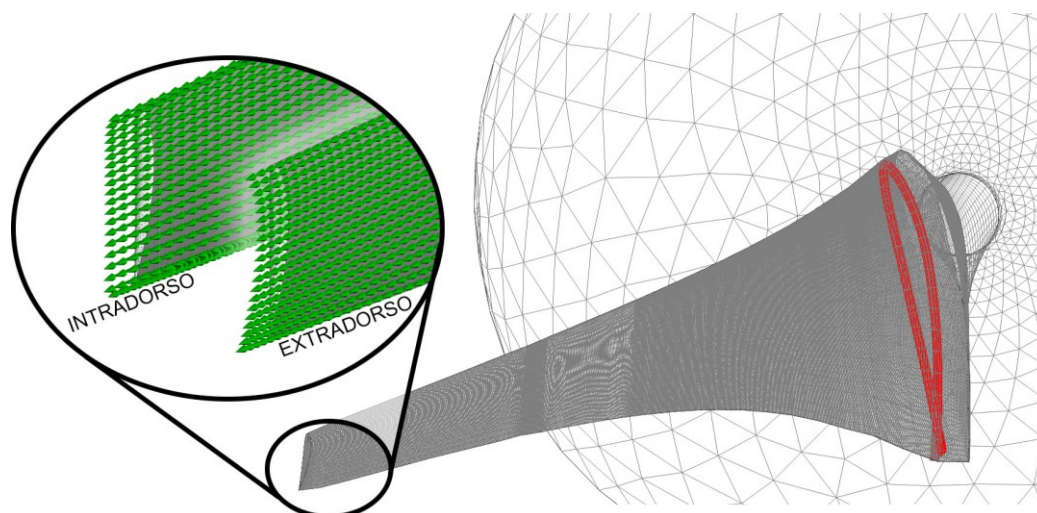
Laminado	Nr. camadas	Orientação	
		[extradorso]	[intradorso]
L0	3	[60 / 60 / 0]	[90 / 30 / 30]
L1	3	[-45 / 0 / 45]	[135 / 90 / 45]
L2	4	[-45 / 90 / 0 / 45]	[135 / 0 / 90 / 45]

Fonte: o autor

Nota-se que a simetria do laminado *L0* se dá no centro da pá, e não no centro do laminado. Isto, pois, durante as análises preliminares dos laminados, é percebido que o efeito de acoplamento flexão-torção da pá apresenta melhores resultados quando a simetria das orientações toma como referência a pá, e não no laminado em si. Isto é, as lâminas orientadas a 90° se encontram na parte interna do aerofólio, ao invés da parte interna de cada laminado (extradorso e intradorso). Tomando o extradorso como referência, as lâminas a 90° são dispostas paralelas ao *span*.

A definição do laminado é realizada separadamente para o extradorso e intradorso. Isto é feito para garantir que o *offset* de espessura e as orientações das lâminas sejam as mais fiéis possíveis, motivo pelo qual a Tabela 9 apresenta configurações distintas para cada superfície.

Figura 36: Ilustração das orientações das lâminas e *offset* de espessura na pá (laminado L0)



Fonte: o autor

A Figura 36 ilustra a orientação das lâminas no extra e intradorso da pá estudada com o laminado *L0* (em verde), assim como uma representação do *offset* de espessura (em vermelho). A similaridade e simetria das orientações das lâminas entre extradorso e intradorso, mais o *offset* de espessura, são equivalentes em todos os laminados.

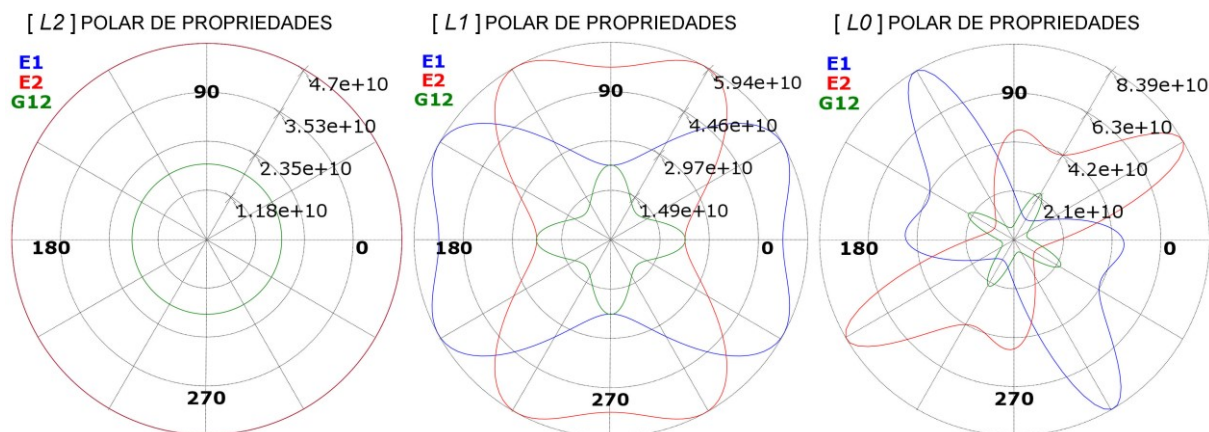
Tabela 10 – Propriedades mecânicas dos três laminados avaliados

Propriedade	Valor [L0]	Valor [L1]	Valor [L2]	Unidade
Rigidez de cisalhamento em flexão	6,798	30,413	28,064	GPa
Rigidez de flexão E1	63,310	20,446	25,965	GPa
Rigidez de flexão E2	18,762	18,385	25,965	GPa
Rigidez de cisalhamento	6,876	22,501	18,051	GPa
Rigidez E1	46,782	51,944	47,036	GPa
Rigidez E2	19,456	22,378	47,036	GPa
Cisalhamento fora do plano G23	2,289	0,285	0,605	GPa
Cisalhamento fora do plano G31	3,226	0,424	1,330	GPa
Fator de correção de cisalhamento k44 (G23)	0,595300	0,078505	0,155249	—
Fator de correção de cisalhamento k55 (G31)	0,838836	0,101656	0,341097	—

Fonte: o autor

A Tabela 10 traz as propriedades mais detalhadas de cada laminado, as quais são alimentadas ao *Static Structural*. Uma representação gráfica polar é ilustrada na Figura 37.

Figura 37: Representação gráfica polar de algumas propriedades dos laminados configurados



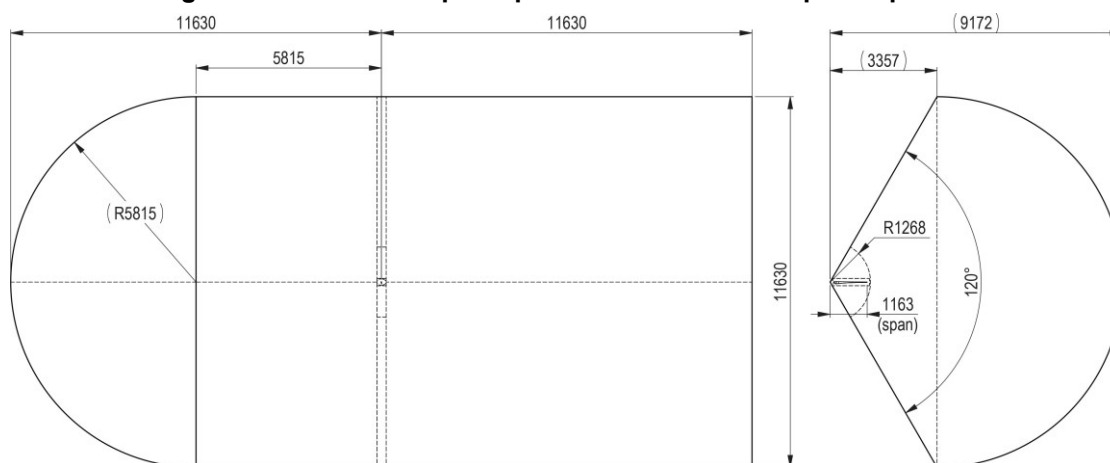
Fonte: o autor

Com isso, definem-se as propriedades dos três laminados (*L0*, *L1* e *L2*) utilizados neste estudo.

4.4 DOMÍNIOS E MALHAS GERADAS

Uma vez construída a geometria da pá, constrói-se então o túnel de vento para se obter os ambientes de simulação. O túnel é modelado conforme as indicações mínimas de espaçamento com o objeto de estudo, estabelecido na Tabela 5.

Figura 38: Dimensões principais do túnel de vento para a pá modelada



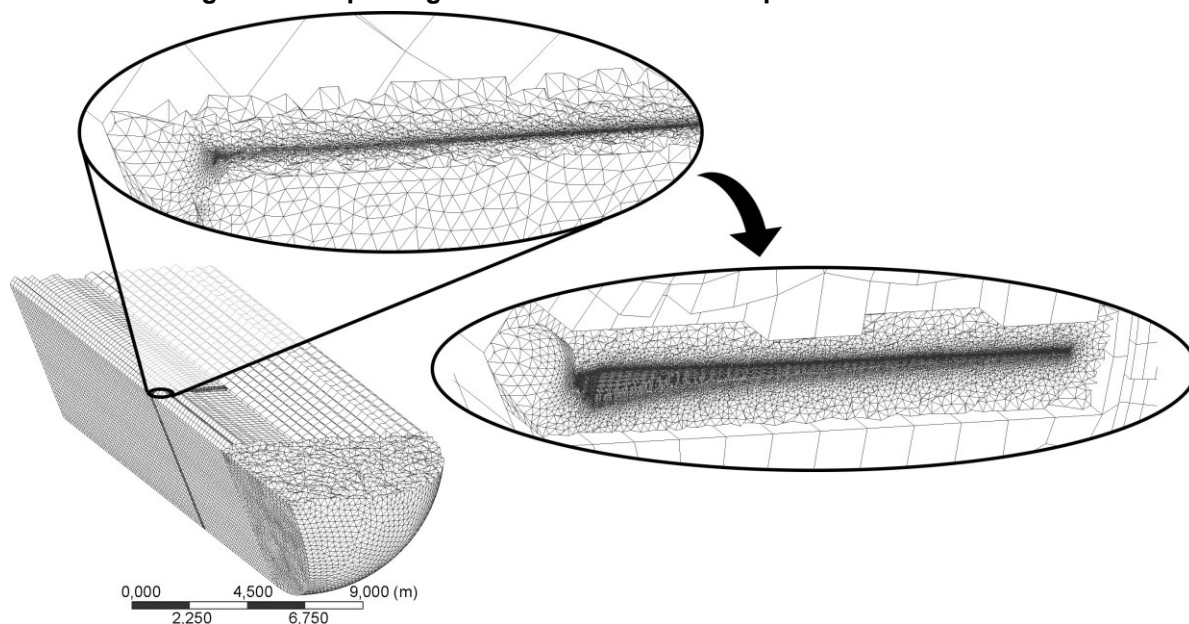
Fonte: o autor

O ambiente de simulação é então dividido entre os domínios fluídico e sólido, os quais seguem processos de discretização distintos para seus respectivos fins (simulação CFD ou estrutural).

4.4.1 Malha do domínio fluídico

A discretização do túnel de vento é feita dando maior atenção às regiões mais próximas da pá, uma vez que o interesse deste estudo é avaliar o efeito do escoamento na estrutura, e não tanto o desenvolvimento das estruturas turbulentas na esteira de turbulência à jusante da pá no escoamento.

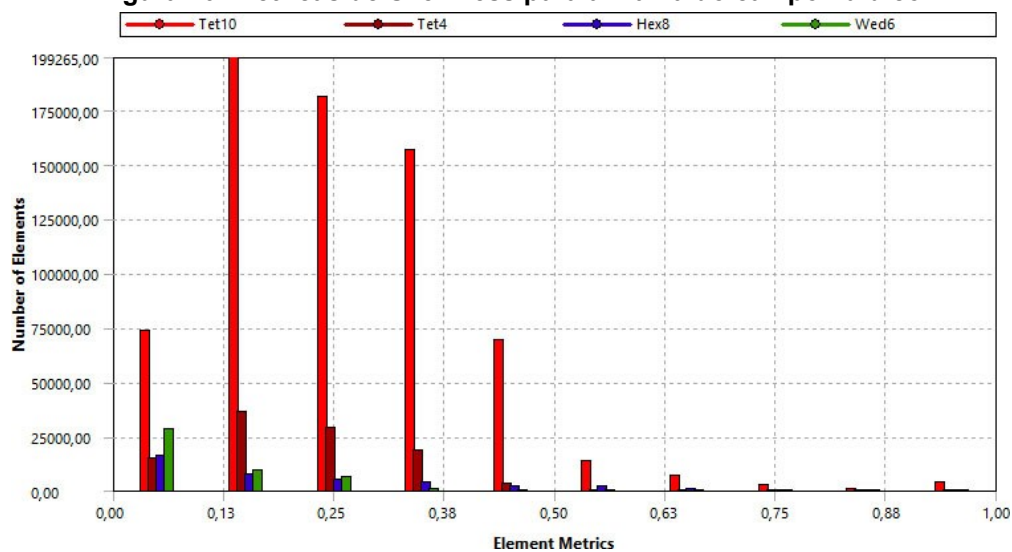
Figura 39: Aspecto geral da malha construída para o túnel de vento



Fonte: o autor

A Figura 39 apresenta o aspecto geral da malha do campo fluídico. Para averiguar seus parâmetros de qualidade, utiliza-se da própria ferramenta de inspeção no ANSYS *Meshing*. As métricas de *Skewness* são apresentadas na sequência.

Figura 40: Métricas de *Skewness* para a malha do campo fluídico

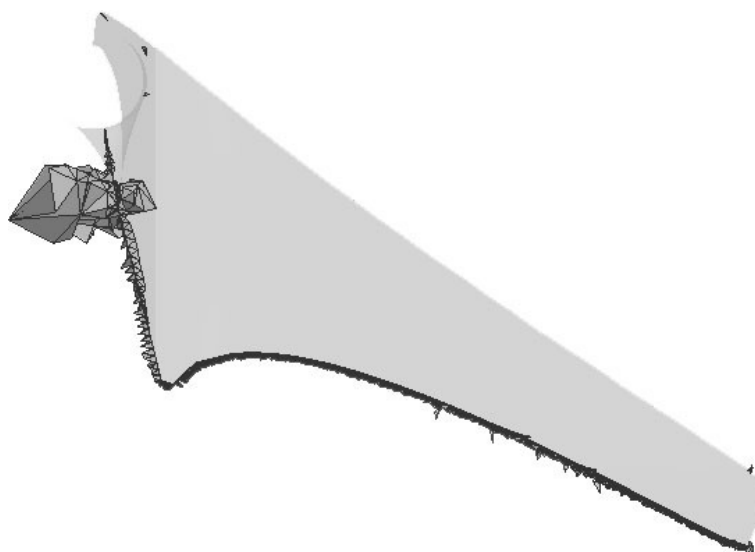


Fonte: o autor

Percebe-se que, no geral, a qualidade dos elementos é bem satisfatória.

Quanto aos elementos com maior distorção, são aqueles encontrados no bordo de fuga da pá, onde o raio de ponta é bem reduzido (chegando até a 0,2mm em sua menor dimensão) As distorções destes elementos não são assumidas como muito impactantes para fins deste estudo – especialmente tendo em vista que o refino de malha para correção eleva demasiadamente o número de elementos no domínio, trazendo um custo computacional muito maior – e as simulações são conduzidas com a malha neste estado.

Figura 41: Localização dos elementos mais distorcidos nas regiões periféricas da pá



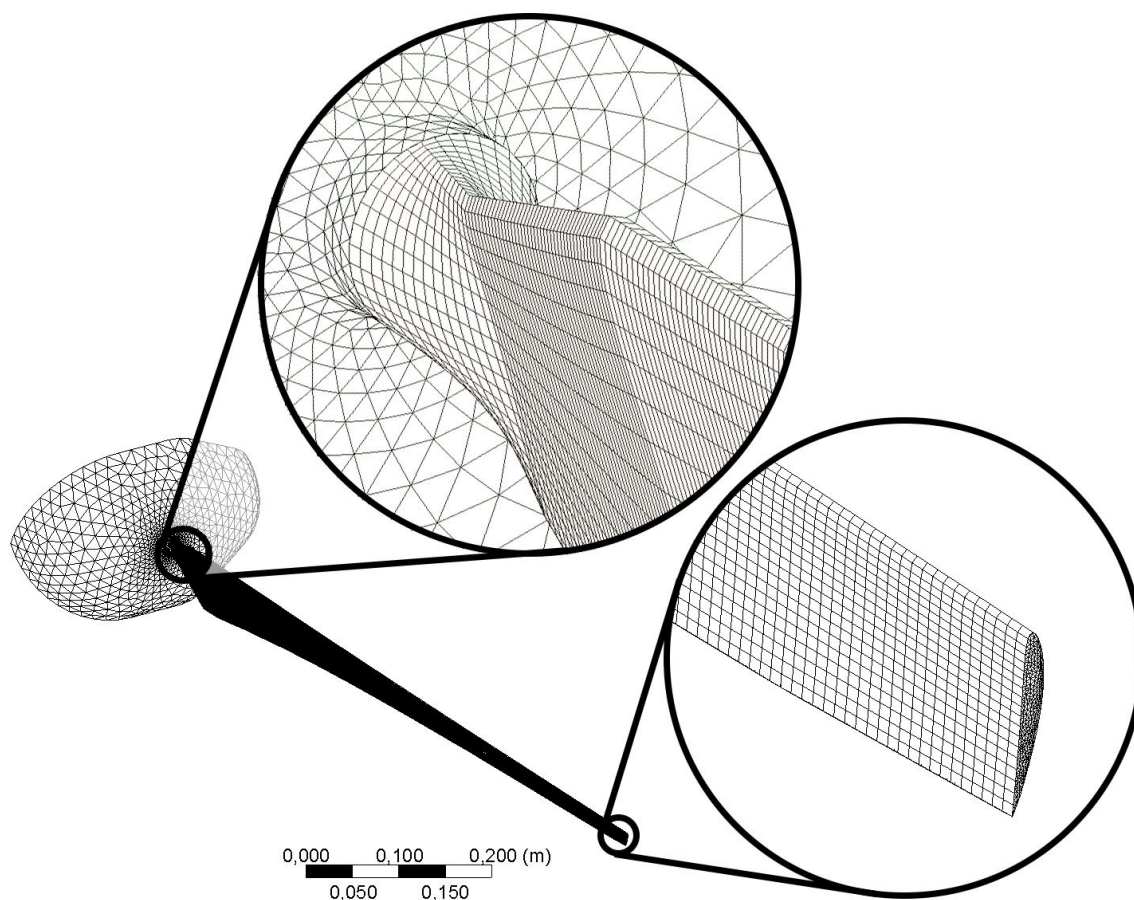
Fonte: o autor

A Figura 41 apresenta a localização dos elementos distorcidos, os quais apresentam *Skewness* superior a 0,80. Percebe-se que todos se encontram no bordo de fuga do aerofólio, conforme estipulado.

4.4.2 Malha do domínio sólido

A discretização do domínio sólido é realizada com elementos quadrangulares, uma vez que se utilizam elementos de casca quadráticos (SHELL281), os quais dispõem 8 (oito) nós com seis graus de liberdade em cada nó. Buscou-se obter o mesmo tamanho de elemento e aspecto da malha, de forma a garantir a máxima compatibilidade entre os domínios.

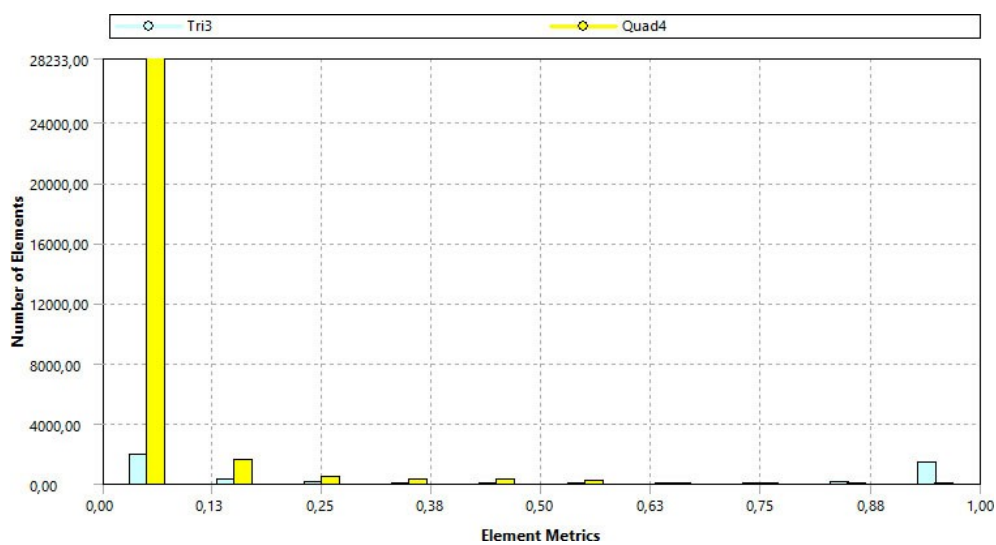
Figura 42: Aspecto geral da malha construída para a pá



Fonte: o autor

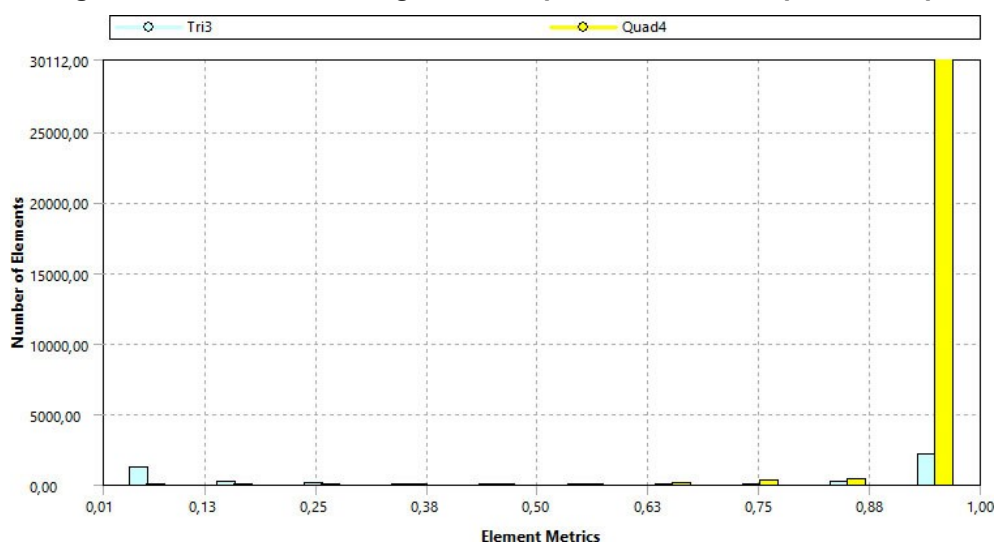
A Figura 42 apresenta o aspecto geral da malha na superfície da pá. Para averiguar seus parâmetros de qualidade, utiliza-se novamente da métrica de *Skewness*, mais a de ortogonalidade, as quais são apresentadas na sequência.

Figura 43: Métricas de *Skewness* para a malha na superfície da pá



Fonte: o autor

Figura 44: Métricas de *Ortogonalidade* para a malha na superfície da pá



Fonte: o autor

Percebe-se que, no geral, a qualidade dos elementos é satisfatória. As maiores distorções se encontram na ponta abaulada da pá, no *Hub* e ao longo bordo de fuga (devido ao raio de ponta diminuto). Ainda assim, segundo o resultado das métricas de qualidade, os objetivos deste estudo e os recursos computacionais disponíveis, toma-se a malha do domínio sólido como satisfatória.

4.5 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

A simulação como um todo é fundamentada pelos componentes do CFD e estrutural, que se apoia na teoria clássica de laminados para computar as tensões e deslocamentos. Isto posto, faz-se importante avaliar a confiabilidade e representatividade dos resultados obtidos em cada componente.

A distribuição da pressão sobre a superfície da pá define os esforços na estrutura e, portanto, tem forte relevância nos resultados. Uma forma de compreender melhor o aspecto da distribuição de pressão é analisar as linhas de corrente, que podem apontar as estruturas turbulentas que se formam nas regiões mais próximas.

Buscando garantir que o modelo de turbulência tenha sido aplicado adequadamente e que a malha comporta os resultados, utiliza-se o valor adimensional Y^+ como referência, que ajuda a denunciar se a malha é inadequada para a simulação realizada.

Quanto à parte estrutural, uma vez definida a configuração do laminado e aplicada à geometria, resta avaliar as tensões nas regiões mais críticas, de forma a garantir que não exceda o limite elástico do material. Os deslocamentos ao longo da geometria também são apresentados.

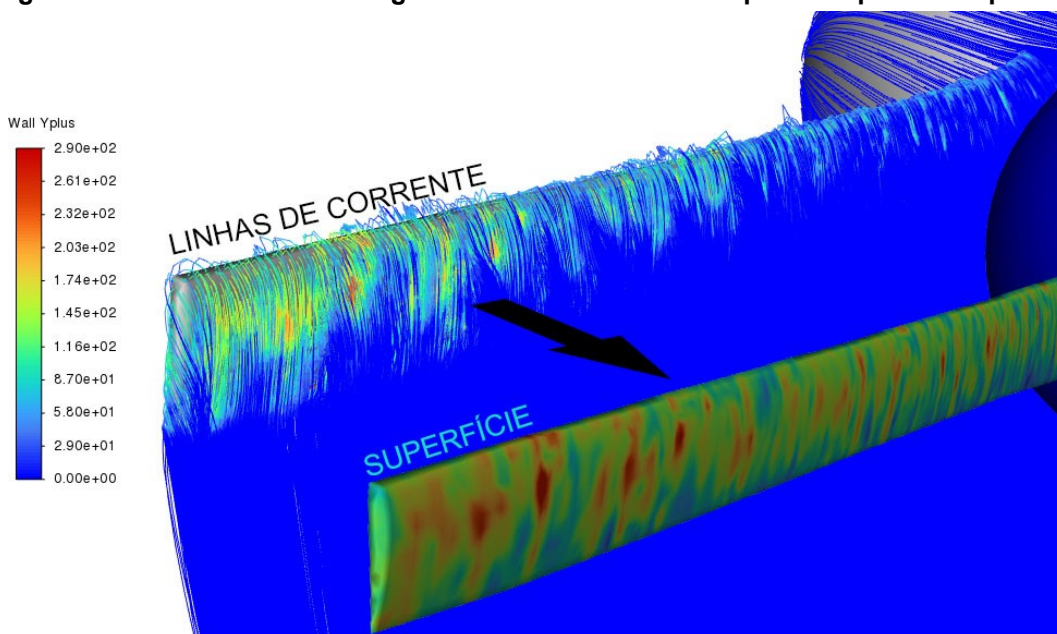
4.5.1 Resultados do CFD

Os resultados mais importantes para fins deste estudo na simulação CFD é o valor Y^+ e a distribuição da pressão ao longo da pá. O primeiro fornece uma referência da confiabilidade dos resultados, especialmente nas regiões mais próximas da interface fluido-sólido.

Os valores obtidos de Y^+ , em geral, são próximos ou menores que unidade; os valores mais altos de Y^+ se encontram na periferia imediata da pá. O modelo $k-\omega$ SST dispõe função de parede e uma função de mesclagem para modelar o escoamento na região logarítmica (MENTER, 1993). Para a utilização das funções de parede, os centroides dos elementos na primeira camada devem estar na região logarítmica. A camada limite, então, é aproximada pelas funções de parede do modelo de turbulência selecionado.

A resolução direta da camada limite não foi implementada devido ao crescimento exacerbado do número de elementos no domínio e, conseqüentemente, no custo da computação. Dispondo-se de uma malha com 937 415 elementos, o consumo da memória para acesso rápido (RAM) requisitado é entre 14 e 15 gigabytes durante as simulações finais, enquanto que a máquina dispõe 16.384 MB de memória. A extrapolação deste valor leva a uma delonga demasiada na simulação pela necessidade de utilizar o disco para armazenar os dados temporários (mesmo tratando-se de disco sólido, SSD), além de causar erros na invocação do *Fluent* pelo *System Coupling* (e.g. MPI_Recv, erro cód. 0x84000002).

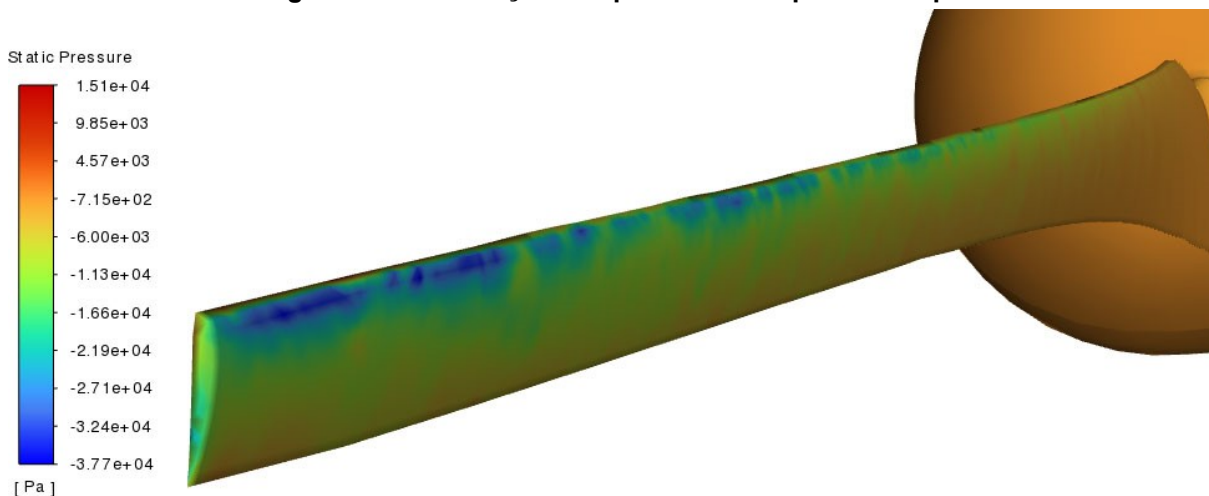
Figura 45: Valores de Y^+ ao longo das linhas de corrente a partir da pá e na superfície



Fonte: o autor

Considerando que se confia nas funções de parede do modelo de turbulência selecionado para prever o comportamento da camada limite, busca-se limitar Y^+ ao intervalo entre 30 a 300 nas regiões próximas da superfície da pá, não obstante a ANSYS esclarecer que os modelos de turbulência $k-\omega$ sejam insensíveis ao valor de Y^+ (ANSYS, 2021). A Figura 45 aponta a escala completa de Y^+ em todo o domínio nas linhas de corrente geradas a partir da superfície da pá. O valor máximo é de 290; os valores são similares ou bem próximos para todas as pás simuladas e jamais extrapolando $Y^+ < 300$.

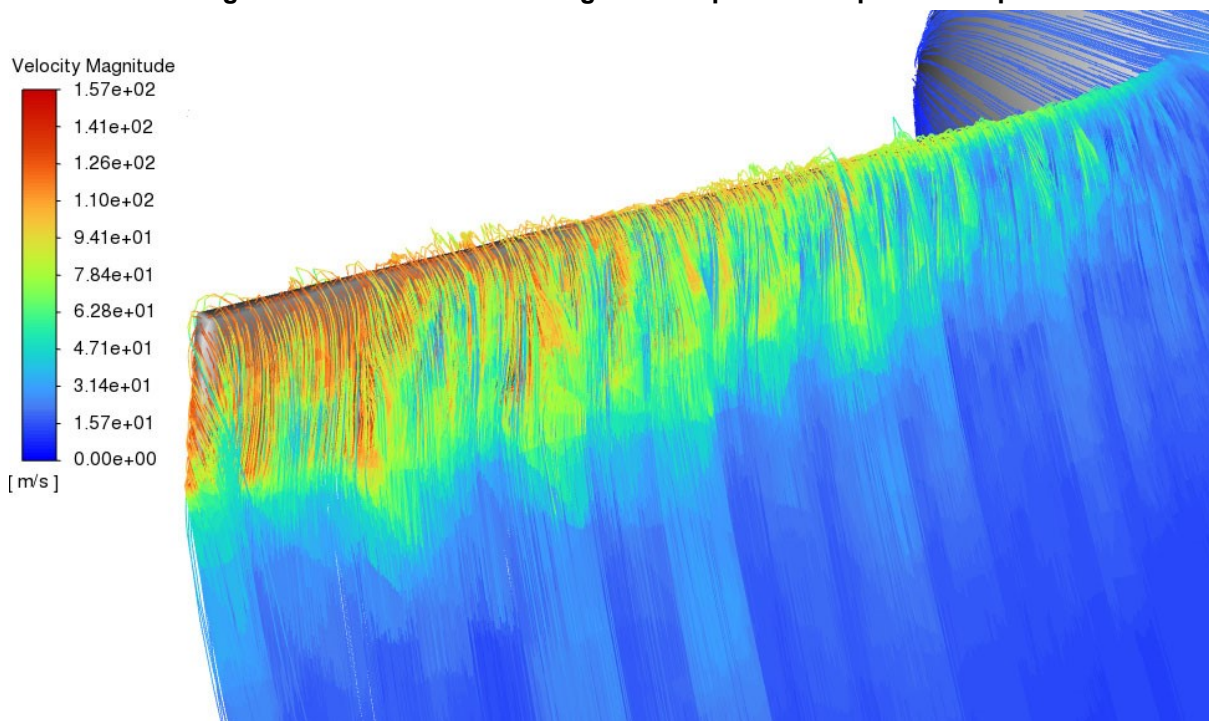
Figura 46: Distribuições de pressão na superfície da pá



Fonte: o autor

Quanto à distribuição de pressão sobre a pá, nota-se que os gradientes são mais representativos na ponta, conforme esperado, tendo em vista que a velocidade tangencial é maior nesta extremidade. A distribuição também não é uniforme, o que poderia se justificar pelas estruturas turbulentas que se formam já próximas à superfície.

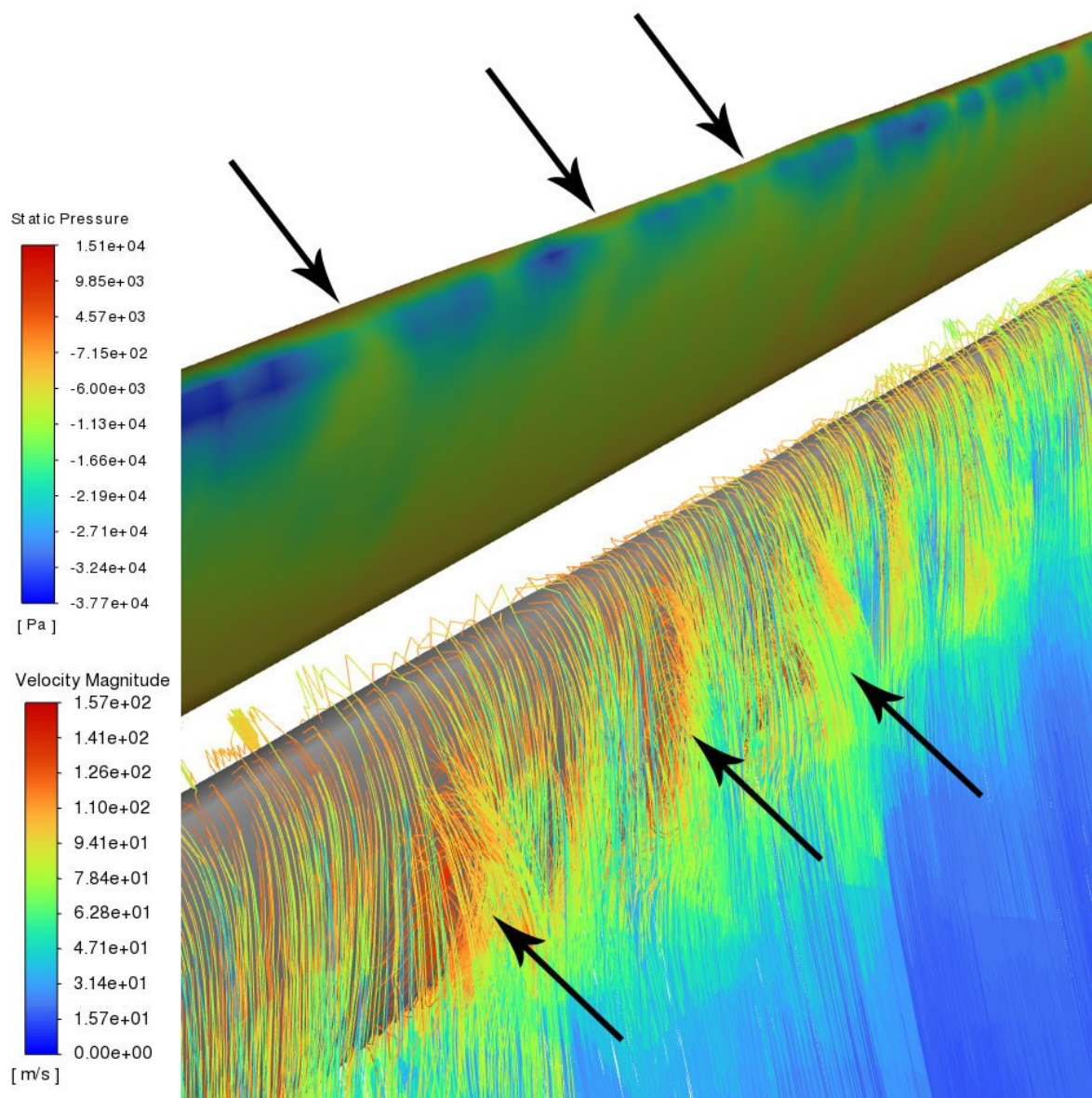
Figura 47: Linhas de corrente geradas a partir da superfície da pá



Fonte: o autor

A Figura 47 apresenta as linhas de correntes geradas a partir da pá. Comparando as duas figuras acima, nota-se que a distribuição de pressão coincide com as estruturas turbulentas e recirculação próximas à superfície da pá.

Figura 48: Destaque da distribuição de pressão e recirculação nas regiões próximas da pá



Fonte: o autor

A Figura 46 aponta com maiores detalhes alguns pontos onde coincidem as perdas nos gradientes de pressão com regiões de recirculação. Os resultados, por fim, são tomados como satisfatórios e válidos para alimentar a simulação e análise estrutural.

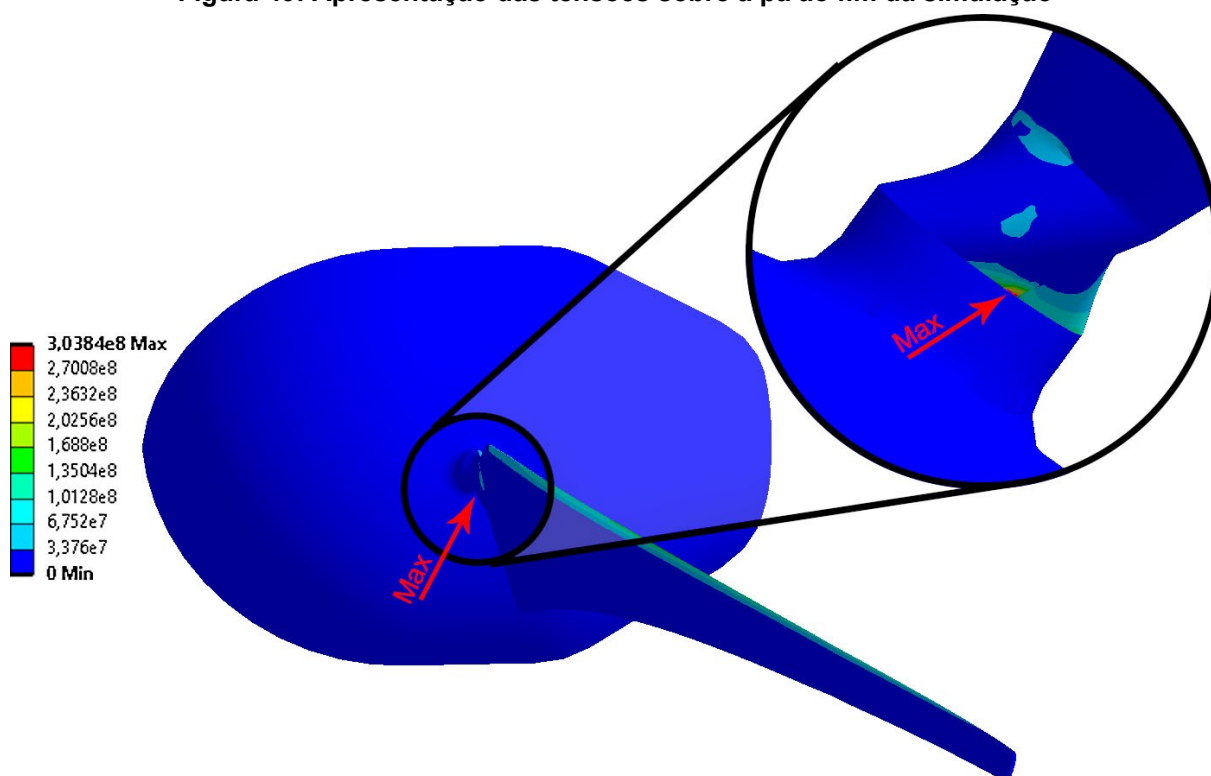
4.5.2 Resultados da análise estrutural

Uma vez que os valores obtidos a partir da simulação CFD são considerados válidos, resta averiguar as direções e orientações do laminado utilizado (através do ACP) e as tensões e deformações na pá (pelo *Static Structural*).

Utilizam-se elementos de casca para a análise e o *offset* de espessura é projetado para dentro, uma vez que, se fosse para fora, a geometria final da pá e seu desempenho aerodinâmico seria alterada. Vale ressaltar que a espessura da pá, especialmente próximo à ponta e nos bordos de fuga e ataque, pode ser menor que a espessura do laminado, algo a ser corrigido no modelo real no ato da junção entre as duas partes. Este fato fundamenta mais um motivo pelo qual se utilizam elementos de casca.

Se a definição do laminado e sua aplicação sobre a pá é válida, resta averiguar as tensões finais do material. Almeja-se a construção de uma pá cujas tensões não excedam seu limite elástico, de forma a evitar problemas envolvendo fadiga ou deformações plásticas, que reduziriam o desempenho do componente com seu tempo de operação.

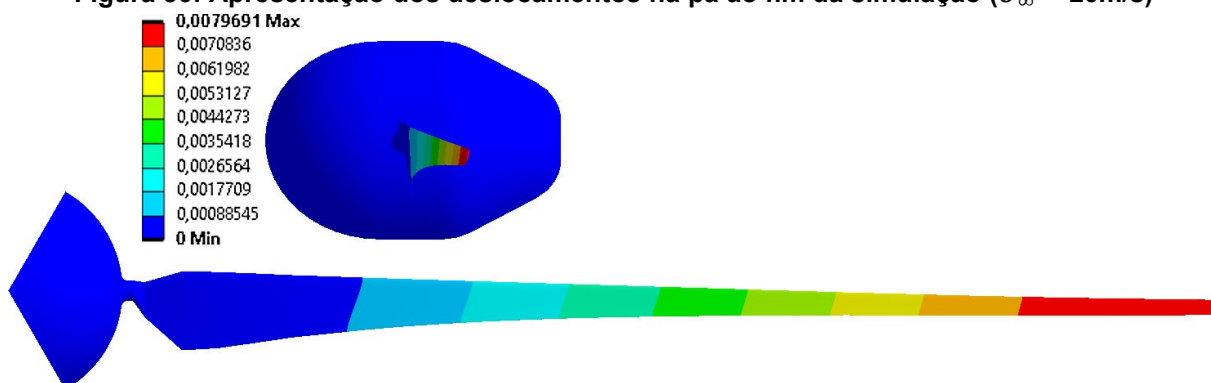
Figura 49: Apresentação das tensões sobre a pá ao fim da simulação



Fonte: o autor

A Figura 49 apresenta a distribuição de pressão sobre a pá e sua respectiva escala. Percebe-se que o valor máximo desenvolvido foi de 304 MPa, no entanto, esta tensão está localizada apenas na base da fixação, em uma aresta côncava de pequeno raio. Excetuando este ponto específico, as tensões não superam 180MPa. Os pontos mais críticos na perspectiva estrutural estão localizados na região próxima à fixação da pá ao *Hub* e ao longo do bordo de ataque.

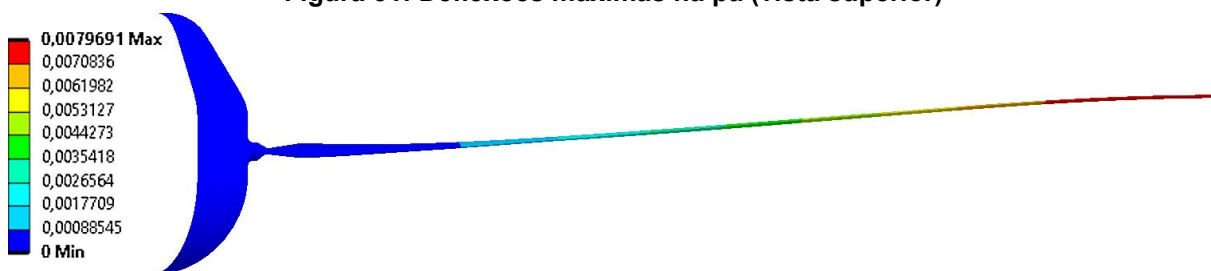
Figura 50: Apresentação dos deslocamentos na pá ao fim da simulação ($U_{\infty} = 20\text{m/s}$)



Fonte: o autor

Além da análise de tensões, a deflexão máxima da pá não deve ultrapassar 5% de seu *span*. Esta é uma condição necessária para garantir que, durante a operação do gerador, não há interferência da pá com a torre devido a um deslocamento excessivo da ponta, além de fornecer um indicador de rigidez durante os estudos preliminares e construção do laminado.

Figura 51: Deflexões máximas na pá (vista superior)



Fonte: o autor

Considerando um *span* de 1,032m os deslocamentos na pá não devem ultrapassar aprox. 50mm. A Figura 50 e a Figura 51 apresentam os deslocamentos e sua respectiva escala; o deslocamento máximo na ponta, na condição de vento a 20m/s é de aprox. 8mm. Por fim, as condições de tensão e deslocamentos na pá são tomadas como aceitáveis e coerentes.

4.6 POTÊNCIA EXTRAÍDA E ANÁLISE DE DESEMPENHO

Com os deslocamentos e a distribuição de pressão na pá é possível computar as forças resultantes e, conseqüentemente, o torque gerado no eixo central do rotor. Os resultados são obtidos diretamente através do *Fluent*, uma vez que a malha é atualizada a cada passo de tempo para a geometria deformada no *Static Structural*. A Tabela 11 apresenta a comparação dos torques e potências (equação 77) obtidas em cada pá. O relatório completo do *Fluent* para cada pá é disposto no ANEXO D.

Tabela 11 – Sumarização dos torques e potências obtidas para cada pá

Laminado	Velocidade [m/s]	Rotação [rad/s]	Somatório de momentos [Nm]	Potência calculada [W]	Ganhos de <i>L0</i>
<i>L0</i>	20	98,5	9,879	648,9	—
<i>L1</i>	20	98,5	9,745	640,1	+1,35%
<i>L2</i>	20	98,5	9,541	626,7	+3,42%

Fonte: o autor

Conforme apontado na Tabela 11, o incremento potencial na extração de energia para a pá avaliada é de 3,42%, no melhor cenário avaliado. Este valor é tomado como satisfatório, uma vez que, segundo a publicação de DELLAROZA, a expectativa seria de um ganho próximo entre 5 e 10% .

Ademais, percebe-se que o desempenho do laminado *L0*, com três camadas, é superior ao laminado *L2*, com quatro camadas, o que fornece uma vantagem econômica pela redução do número de lâminas em sua fabricação.

5 CONCLUSÕES

O perfil NACA 4412 apresenta bom desempenho para a aplicação almejada, o perfil foi desenvolvido para escoamento de baixo número de Reynolds, que condiz às condições de escoamento previstas ao microgerador eólico dimensionado.

O dimensionamento da pá e sua geometria final leva em conta não apenas alguns parâmetros fundamentais de projeto, como a condição do vento (propriedades do escoamento de corrente livre), mas também as possíveis perdas aerodinâmicas e a eficiência eletromecânica do gerador. Essas considerações auxiliam na obtenção de resultados mais confiáveis a partir da teoria do momento de elemento de pá (BEMT). Simulações computadorizadas não substituem um protótipo físico, mas fornecem um virtual, que pode ser utilizado para obter resultados teóricos mais precisos.

Ainda que o material seja composto por lâminas ortotrópicas, o laminado final apresenta comportamento anisotrópico devido às orientações de laminação. Isso pode ser observado tanto pelo gráfico polar de propriedades (disposto na Figura 37), quanto pela matriz de rigidez resultante no ACP, que corresponde aos termos da matriz $[C]$ da equação 42.

A distribuição da pressão sobre a superfície da pá corresponde às estruturas turbulentas identificadas nas regiões próximas, justificando as perdas potenciais das forças de sustentação e, conseqüentemente, na extração máxima de energia. Este fato é observado em todas as pás e condições de escoamento.

A análise estrutural conclui que o material dimensionado suporta as tensões originadas pelo carregamento aerodinâmico. Ainda que um ponto de sensibilidade tenha sido identificado, sua ocorrência se deve mais à adaptação do modelo geométrico utilizado que uma fragilidade na estrutura.

O efeito de acoplamento torção-flexão do material aprimora a potência do gerador em aprox. 3,42%. Não bastasse isso, o desempenho da pá fabricada com apenas três lâminas, na laminação construída, apresenta melhores resultados que com um laminado isotrópico (no estado plano de tensões) com quatro lâminas, o que traz uma vantagem no aspecto econômico.

REFERÊNCIAS

- [1] SWIFT-HOOK, D.T. History of Wind Power. **Comprehensive Renewable Energy**, 2012
- [2] SHAHAN, Z. **History of Wind Turbines**. 2014. Disponível em: <<https://www.renewableenergyworld.com/storage/history-of-wind-turbines/#gref>>. Acesso em: 07 AGO 2021
- [3] BRASIL. Código Civil. **LEI Nº 10.438, DE 26 DE ABRIL DE 2002**. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10438.htm>. Acesso em: 07 AGO 2021
- [4] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Boletim Mensal de Geração Eólica Junho/2021**.
- [5] SIMAS, M. PACCA, S. Energia Eólica, Geração de Empregos e Desenvolvimento Sustentável. **Estudos Avançados**, v. 27, n. 77, 2013
- [6] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Usinas eólicas correspondem a 83% do acréscimo de potência no primeiro semestre de 2021**. Disponível em: <<https://bit.ly/36q2LWG>> Acesso em: 07 AGO 2021
- [7] ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Our Common Future**. 1987. Disponível em: <<http://www.un-documents.net/ocf-02.htm#III>>. Acesso em: 07 AGO 2021
- [8] SASTRESA, E. SCARPELLINI, S. ZABALZA, I. ARANDA-USÓN, A. Local Impact of Renewables On Employment: Assessment Methodology and Case Study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 2, p. 679-690, 2010
- [9] FERREIRA, I. Centros Urbanos Têm Potencial Para Gerar Energia Eólica Com Turbinas no Alto dos Edifícios. **Jornal da USP**. 2021. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/ciencias/centros-urbanos-tem-potencial-para-gerar-energia-eolica-com-turbinas-no-alto-dos-edificios/?fbclid=IwAR06XiXcGo0Z1NXU1B3eZ0rDFS9K5OqEDdBNLzqgduuQgjeqQJt3rMkU2N8>>. Acesso em: 11 AGO 2021

[10] MACYNTIRE, A. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997

[11] GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report 2018**. Bruxelas, 2019.

[12] SORIANO, L.YU, W. RUBIO, J. Modeling and Control of Wind Turbine. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2013, n. 982597, 2013.

[13] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482/2012**. 2012.

[14] WORLD WIDE FUND FOR NATURE. **Desafios e Oportunidades Para a Energia Eólica no Brasil**: Recomendações Para Políticas Públicas. Brasília, 2015.

[15] CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília, 2001

[16] CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**: Simulações 2013. 1. ed. Rio de Janeiro, 2017

[17] GRILLO, D. G. B. **Análise Computacional do Vento Sobre o Topo de Edifícios**: Variações de Direção e Velocidade. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019

[18] BURTON, T. SHARPE, D. JENKINS, N. BOSSANYI, E. **Wind Energy Handbook**. Chichester, 2001

[19] PRITCHARD, P. **Fox and McDonald's Introduction To Fluid Mechanics**. 8. ed. Danvers, 2011

[20] DEILMANN, C. **Passive Aeroelastic Tailoring of Wind Turbine Blades: A Numerical Analysis**. Munich, 2008

[21] HANSEN, M. **Aerodynamics of Wind Turbines**. 2. ed. Sterling, 2008

[22] MANWELL, J.F. MCGOWAN, J.G. **Wind Energy Explained: Theory Design and Application**. 2. ed. Chichester, 2009

[23] HAU, E. **Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics**. 3. ed. Munich, 2013

[24] DESHMUKH, S. MANABENDRA, M. De. **Investigation of Blade Geometry Linearization on Performance of Small Wind Turbine**. 61st Congress of the Indian Society of Theoretical and Applied Mechanics. Vellore, 2016

[25] VERMEER, L. SORENSEN, J. CRESPO, A. Wind Turbine Wake Aerodynamics. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 39, p. 467-510, 2003

[26] WILSON, R. LISSAMAN, P. **Applied Aerodynamics of Wind Power Machines**. Corvallis, 1974

[27] EAGAR, T. Wither Advanced Materials. **Advanced Materials and Processes**, v. 6/91, p. 25-29, 1991

[28] KAW, A. **Mechanics of Composite Materials**. 2. ed. Boca Raton, 2006

[29] NETLLES, A.T. Basic Mechanics of Laminated Composite Plate. **NASA, Marshall Space Flight Center**. NASA-RP-1351, 1994

[30] DOWLING, N. **Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue**. 4. ed Blacksburg, 2013

[31] REDDY, J. **Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis**. 2. ed. Boca Raton, 2003

[32] COWIN, S. **Continuum Mechanics of Anisotropic Materials**. New York, 2013

[33] INCROPERA, F.P. DEWITT, D.P. BERGMAN, T.L. LAVINE, A.S. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 7. ed. Koboken, 2011

[34] VERSTEEG, H.K. MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. 2. ed. London, 1996

[35] PULLIAM, T.H. LOMAX, H. **Fundamentals of Computational Fluid Dynamics**. NASA-Ames Research Center. Sunnyvale, 1999

[36] MENTER, F. **Zonal Two Equation k- ω Turbulence Models for Aerodynamic Flows**. NASA-Ames Research Center. Moffett Field, Sunnyvale, 1993

[37] MENTER, F. **Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications**. NASA Ames Research Center. Moffett Field, Sunnyvale, 1994

[38] ANSYS. **ANSYS Fluent Theory Guide**. Canonsburg, PA. 2021

[39] BORGES, B. K. FOFANO, L. G. S. **Estudo da Aplicação de *Aeroelastic Tailoring* para Controle Passivo do Ângulo de Passo de Pás de Geradores Eólicos**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016

[40] LEITE, I. T. FERREIRA, J. V. M. **Prova de Conceito de Controle Passivo de Ângulo de Arfagem em Pás de Microgeradores Eólicos**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019

[41] DELLAROZA, D.G. TAVARES, C. LUERSEN, M.A. Surrogate-Based Optimization of the Layup of a Laminated Composite Wind Turbine Blade for an Improved Power Coefficient. **Journal of Theoretical and Applied Mechanics**. Warsaw, 2022

ANEXO A – PONTOS DE COORDENADAS DO PERFIL NACA 4412

Tabela 12 – Pontos de coordenadas do perfil NACA 4412

(continua)

X	Y	Z
1,000	0,001	0
0,950	0,015	0
0,900	0,027	0
0,800	0,049	0
0,700	0,067	0
0,600	0,081	0
0,500	0,092	0
0,400	0,098	0
0,300	0,098	0
0,250	0,094	0
0,200	0,088	0
0,150	0,079	0
0,100	0,066	0
0,075	0,058	0
0,050	0,047	0
0,025	0,034	0
0,013	0,024	0
0,000	0,000	0
0,013	-0,014	0
0,025	-0,020	0
0,050	-0,025	0
0,075	-0,027	0
0,100	-0,029	0
0,150	-0,029	0
0,200	-0,027	0

Tabela 12 – Pontos de coordenadas do perfil NACA 4412

(conclusão)

X	Y	Z
0,250	-0,025	0
0,300	-0,023	0
0,400	-0,018	0
0,500	-0,014	0
0,600	-0,010	0
0,700	-0,007	0
0,800	-0,004	0
0,900	-0,002	0
0,950	-0,002	0
1,000	-0,001	0

Fonte: adaptado de *Airfoil Tools*

ANEXO B – PARÂMETROS CONSTRUTIVOS GEOMÉTRICOS DA PÁ

Tabela 13 – Parâmetros construtivos geométricos da pá

(continua)

Posição radial (m)	Corde (m)	Torção (graus)	Aerofólio
0,010	0,020	0,00	Aerofólio circular (cilíndrico)
0,130	0,020	0,00	Aerofólio circular (cilíndrico)
0,131	0,034	11,14	NACA 4412
0,167	0,077	11,98	NACA 4412
0,202	0,074	10,01	NACA 4412
0,238	0,067	7,60	NACA 4412
0,273	0,060	5,40	NACA 4412
0,309	0,055	3,52	NACA 4412
0,344	0,050	1,93	NACA 4412
0,380	0,046	0,58	NACA 4412
0,416	0,042	-0,58	NACA 4412
0,451	0,039	-1,57	NACA 4412
0,487	0,036	-2,43	NACA 4412
0,522	0,034	-3,18	NACA 4412
0,558	0,032	-3,85	NACA 4412
0,594	0,030	-4,44	NACA 4412
0,629	0,029	-4,96	NACA 4412
0,665	0,027	-5,44	NACA 4412
0,700	0,026	-5,86	NACA 4412
0,736	0,025	-6,25	NACA 4412
0,771	0,023	-6,60	NACA 4412
0,807	0,022	-6,92	NACA 4412
0,843	0,021	-7,22	NACA 4412
0,878	0,021	-7,49	NACA 4412
0,914	0,020	-7,74	NACA 4412

Tabela 13 – Parâmetros construtivos geométricos da pá**(conclusão)**

Posição radial (m)	Corda (m)	Torção (graus)	Aerofólio
0,949	0,019	-7,97	NACA 4412
0,985	0,018	-8,19	NACA 4412
1,021	0,018	-8,40	NACA 4412
1,056	0,017	-8,60	NACA 4412
1,092	0,016	-8,80	NACA 4412
1,127	0,016	-9,03	NACA 4412
1,163	0,014	-9,36	NACA 4412

Fonte: o autor

ANEXO C – CONFIGURAÇÕES NO ANSYS FLUENT

Tabela 14 – Principais configurações no ANSYS *Fluent*

(continua)

Configuração	Definição	Comentários
Tempo	Regime permanente (RP) Regime Transiente	RP é ponto de partida da Transiente; RP é utilizada nos estudos preliminares do laminado
Modelo de Turbulência	k- ω SST	Utilizada as configurações padrões do <i>Fluent</i>
Configurações das zonas (subdomínios)	Domínio do rotor é rotativo	Definido um SRF (<i>Single Rotating Frame</i>) para a região do rotor
Condições de contorno	—	—
• Entrada / inlet:	Velocidade nominal do vento (U_{∞})	Direção paralela ao eixo central do rotor (escoamento axial); Entradas são as faces frontais do túnel
• Saídas / outlet:	Pressão	<i>Backflow</i> relativo à zona adjacente e às células próximas; Saídas são as laterais e o fundo do túnel
• Paredes (<i>Hub</i>):	Cisalhamento zero	Não há formação de camada limite
• Paredes (pá):	Não deslizamento	Há formação de camada limite
• Paredes periódicas:	Acopladas	Periodicidade em 120° (rotor com 3 pás)
Malha dinâmica	Funções <i>Smoothing</i> e <i>Remeshing</i> ; Aplicado à região dinâmica (tetraédrica)	—
• <i>Smoothing</i> :	<i>Spring Constant Factor</i> = 0,33	Preservar os elementos mais próximos para proteger contra deslocamentos maiores que o tamanho mínimo de elemento (" <i>Negative Cell Volume Error</i> ")
• <i>Remeshing</i> :	<i>Local Cell & Local Face</i>	Os parâmetros são definidos conforme as estatísticas da malha na região dinâmica
• Regiões:	Região dinâmica; Superfície do <i>Hub</i> ; Superfície da pá	Região dinâmica é deformável conforme os deslocamentos da estrutura; <i>Hub</i> e pá vinculados ao <i>System Coupling</i>

Tabela 14 – Principais configurações no ANSYS *Fluent*

(conclusão)

Configuração	Definição	Comentários
Métodos	—	—
• Acoplamento pressão-velocidade:	<i>Coupled</i>	Configuração do próprio <i>Fluent</i>
• Discretização espacial (gradientes):	<i>Green-Gauss Node Based</i>	Considera-se os elementos tetraédricos na região dinâmica
• Demais configurações:	Segunda ordem	Pressão; Momento; Energia Cinética de Turbulência; Taxa de Dissipação Específica
Controles	—	—
• Número de Courant:	3	Valor pequeno o suficiente para garantir boa estabilidade das simulações; Definido nos estudos preliminares da simulação transiente (antes de iniciar a FSI)
• Fatores de relaxamento:	Padrão	Utilizados os valores padrão do <i>Fluent</i> ; Não foi identificada a necessidade de corrigir os valores durante as simulações
Residuais:	Velocidades em X, Y, Z = 0,001 Continuidade, k, omega = 0,0012	O incremento de 0,0002 auxilia na agilidade da solução. Considera-se que a pequena diferença não impacta na confiabilidade dos dados
Parâmetros da solução	—	—
• Máx. iterações por passo de tempo:	80	Número suficiente segundo os estudos preliminares da simulação transiente
• Demais configurações:	Controlados pelo <i>System Coupling</i>	e.g. número e duração dos passos de tempo

Fonte: o autor

ANEXO D – RELATÓRIO DE FORÇAS E MOMENTOS

Relatório de momentos do laminado L0

Moments - Moment Center (0 0 0)

Zone	Moments [N m] Pressure	Viscous	Total
blade_wall_fff	(9.4527735 149.0668 0.60326363)	(0.41567485 -0.018169566 -0.0027133464)	(9.8684484 149.04863 0.60055028)
root_wall_fff	(0.010227525 -0.078511891 0.0021304648)	(0 0 0)	(0.010227525 -0.078511891 0.0021304648)

Net	(9.4630011 148.98829 0.60539409)	(0.41567485 -0.018169566 -0.0027133464)	(9.8786759 148.97012 0.60268074)

Zone	Coefficients Pressure	Viscous	Total
blade_wall_fff	(15.4331 243.37436 0.9849202)	(0.67865282 -0.029664598 -0.0044299533)	(16.111752 243.3447 0.98049025)
root_wall_fff	(0.016698 -0.12818268 0.0034783098)	(0 0 0)	(0.016698 -0.12818268 0.0034783098)

Net	(15.449798 243.24618 0.98839851)	(0.67865282 -0.029664598 -0.0044299533)	(16.12845 243.21652 0.98396856)

Moments - Moment Center (0 0 0) Moment Axis (1 0 0)

Zone	Moments [N m]			Coefficients		
	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
blade_wall_fff	9.4527735	0.41567485	9.8684484	15.4331	0.67865282	16.111752
root_wall_fff	0.010227525	0	0.010227525	0.016698	0	0.016698

Net	9.4630011	0.41567485	9.8786759	15.449798	0.67865282	16.12845
number tracked = 32586, escaped = 32518, incomplete = 68						

Moments - Moment Center (0 0 0)

Zone	Moments [N m] Pressure	Viscous	Total
blade_wall_fff	(9.4527735 149.0668 0.60326363)	(0.41567485 -0.018169566 -0.0027133464)	(9.8684484 149.04863 0.60055028)
root_wall_fff	(0.010227525 -0.078511891 0.0021304648)	(0 0 0)	(0.010227525 -0.078511891 0.0021304648)

Net	(9.4630011 148.98829 0.60539409)	(0.41567485 -0.018169566 -0.0027133464)	(9.8786759 148.97012 0.60268074)

Zone	Coefficients Pressure	Viscous	Total
blade_wall_fff	(15.4331 243.37436 0.9849202)	(0.67865282 -0.029664598 -0.0044299533)	(16.111752 243.3447 0.98049025)
root_wall_fff	(0.016698 -0.12818268 0.0034783098)	(0 0 0)	(0.016698 -0.12818268 0.0034783098)

Net	(15.449798 243.24618 0.98839851)	(0.67865282 -0.029664598 -0.0044299533)	(16.12845 243.21652 0.98396856)

Moments - Moment Center (0 0 0) Moment Axis (0 1 0)

Zone	Moments [N m]			Coefficients		
	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
blade_wall_fff	149.0668	-0.018169566	149.04863	243.37436	-0.029664598	243.3447
root_wall_fff	-0.078511891	0	-0.078511891	-0.12818268	0	-0.12818268

Net	148.98829	-0.018169566	148.97012	243.24618	-0.029664598	243.21652

Relatório de momentos do laminado L1

Moments - Moment Center (0 0 0)

Zone	Moments [N m] Pressure	Viscous	Total
blade_wall_fff	(9.3162645 146.60316 0.56994004)	(0.41802483 -0.017730193 -0.0023959906)	(9.7342893 146.58543 0.56754405)
root_wall_fff	(0.010883115 -0.076721516 0.0044513576)	(0 0 0)	(0.010883115 -0.076721516 0.0044513576)

Net	(9.3271476 146.52644 0.5743914)	(0.41802483 -0.017730193 -0.0023959906)	(9.7451724 146.50871 0.57199541)

Zone	Coefficients Pressure	Viscous	Total
blade_wall_fff	(15.210228 239.3521 0.93051435)	(0.68248953 -0.028947253 -0.0039118214)	(15.892717 239.32316 0.92660253)
root_wall_fff	(0.01776835 -0.12525962 0.0072675225)	(0 0 0)	(0.01776835 -0.12525962 0.0072675225)

Net	(15.227996 239.22684 0.93778187)	(0.68248953 -0.028947253 -0.0039118214)	(15.910486 239.1979 0.93387005)

Moments - Moment Center (0 0 0) Moment Axis (1 0 0)

Zone	Moments [N m]			Coefficients		
	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
blade_wall_fff	9.3162645	0.41802483	9.7342893	15.210228	0.68248953	15.892717
root_wall_fff	0.010883115	0	0.010883115	0.01776835	0	0.01776835

Net	9.3271476	0.41802483	9.7451724	15.227996	0.68248953	15.910486

Moments - Moment Center (0 0 0)

Zone	Moments [N m] Pressure	Viscous	Total
blade_wall_fff	(9.3162645 146.60316 0.56994004)	(0.41802483 -0.017730193 -0.0023959906)	(9.7342893 146.58543 0.56754405)
root_wall_fff	(0.010883115 -0.076721516 0.0044513576)	(0 0 0)	(0.010883115 -0.076721516 0.0044513576)

Net	(9.3271476 146.52644 0.5743914)	(0.41802483 -0.017730193 -0.0023959906)	(9.7451724 146.50871 0.57199541)

Zone	Coefficients Pressure	Viscous	Total
blade_wall_fff	(15.210228 239.3521 0.93051435)	(0.68248953 -0.028947253 -0.0039118214)	(15.892717 239.32316 0.92660253)
root_wall_fff	(0.01776835 -0.12525962 0.0072675225)	(0 0 0)	(0.01776835 -0.12525962 0.0072675225)

Net	(15.227996 239.22684 0.93778187)	(0.68248953 -0.028947253 -0.0039118214)	(15.910486 239.1979 0.93387005)

Moments - Moment Center (0 0 0) Moment Axis (0 1 0)

Zone	Moments [N m]			Coefficients		
	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
blade_wall_fff	146.60316	-0.017730193	146.58543	239.3521	-0.028947253	239.32316
root_wall_fff	-0.076721516	0	-0.076721516	-0.12525962	0	-0.12525962

Net	146.52644	-0.017730193	146.50871	239.22684	-0.028947253	239.1979

Relatório de momentos do laminado L2

Moments - Moment Center (0 0 0)

Zone	Moments [N m] Pressure	Viscous	Total
blade_wall_fff	(9.1104489 146.46848 0.58099076)	(0.42235751 -0.018031851 -0.0020641547)	(9.5328064 146.45044 0.57892661)
root_wall_fff	(0.008458624 -0.076962319 0.0032158397)	(0 0 0)	(0.008458624 -0.076962319 0.0032158397)

Net	(9.1189075 146.39151 0.5842066)	(0.42235751 -0.018031851 -0.0020641547)	(9.541265 146.37348 0.58214245)

Zone	Coefficients Pressure	Viscous	Total
blade_wall_fff	(14.874202 239.13221 0.94855634)	(0.68956327 -0.029439756 -0.0033700485)	(15.563766 239.10277 0.9451863)
root_wall_fff	(0.013809998 -0.12565277 0.0052503505)	(0 0 0)	(0.013809998 -0.12565277 0.0052503505)

Net	(14.888012 239.00655 0.9538067)	(0.68956327 -0.029439756 -0.0033700485)	(15.577576 238.97711 0.95043665)

Moments - Moment Center (0 0 0) Moment Axis (1 0 0)

Zone	Moments [N m]			Coefficients		
	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
blade_wall_fff	9.1104489	0.42235751	9.5328064	14.874202	0.68956327	15.563766
root_wall_fff	0.008458624	0	0.008458624	0.013809998	0	0.013809998

Net	9.1189075	0.42235751	9.541265	14.888012	0.68956327	15.577576

Moments - Moment Center (0 0 0)

Zone	Moments [N m] Pressure	Viscous	Total
blade_wall_fff	(9.1104489 146.46848 0.58099076)	(0.42235751 -0.018031851 -0.0020641547)	(9.5328064 146.45044 0.57892661)
root_wall_fff	(0.008458624 -0.076962319 0.0032158397)	(0 0 0)	(0.008458624 -0.076962319 0.0032158397)

Net	(9.1189075 146.39151 0.5842066)	(0.42235751 -0.018031851 -0.0020641547)	(9.541265 146.37348 0.58214245)

Zone	Coefficients Pressure	Viscous	Total
blade_wall_fff	(14.874202 239.13221 0.94855634)	(0.68956327 -0.029439756 -0.0033700485)	(15.563766 239.10277 0.9451863)
root_wall_fff	(0.013809998 -0.12565277 0.0052503505)	(0 0 0)	(0.013809998 -0.12565277 0.0052503505)

Net	(14.888012 239.00655 0.9538067)	(0.68956327 -0.029439756 -0.0033700485)	(15.577576 238.97711 0.95043665)

Moments - Moment Center (0 0 0) Moment Axis (0 1 0)

Zone	Moments [N m]			Coefficients		
	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
blade_wall_fff	146.46848	-0.018031851	146.45044	239.13221	-0.029439756	239.10277
root_wall_fff	-0.076962319	0	-0.076962319	-0.12565277	0	-0.12565277

Net	146.39151	-0.018031851	146.37348	239.00655	-0.029439756	238.97711