



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

# Projeto e fabrico de pás em compósito de resina epóxi reforçada por fibra de vidro para mini turbina eólica

**Miguel José Antunes Machado**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletromecânica**  
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor João Manuel Milheiro Caldas Paiva Monteiro  
Coorientador: Prof. Doutor Abílio Manuel Pereira da Silva

Covilhã, junho de 2015



# Agradecimentos

Todo o processo que levou à realização deste trabalho não teria sido possível sem a contribuição de diversas pessoas. Como tal, gostaria de exprimir a minha gratidão a todos os que contribuíram para que este avanço a nível pessoal e profissional se tornasse realidade.

Os meus primeiros agradecimentos vão para os meus orientadores, Professor Doutor João Manuel Milheiro Caldas Paiva Monteiro e Professor Doutor Abílio Manuel Pereira da Silva pela confiança que depositaram em mim e por todo o conhecimento, apoio e disponibilidade que me prestaram ao longo de todo o trabalho.

Gostaria de agradecer ao Sr. João Correia, assistente técnico do Departamento de Engenharia Eletromecânica pelo auxílio prestado no que diz respeito à instalação do programa de simulação e ao Professor Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva por ter cedido gentilmente a licença do programa de simulação, tratando-se de um fator indispensável à realização do trabalho.

Agradeço a toda a minha família pelo apoio, em particular ao meu pai, que me acompanhou durante todo o processo, mostrando interesse constante e oferecendo os seus conselhos sempre que possível e à minha mãe e irmã por me incentivarem e me confortarem com as suas palavras.

Por fim, gostaria de agradecer a todos os meus amigos e colegas pelo incentivo que me deram em todas as alturas e pela experiência que me transmitiram através dos seus conselhos.



## Resumo

O presente trabalho consiste no projeto de uma pá em compósito de epóxi-fibra de vidro destinada a uma microturbina eólica de eixo horizontal que tem vindo a ser adotada por um vasto número de organizações sem fins lucrativos, com o intuito de ajudar algumas populações a tornarem-se autónomas no que diz respeito ao abastecimento de energia elétrica.

O projeto de construção da pá iniciou-se com o desenho computacional do modelo virtual da pá e dos moldes, seguindo-se o fabrico do molde através de maquinação CNC e, por fim, o fabrico da pá em compósito de epóxi-fibra de vidro.

Foram realizados ensaios relativos à resistência da pá num programa de simulação estrutural com o objetivo de analisar a resposta da pá à força centrífuga e à força aerodinâmica. Compararam-se os resultados obtidos para uma pá em madeira com os de uma pá em compósito de epóxi-fibra de vidro tendo cada uma dois tipos distintos de furação destinada à sua fixação ao gerador. Os resultados obtidos permitiram comparar a tensão máxima existente nas pás, os deslocamentos máximos presentes e os fatores de segurança mínimo que estas apresentam. A pá em compósito de epóxi-fibra de vidro demonstrou ser sempre mais resistente que a pá em madeira pois apresentou um fator de segurança mínimo sempre superior.

## Palavras-chave

Energia eólica, turbina eólica, compósito de epóxi-fibra de vidro, resistência estrutural.



# Abstract

This dissertation focuses on an epoxy composite-fiberglass blade design aimed for a horizontal axis micro wind turbine that has been adopted by a large number of non-profit organizations, in order to help some populations become autonomous concerning electricity supply.

The blade construction design began with the virtual design of the blade model and mold, followed by the mold manufacture via CNC machining and finally the manufacturing of the epoxy composite - fiberglass blade.

Several tests concerning blade resistance were performed in a structural simulation program, with the aim of analyzing the blade response to centrifugal and aerodynamic forces. The results obtained for a wood blade were compared with the ones obtained from a glass fiber blade, each one having two types of drilling for their attachment to the generator. One of the drilling cases has only one hole for attachment and the other case has two holes. The results obtained allowed the comparison, for the two types of blade materials and fastening holes, of the maximum stress on the blades, the maximum existing displacements and the minimum safety factors. The epoxy composite-fiberglass blade proved to be always stronger than the wood blade because it always presented a higher minimum safety factor.

## Keywords

Wind energy, wind turbine, epoxy composite-fiberglass, structural resistance.



# Índice

Agradecimentos .....	iii
Resumo .....	v
Abstract .....	vii
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas .....	xv
Lista de símbolos.....	xvii
Lista de acrónimos.....	xix
<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1    Objetivos e contribuição da dissertação .....	1
1.2    Visão geral e organização da dissertação .....	2
<b>2. Energia eólica - revisão bibliográfica .....</b>	<b>3</b>
2.1    Evolução histórica .....	3
2.2    Elementos constituintes de uma microturbina eólica.....	6
2.2.1    Fuselagem da turbina (“nacelle”) .....	8
2.3    Tipos de microturbinas eólicas.....	9
2.4    Limite de Betz.....	15
2.5    Aplicações das microturbinas eólicas .....	16
2.6    Autoconstrução de pás para microturbinas .....	18
<b>3. Construção da pá em compósito de resina epóxi reforçada por fibra de vidro .....</b>	<b>23</b>
3.1    Desenho do modelo CAD da pá .....	23
3.2    Criação do molde em CAD da pá.....	33
3.3    Obtenção do código de maquinação CNC do molde da pá .....	38
3.4    Maquinação CNC do molde da pá .....	41
3.5    Fabrico da pá em compósito de epóxi-fibra de vidro .....	44
<b>4. Simulação da resistência estrutural da pá .....</b>	<b>47</b>
4.1    Força Centrífuga .....	47
4.2    Força Aerodinâmica .....	61
4.3    Forças conjuntas, centrífuga e aerodinâmica .....	67
4.4    Ensaio para a Força Centrífuga a várias velocidades.....	73
4.5    Comparação de resultados.....	75

5. Conclusões .....	79
Referências bibliográficas .....	83

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Turbina eólica de Charles Brush. ....	3
Figura 2.2 - Turbina eólica Darrieus. ....	4
Figura 2.3 - Turbina eólica Savonius. ....	5
Figura 2.4 - Turbina eólica Smith-Putnam. ....	5
Figura 2.5 - Turbina eólica Gedser. ....	6
Figura 2.6 - Constituição de uma microturbina eólica. ....	9
Figura 2.7 - Elementos intervenientes num escoamento em torno do perfil alar. ....	9
Figura 2.8 - Configuração do número de pás numa turbina eólica de eixo horizontal. ....	11
Figura 2.9 - Configuração “upwind” e “downwind” das turbinas eólicas de eixo horizontal. .	11
Figura 2.10 - Configurações do mecanismo de rotação (“yaw”). ....	12
Figura 2.11 - Configurações alternativas do rotor da turbina Darrieus. ....	13
Figura 2.12 - Princípio de funcionamento da turbina Savonius. ....	14
Figura 2.13 - Rotor Savonius com pás retas (à esquerda), helicoidais (centro) e helicoidais com espaçamento (direita). ....	14
Figura 2.14 - Coeficiente de potência de vários tipos de rotores de acordo com o TSR. ....	15
Figura 2.15 - Acampamento nómada com uso de turbina eólica na China. ....	16
Figura 2.16 - Afilamento da pá em madeira. ....	19
Figura 2.17 - Processo de remoção do desnível da face frontal. ....	19
Figura 2.18 - Pá esculpida em madeira. ....	20
Figura 2.19 - Vista explodida da pá em compósito de fibra de vidro. ....	20
Figura 2.20 - Fibra de vidro em manta (esquerda) e em tecido (direita). ....	21
Figura 3.1 - Elementos constituintes de um perfil alar. ....	23
Figura 3.2 - Tabela de coordenadas XYZ do perfil e curva obtida. ....	24
Figura 3.3 - Processo de conversão da curva do perfil alar em “sketch” manipulável. ....	24
Figura 3.4 - Redimensionamento da curva do perfil através da função “scale”. ....	25
Figura 3.5 - Função “offset” para prolongamento do bordo de fuga da pá. ....	26
Figura 3.6 - Alinhamento coincidente de todos os “sketches” num ponto comum. ....	26
Figura 3.7 - Função “rotate” para variação angular do “sketch”. ....	27
Figura 3.8 - Vista geral de todos os “sketches” com as respetivas variações angulares. ....	27
Figura 3.9 - Vista em perspetiva da variação angular nos perfis aerodinâmicos. ....	28
Figura 3.10 - Conceção da zona de transição da pá. ....	28
Figura 3.11 - Vista em perspetiva de todos os “sketches” e linha diretriz usados no “loft”. ...	29
Figura 3.12 - Pré-visualização da função “loft” com duas linhas diretrizes adicionais usadas. ...	29
Figura 3.13 - Aspeto final da pá após aplicação do “loft”. ....	30
Figura 3.14 - Vista em perspetiva do corte lateral e aspeto final na pá. ....	30
Figura 3.15 - Montagem das três pás. ....	30
Figura 3.16 - Corte circular para permitir a fixação da pá ao gerador. ....	31

Figura 3.17 - Montagem das três pás após o corte circular respetivo. ....	31
Figura 3.18 - Gerador. ....	32
Figura 3.19 - Função “shell” com geometria variável aplicada na pá. ....	32
Figura 3.20 - Linha de divisão na ponta da pá e no corte circular. ....	33
Figura 3.21 - Linhas de divisão laterais. ....	34
Figura 3.22 - Divisão da pá em duas partes. ....	34
Figura 3.23 - Linha de partição e “Draft analysis”. ....	35
Figura 3.24 - Superfície de partição. ....	35
Figura 3.25 - Criação do molde com a ferramenta “tooling split”. ....	36
Figura 3.26 - Aspeto final das cavidades do molde juntas e abertura para molde macho. ....	36
Figura 3.27 - Núcleo e cavidade do molde. ....	37
Figura 3.28 - Cavidade superior e inferior do molde. ....	37
Figura 3.29 - Molde macho da pá. ....	37
Figura 3.30 - Superfície escolhida para maquinar. ....	38
Figura 3.31 - Posição do início de maquinação e medidas do molde. ....	38
Figura 3.32 - Tipo de fresa utilizada e estratégia de maquinação na fase de desbaste. ....	39
Figura 3.33 - Tipo de fresa utilizada e estratégia de maquinação para a fase de acabamento. .....	39
Figura 3.34 - Resultados da simulação de maquinação. ....	40
Figura 3.35 - Simulação do aspeto final do molde macho no programa de maquinação. ....	40
Figura 3.36 - Colagem das placas de poliuretano. ....	41
Figura 3.37 - Fresadora CeNeCe FR150. ....	41
Figura 3.38 - Fixação das placas de poliuretano na calha da fresadora. ....	42
Figura 3.39 - Interface gráfica do programa Mach 2. ....	42
Figura 3.40 - Interface gráfica do programa Mach 2 depois de percorridas as linhas de corte. ....	43
Figura 3.41 - Resultados finais da maquinação do molde das pás. ....	44
Figura 3.42 - Corte das tiras de fibra de vidro e de tecido desmoldante. ....	44
Figura 3.43 - Maquinação do molde macho e inserção na abertura destinada ao efeito. ....	45
Figura 3.44 - Saco de vácuo com as duas partes do molde no interior. ....	45
Figura 3.45 - Resultados finais da etapa de fibragem. ....	46
Figura 3.46 - Aspeto final da pá construída. ....	46
Figura 4.1 - Funcionamento normal da microturbina (à esquerda) e “furling” do rotor (centro e direita). ....	48
Figura 4.2 - Propriedades do compósito de fibra de vidro do tipo E inseridas no programa Cosmos Works. ....	49
Figura 4.3 - Propriedades mássicas da pá em compósito de epóxi-fibra vidro com furação simples e distância do seu centro de massa ao eixo de rotação. ....	49
Figura 4.4 - Restrição no furo da pá em compósito de epóxi-fibra de vidro com furação simples. ....	50

Figura 4.5 - Restrição na face direita da pá em compósito de epóxi-fibra com furação simples. ....	51
Figura 4.6 - Distribuição da força centrífuga que atua na pá. ....	51
Figura 4.7 - Definições utilizadas para a densidade da malha. ....	52
Figura 4.8 - Diagrama de tensões referente à força centrífuga na pá de compósito epóxi-fibra de vidro com furação simples. ....	52
Figura 4.9 - Distribuição das tensões num elemento de volume. ....	53
Figura 4.10 - Diagrama do fator de segurança referente à força centrífuga na pá de compósito epóxi-fibra de vidro com furação simples. ....	53
Figura 4.11 - Propriedades mássicas da pá em compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla e distância do seu centro de massa ao eixo de rotação. ....	54
Figura 4.12 - Restrições nos furos da pá em compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla. ....	55
Figura 4.13 - Diagrama de tensões referente à força centrífuga na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla. ....	55
Figura 4.14 - Diagrama do fator de segurança referente à força centrífuga na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla. ....	56
Figura 4.15 - Propriedades mecânicas da madeira do tipo mogno africano inseridas no programa Cosmos Works. ....	57
Figura 4.16 - Propriedades mássicas da pá em madeira com furação simples e distância do seu centro de massa ao eixo de rotação. ....	57
Figura 4.17 - Diagrama de tensões referente à força centrífuga na pá de madeira com furação simples. ....	58
Figura 4.18 - Diagrama do fator de segurança referente à força centrífuga na pá de madeira com furação simples. ....	58
Figura 4.19 - Propriedades mássicas da pá em madeira com furação simples e distância do seu centro de massa ao eixo de rotação. ....	59
Figura 4.20 - Diagrama de tensões referente à força centrífuga na pá de madeira com furação dupla. ....	60
Figura 4.21 - Diagrama do fator de segurança referente à força centrífuga na pá de madeira com furação dupla. ....	60
Figura 4.22 - Montagem das pás no gerador. ....	61
Figura 4.23 - Área projetada da pá. ....	62
Figura 4.24 - Aplicação da força aerodinâmica na superfície da pá. ....	63
Figura 4.25 - Diagrama de tensões referente à força aerodinâmica na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação simples. ....	63
Figura 4.26 - Diagrama do fator de segurança referente à força aerodinâmica na pá de compósito de epóxi- fibra de vidro com furação simples. ....	64
Figura 4.27 - Diagrama de tensões referente à força aerodinâmica na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla. ....	64

Figura 4.28 - Diagrama do fator de segurança referente à força aerodinâmica na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla. ....	65
Figura 4.29 - Diagrama de tensões referente à força aerodinâmica na pá de madeira com furação simples. ....	65
Figura 4.30 - Diagrama do fator de segurança referente à força aerodinâmica na pá de madeira com furação simples. ....	66
Figura 4.31 - Diagrama de tensões referente à força aerodinâmica na pá de madeira com furação dupla. ....	66
Figura 4.32 - Diagrama do deslocamento referente à força aerodinâmica na pá de madeira com furação dupla. ....	67
Figura 4.33 - Diagrama de tensões referente às forças conjuntas na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação simples. ....	67
Figura 4.34 - Diagrama do deslocamento referente às forças conjuntas na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação simples. ....	68
Figura 4.35 - Diagrama do fator de segurança referente às forças conjuntas na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação simples. ....	68
Figura 4.36 - Diagrama de tensões referente às forças conjuntas na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla. ....	69
Figura 4.37 - Diagrama do deslocamento referente às forças conjuntas na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla. ....	69
Figura 4.38 - Diagrama do fator de segurança referente às forças conjuntas na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla. ....	70
Figura 4.39 - Diagrama de tensões referente às forças conjuntas na pá de madeira com furação simples. ....	70
Figura 4.40 - Diagrama do deslocamento referente às forças conjuntas na pá de madeira com furação simples. ....	71
Figura 4.41 - Diagrama do fator de segurança referente às forças conjuntas na pá de madeira com furação simples. ....	71
Figura 4.42 - Diagrama de tensões referente às forças conjuntas na pá de madeira com furação dupla. ....	72
Figura 4.43 - Diagrama do deslocamento referente às forças conjuntas na pá de madeira com furação dupla. ....	72
Figura 4.44 - Diagrama do fator de segurança referente às forças conjuntas na pá de madeira com furação dupla. ....	73
Figura 4.45 - Evolução do fator de segurança com a velocidade do vento. ....	75

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Classificação das turbinas eólicas de acordo com a sua dimensão e potência....	10
Tabela 3.1 - Elementos de dimensionamento da pá ao longo das secções. ....	25
Tabela 3.2 - Elementos de redimensionamento da corda do perfil alar. ....	27
Tabela 4.1 - Tabela de resultados dos ensaios da força centrífuga a diferentes velocidades do vento. ....	74
Tabela 4.2 - Comparação dos resultados obtidos para a força centrífuga.....	75
Tabela 4.3 - Comparação dos resultados obtidos para as cargas aerodinâmicas. ....	76
Tabela 4.4 - Comparação dos resultados obtidos para as forças em conjunto. ....	77



## Lista de símbolos

$A$	Área	$[m^2]$
$C_D$	Coeficiente de arrasto aerodinâmico	
$C_p$	Coeficiente de potência	
$F_C$	Força Centrífuga	$[N]$
$F_D$	Força Aerodinâmica	$[N]$
$P_{Betz}$	Potência máxima extraída por uma turbina eólica	$[W]$
$P$	Potência	$[W]$
$R$	Distância do centro de massa da pá ao eixo de rotação	$[m]$
$v$	Velocidade	$[m/s]$

## Símbolos gregos

$\sigma_{Von Mises}$	Tensão de Von Mises	$[Pa]$
$\lambda$	Tip Speed Ratio	
$\rho$	Densidade de um fluido	$[kg/m^3]$
$\omega$	Velocidade angular	$[rad/s]$



## Lista de acrónimos

AC	Alternate current
CAD	Computed Assisted Design
CNC	Computer Numeric Control
DC	Direct current
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
PME	Pequena e média empresa
PTN	Pressão e temperatura normais
STL	Standard Tessellation Language
TSR	Tip speed ratio
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine



# 1. Introdução

## 1.1 Objetivos e contribuição da dissertação

Esta dissertação tem como objetivo primordial estudar o processo de construção de uma pá em compósito de resina epóxi reforçada por fibra de vidro para uma microturbina eólica da família de turbinas projetadas por Hugh Piggott (Piggott, 2013) e destinada à autoconstrução, particularmente em países em vias de desenvolvimento. Esta família de turbinas, tem o seu diâmetro contido entre 1200 e 4200 mm e foi aceite a nível mundial tendo já sido construídas mais de 1000 unidades.

Este projeto de turbinas eólicas foi adotado por um vasto número de organizações sem fins lucrativos com o objetivo de ajudar populações a tornarem-se autónomas na capacidade de obter abastecimento de energia elétrica. A viabilidade económica, a rigidez, a facilidade de construção e o bom desempenho a velocidades do vento baixas e médias (entre 3 a 10 m/s) com capacidade de resistir a condições atmosféricas extremas são os objetivos principais deste projeto. A turbina dispõe de um rotor de três pás de inclinação fixa acoplado a um gerador de ímanes permanentes e fluxo axial, dispensando o uso de uma caixa de velocidades. A orientação da turbina ao vento é feita através de uma cauda de catavento (“tailvane”). A proteção da turbina face a condições de vento críticas está a cargo de um mecanismo de rotação contruído na montagem do rotor à cauda, que permite que o plano de rotação do rotor se torne oblíquo em relação à direção do vento reduzindo desta forma a área do rotor que fica exposta. A turbina é suportada por uma torre fixa ao solo através de cabos, que pode ser nivelada para inspeção e manutenção. O material aplicado no rotor e na cauda é a madeira, devido à resistência deste tipo de material a cargas cíclicas, a sua disponibilidade, baixo preço e facilidade de manuseamento. Já os elementos restantes são obtidos através de placas e tubos de aço soldados.

Atualmente, a utilização principal deste tipo de turbinas destina-se ao carregamento autónomo de baterias, embora algumas já estejam ligadas à rede. O gerador da turbina pode operar a 12, 24 e 48V.

O desempenho aerodinâmico do rotor da turbina eólica para a qual a presente pá foi projetada foi estudado por Monteiro et al. (2013). Neste trabalho, o rotor da turbina eólica, construído em madeira foi ensaiado experimentalmente em túnel de vento, tendo estes resultados sido comparados com os obtidos por dois códigos de Teoria de Elemento de Pá, WT\_Perf e QBlade. Os ensaios foram realizados a diferentes velocidades num intervalo de 3 a 7,7 m/s. Os resultados obtidos, concordantes entre os dois métodos, permitiram concluir que o rotor apresenta um coeficiente de potência ( $C_p$ ) de 0,40. Este parâmetro ( $C_p$ ) representa o cociente entre a potência total disponível no escoamento de ar e a potência realmente extraída pela turbina, sendo que o valor de 0,40 representa um resultado muito bom para este tipo de turbinas eólicas.

Pretende-se igualmente nesta dissertação estudar a rigidez estrutural da pá em compósito de epóxi-fibra de vidro de forma a ser possível estabelecer um meio de comparação com a do rotor em madeira estudado por Monteiro et al. (2013) e retirar conclusões sobre qual o material mais resistente e mais favorável à construção.

## **1.2 Visão geral e organização da dissertação**

A presente dissertação é constituída por cinco capítulos, sendo a sua organização descrita de seguida.

O primeiro capítulo realiza uma introdução ao tema do trabalho, expondo a perspetiva geral do mesmo, o problema em estudo e a sua relevância e os objetivos da dissertação.

No segundo capítulo é descrita a evolução histórica da energia eólica, são dados a conhecer os elementos constituintes mais importantes de uma microturbina eólica assim como os tipos de microturbinas eólicas. É também realizada uma breve análise às aplicações mais atuais para as microturbinas eólicas e demonstrado o procedimento a utilizar para o fabrico de pás da turbina eólica em madeira e compósito de fibra de vidro.

No terceiro capítulo é dado a conhecer todo o processo experimental da construção, tanto do modelo da pá, como dos moldes que levaram à sua origem e são efetuados comentários e descrições de todos os passos do processo de realização da pá: os projetos virtuais do modelo da pá e dos moldes, o fabrico do molde e, por fim, o fabrico da pá em compósito de fibra de vidro.

No quarto capítulo são descritos todos os ensaios relativos à resistência estrutural da pá no programa de simulação estrutural Cosmos Works. São comparados os resultados para uma pá em madeira com os de uma pá em compósito de epóxi-fibra de vidro com dois tipos de furação para fixação das pás, sendo que, em um dos casos de furação a pá apenas possui um furo responsável pela fixação da mesma ao gerador e no outro caso possui dois furos. Os ensaios realizados neste capítulo visam a análise de reposta da pá à força centrífuga e à força aerodinâmica. Os resultados que se obtêm permitem comparar a tensão máxima existente na pá, assim como o deslocamento máximo presente e o fator de segurança mínimo que a mesma apresenta.

No quinto capítulo é elaborada uma revisão aos objetivos propostos na dissertação assim como uma recapitulação do trabalho desenvolvido. São também enumeradas algumas sugestões acerca de novos trabalhos relacionados com o realizado na presente dissertação.

## 2. Energia eólica - revisão bibliográfica

O termo eólico tem origem no termo do latim “aeolicus”, que pertence ou é relativo a Éolo, Deus dos ventos na mitologia grega e que desta forma se relaciona fortemente com o vento. O vento é um fenómeno da natureza resultante do deslocamento de massas de ar, sendo portanto considerado ar em movimento. É influenciado pelos efeitos locais e pela rugosidade do solo, devido às diferenças de pressão atmosférica, que têm origem térmica e se relacionam diretamente com a radiação solar e os processos de aquecimento das massas de ar.

A aplicação prática da energia eólica traduz-se na conversão da energia cinética de uma massa de ar em energia mecânica. A energia mecânica gerada provém da rotação das pás de uma turbina eólica em torno de um eixo, que, através de um gerador elétrico, converte a mesma em energia elétrica (Lima, 2009).

### 2.1 Evolução histórica

Existem diferentes referências quanto à data em que se iniciou o aproveitamento do vento para várias funções. Segundo Lima (2012), pelo ano 200 a.C. existiam moinhos utilizados para bombagem de água na China. Ao longo do tempo, as técnicas evoluíram e expandiram-se pelo Mundo até ao século XI, altura em que já se fazia uso destes mesmos moinhos para moagem de alimentos. Mais tarde, o povo holandês alterou estes moinhos e deu-lhes outra função, a de drenar as planícies que ficariam inundadas.

Para Batista (2013), os moinhos de vento de eixo vertical surgiram antes dos moinhos de vento de eixo horizontal que surgiram na Babilónia no século XVII a.C. sendo utilizados em processos de irrigação. O povo persa, algum tempo depois, melhorou o modelo criado pelos babilónios utilizando-o na moagem de cereais.

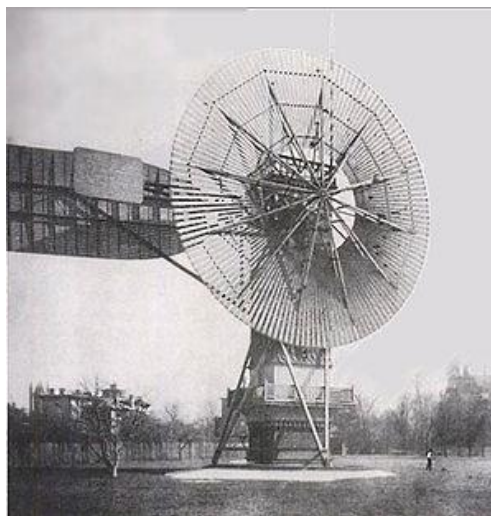


Figura 2.1 - Turbina eólica de Charles Brush.

O primeiro sistema eólico com vista à produção de energia elétrica foi desenvolvido por Charles Brush em 1888, em Cleveland, nos EUA. Foi através da sua empresa, (Brush Electric) que Charles Brush desenvolveu a turbina eólica que viria a ser designada de turbina Brush. Esta turbina tinha na sua estrutura base um moinho de vento provido de 144 pás de madeira, com 17 metros de diâmetro e um gerador de corrente contínua com o intuito de carregar um conjunto de baterias. Para além destes elementos possuía também uma cauda que permitia que o rotor girasse na direção do vento. Este modelo tem como principal característica a utilização de uma caixa de velocidades cuja função seria adequar a velocidade de rotação do eixo à velocidade de operação do gerador. Apresentava uma potência de 12 kW (Marques, 2004).

Nos anos 30, George Darrieus desenvolveu um modelo de turbina diferente do usual. Esta turbina de origem francesa ficou intitulada de turbina Darrieus e a sua característica principal era possuir um rotor de eixo vertical. A sua estrutura é simples e em forma elipsoidal (Ferreira, 2011). O princípio de rotação desta turbina baseia-se na força de sustentação de um perfil aerodinâmico e as suas principais vantagens residem no facto do gerador e a caixa de velocidades estarem colocados no solo e não necessitar de sistema de direcionamento relativo à direção do vento incidente. Uma falha neste tipo de configuração está relacionada com a velocidade do vento ser relativamente baixa junto ao solo e ir aumentando de acordo com a altura. Deste modo, quando se encontra em contacto com velocidades mais elevadas a turbina tem mais dificuldade em manter-se estável, pois está sujeita a diferentes esforços. Esta turbina por apresentar um valor baixo para o binário, necessita de um sistema auxiliar para o seu arranque (Marques, 2004). Este tipo de turbinas, dado o carácter cíclico das cargas nas pás, apresenta ainda graves problemas de fadiga estrutural.



Figura 2.2 - Turbina eólica Darrieus.

Pela mesma época, foi desenvolvido por Sigurd Savonius um outro modelo de turbina de eixo vertical denominada de turbina Savonius, em honra do seu criador. Esta turbina possui duas lâminas de forma cilíndrica formando uma geometria em “S” (Ferreira, 2011). Esta turbina teve origem na Finlândia e a força de arrasto era o meio de funcionamento do rotor, funcionando a baixa velocidade e binário elevado. A sua utilidade principal era a moagem de grãos e o bombeamento de água (Marques, 2004). Este tipo de turbinas, tal como todas as turbinas de eixo vertical, apresenta problemas de fadiga estrutural dado as cargas aerodinâmicas nas pás variarem ao longo de uma rotação (fadiga cíclica).



Figura 2.3 - Turbina eólica Savonius.

Por volta de 1940 surgiu uma turbina designada de turbina Smith-Putnam com capacidade de gerar 1,25 MW, que foi instalada em Vermont, nos EUA. Possuía duas pás e um rotor de 53 m de diâmetro (Marques, 2004).

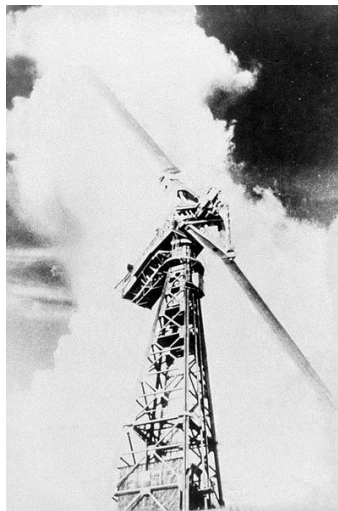


Figura 2.4 - Turbina eólica Smith-Putnam.

No ano de 1956 Johannes Jull projetou uma turbina de 200 kW que possuía um rotor de eixo horizontal com 24 m de diâmetro constituído por 3 pás. Assim nasceu a turbina Gedser, a primeira turbina eólica de corrente alternada (Marques, 2004). Esta turbina teve um papel determinante na evolução das turbinas que se sucederam (Resende, 2011).



Figura 2.5 - Turbina eólica Gedser.

## 2.2 Elementos constituintes de uma microturbina eólica

Em geral, todas as microturbinas eólicas são compostas pelo rotor, pelo gerador e pela torre. As turbinas de grandes dimensões possuem um sistema de rotação para direcionar o rotor na direção do vento e possuem também uma caixa de velocidades que faz com que o gerador rode a uma velocidade superior à do rotor com a função de produzir eletricidade eficientemente. Já as microturbinas eólicas geralmente usam caudas para direcionar o rotor passivamente na direção do vento. A presença da caixa de velocidades também deixa de ser necessária porque muitas destas turbinas têm o gerador ligado diretamente ao rotor. A figura 2.6 apresenta a constituição mais comum de uma microturbina eólica.

O rotor é projetado para extrair energia a partir do vento e convertê-la em energia mecânica, que tem de ser suficientemente robusto para suportar cargas fixas, periódicas ou aleatórias, e é constituído por várias pás acopladas num cubo comum.

As pás são componentes críticos do rotor e consistem em perfis aerodinâmicos que interagem com o vento e convertem a energia extraída deste em energia mecânica. A geometria e as dimensões das pás são determinadas pelos requisitos de desempenho que se pretendem da turbina eólica. Devem ser tidos em conta simultaneamente dois problemas comuns no projeto da pá: o desempenho aerodinâmico e a resistência estrutural. Muitas vezes é otimizada aerodinamicamente toda a forma da pá, mas não se tem em atenção os requisitos estruturais. Vantagens do ponto de vista aerodinâmico, como o bordo de fuga ser muito afiado, podem apresentar dificuldades na construção e obrigar a uma revisão do projeto para que seja possível prosseguir com a construção. A escolha dos materiais tem importância na fase de projeto e análise estrutural (Song, 2012).

De entre vários materiais utilizados no fabrico das pás destacam-se a madeira, aço, alumínio, compósito de fibra de carbono e compósito de fibra de vidro.

A madeira é um material de baixa densidade, na qual se aplica alguma resina, apresenta facilidade no seu manuseamento, no entanto ao longo do tempo tem tendência a originar fissuras e irregularidades. Desta forma provoca um aumento de atrito com o vento e reduz a sua eficiência. Madeira revestida com resina epóxi é a indicada para rotores com diâmetro inferior a 10 m pois este revestimento impermeabiliza a madeira aumentando o seu tempo de vida útil e provocando uma diminuição do atrito entre o fluido e a superfície da pá. Desta forma, a superfície da pá apresentará menor rugosidade ( $R_a$ ). Uma característica da madeira que a torna um bom material para o fabrico de pás é a sua excelente resistência à fadiga.

O aço como material de fabrico de pás eólicas tem duas vantagens mecânicas: a elevada resistência e robustez. O aço é muito suscetível de apresentar sintomas de corrosão, no entanto com tratamentos superficiais específicos, este problema é facilmente minimizado, obtendo-se resultados positivos. A desvantagem principal na utilização deste material é a alta densidade ( $\approx 7,9 \text{ g/cm}^3$ ) (MatWeb), pois provoca um aumento de inércia no sistema, o que torna mais difícil o arranque do mesmo.

O alumínio é mais leve ( $\approx 2,7 \text{ g/cm}^3$ ) que o aço e apresenta melhor resistência relativamente à corrosão. No entanto, em geral as ligas de alumínio, têm baixa resistência à fadiga ( $\approx 180 \text{ MPa}$ , por exemplo para a liga AA7000), comparativamente ao aço ( $\approx 472 \text{ MPa}$ , por exemplo para um aço de baixa liga) (MatWeb). Assim, requer manutenções constantes de forma a avaliar os seus ciclos de vida. A vida útil de pás em alumínio é mais reduzida em relação às pás de aço.

A fibra de carbono-epóxi é um material compósito, que melhora a rigidez estrutural das pás mas é mais utilizada experimentalmente, pois em projetos de pequeno porte os custos associados não apresentam viabilidade.

Por fim destaca-se a fibra de vidro-epóxi, que é o material mais aplicado nas pás das turbinas eólicas atuais. Em relação ao preço é mais vantajoso quando comparado com a fibra de carbono-epóxi. Apresenta boa resistência mecânica, resistência à corrosão e à fadiga. Este material torna o processo de fabrico mais acessível devido à sua facilidade de manuseamento (Pires, 2010).

Em todas as turbinas eólicas de produção de energia elétrica tem de estar inserido um gerador, componente que converte a energia mecânica da rotação das pás em energia elétrica. Enquanto na maior parte das turbinas de grandes dimensões são utilizados geradores síncronos ou de indução, nas turbinas de baixo porte são usados geradores de ímanes permanentes de acionamento direto (“direct drive”) que são na verdade geradores síncronos especiais com polos suficientes para permitir um correto funcionamento do gerador à mesma velocidade de rotação do rotor. Como não necessitam de uma caixa de velocidades, estes geradores possibilitam uma maior fiabilidade do sistema (Song, 2012).

### **2.2.1 Fuselagem da turbina (“nacelle”)**

A fuselagem (“nacelle”) é um compartimento que abriga todos os componentes principais da turbina à exceção do rotor. Dentro da fuselagem localiza-se uma armadura principal que constitui a espinha dorsal da turbina à qual estão acoplados os rolamentos que suportam o cubo, o gerador, a cauda e os rolamentos do mecanismo de rotação. A função principal da fuselagem é proteger estes componentes da luz solar, chuva, neve e gelo. Em certos tipos de microturbinas, tais como as projetadas por Hugh Piggott, não existe uma fuselagem.

A torre é o elemento que permite a fixação da turbina ao solo e funciona como meio de suporte de todos os outros componentes da mesma. Como sustenta todos os elementos constituintes da turbina, está sujeito a solicitações estruturais. Para além do peso e resistência aerodinâmica da turbina eólica, a torre tem de ser dimensionada para resistir a cargas de vento horizontais.

Grande parte das turbinas eólicas de baixo porte são direcionadas para o vento, com a utilização de uma cauda. Os elementos que constituem a cauda são: o veio e a asa, componentes primários do mecanismo de rotação (“yaw”), que permite que a turbina assuma a direção do vento. As turbinas maiores geralmente dispensam o uso da cauda, pois com o aumento do tamanho da turbina, o peso e as cargas associadas à cauda tornam-se excessivos. Nestas turbinas de grande dimensão, com diâmetros do rotor superiores a 5 metros, a orientação ao vento é efetuada por rotação de toda a parte superior da turbina por meio de motores elétricos.

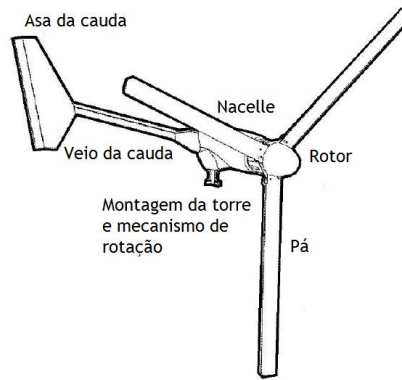


Figura 2.6 - Constituição de uma microturbina eólica.  
 Fonte: Song, 2012 (adaptado)

### 2.3 Tipos de microturbinas eólicas

As microturbinas eólicas dividem-se em dois géneros distintos que se distinguem quanto ao tipo de eixo onde está inserido o rotor. Podem tratar-se de turbinas de eixo horizontal (HAWT - Horizontal Axis Wind Turbine) ou turbinas de eixo vertical (VAWT - Vertical Axis Wind Turbine). As turbinas eólicas também se podem distinguir quanto ao seu fator de propulsão, nomeadamente através da força de sustentação ou através da força de arrasto. (Coutinho, 2012).

Segundo Patel et al. (2013), quando o perfil alar da pá é colocado em contacto com um fluxo de vento, o ar passa pela parte superior e inferior da pá, denominadas de extradorso e intradorso respetivamente. Devido à curvatura da pá, o ar que passa no extradorso tem de percorrer uma maior distância por unidade de tempo do que o ar que passa pelo intradorso. Deste modo, as partículas de ar deslocam-se mais rapidamente no extradorso. Cria-se então uma zona de baixa pressão no mesmo local do perfil alar. Esta diferença de pressão entre o intradorso e o extradorso origina uma força aerodinâmica. A componente perpendicular desta força denomina-se sustentação e a componente paralela ao escoamento denomina-se arrasto, tal como se observa na figura 2.7.

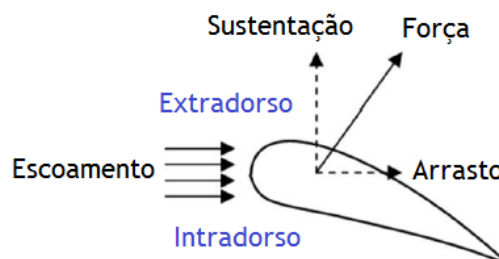


Figura 2.7 - Elementos intervenientes num escoamento em torno do perfil alar.  
 Fonte: Patel et al., 2013 (adaptado)

Tratando-se de uma asa de um avião, a força de sustentação faria a asa subir e portanto o avião levantaria voo. Visto que as pás de uma turbina eólica estão constantemente em contacto com o cubo, a força de sustentação provoca uma rotação em relação ao mesmo. Em adição à força de sustentação surge a força de arrasto que contraria a rotação do rotor. O principal objetivo no projeto de uma turbina eólica é obter uma relação sustentação-arrasto relativamente elevada, dependendo esta relação do comprimento da pá e tendo como objetivo maximizar a produção de energia a velocidades diferentes do vento (Bhattacharya, 2010).

As turbinas eólicas geralmente classificadas como microturbinas eólicas possuem uma potência não superior a 5 kW e um diâmetro máximo do rotor de 1,6 m. As mini turbinas eólicas têm a sua potência compreendida entre 5 e 50 kW e as turbinas eólicas de grandes potências, na ordem de 50 a 500 kW são denominadas de pequenas turbinas, tal como se observa na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Classificação das turbinas eólicas de acordo com a sua dimensão e potência.

Fonte: Estanqueiro et al., 2010 (adaptado)

Sub-classe	Diâmetro do rotor (m)	Classificações normativas (m <sup>2</sup> )	Classificações comuns (kW)	Aplicações
Micro-turbina	D <1,6 m	A <2m <sup>2</sup>	<5kW	Domésticas
Mini-turbina	1,6 m < D <5m	2 < A < 78,5m <sup>2</sup>	5 <Pu <50 kW	Urbanizações e pequenas empresas
Pequena turbina	5m <D <16m	78,5 <A < 200m <sup>2</sup>	50 <Pu <500kW	Grandes urbanizações e PMEs de consumo significativo

As turbinas eólicas de eixo horizontal possuem o eixo de rotação paralelo ao solo e praticamente paralelo à direção do vento incidente (Patel et al., 2013). Este tipo de configuração é a mais comum e também a mais utilizada. Funcionam predominantemente através de forças de sustentação, forças que atuam perpendicularmente ao escoamento mas também em parte devido a forças de arrasto, atuando estas paralelamente ao escoamento. O facto de operarem predominantemente sob o efeito de forças de sustentação permite-lhes obter muito mais potência do que sob efeito de forças de arrasto. De modo geral, as pás constituintes deste tipo de turbinas são fabricadas a partir de madeira, alumínio ou compósito de epóxi-fibra de vidro (Lima, 2009).

De acordo com Horn (2010), a velocidade de rotação de uma turbina depende bastante do número de pás que o seu rotor possui. Quanto menos pás forem utilizadas, maior será a velocidade do rotor. Para sistemas de geração de energia elétrica, utiliza-se um número reduzido de pás com o objetivo de se obter maior velocidade por parte do rotor de forma a

simplificar a construção do gerador elétrico dispensando a necessidade de uma caixa de velocidades, componente de elevada manutenção e suscetível de avarias.

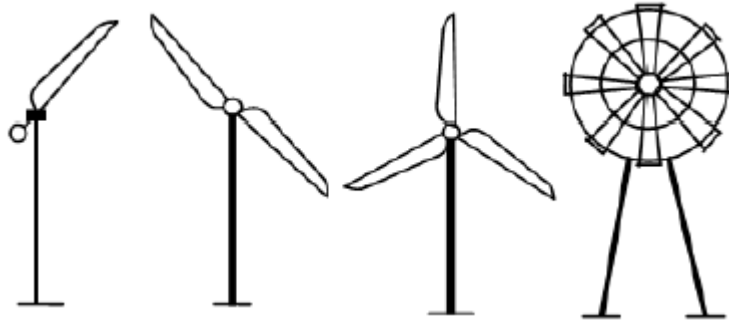


Figura 2.8 - Configuração do número de pás numa turbina eólica de eixo horizontal.  
Fonte: Patel et al., 2013 (adaptado)

Através da figura 2.9 observa-se que uma turbina eólica de eixo horizontal pode ter o seu rotor posicionado frontalmente (“upwind”) ou à retaguarda (“downwind”). As turbinas “upwind” têm contacto com o fluxo de vento diretamente enquanto nas turbinas “downwind”, o rotor está posicionado na retaguarda, permitindo que o vento incida primeiro no gerador. A vantagem presente nas turbinas “upwind” é que estas não sofrem do efeito de sombra, uma interferência aerodinâmica que ocorre quando o rotor se encontra muito próximo da torre. Contudo, para manter o rotor sempre alinhado na direção do vento, é necessário recorrer a um dispositivo de rotação (“yaw mechanism”) e posicionar o rotor algo afastado da torre da turbina. Por outro lado, as turbinas “downwind” são mais flexíveis e podem não necessitar de um mecanismo de rotação da torre, o que traz benefícios a nível financeiro tornando os projetos mais acessíveis mas, pelo facto de se posicionar o rotor no lado contrário ao sentido do vento, surgem então cargas desniveladas nas pás à medida que passam pelo efeito de sombra da torre (Mathew et al., 2012).

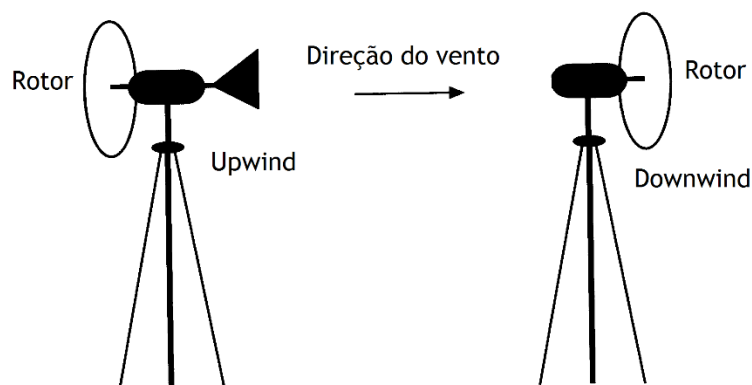


Figura 2.9 - Configuração “upwind” e “downwind” das turbinas eólicas de eixo horizontal.  
Fonte: Piggott, 2000 (adaptado)

Contrariamente às turbinas eólicas de eixo vertical, este tipo de turbinas não são omnidirecionais, o que implica a sua mudança de direção de acordo com a direção imposta pelo vento. Desta forma, torna-se necessário que este tipo de turbinas possuam um mecanismo de rotação da turbina, como já foi referido. Este mecanismo pode ser ativo através de um motor elétrico ou hidráulico que direciona o rotor mecanicamente contra o vento. Para utilizar um mecanismo passivo, recorre-se a uma cauda de catavento (“tail vane”) ou uma cauda de ventoinha (“fan tail”). Ambos os tipos de mecanismo passivo usam a força do vento para orientarem o rotor na direção do vento sem, para isso, necessitarem de apoio humano. Podem também ser posicionados estes mecanismos nas turbinas “downwind”, no entanto em vez de se recorrer a uma cauda de catavento ou de ventoinha, estas turbinas podem inclinar um pouco as suas pás dando ao rotor a configuração de um cone raso ou de um semicone, como se observa na figura 2.10. Esta inclinação em cone das pás (“coning”) provoca uma auto-orientação do rotor, permitindo que o próprio sirva de cauda. Em pás pesadas o ângulo de “coning” pode apenas ir de 1 a 2 graus, enquanto em pás leves pode ir de 8 até 10 graus (Gipe, 2004).

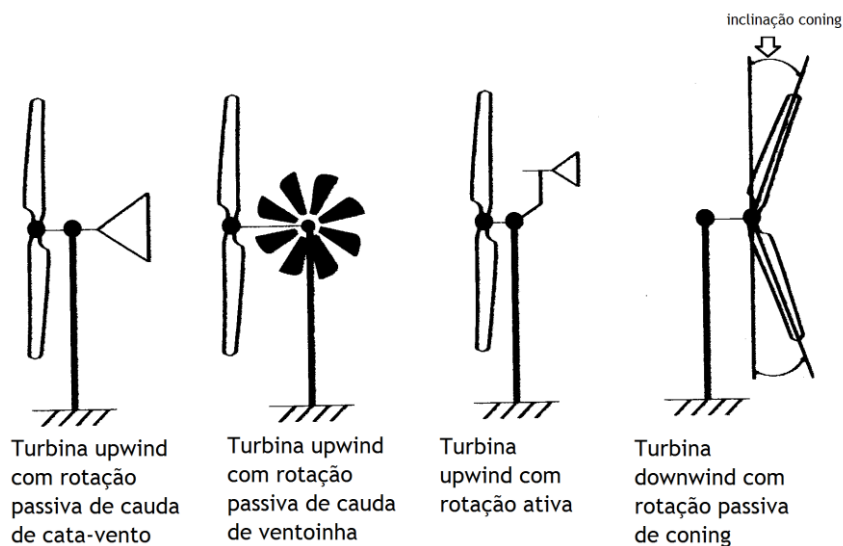


Figura 2.10 - Configurações do mecanismo de rotação (“yaw”). Fonte: Gipe, 2004 (adaptado)

Segundo Gipe (2004), a principal vantagem das microturbinas de eixo vertical modernas é o facto de serem omnidirecionais, ou seja, aceitam o vento de qualquer direção. Esta vantagem simplifica o seu projeto pelo facto de não ser necessário a turbina “procurar” o vento. Deste modo, não se torna essencial o uso de um mecanismo de rotação (“yaw”) para o efeito. O eixo vertical permite também que a montagem do gerador e a transmissão sejam feitos ao nível do solo, assim como a manutenção dos mesmos.

Este tipo de microturbinas apresentam também algumas desvantagens pelo facto de não terem capacidade de iniciar o movimento por si só, à exceção do modelo Savonius, que não é adequado

para aplicações isoladas. Também não podem fazer uso de melhores condições do vento, visto que a altura da torre é mais baixa e o rotor está mais próximo do solo, e sofrem de problemas de fadiga, dado o carácter cíclico das cargas aerodinâmicas que variam ao longo de cada rotação das pás.

Os modelos mais comuns são a turbina Darrieus e a turbina Savonius. É feita uma análise a cada um dos modelos de seguida.

A turbina Darrieus foi apresentada em 1931 por George Darrieus, e no projeto original as pás da turbina tinham a forma de uma bateadeira de ovos ou elipsoidal para minimizar os esforços à flexão que as pás sofriam. O rotor tem os perfis aerodinâmicos montados verticalmente num eixo central. Quando o rotor inicia a sua rotação com a velocidade do vento incidente, as pás sentem um fluxo de ar devido à rotação do rotor e, entre o fluxo de ar resultante e a corda da pá, surge um ângulo de ataque positivo. Cria-se então uma força de sustentação e o rotor é forçado a rodar para a frente. Como o ângulo de ataque é dependente da rotação da pá, a força de sustentação também varia. Portanto, para obter aceleração a partir da força motriz, o rotor deve estar já em rotação mas, em situações em que o rotor está parado, tal não é possível. Por esta razão é que as turbinas Darrieus não arrancam por si próprias e necessitam de um motor para iniciar a sua rotação. Por vezes, usa-se também um rotor de uma turbina Savonius em conjunto com a turbina Darrieus para permitir o seu auto arranque.

Outro desafio perante estas turbinas é a proteção contra velocidades do vento excessivas pois contrariamente às turbinas de eixo horizontal, estas não podem ser afastadas da direção do vento. Atualmente existem inúmeras configurações para o rotor da turbina Darrieus como se observa na figura 2.11.



Figura 2.11 - Configurações alternativas do rotor da turbina Darrieus. Fonte: Gipe, 2004

A turbina Savonius é uma turbina simples de eixo vertical inventada por Sigurd Savonius em 1922. No seu projeto original, era constituída por duas pás semicilíndricas em forma de “S”. Ambos os semicilindros da turbina enfrentam o vento ao mesmo tempo. Dado um fluxo de ar, o coeficiente de arrasto é superior na superfície côncava em relação à superfície convexa, logo a força de arrasto presenciada pela superfície côncava será também superior à da superfície

convexa. É através desta diferença da força de arrasto que o rotor da turbina eólica gira e se gera energia mecânica como se ilustra na figura 2.12.

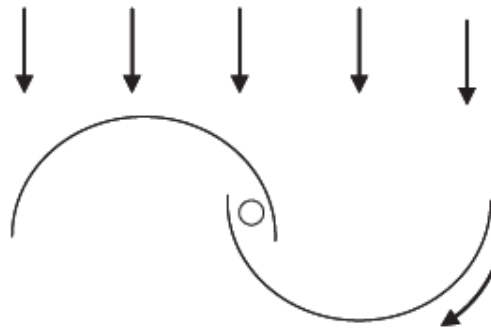


Figura 2.12 - Princípio de funcionamento da turbina Savonius. Fonte: Mathew et al., 2012.

Existem outros tipos de configurações para o rotor deste tipo de turbina presentes na figura 2.13, como o rotor helicoidal cuja função é melhorar a eficiência aerodinâmica. A maior vantagem da turbina Savonius é a sua simplicidade, pois não são necessários métodos e capacidades técnicas para o seu fabrico, podendo ser facilmente produzidas em oficinas locais. É um tipo de turbina atrativa para aplicações em países subdesenvolvidos. Como este tipo de turbina tem grande robustez a velocidades baixas e produz um binário elevado, é facilmente aplicável em aplicações como a bombagem de água. No entanto, a sua maior desvantagem é a baixa eficiência (Mathew et al., 2012).

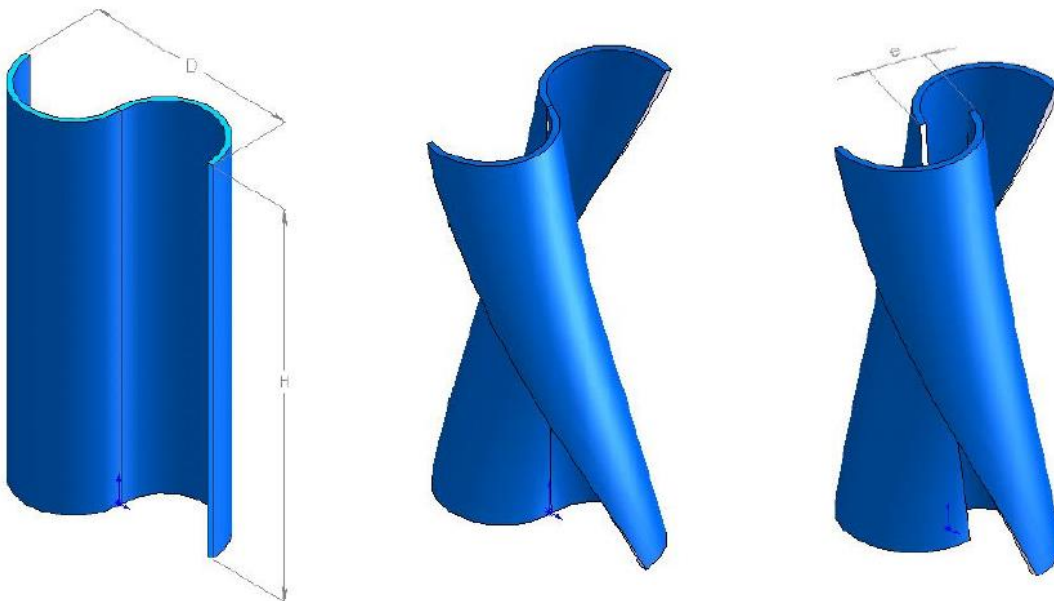


Figura 2.13 - Rotor Savonius com pás retas (à esquerda), helicoidais (centro) e helicoidais com espaçamento (direita). Fonte: Giovannella, 2004 (adaptado)

## 2.4 Limite de Betz

A relação entre a potência disponível pelo escoamento de ar na área da turbina e a potência efetivamente extraída pela turbina é dada pelo coeficiente de potência ( $C_p$ ). O coeficiente de potência máximo numa turbina eólica foi determinado por Albert Betz, físico alemão, em 1919. A teoria do limite de Betz define que uma turbina eólica apenas consegue extrair 59,3% da energia cinética proveniente do vento tendo o valor teórico de  $16/27$ . Esta potência máxima é obtida quando a velocidade de saída do rotor da turbina é igual a  $1/3$  da velocidade do vento.

A potência obtida a partir do vento descreve-se na seguinte expressão:

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 (\pi R^2) \quad (2.1)$$

Sendo  $P$  a potência disponibilizada pelo vento,  $\rho$  a densidade do ar (nas condições PTN),  $V$  a velocidade do vento e  $R$  o raio da pá.

Aplicando o limite teórico de Betz à equação obtém-se:

$$P_{Betz} = \frac{161}{272} \rho V^3 (\pi R^2) \quad (2.2)$$

A potência máxima extraída por uma turbina eólica através do vento é definida então por  $P_{Betz}$ . Os coeficientes de potência das turbinas eólicas atuais não ultrapassam ainda os 50% (Horn, 2010). A figura 2.14 apresenta os valores dos vários coeficientes de potência dos rotores das turbinas eólicas atuais.

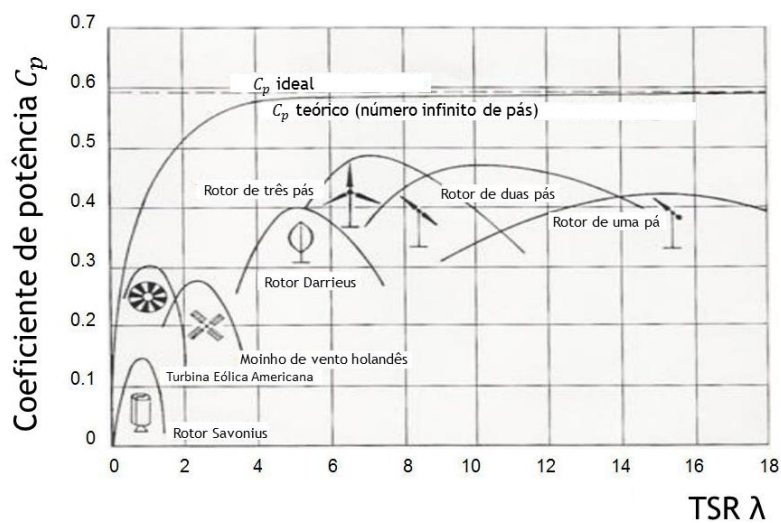


Figura 2.14 - Coeficiente de potência de vários tipos de rotores de acordo com o TSR.  
Fonte: Wiki-cleantech (adaptado).

## 2.5 Aplicações das microturbinas eólicas

As aplicações da energia eólica podem dividir-se em várias categorias distintas nomeadamente a produção de energia em locais remotos, produção de energia em paralelo com a rede e bombagem de água.

Segundo Gipe (2004), para além de serem conhecidas pelas suas funções de bombagem de água e moagem de grãos, as turbinas eólicas há décadas que se distinguem também pela capacidade de gerar energia fora da rede em locais remotos. Acredita-se que existam cerca de 100 mil pequenas turbinas eólicas em utilização por pastores nómadas no noroeste da China.

Estas pequenas turbinas eólicas são a única fonte de energia disponível nas grandes planícies asiáticas que se estendem desde a China até à União Soviética e apresentam uma dimensão de tal forma reduzida que podem ser transportadas a cavalo de acampamento em acampamento. A figura 2.15 demonstra um exemplo deste tipo de utilização para as pequenas turbinas eólicas.



Figura 2.15 - Acampamento nómada com uso de turbina eólica na China. Fonte: Gipe, 2004

Surge então a questão de o que é realmente um local remoto. A rede pode instalar uma linha elétrica em quase todos os locais que se pretenda, desde que esse serviço seja contratado. Alguém que viva a mais de um quilómetro de um local onde exista rede elétrica, perceberá que fica mais em conta instalar um sistema eólico independente do que instalar potência da rede.

Como o vento é um recurso de natureza variável, torna-se necessário recorrer a uma forma de armazenamento da energia. Muitas vezes utilizam-se baterias em habitações remotas devido à necessidade de uma fonte de energia elétrica estável para alimentar os consumos dessas mesmas habitações. As baterias armazenam energia em excesso durante dias mais ventosos para uso posterior durante dias em que não há tanto vento. Em sistemas eólicos de carregamento de baterias, a corrente contínua (DC) armazenada nas baterias pode ser

convertida em corrente alternada (AC), a mesma que é fornecida pela rede de energia. A produção de energia a partir da energia eólica tem um custo inferior à energia gerada a partir de geradores a gasolina ou gasóleo.

Um terço da população mundial vive sem eletricidade. Na China metade da população não tem acesso a energia da rede. Muitas nações de terceiro Mundo tentam expandir os seus sistemas de energia para atender às necessidades de eletrificação rural. A maioria das nações está a seguir o padrão definido pelos países desenvolvidos que visa construir novas centrais de produção de energia e estender as linhas de energia de rede até às zonas rurais. Contudo, com a evolução da produção local e descentralizada de energia através de sistemas de energia híbridos (eólicos e solares), esta solução não é tão universalmente aceite como no passado. Embora estes sistemas híbridos produzam pouca energia em comparação com as centrais de produção de energia, a energia gerada é suficiente para as necessidades de algumas aldeias em países pouco desenvolvidos. Os sistemas híbridos, por terem um custo relativamente baixo, permitem aos governos levar energia às aldeias remotas mais facilmente. A partir do momento que a rede de energia se estende até essas aldeias, os sistemas híbridos usados anteriormente podem ser reutilizados noutras aldeias.

Alguns casos de microturbinas eólicas podem gerar energia idêntica à fornecida pela rede, com tensão constante e corrente alternada de frequência constante.

Existem dois tipos de turbinas eólicas apropriadas para produção de energia compatível com a energia da rede: os que usam geradores assíncronos e os que usam alternadores. Independentemente de qual é usado, a sua ligação à rede é a mesma. A turbina é conectada aos terminais do quadro elétrico ou ligada diretamente ao transformador da rede. Desta forma, a turbina torna-se parte do circuito elétrico do edifício. Se a turbina estiver ligada imediatamente depois do contador elétrico, será a mesma a alimentar as aplicações domésticas ou de outro cariz, reduzindo a necessidade de consumo de energia diretamente a partir da rede.

A energia produzida pela turbina flui para o quadro elétrico e segue a partir deste para o primeiro circuito que necessite de energia. Se estiver a ser produzida mais energia do que a usada pelo primeiro circuito, fluirá para o próximo e por aí em diante. Quando a turbina não tem capacidade de alimentar o circuito como se deseja, a rede cobre a diferença de energia necessária. Por outro lado, se não houver consumo de energia enquanto a turbina está em funcionamento, a energia produzida flui para o quadro elétrico, passa pelo contador e prossegue para as linhas da rede. Algumas companhias de energia requerem o uso de um contador separado para acompanhar a produção de energia da turbina.

As turbinas eólicas têm sido usadas para bombagem de água, aplicação esta que ainda representa uma utilização importante da energia eólica tanto em países desenvolvidos como em desenvolvimento. As turbinas de múltiplas pás ou moinhos, dado o seu elevado binário, são

usadas para rega nas grandes planícies da América do Norte, no Pampa argentino, no “Outback” australiano e no “Veld” sul-africano. Estima-se que existam ainda em uso mais de um milhão de moinhos (Gipe, 2004).

## 2.6 Autoconstrução de pás para microturbinas

De acordo com Piggott (2000), num processo de fabrico das pás do rotor de uma microturbina eólica, é preferível optar por um projeto com um perfil aerodinâmico com bom desempenho tal como um projeto de três pás montadas num rotor horizontal com um TSR de aproximadamente 6. Um rotor pesado será mais difícil de colocar em rotação do que um mais leve e assim que este entre em rotação, será mais difícil pará-lo. As pás mais pesadas sofrem mais o efeito da força centrífuga. A pá ideal deve ser leve, particularmente na ponta, onde a sua velocidade tangencial é mais elevada e robusta perto da raiz.

O fabrico das pás do rotor pode ser realizado em vários materiais, dos quais se destacam a madeira e o compósito de epóxi-fibra de vidro.

A madeira é um material bastante apropriado, por ser leve, forte e resistente à fadiga. Por outro lado, visto tratar-se de um material natural, nem sempre é fácil encontrar madeira com qualidade consistente. O compósito de epóxi-fibra de vidro é um material muito utilizado, no entanto é mais difícil construir pás neste material do que em madeira pois é necessário criar os moldes, o que se torna tão trabalhoso como esculpir a madeira (Piggott, 2013).

Para o tipo de madeira aceita-se cedro ou pinheiro-larício. Pinho e abeto também são bastante utilizados. É possível construir uma pá a partir de tiras de madeira coladas umas às outras, porém torna-se mais propício surgirem defeitos devido aos nós, para além de ser mais difícil a sua escultura com ferramentas manuais.

O processo de fabrico da pá em madeira divide-se em cinco passos:

Em primeiro lugar marcam-se as estações no pedaço de madeira com espaçamentos iguais. As estações são pequenas divisões ao longo da pá desde a raiz até à ponta. De seguida mede-se a largura pretendida para a pá, a partir do bordo mais próximo e marcam-se pontos de forma a se unirem com uma linha.

O excedente de madeira que forma uma zona triangular é então removido, como se visualiza na figura 2.16.

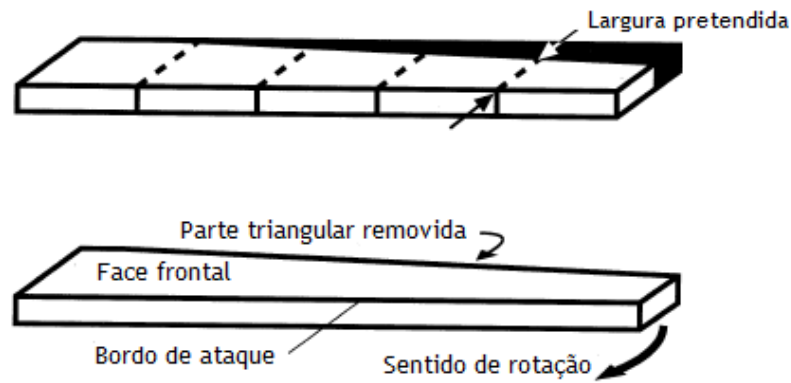


Figura 2.16 - Afilamento da pá em madeira.

O passo seguinte consiste em voltar a peça de modo a que o bordo de ataque fique atrás e a ponta do lado esquerdo. Em cada estação é desenhada uma linha vertical na face cortada anteriormente, paralela à face frontal. Marca-se um ponto em cada linha de forma a se obter o desnível observado na figura 2.17. Este desnível é responsável por determinar o ângulo de ajuste em cada estação. É então escavada a parte de madeira acima do bordo de fuga. A raiz permanece intacta para ser efetuada a montagem da pá ao cubo.

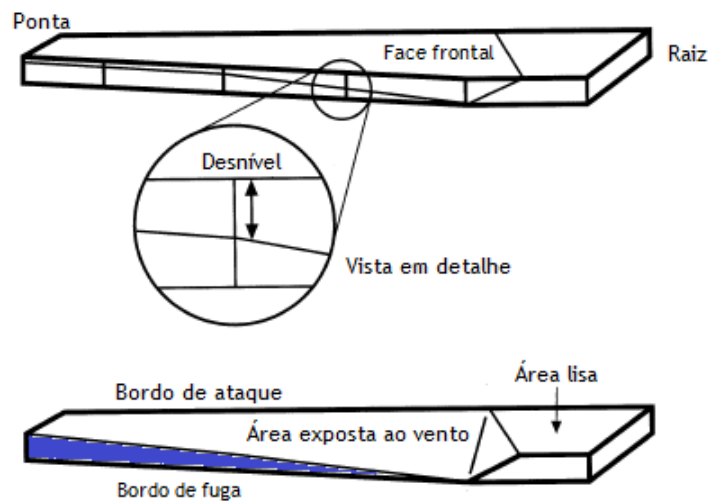


Figura 2.17 - Processo de remoção do desnível da face frontal.

Por fim, resta escavar a espessura de madeira por baixo da peça, zona representada a azul na figura 2.17, para que cada estação tenha a espessura pretendida. Pode também alisar-se a ponta com o objetivo de aproximar esta zona o mais possível do perfil aerodinâmico esperado.



Figura 2.18 - Pá esculpida em madeira.

No caso do fabrico das pás de uma microturbina eólica em compósito de fibra de vidro, o processo é diferente. A pá é dividida em duas metades, ambas feitas em compósito de fibra de vidro, um núcleo de madeira ou outro material e uma longarina ao longo da face interior desde a raiz até à ponta. Na figura 2.19 observam-se os componentes envolvidos. Uma vez que a pá tenha sido construída, e as duas partes tenham sido juntas, utiliza-se uma espuma de expansão para preencher a estrutura da pá e adicionar resistência e rigidez à pá.

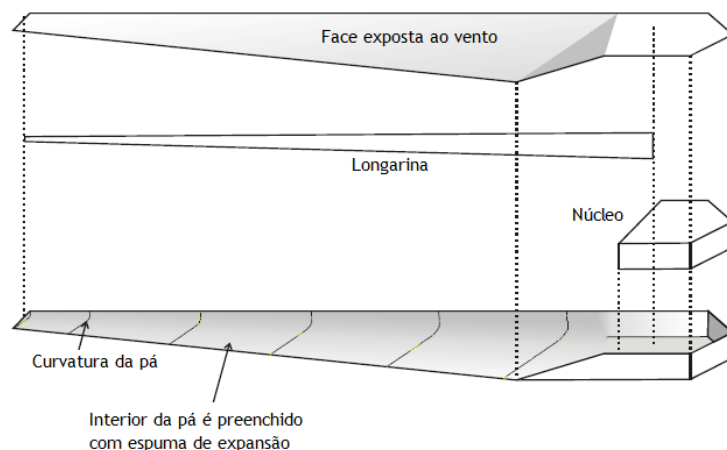


Figura 2.19 - Vista explodida da pá em compósito de fibra de vidro.  
Fonte: Corbyn et al., 2008 (adaptado)

De forma a ser possível produzir as pás em compósito de epóxi-fibra de vidro é necessário um modelo produzido antes (que pode ser em madeira). O molde será então criado a partir deste modelo e servirá para criar inúmeras cópias do modelo original. De salientar que, se o molde produzido apresentar falhas, estas falhas serão reproduzidas em todas as pás criadas a partir do mesmo, o que requer um nível elevado de rigor.

Depois de produzido o modelo em madeira, inicia-se a criação do molde em duas partes. As duas partes do molde são feitas separadamente com recurso a um número de camadas de fibra de vidro e resina. A fibra de vidro usada pode ser em manta ou tecido, sendo que, em manta

tem uma grande vantagem pelo facto de as fibras dentro desta terem orientação aleatória, o que permite que tenha a mesma resistência em qualquer direção. É a fibra de vidro mais barata e mais fácil de trabalhar visto a orientação não ser relevante. Já a fibra de vidro em tecido consiste em fios de fibra dentro de um tecido. É bastante forte na direção da trama (fios transversais) mas é ligeiramente mais cara e mais difícil de manipular porque a orientação da trama quando se corta um pedaço tem de ser escolhida com cuidado. O pedaço que é cortado tem tendência a desfiar-se a seco.



Figura 2.20 - Fibra de vidro em manta (esquerda) e em tecido (direita).

Depois de secas, as duas metades da pá são cortadas cuidadosamente e as pontas são alisadas para que possam encaixar na perfeição.

É inserido o núcleo de madeira na raiz da pá o que permite a fixação da pá ao cubo e adiciona resistência à compressão. A longarina é então fixa numa das metades da pá e cortada à medida para que a outra metade da pá encaixe exatamente no topo desta. A função da longarina é também adicionar resistência à pá da raiz até à ponta.

A outra metade da pá é colada sobre a primeira. O conjunto das duas pás é então recolocado no molde de forma a assegurar que as duas partes secam na forma pretendida. De seguida as duas metades são preenchidas por uma espuma de expansão. Por fim, a pá produzida sofre uma operação de polimento como acabamento (Corbyn et al., 2008).



### 3. Construção da pá em compósito de resina epóxi reforçada por fibra de vidro

Neste capítulo é dado a conhecer todo o processo que esteve por detrás da construção, tanto do modelo da pá, como dos moldes que levaram à sua origem. São efetuados comentários e descrições de todos os passos do processo de realização da pá: os projetos virtuais do modelo da pá e dos moldes, o fabrico do molde e, por fim, o fabrico da pá em compósito de epóxi-fibra de vidro.

#### 3.1 Desenho do modelo CAD da pá

O perfil alar escolhido para a construção da pá foi o perfil NACA 4412 que presentemente representa um bom compromisso entre desempenho e robustez estrutural. Um perfil alar é caracterizado por vários elementos sendo eles a corda, a flecha, a linha de curvatura média, a espessura máxima, o bordo de fuga, o bordo de ataque, o extradorso, o intradorso e o ângulo de ataque representados na figura 3.1. O bordo de ataque é a extremidade do perfil onde o escoamento incide com um certo ângulo denominado de ângulo de ataque e que depois se ramifica pelo extradorso e pelo intradorso que são as superfícies superior e inferior do perfil, respetivamente, e volta a convergir no bordo de fuga onde abandona o perfil. A corda apresenta a distância entre o bordo de ataque e o bordo de fuga e a linha de curvatura média é uma linha equidistante entre o extradorso e o intradorso que define a curvatura do perfil. A espessura do perfil é definida como sendo a distância máxima entre o seu extradorso e intradorso. Por fim, a flecha é a distância entre a linha de curvatura média e a espessura máxima.

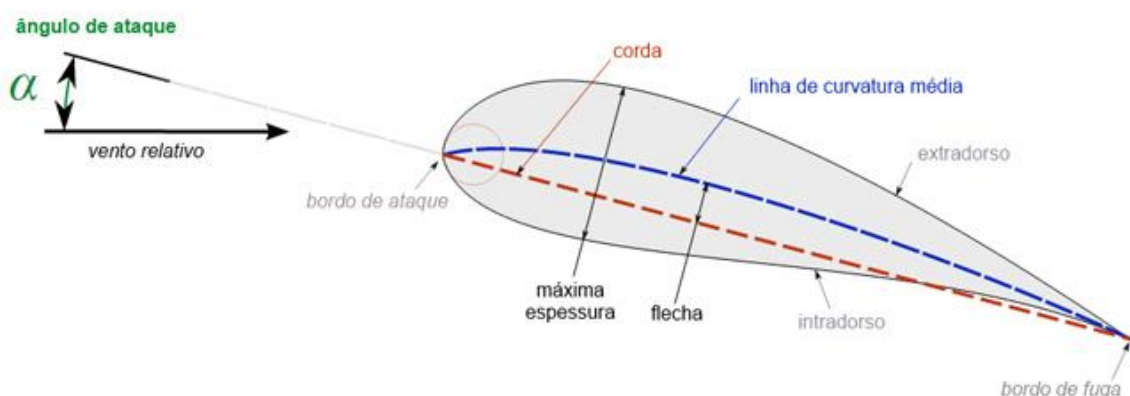


Figura 3.1 - Elementos constituintes de um perfil alar.

A primeira fase deste projeto consistiu na importação da forma do perfil alar NACA 4412 através das suas coordenadas X,Y empregando a ferramenta do programa SolidWorks destinada ao

efeito. Esta ferramenta do programa SolidWorks localiza-se no menu “Features-Curves-Curve Through XYZ Points”. Desta forma, foi possível obter o perfil em formato de desenho, em vez de apenas estar disponível em formato numérico através de um ficheiro de texto.

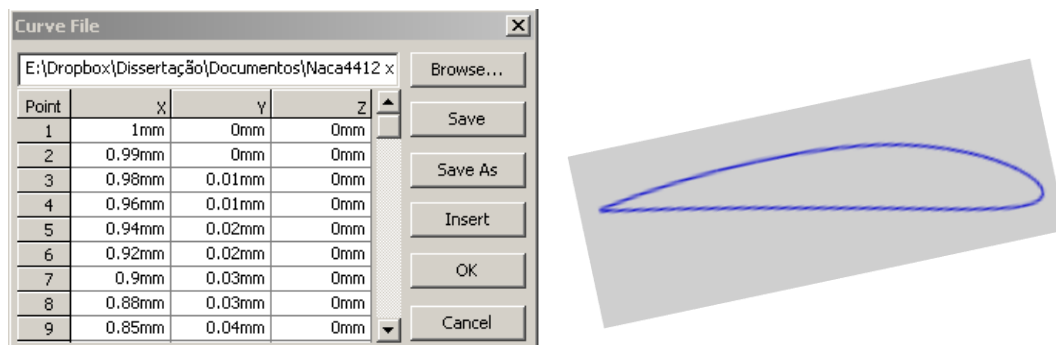


Figura 3.2 - Tabela de coordenadas XYZ do perfil e curva obtida.

Uma vez criada uma curva baseada nos pontos do perfil alar fornecidos, converteu-se essa curva em “sketch” para tornar possível o seu dimensionamento e manipulação.

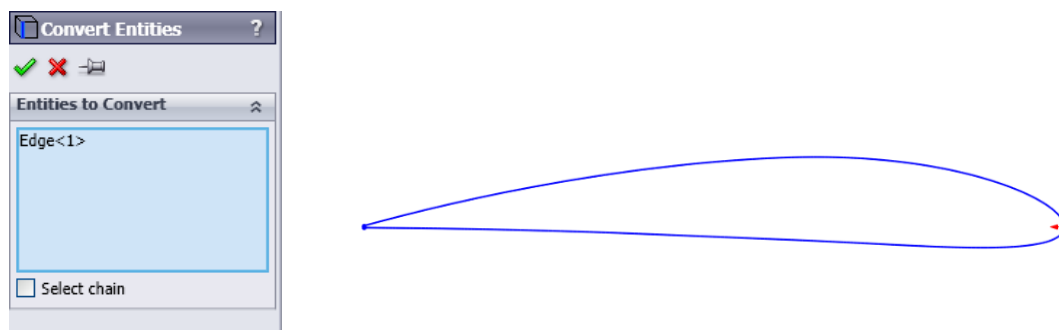


Figura 3.3 - Processo de conversão da curva do perfil alar em “sketch” manipulável.

De seguida foram criados nove planos de trabalho adicionais, distanciados 5 centímetros entre si para neles posteriormente se desenharem secções transversais da pá através da projeção do “sketch” inicial nestes novos planos de trabalho.

Visto que o perfil alar está dimensionado genericamente, apenas apresenta valores de corda numa gama de 0 a 1. Tornou-se portanto necessário redimensionar o perfil alar para valores reais, selecionados previamente através da análise de um modelo similar, construído em madeira. A tabela 3.1 indica os valores utilizados para a corda, ângulo e posição de cada curva, respetivamente.

Tabela 3.1 - Elementos de dimensionamento da pá ao longo das secções.

	Posição (m)	Corda (m)
<b>Ponta</b>	0,00	0,035
	0,05	0,045
	0,10	0,055
	0,15	0,065
	0,20	0,075
	0,25	0,085
	0,30	0,095
	0,35	0,105
	0,40	0,115
<b>Raiz</b>	0,45	0,125

A figura 3.4 demonstra o efeito da função “scale” na curva original. As dimensões reais dos perfis nas 9 secções ao longo da pá foram obtidas através desta função.

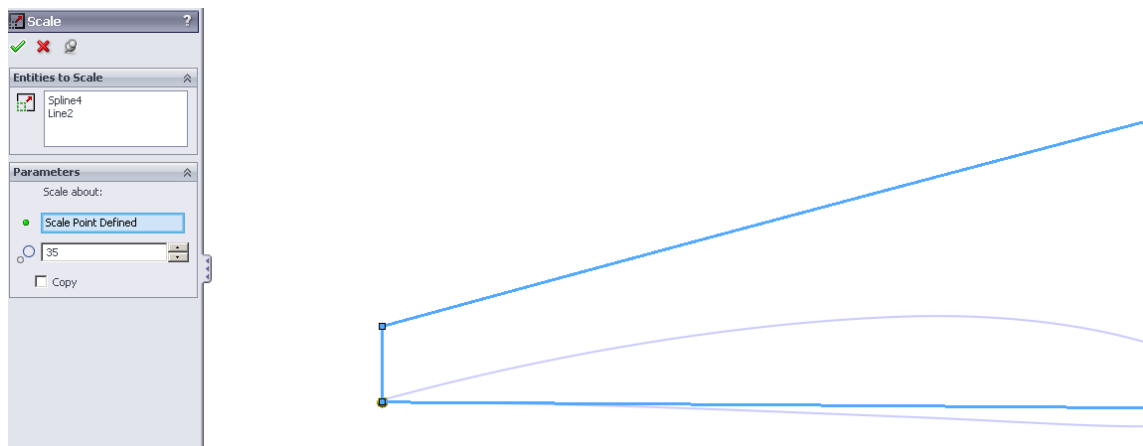


Figura 3.4 - Redimensionamento da curva do perfil através da função “scale”.

De seguida, fez-se uso da função “offset” em 2 mm para prolongar o bordo de fuga da pá, de modo a que este atingisse o valor de aproximadamente 3,6 mm. Este procedimento permitiu que a pá ganhasse volume, o que facilitou bastante a construção do molde. O molde da pá divide-se em duas partes: uma parte inferior e uma parte superior. Um valor inferior a 3,6 mm para o bordo de fuga da pá levaria a um conflito na fase de fibragem, pois a espessura do bordo de fuga seria de tal forma fina que não existiria separação entre a aresta da pá e a superfície do molde. Logo, seria impossível obter duas partes distintas do molde que se pudessem unir

uma à outra dada a espessura reduzida do bordo de fuga. O mesmo processo foi aplicado aos restantes “sketches”.

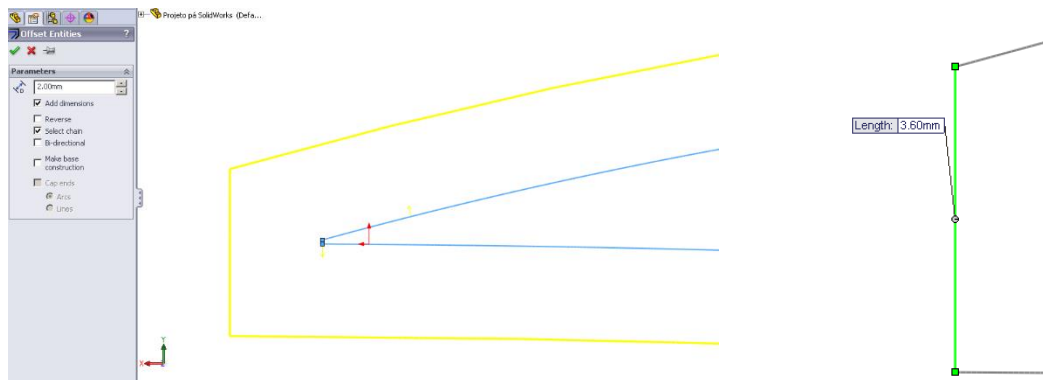


Figura 3.5 - Função “offset” para prolongamento do bordo de fuga da pá.

Traçou-se de seguida uma linha desde o bordo de fuga até ao bordo de ataque, com o objetivo de alinhar todos os “sketches” coincidentemente, num ponto comum a todos eles.

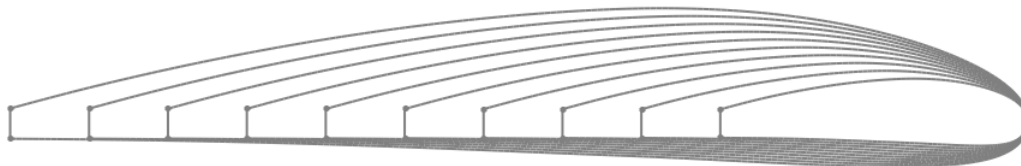


Figura 3.6 - Alinhamento coincidente de todos os “sketches” num ponto comum.

Cada “sketch” foi modificado a nível de rotação com o auxílio da ferramenta “rotate”, disponível nas ferramentas de “sketch”, visto o perfil da pá não ser de inclinação constante tal como se pode constatar da observação da tabela 3.2. Existe uma variação de ângulo de  $3^{\circ}$  a partir da sexta secção, tendo as posteriores uma inclinação de 6, 9, 12 e  $15^{\circ}$ , respetivamente. As figuras seguintes demonstram como se atingiram os resultados pretendidos.

Tabela 3.2 - Elementos de redimensionamento da corda do perfil alar.

	Posição (m)	Ângulo (°)	Corda (m)	Corda com offset (m)
<b>Ponta</b>	0,00	0	0,035	0,037
	0,05	0	0,045	0,047
	0,10	0	0,055	0,057
	0,15	0	0,065	0,067
	0,20	0	0,075	0,077
	0,25	3	0,085	0,087
	0,30	6	0,095	0,097
	0,35	9	0,105	0,107
	0,40	12	0,115	0,117
<b>Raiz</b>	0,45	15	0,125	0,127

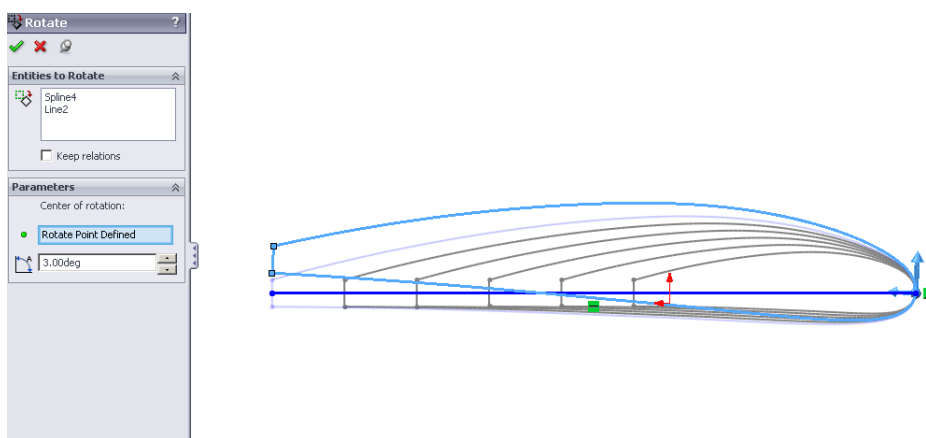


Figura 3.7 - Função “rotate” para variação angular do “sketch”.

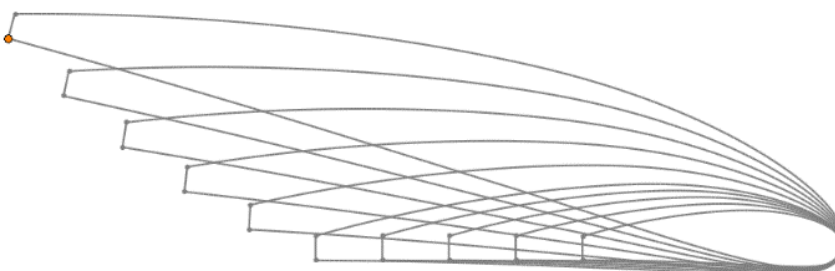


Figura 3.8 - Vista geral de todos os “sketches” com as respectivas variações angulares.

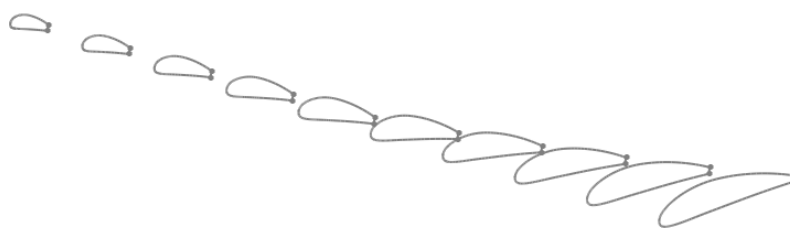


Figura 3.9 - Vista em perspectiva da variação angular nos perfis aerodinâmicos.

Uma vez concluído o desenho da região da pá com características aerodinâmicas, foi necessário conceber a fração correspondente à fixação da pá ao gerador. Não devendo, por razões estruturais e aerodinâmicas, ser as duas partes unidas repentinamente, existe necessariamente uma zona de transição. Esta região de transição foi possível de criar através da geração de mais 7 planos de trabalho adicionais, estando o primeiro distanciado de 5 cm do último plano existente e os 6 seguintes distanciado 2 cm entre si. Após vários testes concluiu-se que esta seria a configuração que conceberia uma transição mais suave entre as zonas aerodinâmica e de fixação da pá.

Em cada um destes planos de trabalho foi criado um “sketch” com uma geometria similar a um retângulo, existindo na aresta correspondente ao bordo de fuga da pá uma ligeira concavidade. Com esta modificação, desejou-se que o desmolde da pá se tornasse mais fácil pois, se o bordo de fuga fosse plano, como se tinha pensado inicialmente, ficaria mais facilmente impedido de se libertar da face do molde. De “sketch” para “sketch” houve uma redução do comprimento entre o bordo de ataque e o bordo de fuga, com o objetivo de manter em conformidade a forma geométrica da pá desde a região aerodinâmica criada anteriormente, até à região de transição.

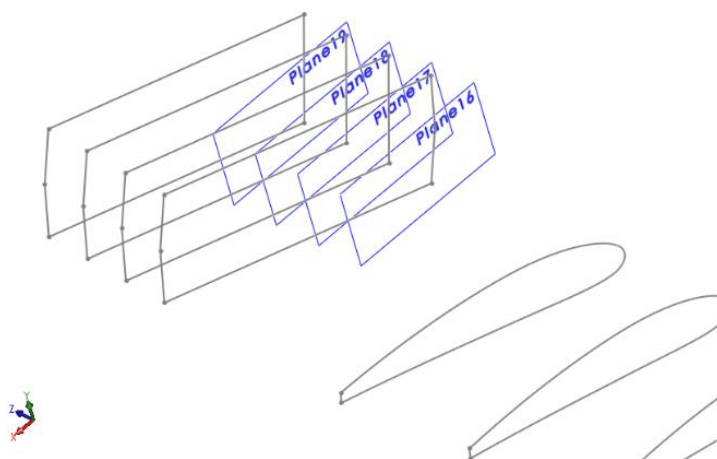


Figura 3.10 - Conceção da zona de transição da pá.

Após todas estas etapas fez-se uso da função “loft” para gerar um sólido a partir de todos os “sketches” criados. A função “loft” isolada não permite que os “sketches” descritos acima sejam adicionados sem recorrer a linhas diretrizes, denominadas no programa de “guidelines”. Estas linhas diretrizes representadas a violeta nas figuras 3.11 e 3.12 foram obtidas através de “sketches 3D”, que acompanham todos os “sketches” de acordo com as suas variações de espessura e inclinação. As figuras 3.11 e 3.12 representam a importância que cada linha diretriz teve na criação do “loft”. Para o resultado final tiveram de ser usadas 3 destas linhas no processo.

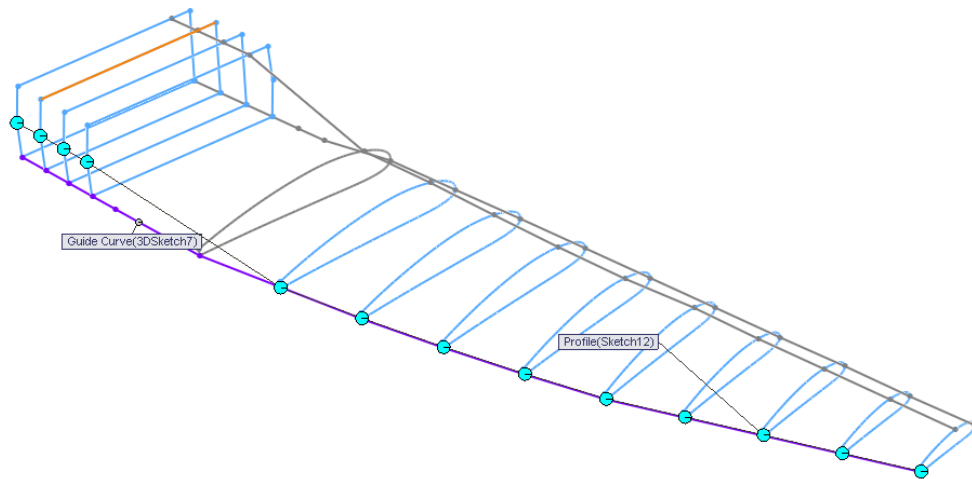


Figura 3.11 - Vista em perspectiva de todos os “sketches” e linha diretriz usados no “loft”.

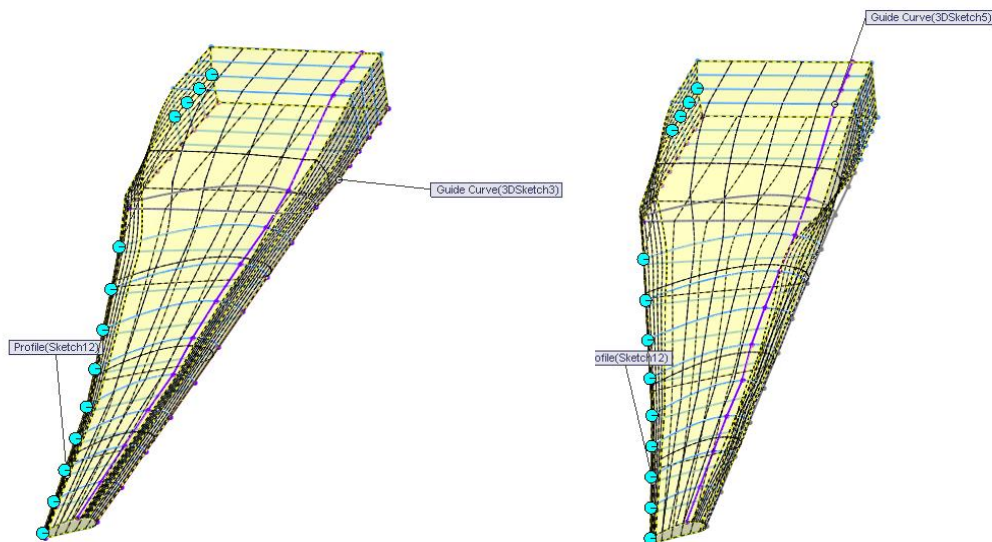


Figura 3.12 - Pré-visualização da função “loft” com duas linhas diretrizes adicionais usadas.

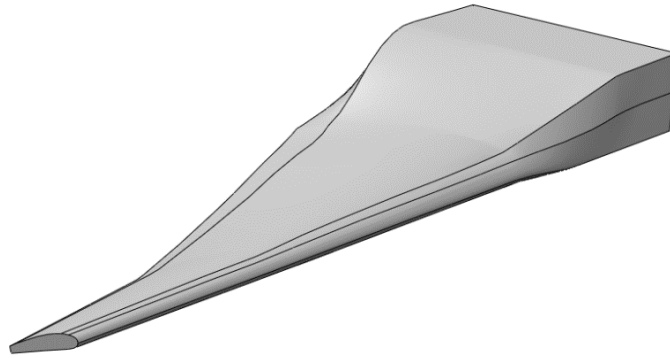


Figura 3.13 - Aspeto final da pá após aplicação do “loft”.

A fase seguinte consistiu num corte incidente sobre a face plana da zona de fixação da pá no lado correspondente ao bordo de ataque com o intuito de permitir o encaixe entre si das três pás. O corte provém de um “sketch” com uma forma aproximadamente triangular, sendo o ângulo formado entre a raiz da pá e a hipotenusa do triângulo criado dentro do “sketch”  $120^\circ$  como se visualiza na figura 3.14.

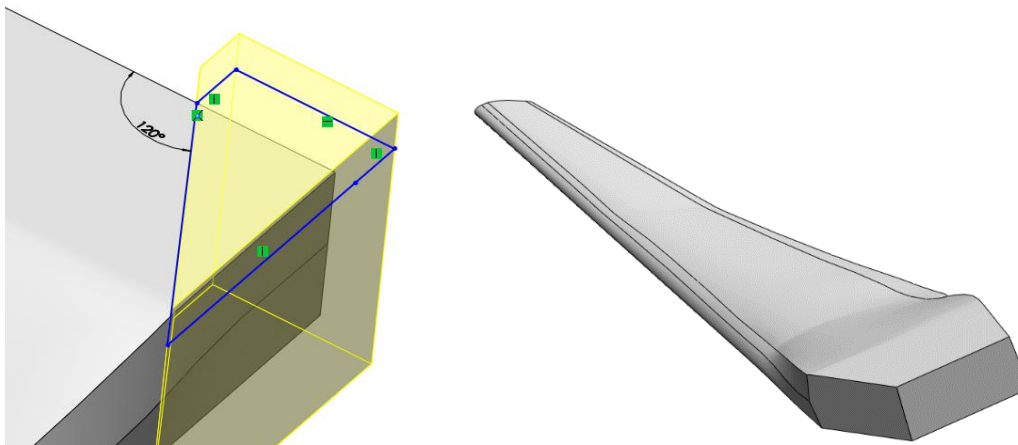


Figura 3.14 - Vista em perspectiva do corte lateral e aspeto final na pá.

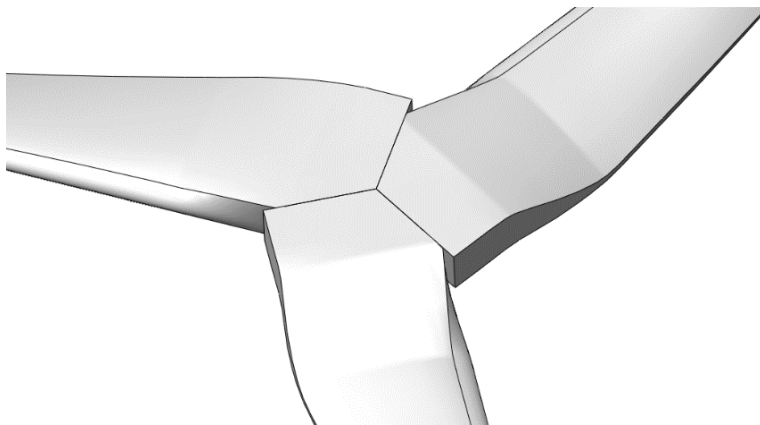


Figura 3.15 - Montagem das três pás.

Após este corte foi ainda criado um outro para permitir a fixação das três pás ao gerador, tendo este outro corte uma forma circular.

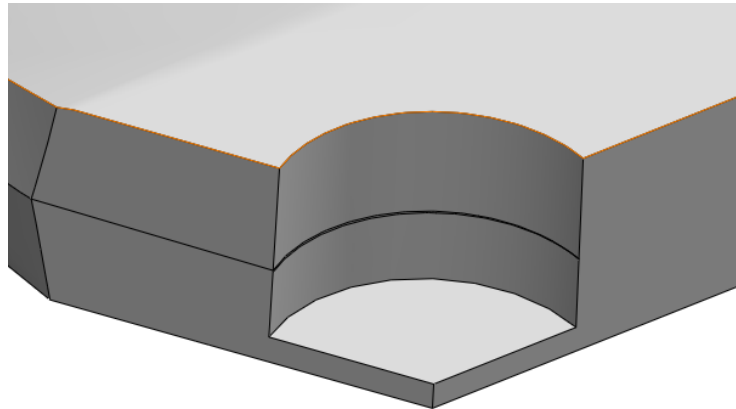


Figura 3.16 - Corte circular para permitir a fixação da pá ao gerador.

Na figura 3.16 visualiza-se o resultado final depois do corte circular ser executado, formando uma cavidade circular que coincide a nível dimensional com o veio existente no gerador tal como se pode observar na figura 3.18.

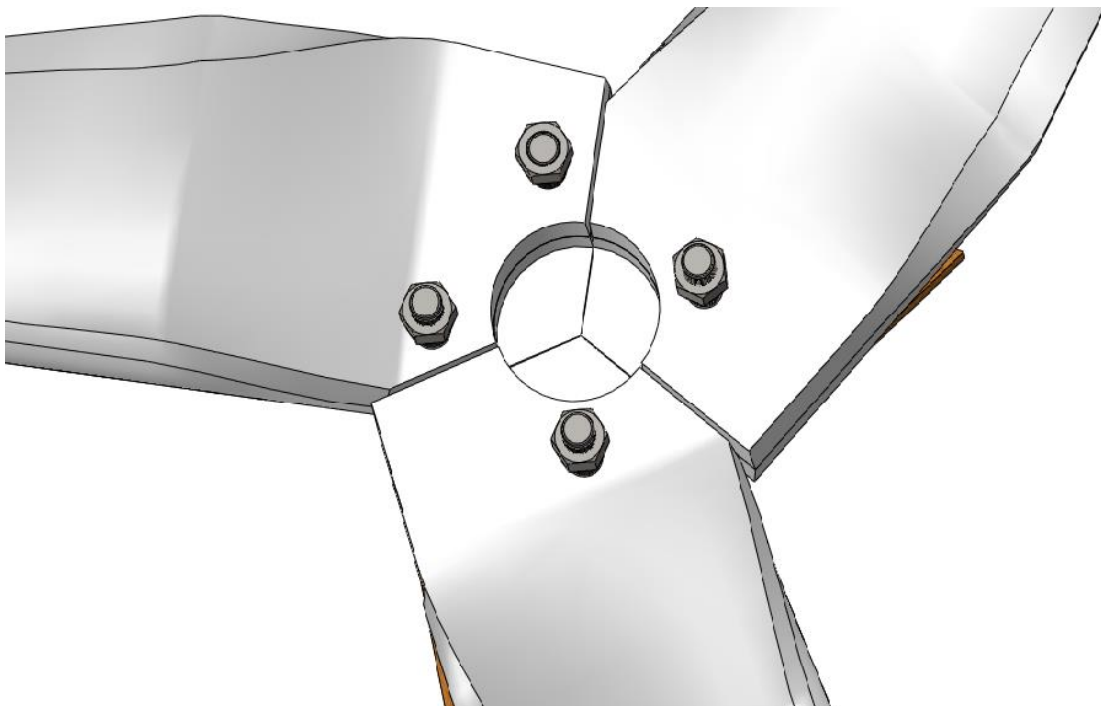


Figura 3.17 - Montagem das três pás após o corte circular respetivo.



Figura 3.18 - Gerador.

Após a pá ter a sua geometria exterior completa, utilizou-se a ferramenta “shell” com vista a criar uma cavidade no interior da pá, tal como se pode observar na figura 3.19, tendo-se seleccionado um valor de espessura de parede de 2 mm.

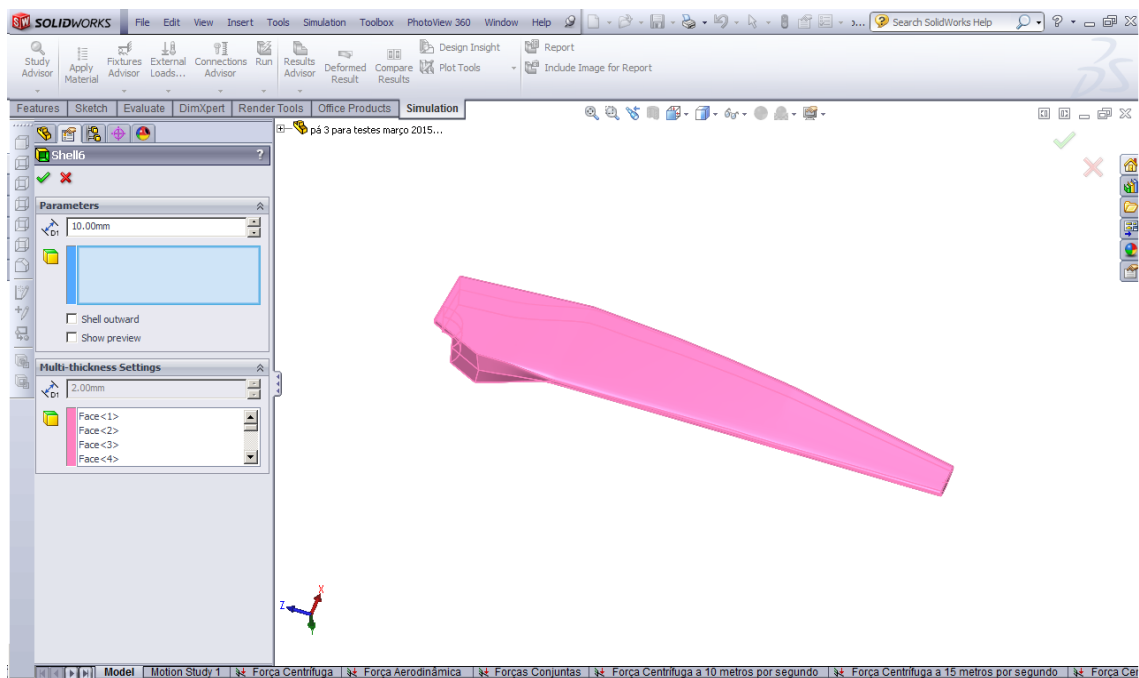


Figura 3.19 - Função “shell” com geometria variável aplicada na pá.

### 3.2 Criação do molde em CAD da pá

Depois de concluído o desenho computacional da pá, foi então iniciada a fase de projeto em computador do molde. Esta fase começou pela divisão da pá em duas partes, ao longo de todo o seu comprimento. Dada a forma assimétrica da pá, não pôde ser usado o método genérico utilizado no projeto de moldes que consiste na divisão da peça através de um plano de corte localizado a meio da sua espessura.

Neste caso, como a pá não é simétrica e apresenta uma geometria irregular, foi então necessário dividi-la através de linhas de divisão que acompanham todas as variações angulares e de comprimento de corda de cada secção transversal. A função das linhas de divisão é delimitar a parte superior e a parte inferior e permitir que as zonas mais problemáticas possam ser separadas. Para tal, criaram-se quatro linhas de divisão ("split lines").

A primeira linha de divisão está situada na ponta da pá, estando em conformidade com uma das linhas diretrizes utilizadas pelo "loft", como se pode visualizar na figura 3.20.

A segunda linha de divisão acompanha o corte circular em todo o seu perímetro, visto ser uma face de maior complexidade para efetuar uma divisão devido à sua geometria. A linha de divisão foi obtida através de um "sketch 3D".

De seguida, foi criada uma outra linha de divisão devido à criação do corte lateral anteriormente mencionado. Este corte veio assim interromper a forma original da pá, o que provoca uma descontinuidade geométrica, não permitindo uma divisão facilitada da face. Por fim, foi criada apenas mais uma linha de divisão análoga à anterior. Pode visualizar-se a pá dividida em duas partes na figura 3.22.

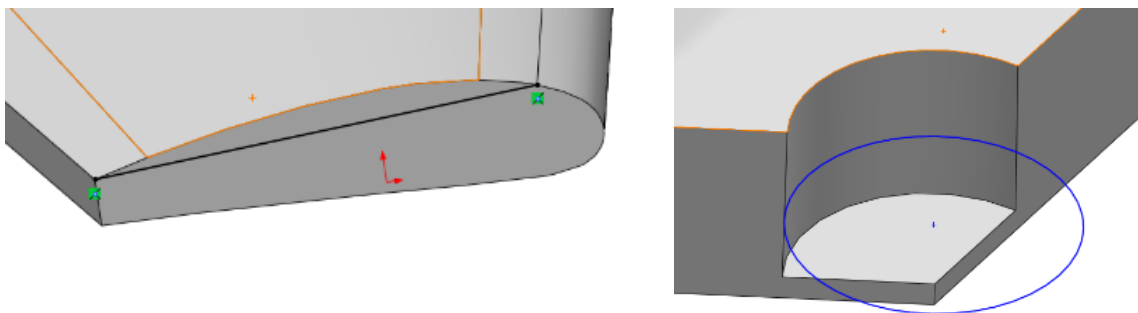


Figura 3.20 - Linha de divisão na ponta da pá e no corte circular.

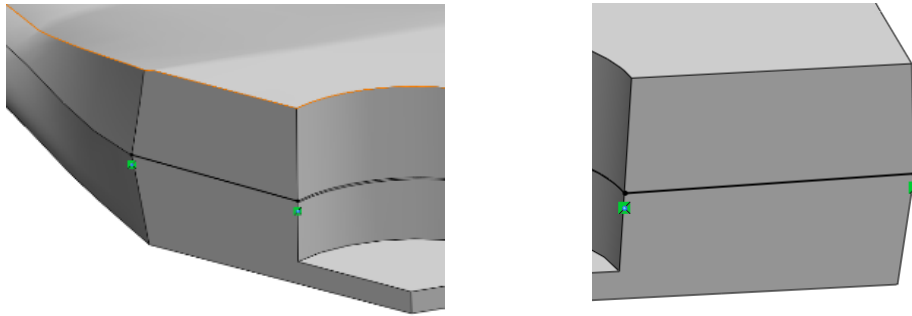


Figura 3.21 - Linhas de divisão laterais.

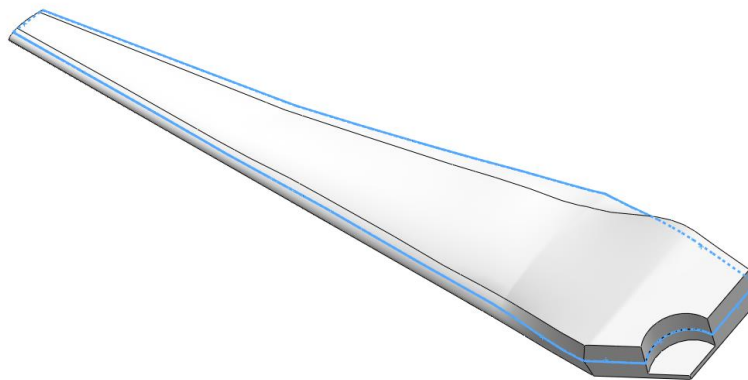


Figura 3.22 - Divisão da pá em duas partes.

Para além de linhas de divisão, foi imperativo criar também uma linha de partição, assim como uma superfície de partição. A linha de partição foi obtida através da reunião de todas as linhas de divisão em conjunto com algumas arestas presentes na geometria da pá e permitiu a separação do molde em núcleo e cavidade. O núcleo do molde é a pá completa que fica encastrada na cavidade como já foi apresentado na figura 3.22 e a cavidade é a parte que circunda o núcleo e onde é aplicada a fibra de vidro para a construção da pá. A figura 3.27 ilustra as duas entidades que constituem o molde, estando o núcleo representado a cinza escuro.

Na criação da linha de partição, fez-se uso de uma ferramenta de análise do programa denominada “draft analysis” que separa por cores as zonas mais ou menos problemáticas de desmoldar e analisa se o molde pode ser ou não separado em núcleo e cavidade. A direção de desmolde é perpendicular ao molde tal como indicado pela seta na figura 3.23 que informa também que a pá será extraída de baixo para cima. A ferramenta de análise indica que as zonas a cor verde representam as zonas de fácil desmolde, enquanto as zonas a cor azul representam zonas negativas, ou seja, não seriam possíveis de serem removidas do molde se a pá fosse produzida por inteiro em vez de dividida em duas partes. As zonas a amarelo são zonas que apresentam dificuldades no desmolde. Foi necessário criarem-se “drafts” com o objetivo de

remover as dificuldades de desmolde das zonas a amarelo. Os “drafts” são comparados a apartamentos nas superfícies mais problemáticas que geralmente apresentam vértices pontiagudos e não permitem um fácil desmolde por ficarem unidos ao molde depois de aplicada a fibra. Os “drafts” vêm arredondar um pouco esses vértices no programa tornando o desmolde mais fácil. A linha de partição está representada a violeta na figura 3.23.

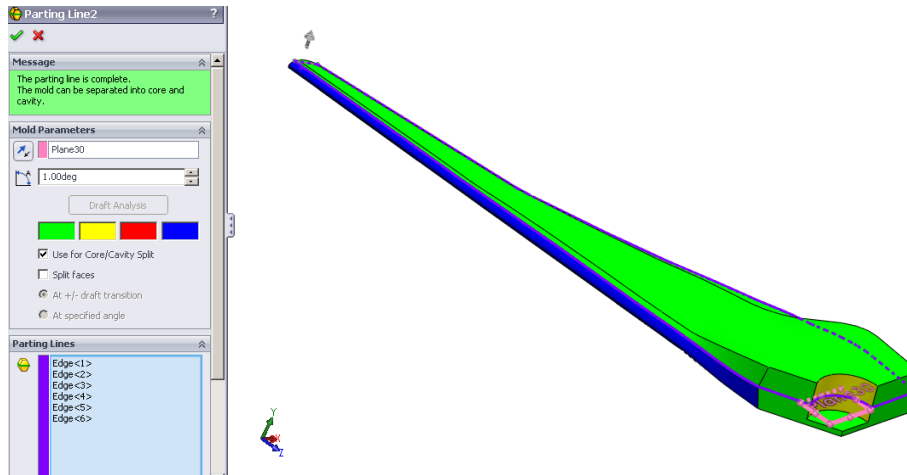


Figura 3.23 - Linha de partição e “Draft analysis”.

A superfície de partição foi criada a seguir com base na linha de partição e a sua função, como o nome indica, é converter a linha de partição numa superfície, ou seja, prolongando a linha de partição para o seu exterior e formando uma área envolvente representada a bege na figura 3.24.

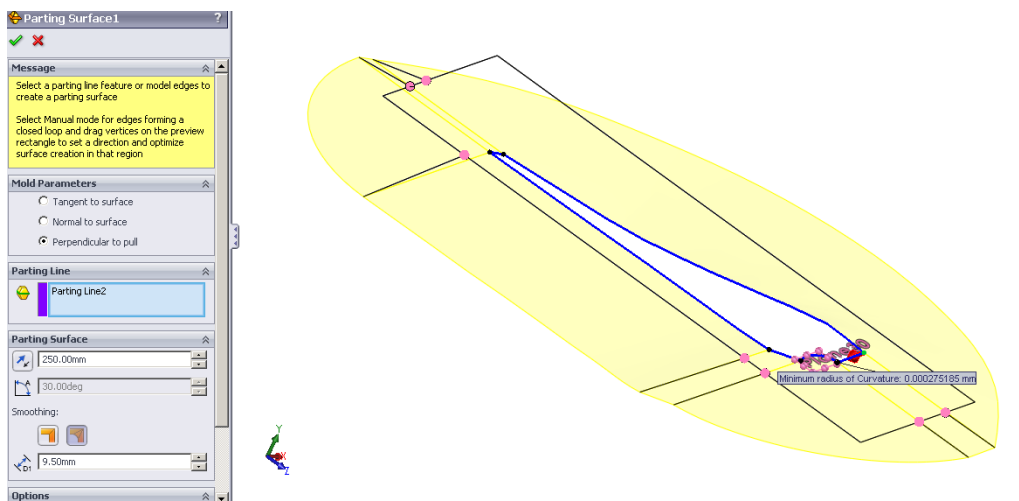


Figura 3.24 - Superfície de partição.

Para finalizar a criação do molde, utilizou-se a função “tooling split”, função responsável por criar o molde e dividi-lo de acordo com a superfície de partição criada. Esta função exige que se crie um “sketch” à volta da superfície de partição que é depois reconhecido por esta e possibilita a criação de um sólido onde estão inseridos o núcleo e a cavidade do molde. Neste caso foi criado um “sketch” retangular que originou um paralelepípedo retângulo como se pode observar na figura 3.25.

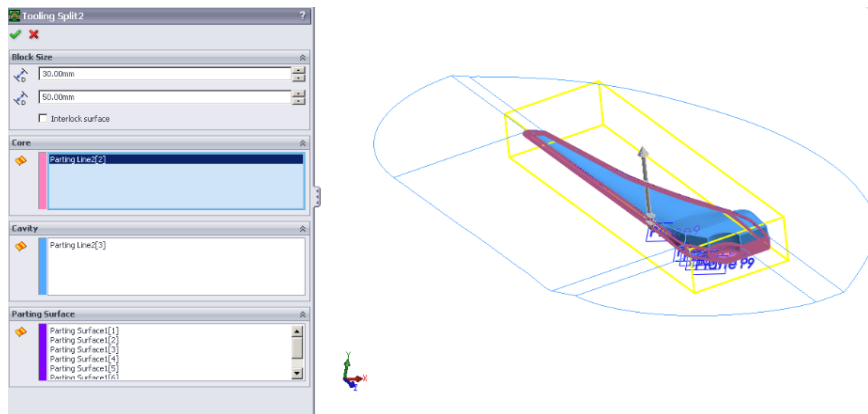


Figura 3.25 - Criação do molde com a ferramenta “tooling split”.

Desta forma o molde foi criado, tendo um aspeto similar ao de uma caixa comprida com uma cavidade no interior. Para efeitos de compatibilidade com o programa de maquinação empregue, o molde sofreu uma rotação de 90 graus de forma a que a pá ficasse alinhada com o eixo da fresadora CNC que apresenta o maior comprimento de maquinação disponível. Por fim, foi criado mais um corte numa das faces do molde, nomeadamente na sua parte inferior. Este corte deve-se ao facto de não ser possível à fresadora alcançar a cavidade localizada debaixo da face redonda da pá. Como se trata de um local de difícil acesso, tornou-se essencial recorrer a um pequeno molde macho, que seria inserido nesse corte, tal como se de uma gaveta se tratasse. Só desta forma se conseguiu obter a forma esperada da pá.

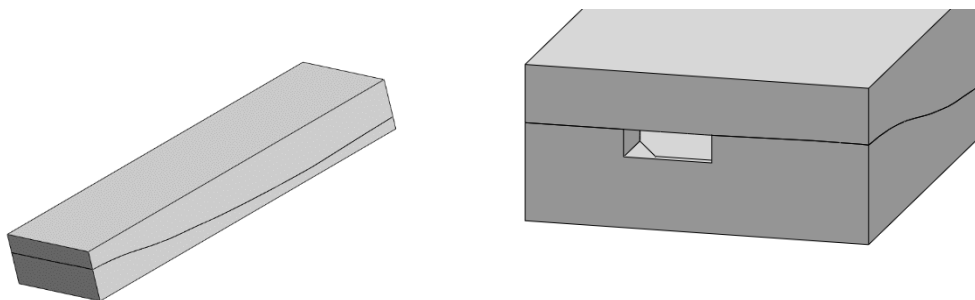


Figura 3.26 - Aspeto final das cavidades do molde juntas e abertura para molde macho.

Finalmente, ambas as partes do molde foram guardadas separadamente como novas peças do programa SolidWorks de forma a poderem ser manipuladas independentemente no programa gerador do código de maquinação, tendo sido removido o núcleo em cada uma das peças.

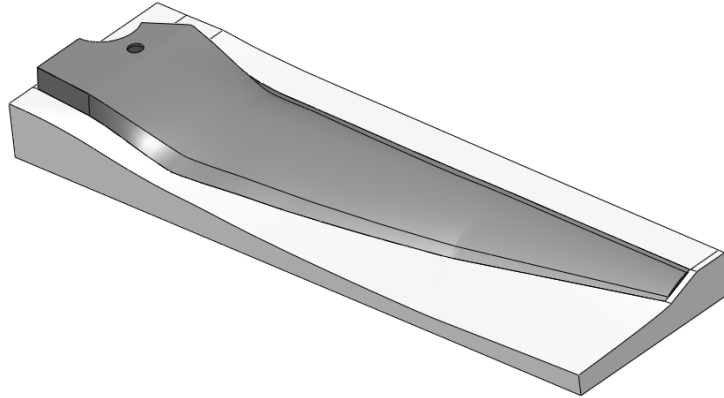


Figura 3.27 - Núcleo e cavidade do molde.

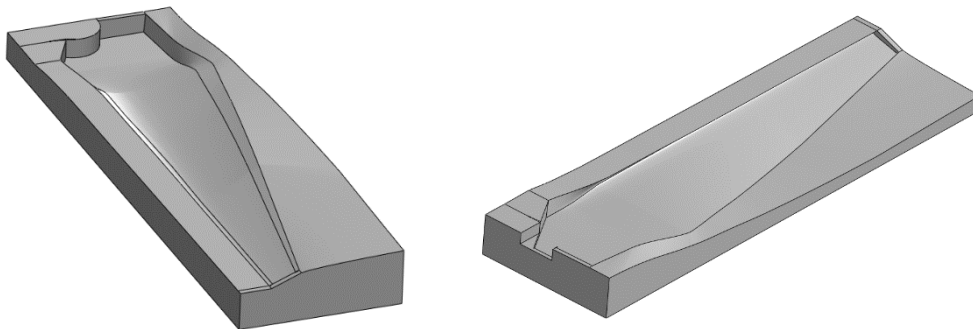


Figura 3.28 - Cavidade superior e inferior do molde.

O molde macho foi criado com base na geometria do corte circular que se encontrava também presente na cavidade inferior do molde como se ilustra à esquerda na figura 3.29.

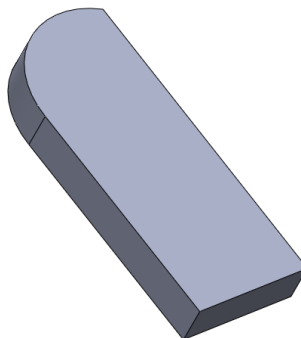


Figura 3.29 - Molde macho da pá.

### 3.3 Obtenção do código de maquinação CNC do molde da pá

Todos os ficheiros, tanto as duas cavidades do molde como o molde macho, foram guardados com a extensão “.stl”, compatível com o programa de maquinação utilizado. Este programa, designado Cut 3D é produto da empresa Vec tric e permite obter o código de maquinação CNC simulando com grande precisão a maquinação, sendo assim possível ter uma ideia de como resultará a peça antes de efetuar o corte real. Esta característica permite poupar muito tempo e material.

A operação deste programa consiste em várias etapas. A figura 3.30 revela a primeira fase em que se selecionou a superfície a maquinar. A superfície selecionada foi a de topo (top).

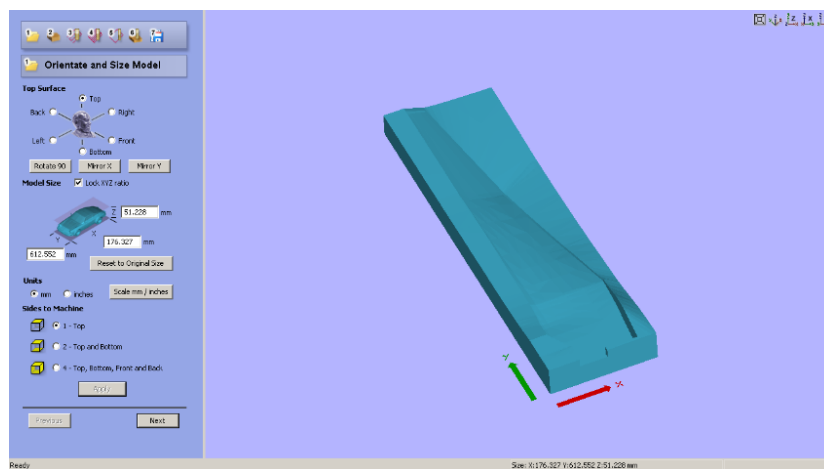


Figura 3.30 - Superfície escolhida para maquinar.

Numa segunda fase, ilustrada pela figura 3.31 pôde escolher-se o ponto de onde se inicia a maquinação (centro, ou um dos cantos) e as medidas do molde.

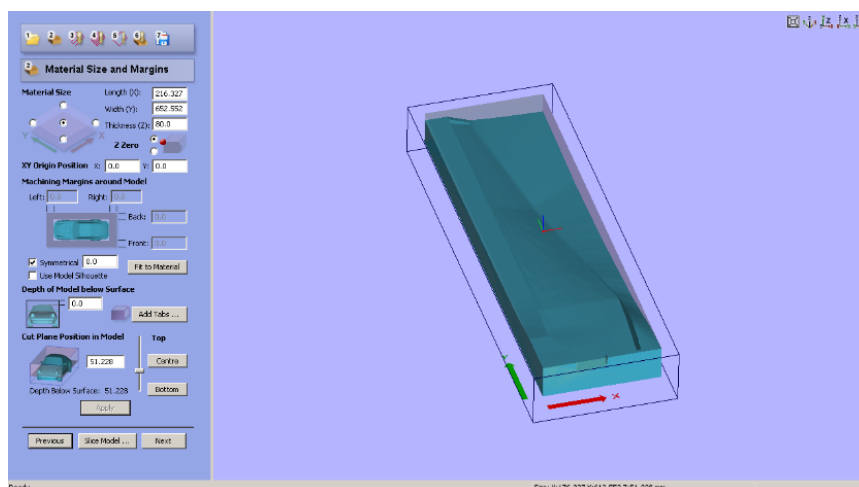


Figura 3.31 - Posição do início de maquinação e medidas do molde.

De seguida, foi selecionado o tipo de fresa a aplicar e a estratégia de maquinação que seria utilizada para o desbaste inicial do material em bruto. Esta fase é a mais demorada e apenas permite ao molde assumir uma forma aproximada, sem grande nível de acabamento. A estratégia de maquinação utilizada foi criar trajetetos de corte ao longo da dimensão maior da pá, ou seja do eixo Oy pois assim ocorreriam muitas menos inversões de sentido, tornando a maquinação menos demorada e mantendo um nível de detalhe adequado. O tempo estimado de maquinação para esta fase foi de 120 minutos.

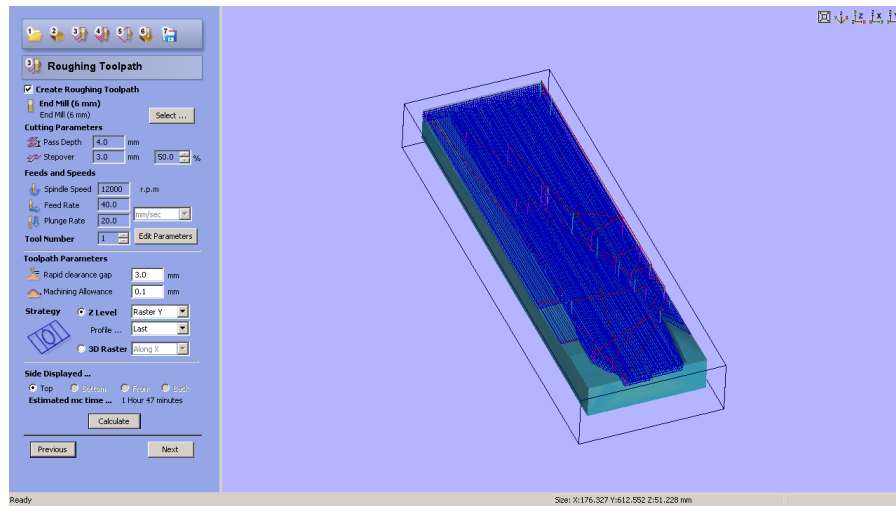


Figura 3.32 - Tipo de fresa utilizada e estratégia de maquinação na fase de desbaste.

De uma forma análoga, para a fase seguinte, a fase de acabamento, também foi escolhido o mesmo tipo de fresa e a mesma estratégia de maquinação. Como é uma fase de melhoria do aspeto final do molde, demora menos tempo a ficar completa, tendo uma duração estimada de 21 minutos.

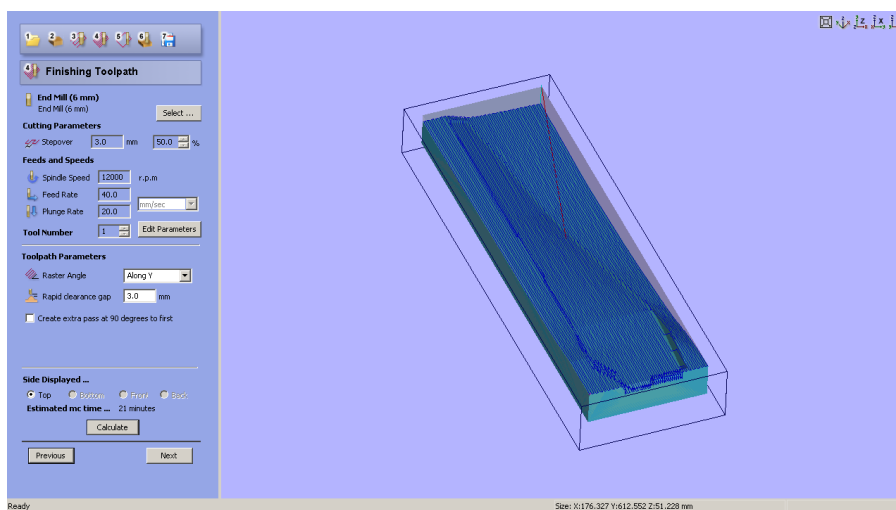


Figura 3.33 - Tipo de fresa utilizada e estratégia de maquinação para a fase de acabamento.

Da simulação de maquinação realizada pelo programa obtêm-se os resultados visíveis na figura 3.34. Do lado esquerdo pode visualizar-se o resultado da fase de desbaste, do lado direito o resultado da fase de acabamento.

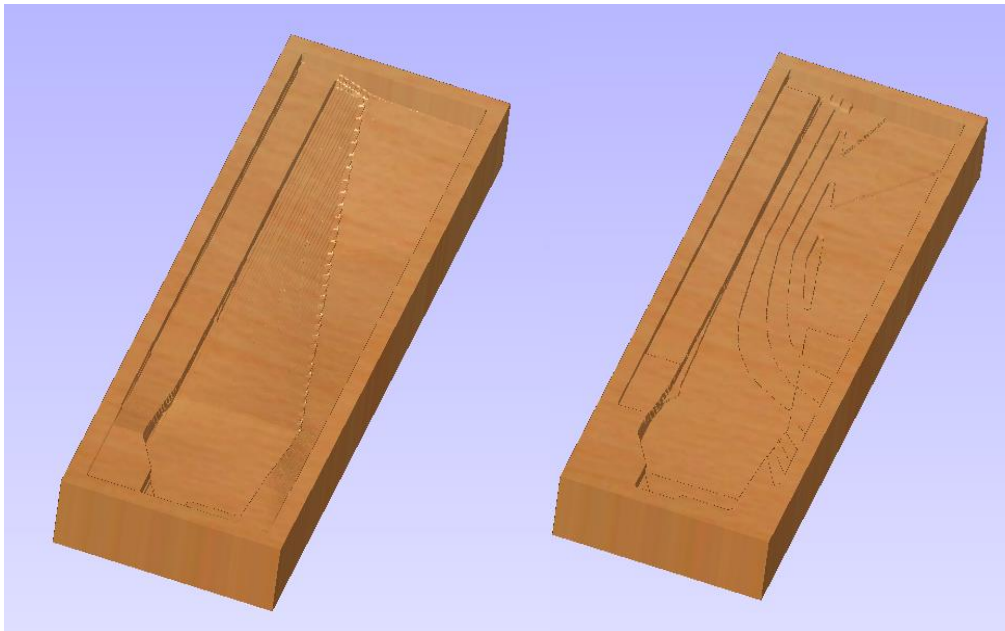


Figura 3.34 - Resultados da simulação de maquinação.

Também o molde macho foi maquinado, tendo passado pelas diferentes fases de maquinação referidas anteriormente, mas visto tratar-se de uma peça mais simples, a sua maquinação foi muito menos trabalhosa e demorada.

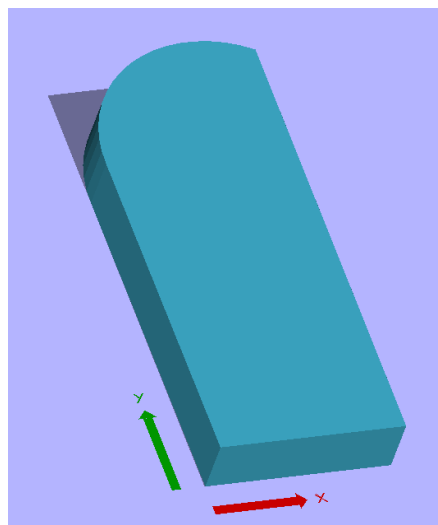


Figura 3.35 - Simulação do aspeto final do molde macho no programa de maquinação.

### 3.4 Maquinação CNC do molde da pá

Depois de obtido o código de maquinação, procedeu-se à obtenção do material de base para maquinação do molde através do corte e colagem de duas placas de poliuretano expandido com 1,5 metros de comprimento e 50 centímetros de largura. Visto o molde ter cerca de 7 centímetros de espessura, foram necessárias duas placas de 4 centímetros de espessura cada de modo a alcançar as dimensões pretendidas. A colagem das placas foi realizada com recurso a uma cola de contacto em “spray” própria para este tipo de materiais. Na figura 3.36 visualiza-se uma das placas antes da colagem (à esquerda) e as duas placas unidas já com a espessura pretendida (à direita).

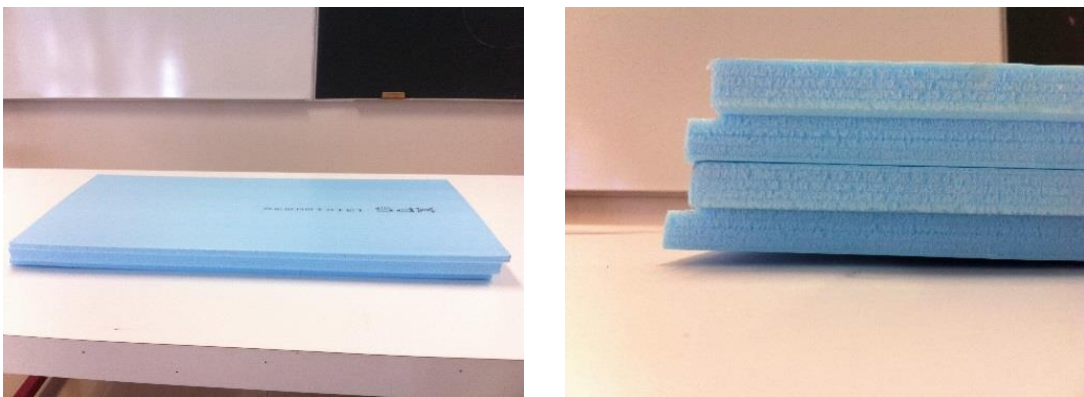


Figura 3.36 - Colagem das placas de poliuretano.

Para a maquinação, o equipamento utilizado foi uma fresadora CNC, modelo FR150, da marca CeNeCe, mediante utilização do respetivo programa de controlo, designado de Mach2.

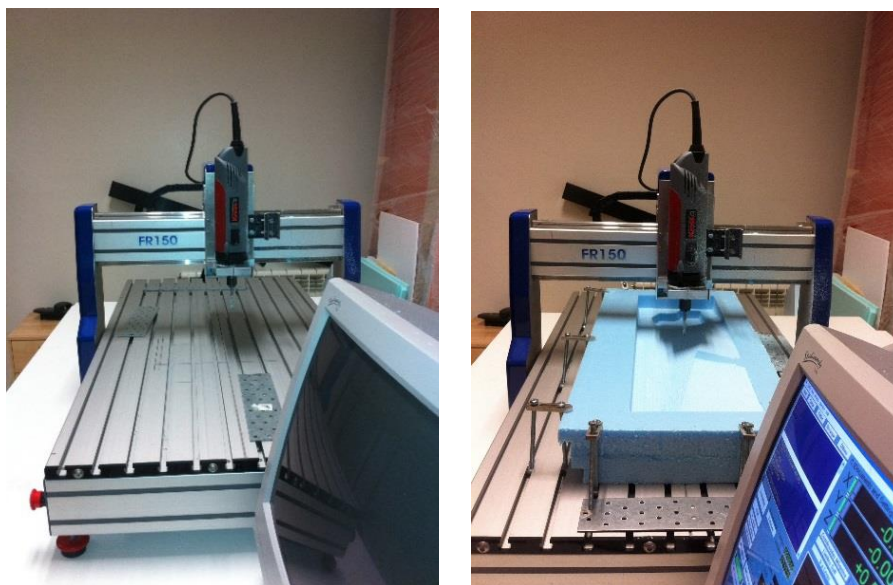


Figura 3.37 - Fresadora CeNeCe FR150.

Para garantir a estabilidade do material a maquinar contra deslocamentos e vibrações, que comprometeriam a qualidade dos resultados obtidos, fixou-se o mesmo através de parafusos M8 com cerca de 10 centímetros de comprimento de rosca.

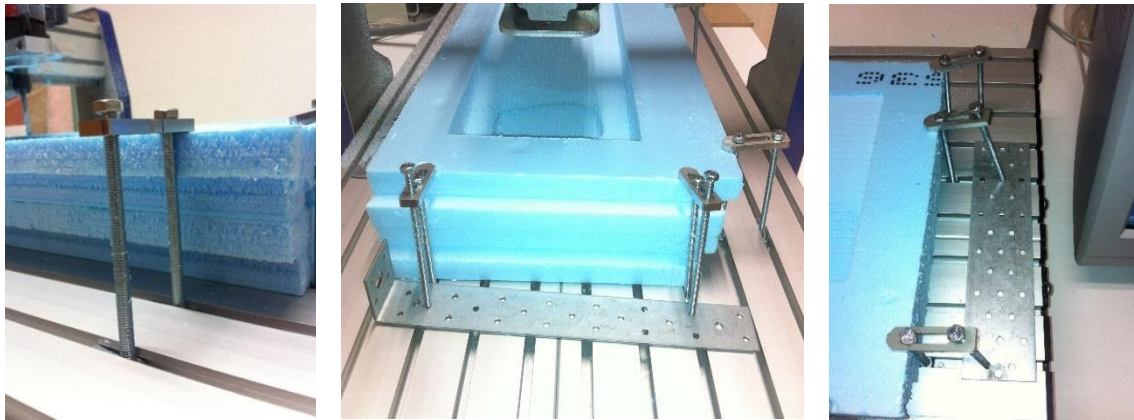


Figura 3.38 - Fixação das placas de poliuretano na calha da fresadora.

Na figura 3.39 observa-se a interface gráfica do programa Mach 2, em que as linhas a azul representam as linhas de corte da fresa antes de se iniciar a maquinação e as linhas a vermelho a passagem da fresa em vazio sobre o material. As linhas a azul vão passando a verde à medida que vão sendo percorridas como se observa na figura 3.40.

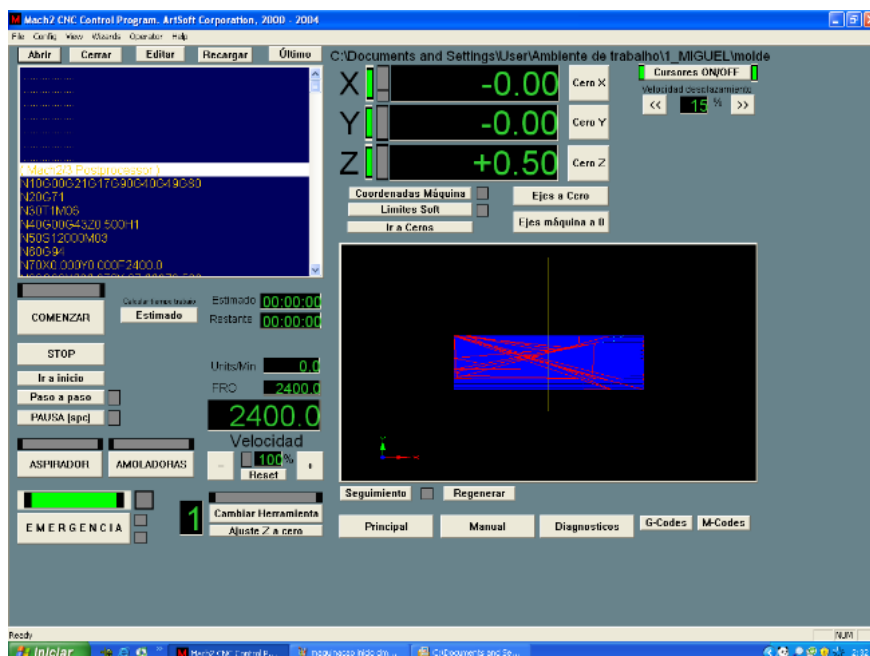


Figura 3.39 - Interface gráfica do programa Mach 2.



Figura 3.40 - Interface gráfica do programa Mach 2 depois de percorridas as linhas de corte.

Depois de algumas tentativas falhadas de maquinação, surgiram finalmente resultados que foram ao encontro das expectativas de qualidade pretendidas. As tentativas anteriores não resultaram como esperado devido a uma fixação pouco consistente das placas de poliuretano e a definição do centro absoluto da fresadora no local errado, o que fez com que as placas se deslocassem durante o processo de maquinação e a fresa não maquinasse no local correto.

Outro dos erros cometidos teve origem na colagem das duas placas que não ficou permanente. A figura 3.41 apresenta os resultados finais da maquinação para a parte de cima do molde (esquerda) e para a parte de baixo do molde (direita). Pode verificar-se que ambas as partes dos moldes ficaram com marcas das linhas que a fresadora percorreu durante a maquinação. Os moldes tiveram então de ser polidos e decapados para ficarem preparados para a fase seguinte, a fibragem.

Nas duas partes do molde foram aplicadas várias camadas de cera, estabelecendo esta um papel de desmoldante, permitindo que a resina e a fibra se fixassem melhor nos moldes, facilitando bastante a fase de construção.

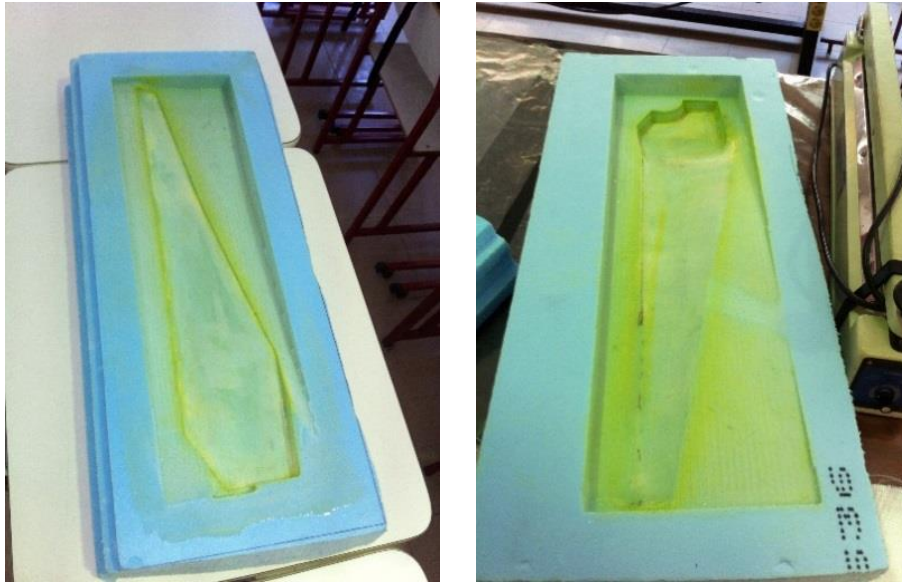


Figura 3.41 - Resultados finais da maquinação do molde das pás.

### 3.5 Fabrico da pá em compósito de epóxi-fibra de vidro

Preparadas as duas partes do molde, procedeu-se à primeira fase de fibragem. Para tal, foram cortadas cinco tiras de fibra de vidro para cada metade do molde e também uma tira de tecido desmoldante com a forma de cada pá.



Figura 3.42 - Corte das tiras de fibra de vidro e de tecido desmoldante.

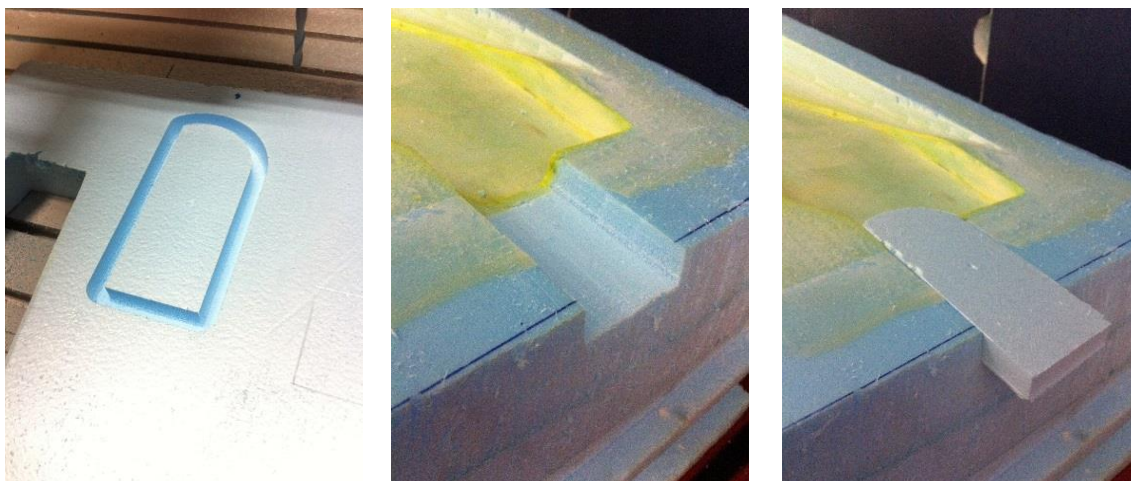


Figura 3.43 - Maquinação do molde macho e inserção na abertura destinada ao efeito.

Iniciou-se entretanto a primeira etapa da fibragem que consistiu na aplicação nos moldes de modo uniforme e através de barramento de resina epóxi SR 1500 de marca SICOMIN e endurecedor SD2503 também da mesma marca, através de uma solução dos dois componentes numa proporção de 1 para 33 juntamente com as tiras de fibra de vidro e o tecido desmoldante. Posteriormente, construiu-se um saco onde foi possível inserir as duas partes do molde de uma só vez. Recorreu-se de seguida a uma bomba de vácuo para que fosse retirado todo o ar no interior do saco e a fibra pudesse fixar-se facilmente em cada parte do molde e assim assumir a forma da pá.



Figura 3.44 - Saco de vácuo com as duas partes do molde no interior.

O resultado obtido depois do término desta etapa foi bastante satisfatório e é ilustrado na figura 3.45. No entanto, denotaram-se pequenos defeitos que tiveram de ser depois corrigidos devido à acumulação de fibra e resina nalguns pontos durante o funcionamento da bomba de vácuo.

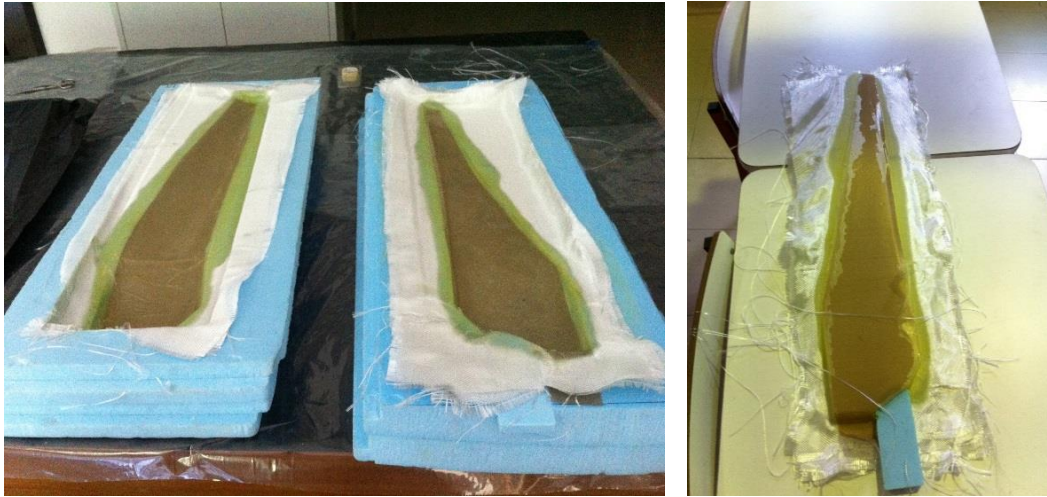


Figura 3.45 - Resultados finais da etapa de fibragem.

Estando as duas partes da pá já separadas da respetiva parte do molde, estas foram coladas entre si com fita adesiva para se iniciar a segunda etapa de fibragem. Esta fase consistiu na união das duas metades da pá através de uma fibragem a toda a volta das duas metades. Posteriormente, verificou-se que, apesar da segunda fase de fibragem, foi ainda necessária uma terceira etapa, devido ao facto de existirem pontos nos bordos das duas metades que não ficaram bem unidos. Mesmo depois da última fase, ainda se reconheciam alguns defeitos na junção das duas pás, mas visto tratar-se de um processo de construção experimental e inovador na Universidade da Beira Interior, o resultado obtido pode considerar-se muito satisfatório. Os resultados finais são apresentados na figura 3.46.



Figura 3.46 - Aspeto final da pá construída.

## 4. Simulação da resistência estrutural da pá

Neste capítulo descreve-se a realização dos ensaios relativos à resistência estrutural da pá no programa de simulação estrutural Cosmos Works. Comparam-se os resultados obtidos para uma pá em madeira com os de uma pá em compósito de resina epóxi reforçada por fibra de vidro e também dois tipos de furação para fixação das pás, sendo que em um dos casos a pá possui apenas um furo responsável pela sua fixação ao gerador e a outra possui dois furos. Os ensaios consistem na análise da resposta da pá a dois tipos de forças diferentes: a força centrífuga e a força aerodinâmica. Os resultados obtidos permitem a comparação da tensão máxima incidente sobre a superfície da pá, o deslocamento máximo presente na pá e o fator de segurança mínimo que a mesma apresenta.

### 4.1 Força Centrífuga

O programa utilizado para realizar a simulação intitula-se Cosmos Works, embora nas versões mais recentes seja designado de SolidWorks Simulation Professional. Apesar de ser um programa inserido dentro do SolidWorks, a sua instalação e funcionamento são independentes.

Trata-se de um programa que permite realizar análises computacionais do comportamento de peças quando estas são sujeitas a esforços estáticos, dinâmicos e térmicos. No presente trabalho apenas se realizaram estudos de resposta de peças a solicitações estáticas.

Um dos esforços mais críticos no funcionamento das microturbinas eólicas deve-se à força centrífuga resultante da sua elevada velocidade de rotação (Wood, 2011).

Ir-se-á empregar o termo força centrífuga ao longo deste trabalho por ser a designação mais comum para este tipo de esforços, embora a força efetivamente existente seja a força centrípeta exercida pelos apoios das pás sobre estas, forçando-as a descrever um movimento circular.

A turbina eólica estudada apresenta um TSR (tip speed ratio) de 6, o que indica que a velocidade tangencial na ponta da pá será seis vezes superior à velocidade incidente do vento. A fórmula seguinte descreve como a relação se processa:

$$\lambda = \frac{\text{Velocidade na ponta da pá}}{\text{Velocidade do vento}} \quad (4.1)$$

O valor de TSR é representado por  $\lambda$  e a velocidade de incidência do vento à qual se pretendem fazer os ensaios é de 30 m/s. Selecionou-se um valor tão elevado para a velocidade do vento incidente de modo a ser possível testar o caso mais extremo equivalente a rajadas de vento de cerca de 110 km/h. Num caso real, uma microturbina eólica iniciaria o funcionamento do seu mecanismo de proteção contra ventos excessivos, designado de “furling” caso a velocidade se

aproximasse de 15 m/s. Este mecanismo consiste no desvio do rotor (conjunto das pás) em relação ao vento. Como se observa na figura 4.1, o rotor (a azul) em funcionamento normal está completamente perpendicular ao vento e tem o seu rendimento máximo nessa posição. À medida que a velocidade aumenta o rotor vai alterando a sua inclinação em relação ao vento até ficar quase paralelo. Este é um mecanismo de proteção que permite que a microturbina não se danifique com velocidades muito elevadas e que continue a produzir energia, mesmo que seja em menor quantidade (Piggott, 2000).

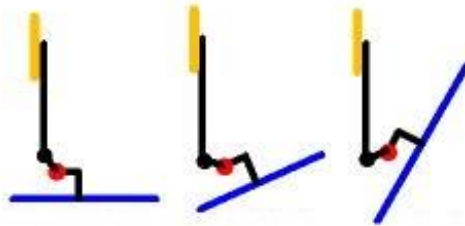


Figura 4.1 - Funcionamento normal da microturbina (à esquerda) e “furling” do rotor (centro e direita).  
Fonte: Windstuffnow, (adaptado)

É possível obter-se a velocidade tangencial na ponta da pá através da seguinte expressão:

$$6 = \frac{\text{Velocidade na ponta da pá}}{30} \quad (4.2)$$

$$\text{Velocidade tangencial na ponta da pá} = 180 \text{ m/s}$$

Para calcular a força centrífuga é necessário obter a velocidade angular da pá. Dado o comprimento total da pá ser 60 cm, a velocidade angular é:

$$\text{Velocidade na ponta da pá} = \omega R \quad (4.3)$$

$$180 = \omega \times 0,6$$

$$\omega = 300 \text{ rad/s}$$

Uma velocidade do vento incidente de 30 m/s equivale a uma velocidade angular de 300 rad/s como demonstrado na equação anterior.

Foram realizados no programa de simulação estrutural Cosmos Works ensaios tendo em conta a furação única ou dupla da pá. Esta diferença de furação entre uma pá e outra relaciona-se com a furação original do gerador e das bolachas de auxílio à fixação das pás no mesmo tal

como se pode observar na figura 3.18. Dispondo os componentes de quatro furos para a fixação das pás, obrigatoriamente uma das pás terá de possuir furação dupla. A pá ensaiada em compósito de epóxi-fibra de vidro apresenta uma cavidade no seu interior tal como o modelo real. O compósito de fibra de vidro escolhido foi o tipo E, que possui um elevado Módulo de Young. Foi necessário criar o material no programa de simulação estrutural pois este não estava disponível na sua biblioteca de materiais.

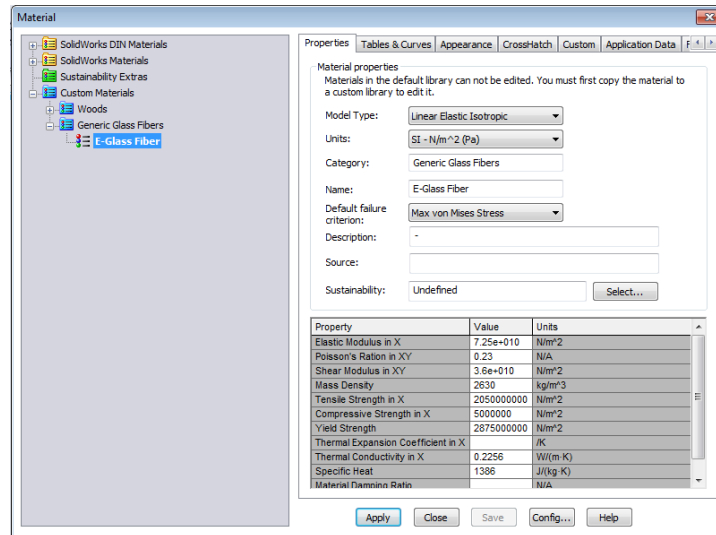


Figura 4.2 - Propriedades do compósito de fibra de vidro do tipo E inseridas no programa Cosmos Works.

De acordo com os dados obtidos através do desenho CAD, a distância desde o eixo de rotação até ao centro de massa da pá é de 0,222 m, e a pá em compósito de fibra de vidro pesa 726 g.

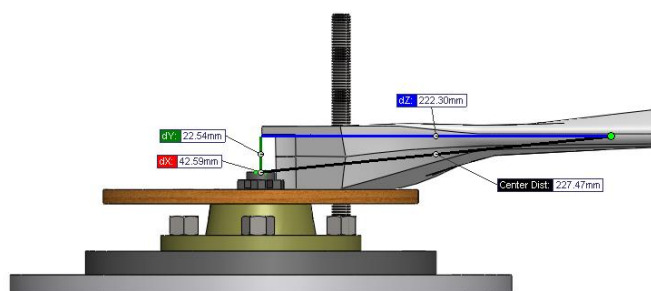
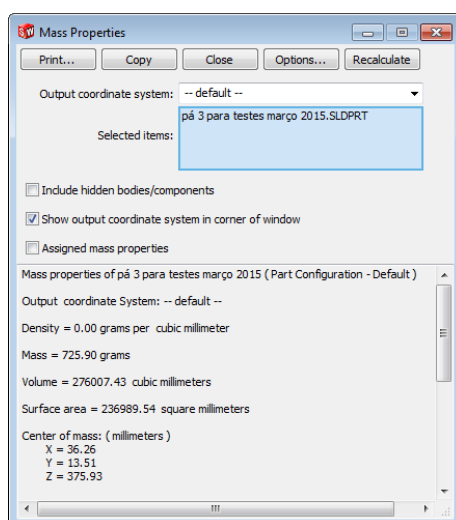


Figura 4.3 - Propriedades mássicas da pá em compósito de epóxi-fibra vidro com furação simples e distância do seu centro de massa ao eixo de rotação.

Com todos os valores recolhidos foi calculada a força centrífuga:

$$F_c = m \times \frac{v^2}{R} \quad (4.4)$$
$$F_c = m \times \frac{\omega^2 \times R^2}{R}$$

$$F_c = m \times \omega^2 \times R$$

$$F_c = 0,726 \times 300^2 \times 0,222$$

$$F_c = 14505 \text{ N}$$

Dividindo por 9,81 m/s<sup>2</sup>, obtém-se o valor da força centrífuga em kgf:

$$F_c = 1479 \text{ kgf}$$

Para realizar o ensaio iniciou-se um estudo estático no programa Cosmos Works tendo-se aplicado restrições ao movimento da pá (“fixtures”) no modelo antes da simulação. A primeira foi estabelecer o furo como dobradiça pois, dado que a pá possui apenas um único furo, tem tendência a girar em torno deste furo e esta é a restrição que melhor descreve este comportamento. É também neste local que se encontram concentradas quase todas as tensões referentes à fixação da pá ao gerador quando este se encontra a girar. A segunda restrição foi ao nível da face que se encontra à direita do furo. Utilizou-se uma restrição de deslizamento nessa face para permitir que, hipoteticamente, a pá pudesse deslizar segundo a direção da aplicação da força, evitando, assim, que a pá girasse em torno do furo de fixação quando da aplicação da força.

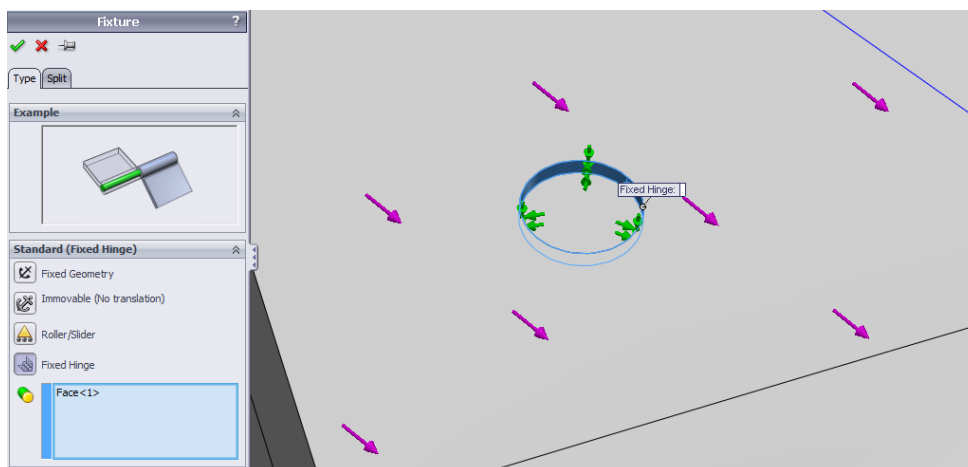


Figura 4.4 - Restrição no furo da pá em compósito de epóxi-fibra de vidro com furação simples.

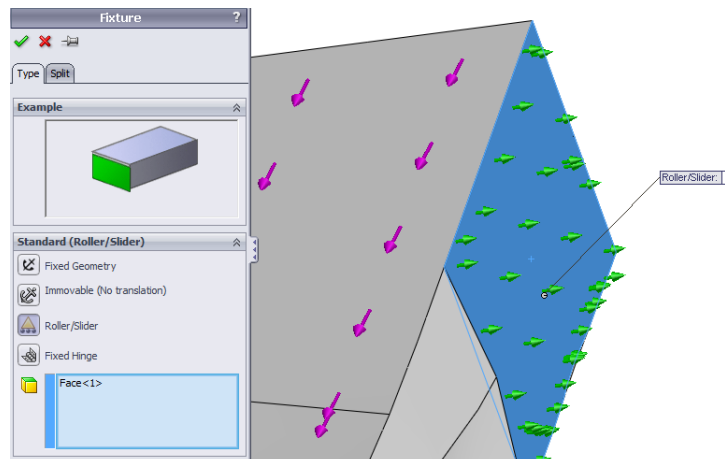


Figura 4.5 - Restrição na face direita da pá em compósito de epóxi-fibra com furação simples.

Continuamente, definiu-se a força a aplicar, que neste caso seria de 14505 N, segundo o eixo Y, distribuída uniformemente por toda a superfície da pá.

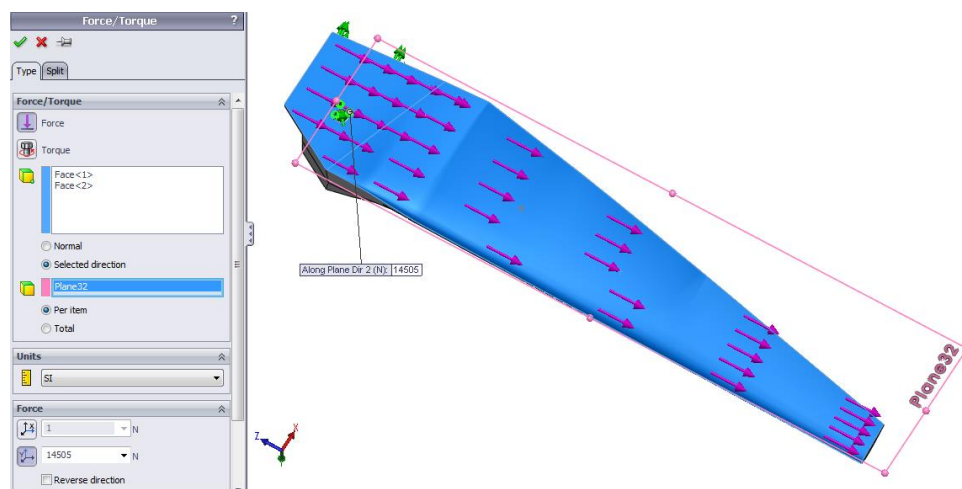


Figura 4.6 - Distribuição da força centrífuga que atua na pá.

Após definir a força a aplicar, definiu-se a densidade da malha (“mesh”) do modelo computacional. A malha consiste num conjunto de pontos nos quais vão ser calculados computacionalmente os resultados. O grau de precisão da malha é obtido através de um fator de escala que varia entre 2 e 5, sendo 2 o valor correspondente a uma malha mais grosseira, na qual se obtêm resultados mais rapidamente mas com menos precisão e 5 o valor máximo que origina uma malha mais fina alcançando melhores resultados embora com tempo de cálculo mais demorado. Nos presentes ensaios foi sempre empregue o valor 5 que origina a malha mais fina.

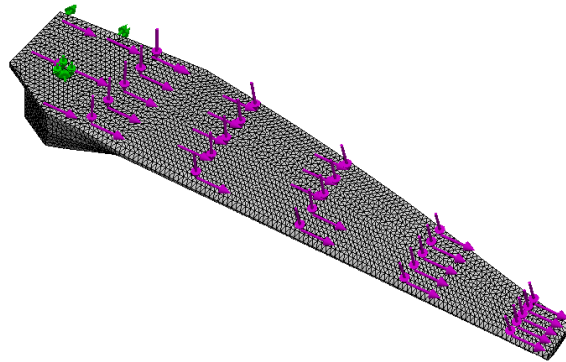
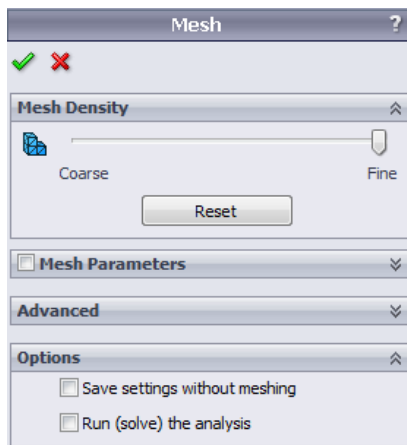


Figura 4.7 - Definições utilizadas para a densidade da malha.

Model name: pá 3 para testes março 2015  
 Study name: Força Centrífuga  
 Plot type: Static nodal stress Stress1  
 Deformation scale: 28.3703

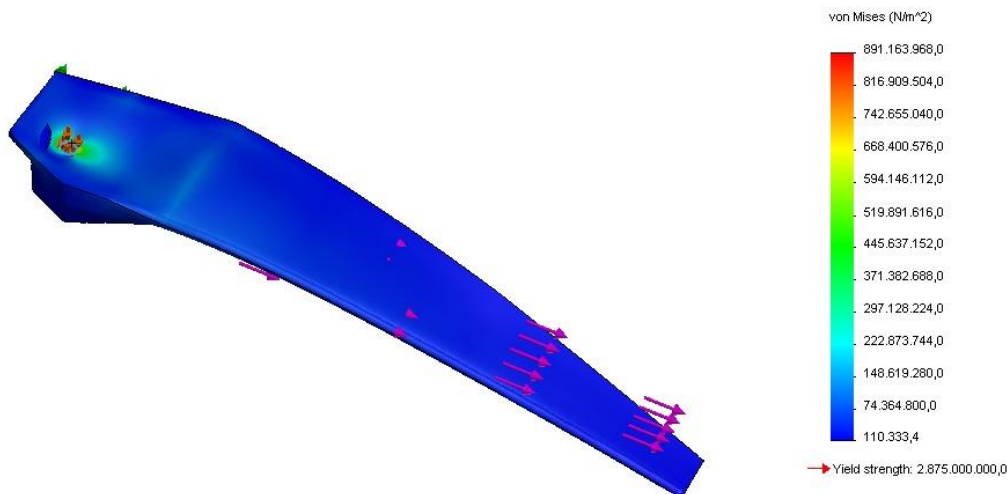


Figura 4.8 - Diagrama de tensões referente à força centrífuga na pá de compósito epóxi-fibra de vidro com furação simples.

Na figura 4.8 apresenta-se o resultado do ensaio, observando-se um valor máximo de tensão devido à força centrífuga de cerca de 891 MPa. Este valor deve-se a uma concentração de tensões localizada no furo, dado que é o único local em toda a pá que garante que a mesma fique acoplada ao gerador.

O método utilizado pelo programa para apresentar a tensão na peça foi o critério de Von Mises o qual estava já predefinido no programa. De salientar que a tensão de Von Mises é um valor médio obtido através das tensões principais exercidas no sólido.

A equação 4.5 demonstra apresenta a forma de cálculo da tensão de Von Mises:

$$\sigma_{Von\ Mises} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (4.5)$$

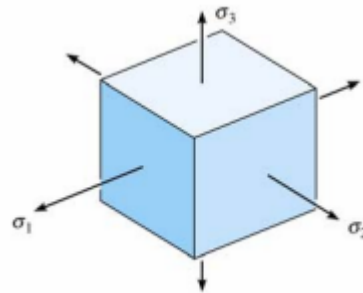


Figura 4.9 - Distribuição das tensões num elemento de volume.

O fator de segurança mínimo que a pá apresenta tem como valor 3,23.

A expressão 4.6 possibilita o cálculo do fator de segurança:

$$F.S. = \frac{\sigma_{cedência}}{\sigma_{Von\ Mises}} \quad (4.6)$$

Model name: pá 3 para testes março 2015  
 Study name: Força Centrífuga  
 Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
 Criterion : Automatic  
 Factor of safety distribution: Min FOS = 3.2

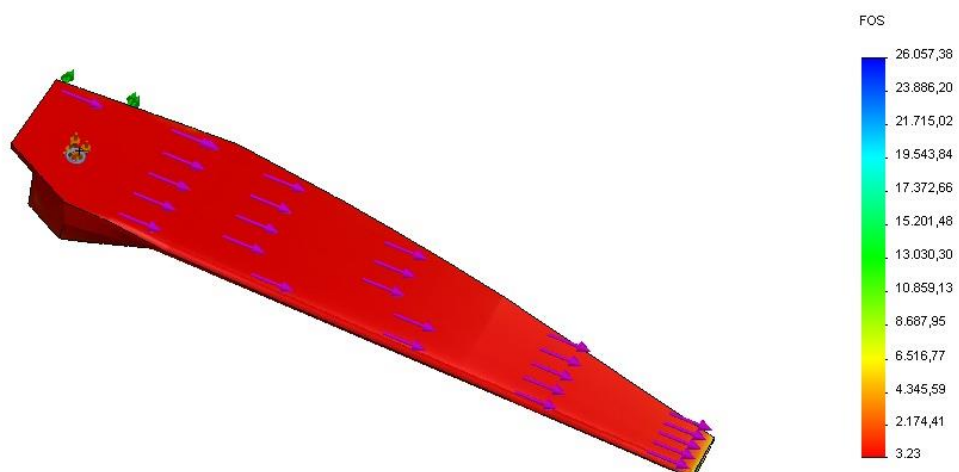


Figura 4.10 - Diagrama do fator de segurança referente à força centrífuga na pá de compósito epóxi-fibra de vidro com furação simples.

Como observado no diagrama de tensões, a tensão máxima existente na pá é de cerca de 891 MPa e a tensão de cedência do compósito de epóxi-fibra de vidro do tipo E é de 2,875 GPa.

O fator de segurança é nada mais que a o cociente entre a tensão de cedência e a tensão máxima existente no material quando é sujeito a um determinado esforço. Ao atingir a tensão de cedência, o material deforma-se plasticamente pois o seu limite elástico já foi ultrapassado, seguindo-se a sua rotura.

$$F.S. = \frac{2875}{891}$$

$$F.S. = 3,23$$

Este resultado demonstra que a pá irá ceder a uma carga que seja 3 vezes superior à carga máxima observada no diagrama de tensões, o que se revela como um valor perfeitamente aceitável na medida em que é o mesmo valor de fator de segurança habitualmente utilizado na indústria automóvel e aeronáutica.

A pá em compósito de epoxy-fibra de vidro com furação dupla pesa cerca de 731 g e a distância do centro de massa ao eixo de rotação é aproximadamente 0,216 m.

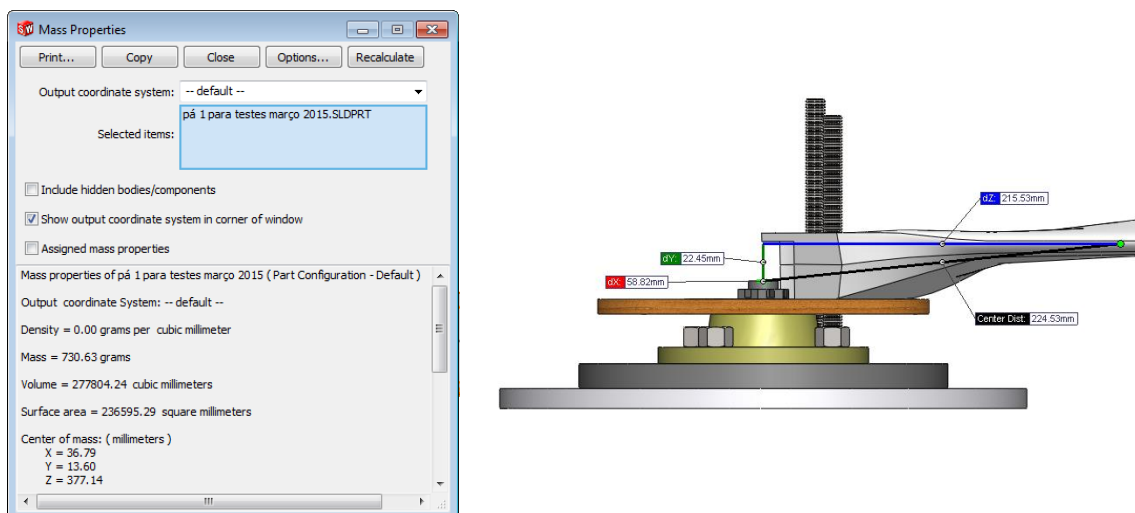


Figura 4.11 - Propriedades mássicas da pá em compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla e distância do seu centro de massa ao eixo de rotação.

Com todos os novos valores recolhidos para este caso em específico, prosseguiu-se para o cálculo da força centrífuga:

$$F_c = 0,731 \times 300^2 \times 0,216 \quad (4.7)$$

$$F_c = 14211 \text{ N}$$

Dividindo por  $9,81 \text{ m/s}^2$ , obteve-se o valor da força centrífuga em kgf:

$$F_c = 1449 \text{ kgf}$$

Como este caso se trata de furação dupla, as restrições que se aplicaram na simulação foram diferentes das empregues no caso anterior, havendo apenas uma restrição de geometria fixa em cada um dos furos. Esta situação deve-se ao facto de, neste caso a pá não ter tendência a girar em torno dos furos aquando da aplicação da força pois, é fixa duplamente, ao contrário do caso estudado no ponto anterior.

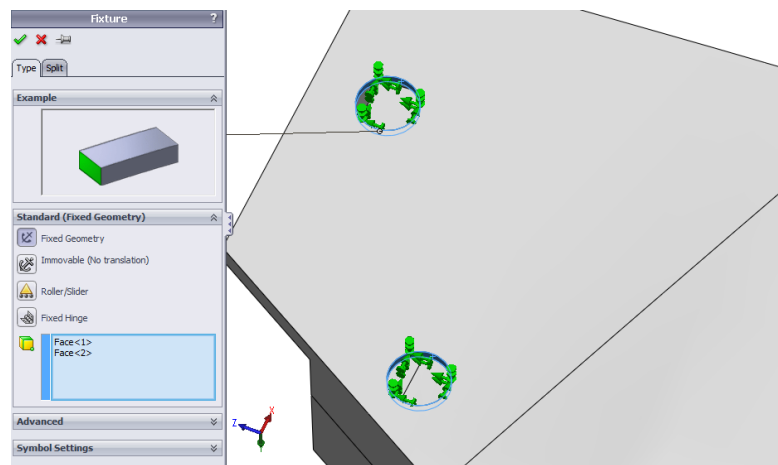


Figura 4.12 - Restrições nos furos da pá em compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla.

Model name: pá 1 para testes março 2015  
Study name: Força Centrífuga  
Plot type: Static nodal stress Stress1  
Deformation scale: 5,18343

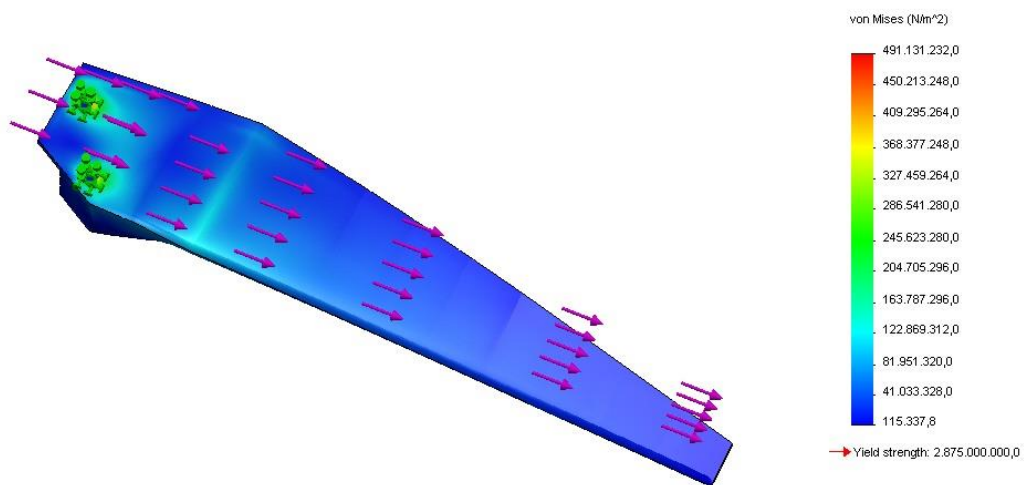


Figura 4.13 - Diagrama de tensões referente à força centrífuga na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla.

Model name: pá 1 para testes março 2015  
Study name: Força Centrífuga  
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
Criterion: Automatic  
Factor of safety distribution: Min FOS = 5.9

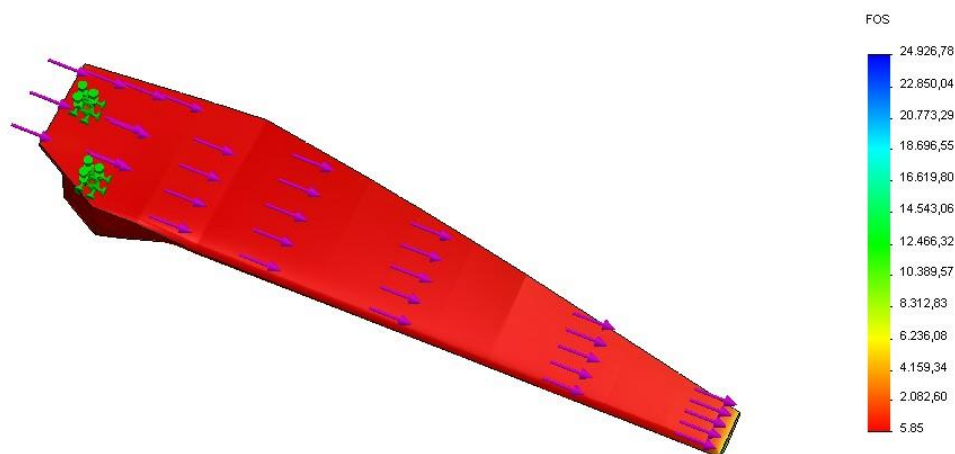


Figura 4.14 - Diagrama do fator de segurança referente à força centrífuga na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla.

Comparativamente com os valores obtidos nos ensaios da pá em compósito de epóxi-fibra de vidro com furação simples, a pá com furação dupla apresenta um valor para a tensão nela existente inferior em quase metade ao obtido para a pá com furação simples, o que se compreende dado ser suportada pelo dobro dos apoios. Tal como previsto, também o fator de segurança mínimo é superior ao revelado no ensaio anterior.

Para os ensaios da pá em madeira, escolheu-se como material madeira do tipo mogno africano, tendo em conta que a pá original é constituída por esse mesmo material. De salientar que o modelo CAD da pá utilizado neste caso para realizar os ensaios é maciço, contrariamente ao modelo em compósito de epóxi-fibra de vidro, de forma a se assemelhar o mais possível com o modelo real em madeira, o qual é igualmente maciço. Também desta vez foi necessário criar de raiz o material no programa de simulação estrutural pois este não estava disponível na sua biblioteca de materiais.

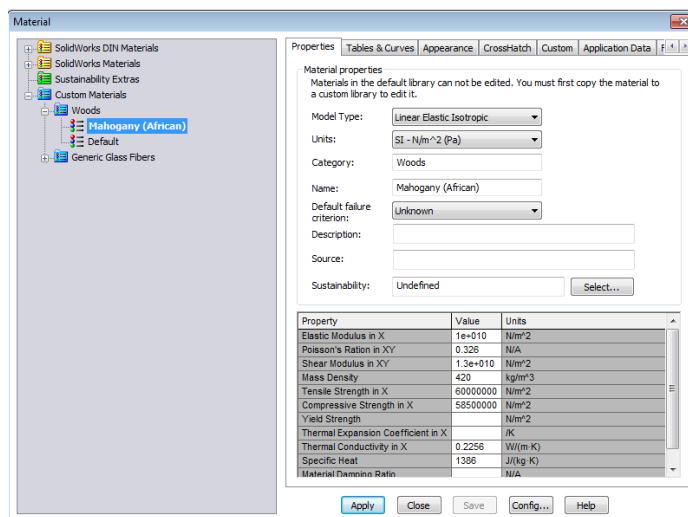


Figura 4.15 - Propriedades mecânicas da madeira do tipo mogno africano inseridas no programa Cosmos Works.

Recolhidos os dados através do programa, a distância desde o eixo de rotação até ao centro de massa é de 0,180 m e a massa da pá em madeira é de cerca de 388 g.

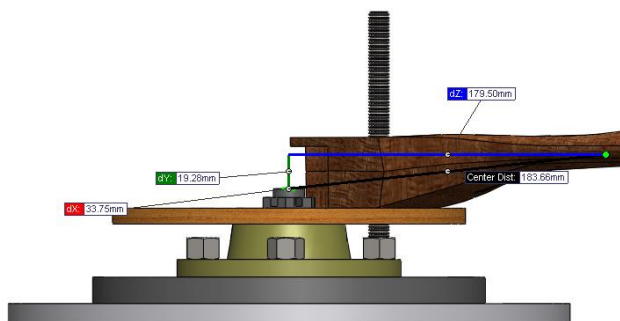
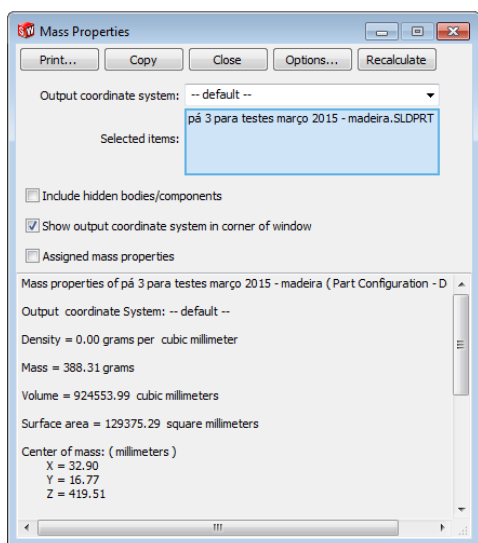


Figura 4.16 - Propriedades mássicas da pá em madeira com furação simples e distância do seu centro de massa ao eixo de rotação.

A força centrífuga presente na pá foi calculada da seguinte forma:

$$F_c = 0,388 \times 300^2 \times 0,180$$

$$F_c = 6286 \text{ N}$$

Dividindo por  $9,81 \text{ m/s}^2$ , obteve-se o valor da força centrífuga em kgf:

$$F_c = 641 \text{ kgf}$$

Todas as restrições usadas para a pá em compósito de epóxi-fibra de vidro com furação simples foram novamente utilizadas neste ensaio visto tratar-se de um modelo idêntico, variando apenas o material pelo qual é constituída.

Model name: pá 3 para testes março 2015 - madeira  
Study name: Força Centrífuga  
Plot type: Static nodal stress Stress1  
Deformation scale: 13.4495

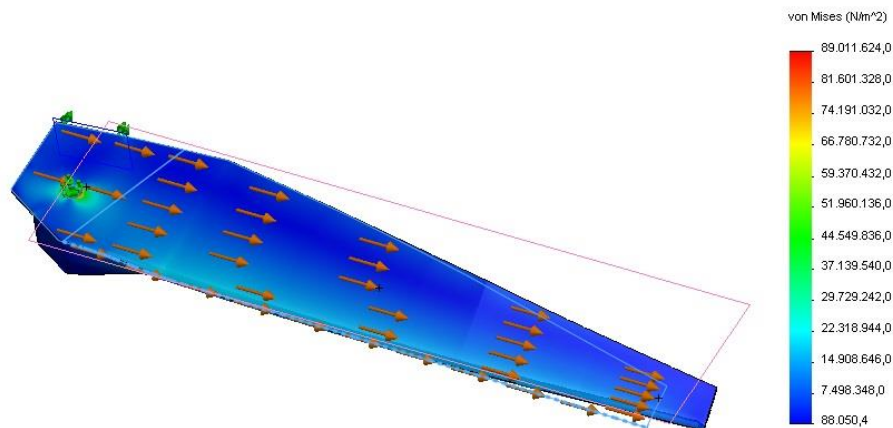


Figura 4.17 - Diagrama de tensões referente à força centrífuga na pá de madeira com furação simples.

Model name: pá 3 para testes março 2015 - madeira  
Study name: Força Centrífuga  
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
Criterion: Automatic  
Factor of safety distribution: Min FOS = 0.61

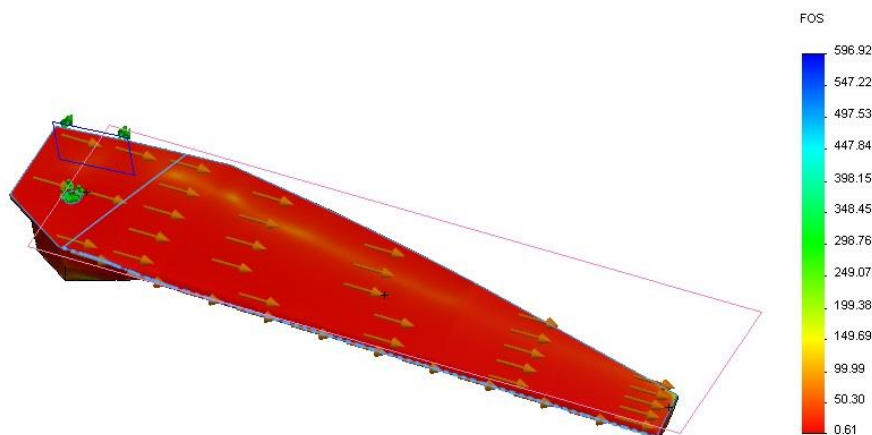


Figura 4.18 - Diagrama do fator de segurança referente à força centrífuga na pá de madeira com furação simples.

Após a análise dos resultados observa-se que o ensaio da força centrífuga para a pá de madeira com furação simples revela um valor reduzido para o fator de segurança, 0,61 provando que

este modelo de pá, com este tipo de furação não consegue enfrentar uma força centrífuga proveniente de uma velocidade do vento de 30 m/s. Foi então indispensável realizar ensaios adicionais de forma a determinar a velocidade limite do vento que a pá de madeira com furação simples pode suportar.

A pá em madeira com furação dupla pesa cerca de 388 g e a distância do centro de massa ao eixo de rotação é aproximadamente 0,172 m.

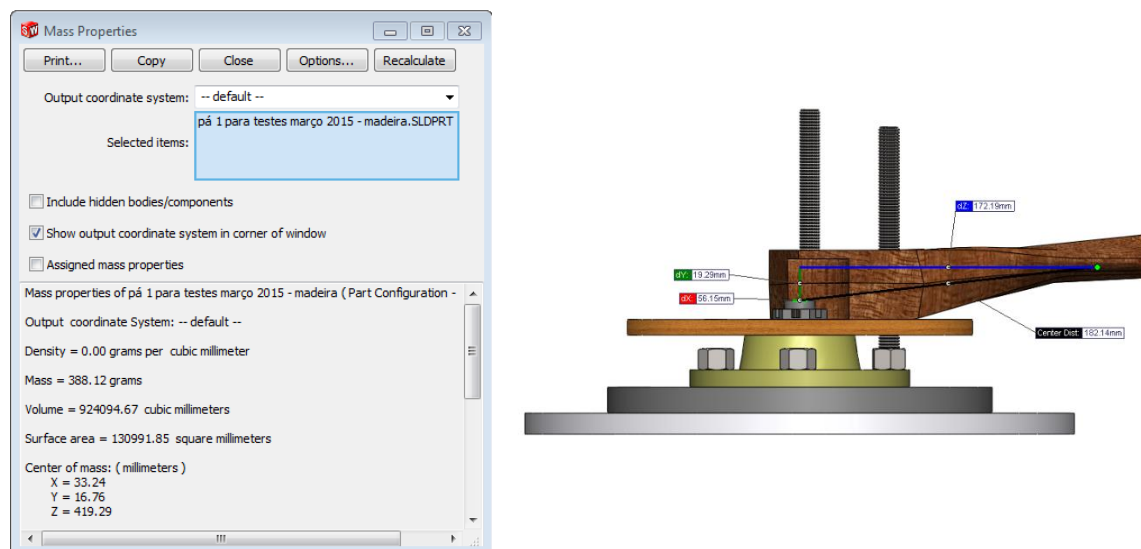


Figura 4.19 - Propriedades mássicas da pá em madeira com furação simples e distância do seu centro de massa ao eixo de rotação.

Calculando de seguida a força centrífuga usando o mesmo raciocínio utilizado anteriormente:

$$F_c = 0,388 \times 300^2 \times 0,172$$

$$F_c = 6006 \text{ N}$$

Dividindo por 9,81 m/s<sup>2</sup>, obtém-se o valor da força centrífuga em kgf:

$$F_c = 612 \text{ kgf}$$

Model name: pá 1 para testes março 2015 - madeira  
Study name: Força Centrífuga  
Plot type: Static nodal stress Stress1  
Deformation scale: 1

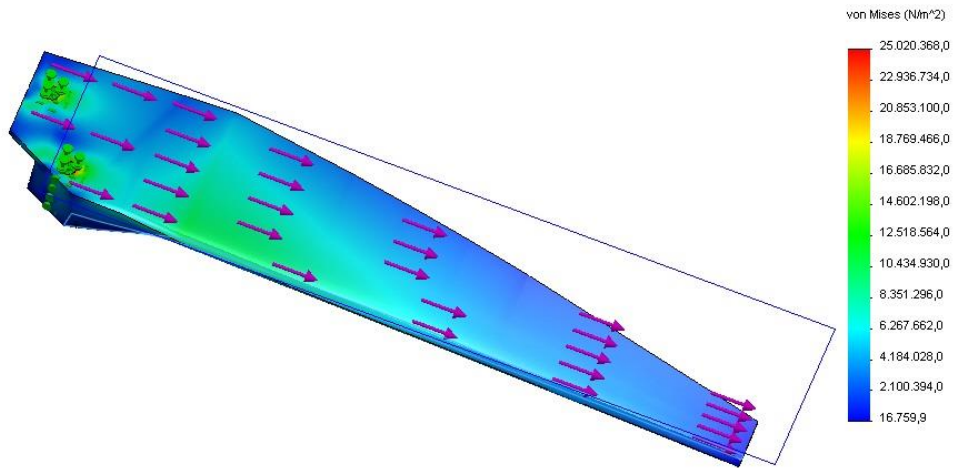


Figura 4.20 - Diagrama de tensões referente à força centrífuga na pá de madeira com furação dupla.

Model name: pá 1 para testes março 2015 - madeira  
Study name: Força Centrífuga  
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
Criterion : Automatic  
Factor of safety distribution: Min FOS = 1.5

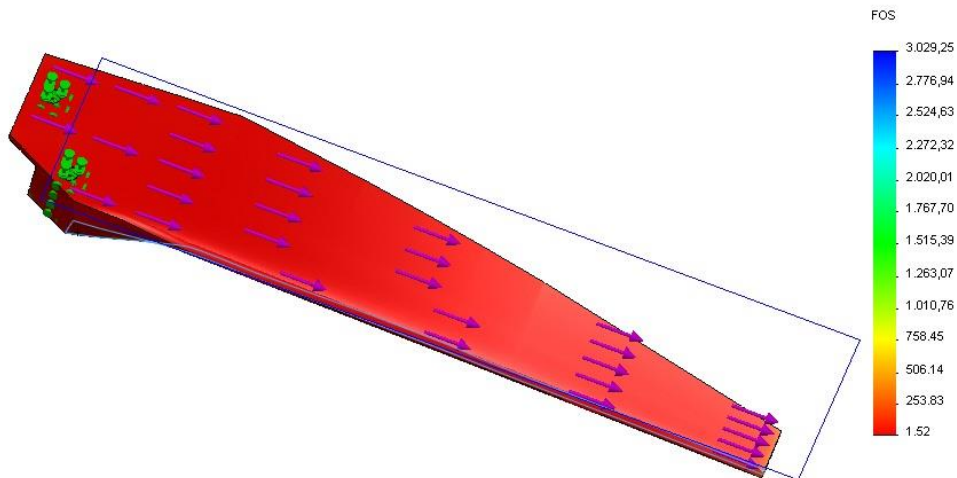


Figura 4.21 - Diagrama do fator de segurança referente à força centrífuga na pá de madeira com furação dupla.

Analisando os ensaios para ambas as pás de madeira, a pá de madeira com furação dupla revela valores inferiores para a tensão máxima, o que se entende, dado estar suportada por dois furos e não apenas por um. O valor obtido para o fator de segurança mínimo é de cerca de 1,5. Este é um valor bastante mais favorável que o alcançado no ensaio com furação simples.

## 4.2 Força Aerodinâmica

O segundo esforço que foi estudado é alusivo à flexão na pá provocada pela força aerodinâmica do vento. Foram realizados ensaios com os dois materiais e furações diferentes, tal como para a força centrífuga. A força aerodinâmica não está distribuída por toda a face da pá. A razão que leva a esta circunstância está relacionada com a fixação da pá ao gerador. Os componentes responsáveis pela fixação cobrem uma parte da face da pá, como é visível na figura 4.22.

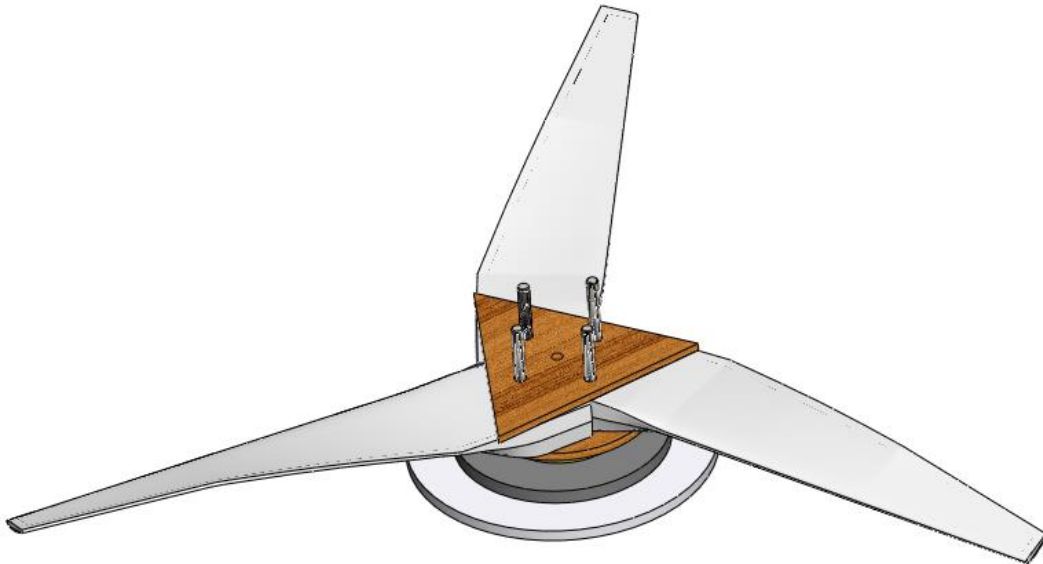


Figura 4.22 - Montagem das pás no gerador.

A área projetada da pá onde incide a força mantém-se constante ao longo de todos os ensaios independentemente do tipo de furação. Apesar do valor da força aerodinâmica ser o mesmo para todos os ensaios, os resultados diferenciaram-se face às propriedades dos materiais e às restrições nas fixações. O valor da força aerodinâmica pôde ser obtido genericamente pela equação 4.8:

$$F_D = C_D \times \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times A \quad (4.8)$$

O coeficiente de atrito aerodinâmico é expresso por  $C_D$ , a densidade do fluido (ar nas condições PTN) por  $\rho$ , a velocidade de escoamento por  $v$  e a área projetada da pá onde incide a força aerodinâmica por  $A$ .

O coeficiente de atrito aerodinâmico escolhido, 1,98, corresponde ao de uma placa plana colocada perpendicularmente ao escoamento de ar. Ao escolher este coeficiente aerodinâmico, superior ao real existente na pá, está-se a majorar o esforço exercido na pá, prezando-se assim a segurança. Também neste grupo de ensaios se escolheu uma velocidade do escoamento de ar incidente de 30 m/s pela razão anteriormente descrita.

$$F_D = 1,98$$

$$\rho_{ar} = 1,18 \text{ kg/m}^3$$

$$v = 30 \text{ m/s}$$

$$A = 0,0461 \text{ m}^2$$

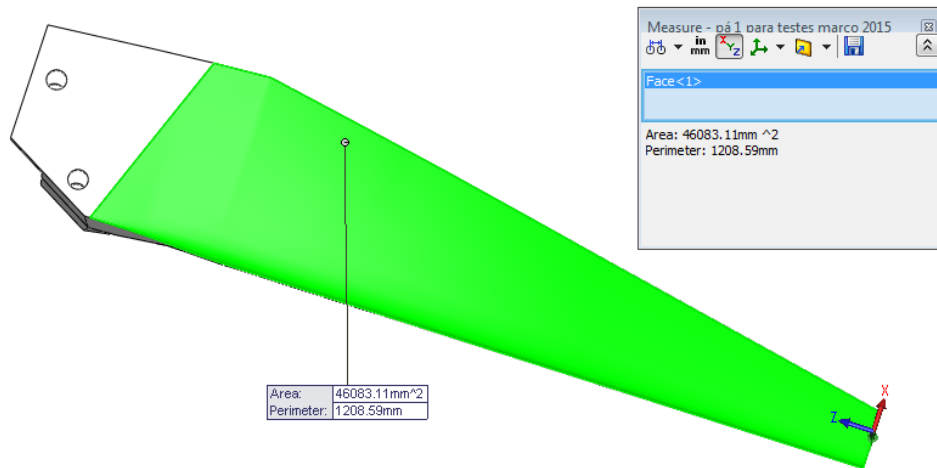


Figura 4.23 - Área projetada da pá.

Foi então possível calcular a força aerodinâmica incidente na superfície da pá:

$$F_D = 1,98 \times \frac{1}{2} \times 1,18 \times 30^2 \times 0,0461$$

$$F_D = 48,5 \text{ N}$$

Dividindo também este valor por  $9,81 \text{ m/s}^2$ , obteve-se este o valor da força em kgf:

$$F_D = 4,94 \text{ kgf}$$

Comparativamente com a força centrífuga, esta apresenta um valor substancialmente inferior.

Por processo idêntico ao utilizado para a força centrífuga, iniciou-se um estudo estático no programa Cosmos Works. Mantiveram-se todas as restrições usadas nos ensaios anteriores.

Para a realização correta do ensaio, efetuou-se uma separação da face em duas partes, atuando a força apenas na zona pretendida. O primeiro ensaio foi destinado à pá em compósito de epóxi-fibra de vidro com furação simples.

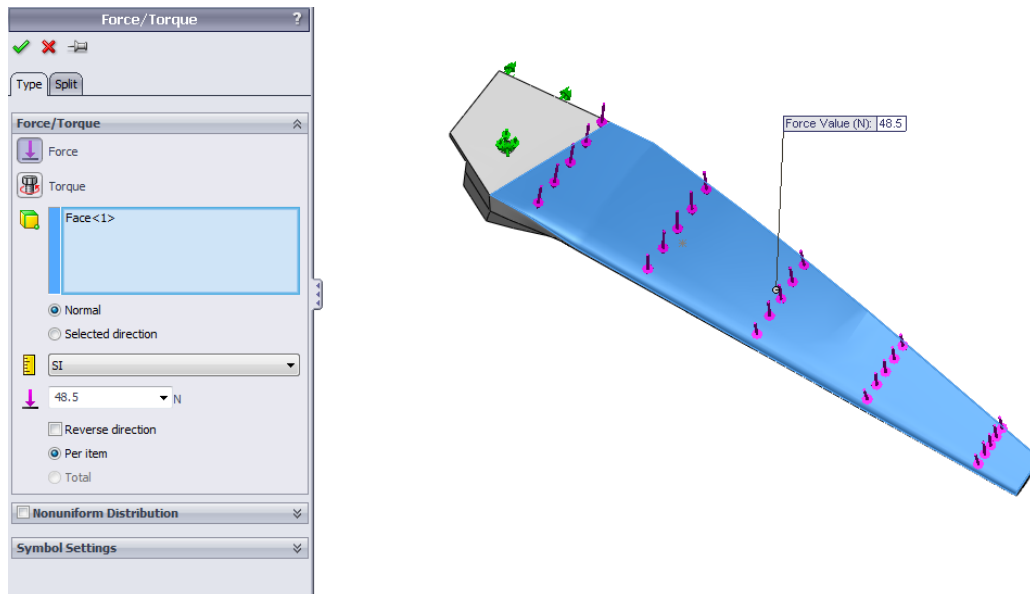


Figura 4.24 - Aplicação da força aerodinâmica na superfície da pá.

Model name: pá 3 para testes março 2015  
 Study name: Força Aerodinâmica  
 Plot type: Static nodal stress Stress1  
 Deformation scale: 4.53925

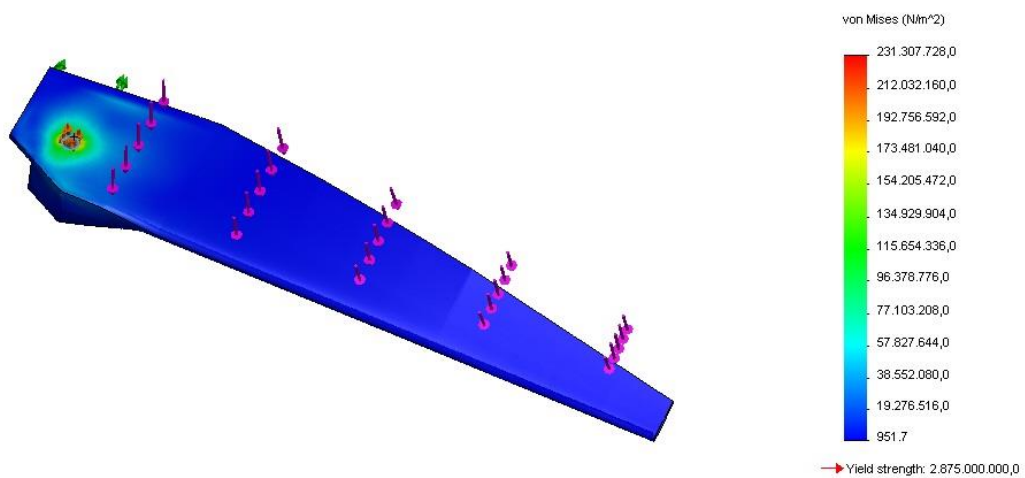


Figura 4.25 - Diagrama de tensões referente à força aerodinâmica na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação simples.

Model name: pá 3 para testes março 2015  
 Study name: Força Aerodinâmica  
 Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
 Criterion : Automatic  
 Factor of safety distribution: Min FOS = 12

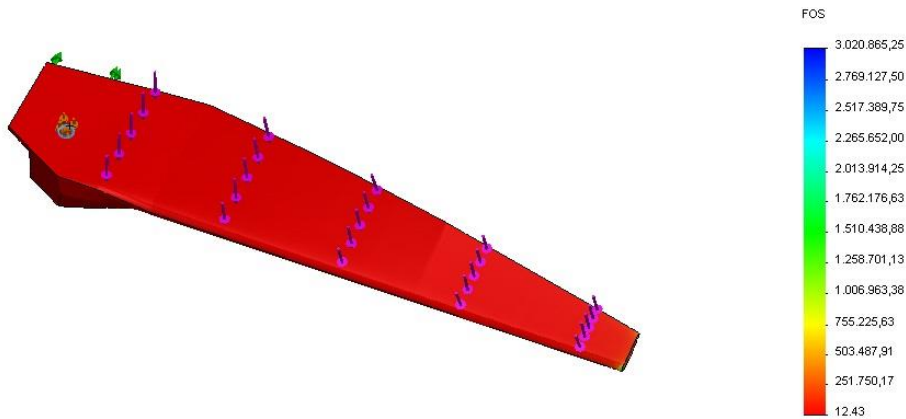


Figura 4.26 - Diagrama do fator de segurança referente à força aerodinâmica na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação simples.

A força aerodinâmica exerce nas pás esforços na ordem dos 230 MPa. Comparando este valor com o obtido no ensaio da força centrífuga para o mesmo tipo de pá e a mesma furação (891 MPa), observa-se que o valor obtido no presente ensaio é substancialmente inferior. Pode afirmar-se o mesmo para o fator de segurança mínimo, que no ensaio relativo à força centrífuga foi de 3,23. Observa-se que no presente ensaio o valor obtido para o fator de segurança mínimo é aproximadamente 4 vezes superior.

Apresentam-se de seguida os resultados da simulação da força aerodinâmica na pá em compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla, sendo reportados a distribuição da tensão de Von Mises e o fator de segurança.

Model name: pá 1 para testes março 2015  
 Study name: Força Aerodinâmica  
 Plot type: Static nodal stress Stress1  
 Deformation scale: 17.1181

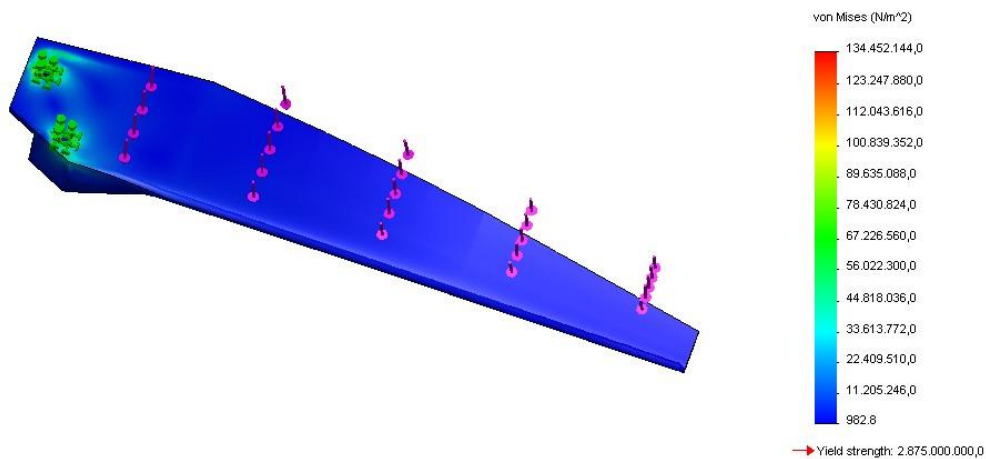


Figura 4.27 - Diagrama de tensões referente à força aerodinâmica na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla.

Model name: pá 1 para testes março 2015  
Study name: Força Aerodinâmica  
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
Criterion: Automatic  
Factor of safety distribution: Min FOS = 21

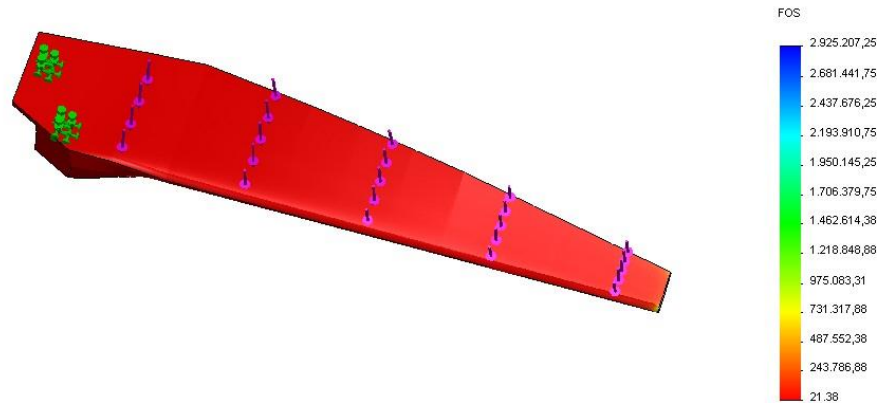


Figura 4.28 - Diagrama do fator de segurança referente à força aerodinâmica na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla.

Observa-se que a força aerodinâmica exerce nas pás esforços muito menos significativos que a força centrífuga. Quando comparados, os valores obtidos para os ensaios em pá de compósito de epóxi-fibra de vidro são muito inferiores aos analisados nos ensaios de força centrífuga. As tensões estão contidas num intervalo entre 100 e 250 MPa, enquanto nos ensaios de força centrífuga estiveram contidas entre 450 e 900 MPa, valores três vezes inferiores. Já o fator de segurança mínimo atinge valores quatro vezes superiores aos obtidos nos ensaios de resistência à força centrífuga.

Para além da pá em compósito de epóxi-fibra de vidro ensaiou-se às solicitações de natureza aerodinâmica também a pá em madeira, com furação simples e furação dupla. Foram analisados a distribuição da tensão de Von Mises e fator de segurança ao longo da pá.

Model name: pá 3 para testes março 2015 - madeira  
Study name: Força Aerodinâmica  
Plot type: Static nodal stress Stress1  
Deformation scale: 33.7873

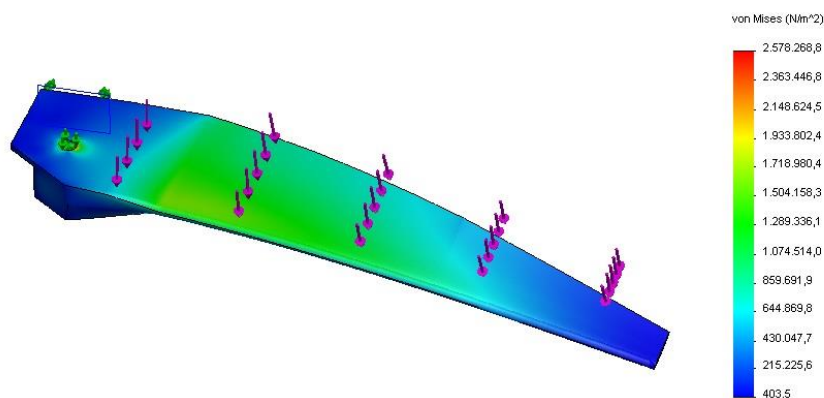


Figura 4.29 - Diagrama de tensões referente à força aerodinâmica na pá de madeira com furação simples.

Model name: pá 3 para testes março 2015 - madeira  
 Study name: Força Aerodinâmica  
 Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
 Criterion : Automatic  
 Factor of safety distribution: Min FOS = 21

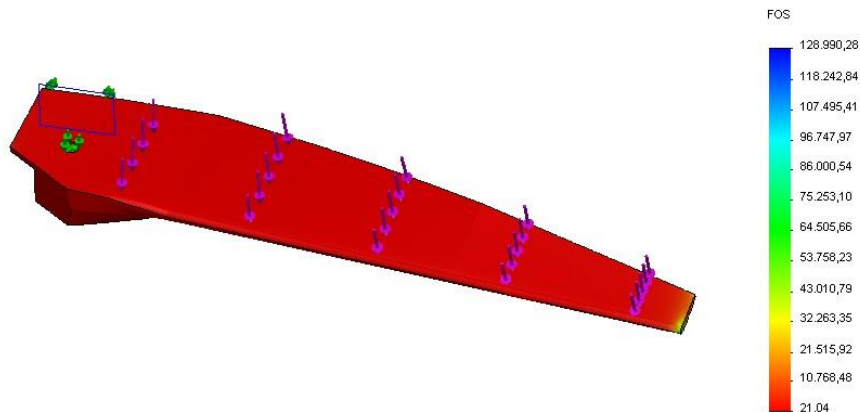


Figura 4.30 - Diagrama do fator de segurança referente à força aerodinâmica na pá de madeira com furação simples.

Neste ensaio observa-se um valor de aproximadamente 2,58 MPa pertencente aos esforços exercidos pela força aerodinâmica na pá. Em comparação com o ensaio predecessor da força centrífuga na pá também em madeira com furação simples (89 MPa), observa-se que o valor do presente ensaio é significativamente inferior. Em relação ao fator de segurança mínimo também se nota bastante diferença a nível de valores. Neste ensaio prova-se que a pá consegue resistir perfeitamente ao efeito da força aerodinâmica, já no ensaio da força centrífuga prova-se exatamente o contrário.

Os ensaios seguintes têm como objetivo estudar a resistência às forças aerodinâmicas da pá em madeira com furação dupla.

Model name: pá 1 para testes março 2015 - madeira  
 Study name: Força Aerodinâmica  
 Plot type: Static nodal stress Stress1  
 Deformation scale: 34.0252

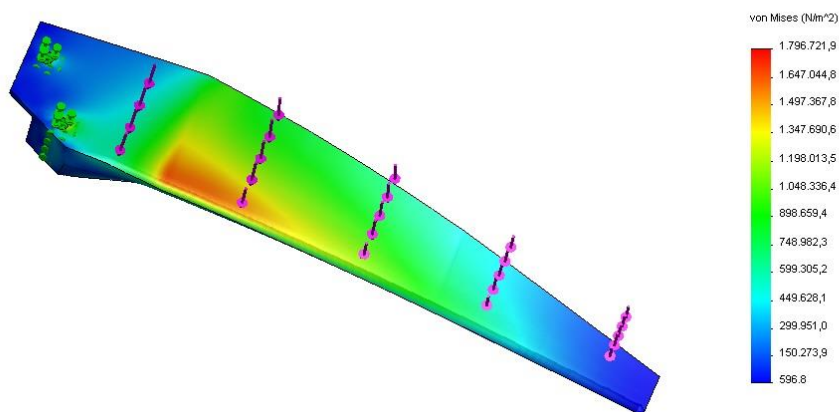


Figura 4.31 - Diagrama de tensões referente à força aerodinâmica na pá de madeira com furação dupla.

Model name: pá 1 para testes março 2015 - madeira  
 Study name: Força Aerodinâmica  
 Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
 Criterion: Automatic  
 Factor of safety distribution: Min FOS = 30

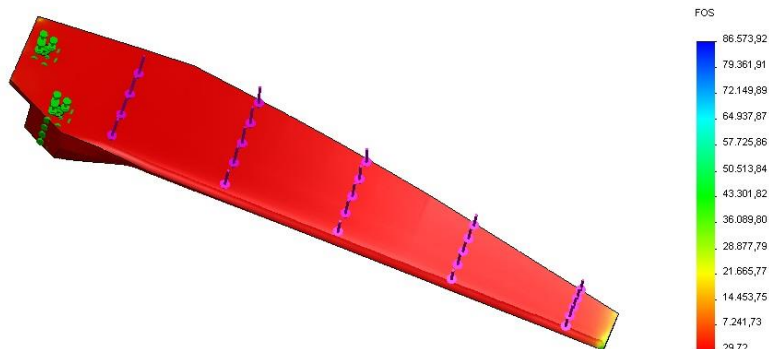


Figura 4.32 - Diagrama do deslocamento referente à força aerodinâmica na pá de madeira com furação dupla.

Observa-se também a partir deste ensaio que a força aerodinâmica exerce nas pás esforços muito menos significativos que a força centrífuga. Comparando os valores obtidos para os ensaios em madeira são muito inferiores aos analisados nos ensaios de força centrífuga. Os valores obtidos inserem-se numa gama não superior a 1 MPa, enquanto nos ensaios de força centrífuga essa gama de valores não ultrapassava os 25 MPa. Já o fator de segurança mínimo atinge valores quase 30 vezes superiores aos obtidos nos ensaios de resistência à força centrífuga.

### 4.3 Forças conjuntas, centrífuga e aerodinâmica

Por fim, realizaram-se quatro ensaios adicionais estando as duas forças, centrífuga e aerodinâmica, a atuar em conjunto na pá, sendo esta a situação que mais se aproxima do que acontece na realidade.

Model name: pá 3 para testes março 2015  
 Study name: Forças Conjuntas  
 Plot type: Static nodal stress Stress1  
 Deformation scale: 16.3943

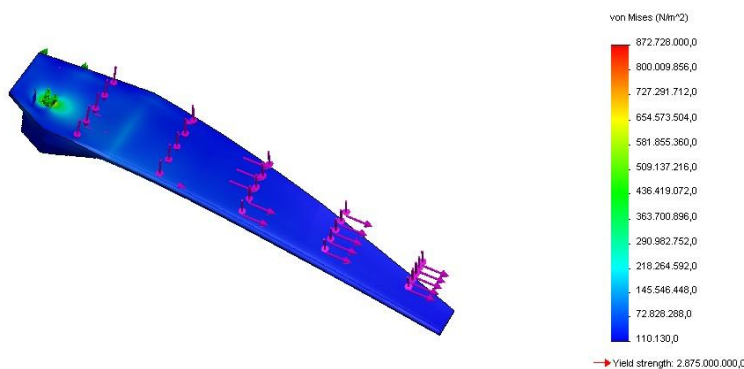


Figura 4.33 - Diagrama de tensões referente às forças conjuntas na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação simples.

Model name: pá 3 para testes março 2015  
Study name: Forças Conjuntas  
Plot type: Static displacement Displacement1  
Deformation scale: 16.3843

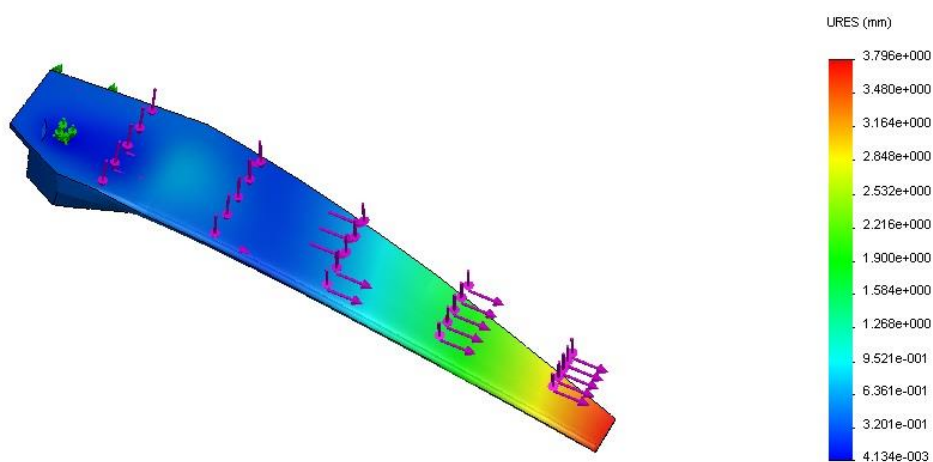


Figura 4.34 - Diagrama do deslocamento referente às forças conjuntas na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação simples.

Model name: pá 3 para testes março 2015  
Study name: Forças Conjuntas  
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
Criterion : Automatic  
Factor of safety distribution: Min FOS = 3.3

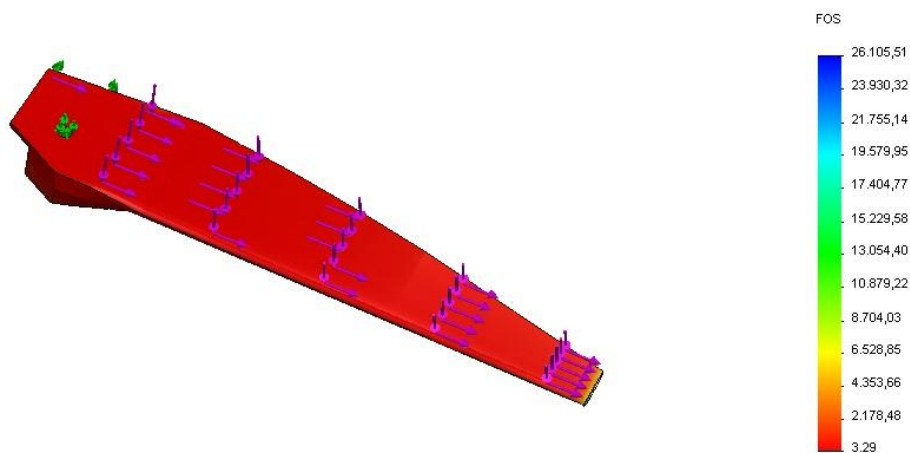


Figura 4.35 - Diagrama do fator de segurança referente às forças conjuntas na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação simples.

Model name: pá 1 para testes março 2015  
Study name: Forças Conjuntas  
Plot type: Static nodal stress Stress1  
Deformation scale: 1

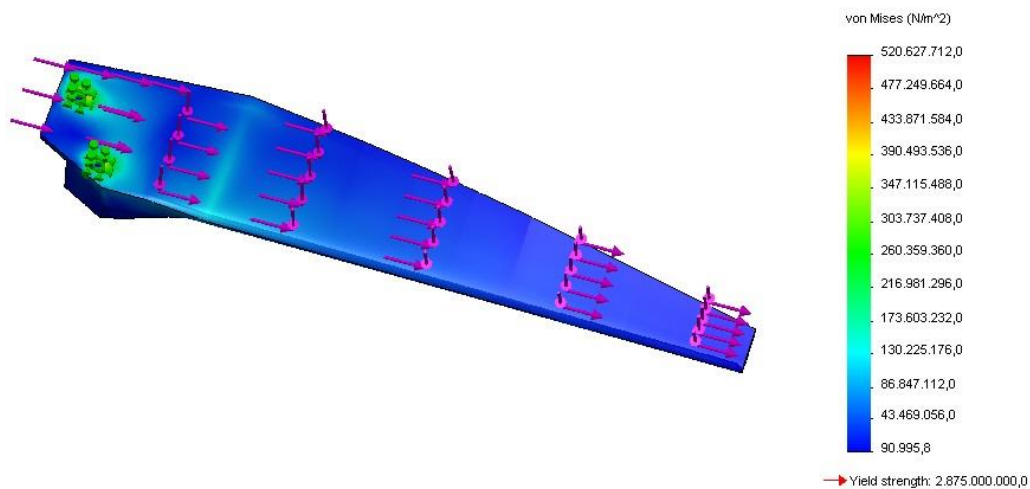


Figura 4.36 - Diagrama de tensões referente às forças conjuntas na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla.

Model name: pá 1 para testes março 2015  
Study name: Forças Conjuntas  
Plot type: Static displacement Displacement1  
Deformation scale: 1

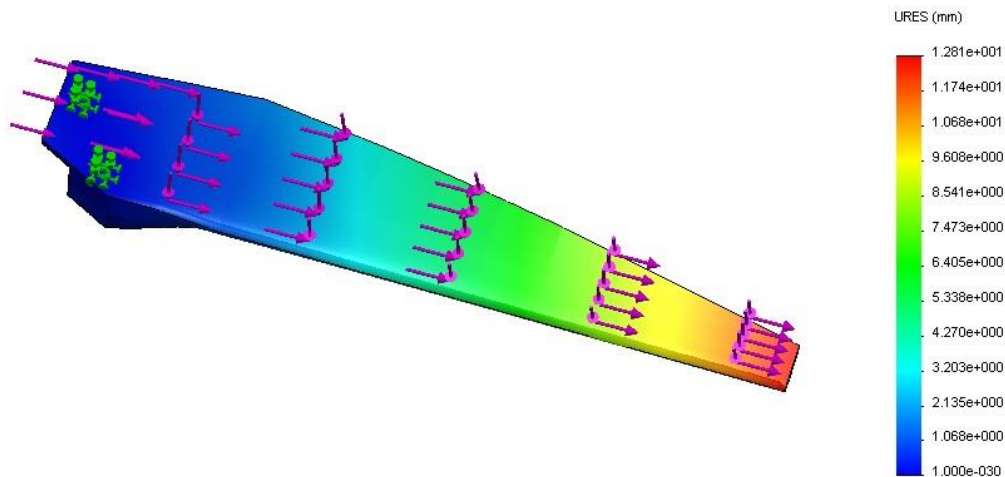


Figura 4.37 - Diagrama do deslocamento referente às forças conjuntas na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla.

Model name: pá 1 para testes março 2015  
Study name: Forças Conjuntas  
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
Criterion : Automatic  
Factor of safety distribution: Min FOS = 5.5

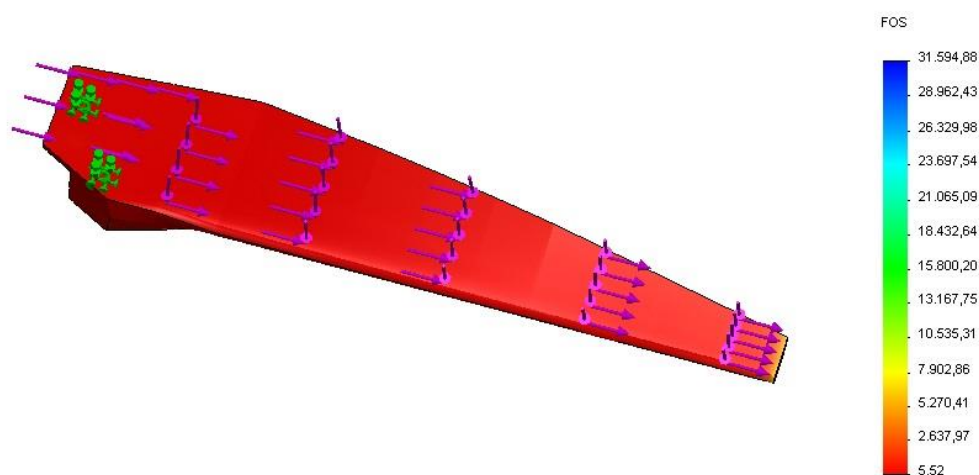


Figura 4.38 - Diagrama do fator de segurança referente às forças conjuntas na pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla.

Os valores obtidos neste ensaio são significativamente superiores aos verificados nos ensaios exclusivamente com a força centrífuga pois, dado tratar-se de um ensaio que possui as duas forças a atuar em simultâneo, a conjugação de forças traduz-se por uma carga mais severa para a pá.

Model name: pá 3 para testes março 2015 - madeira  
Study name: Forças Conjuntas  
Plot type: Static nodal stress Stress1  
Deformation scale: 4.9556

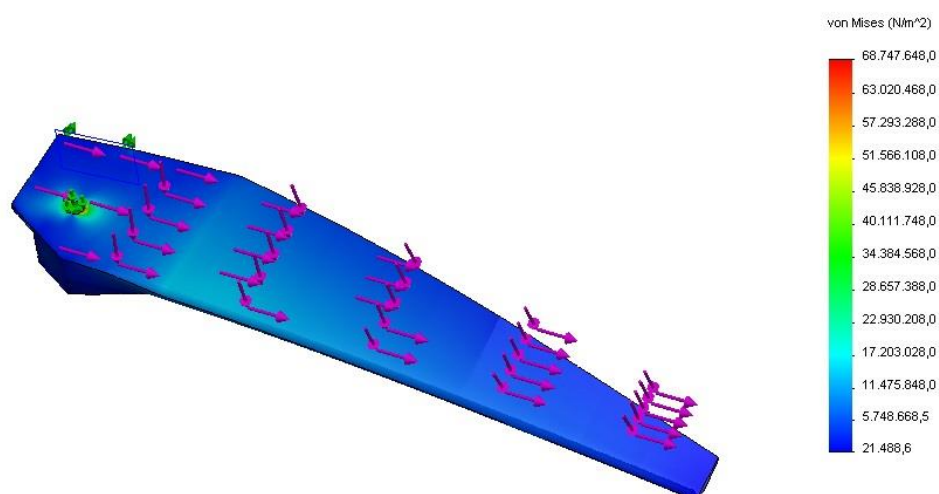


Figura 4.39 - Diagrama de tensões referente às forças conjuntas na pá de madeira com furação simples.

Model name: pá 3 para testes março 2015 - madeira  
Study name: Forças Conjuntas  
Plot type: Static displacement Displacement1  
Deformation scale: 4.9556

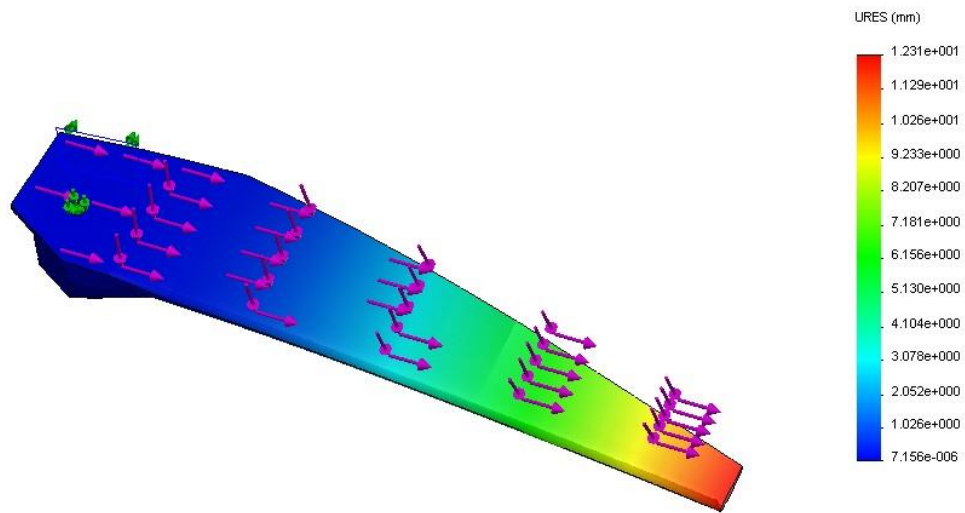


Figura 4.40 - Diagrama do deslocamento referente às forças conjuntas na pá de madeira com furação simples.

Model name: pá 3 para testes março 2015 - madeira  
Study name: Forças Conjuntas  
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
Criterion: Automatic  
Factor of safety distribution: Min FOS = 0.79

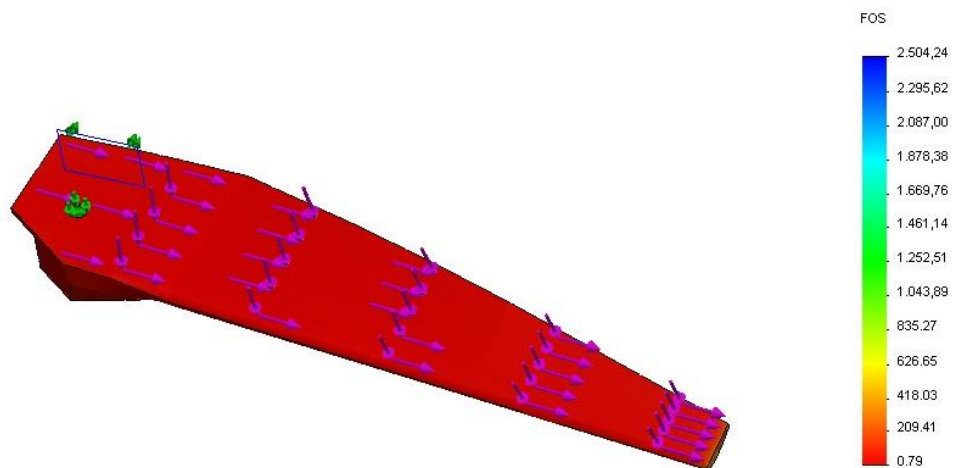


Figura 4.41 - Diagrama do fator de segurança referente às forças conjuntas na pá de madeira com furação simples.

Model name: pá 1 para testes março 2015 - madeira  
Study name: Forças Conjuntas  
Plot type: Static nodal stress Stress1  
Deformation scale: 1

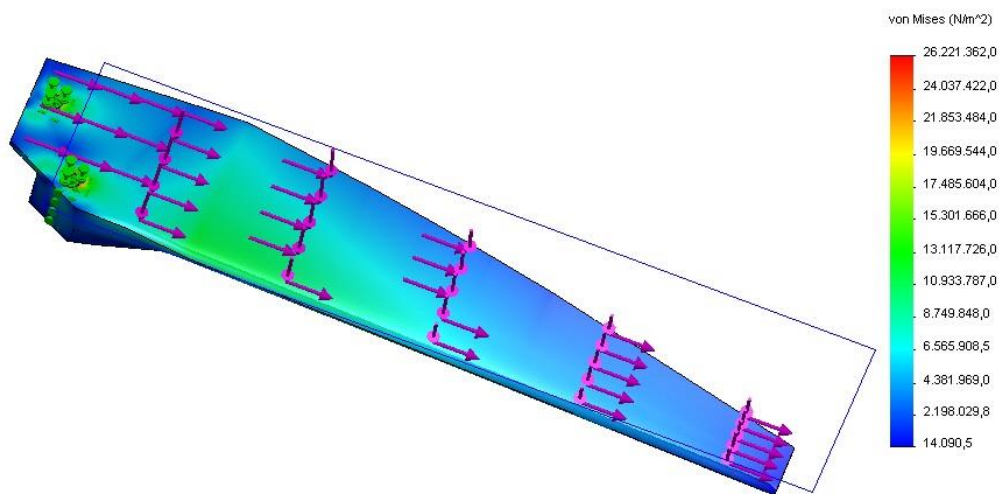


Figura 4.42 - Diagrama de tensões referente às forças conjuntas na pá de madeira com furação dupla.

Model name: pá 1 para testes março 2015 - madeira  
Study name: Forças Conjuntas  
Plot type: Static displacement Displacement1  
Deformation scale: 1

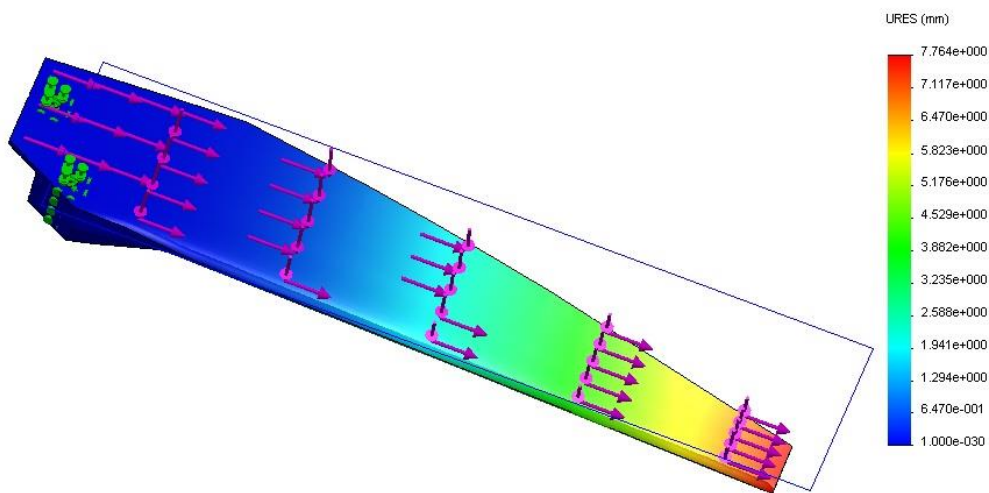


Figura 4.43 - Diagrama do deslocamento referente às forças conjuntas na pá de madeira com furação dupla.

Model name: pá 1 para testes março 2015 - madeira  
Study name: Forças Conjuntas  
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
Criterion: Automatic  
Factor of safety distribution: Min FOS = 1.4

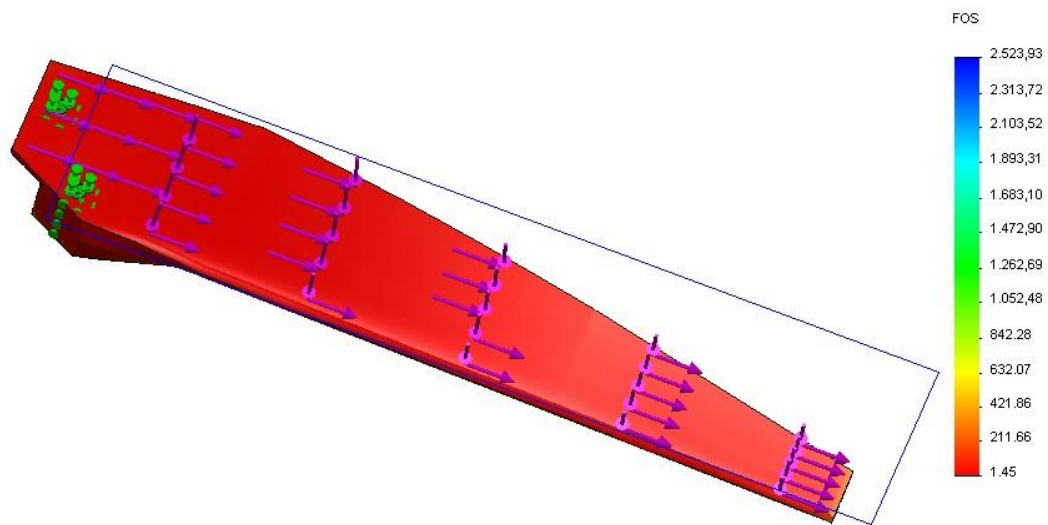


Figura 4.44 - Diagrama do fator de segurança referente às forças conjuntas na pá de madeira com furação dupla.

Verifica-se uma diminuição de resistência estrutural quando se compara a pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com a pá de madeira. Este ensaio revelou que, no caso em que atuam as duas forças em conjunto, a pá de madeira com furação simples não consegue suportar a carga a que é sujeita, facto revelado pelo fator de segurança apresentado, com valor 0,79. Igualmente num dos ensaios da força centrífuga, a pá de madeira demonstrou um valor muito semelhante.

#### 4.4 Ensaios para a Força Centrífuga a várias velocidades

Dada a circunstância que o ensaio da força centrífuga incidente na pá em madeira com furação simples revelou um valor excessivamente reduzido (de cerca de 0,61), ocorreu a necessidade de realizar ensaios adicionais abaixo apresentados, de forma a determinar qual a velocidade máxima do vento incidente que a pá em madeira com furação simples pode suportar. Este resultado é obtido através de uma análise da evolução do fator de segurança mínimo com a velocidade do vento incidente. Os esforços tidos em conta nestes cálculos tiveram em conta as cargas mais relevantes, isto é, as derivadas da força centrífuga.

Tabela 4.1 - Tabela de resultados dos ensaios da força centrífuga a diferentes velocidades do vento.

Velocidade (m/s)	Tensão máxima (MPa)		Deslocamento máximo (mm)		Fator de segurança mínimo	
	Pá em compósito de epóxi-fibra de vidro	Pá em Madeira	Pá em compósito de epóxi-fibra de vidro	Pá em Madeira	Pá em compósito de epóxi-fibra de vidro	Pá em Madeira
10	107	7,67	0,310	1,17	26,89	7,15
15	240	17,3	0,697	2,63	11,96	3,18
20	428	30,7	1,24	4,67	6,72	1,79
25	668	47,9	1,94	7,30	4,30	1,14
30	891	89	2,32	6,32	3,23	0,61

Após realizar os ensaios obtiveram-se os valores representados na tabela acima exibida. A uma velocidade de 25 m/s a pá em madeira apresenta um fator de segurança de 1,14. Este é já um valor favorável, no entanto pretendeu-se descobrir o valor exato de velocidade para a qual se obtém um fator de segurança de 1, que descreve o caso mais extremo. Recorreu-se então a uma interpolação linear entre os dois valores mais elevados de velocidade de forma a encontrar o valor pretendido. Deste modo:

$$\frac{y_a - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x_a - x_1}{x_2 - x_1} \quad (4.9)$$

Sendo que os valores de x são dados pela velocidade e y pelo fator de segurança. Nesse caso, a expressão transforma-se na seguinte:

$$y_a = 1$$

$$x_1 = 25 \text{ m/s}$$

$$y_1 = 1,14$$

$$x_2 = 30 \text{ m/s}$$

$$y_2 = 0,81$$

$$\frac{1 - 1,14}{0,61 - 1,14} = \frac{x_a - 25}{30 - 25}$$

$$x_a = 26,3 \text{ m/s}$$

O valor de velocidade do vento para o qual o fator de segurança é 1 é 26,3 m/s. Apresenta-se de seguida um gráfico que apresenta o progresso numérico do fator de segurança com a variação da velocidade do vento incidente.

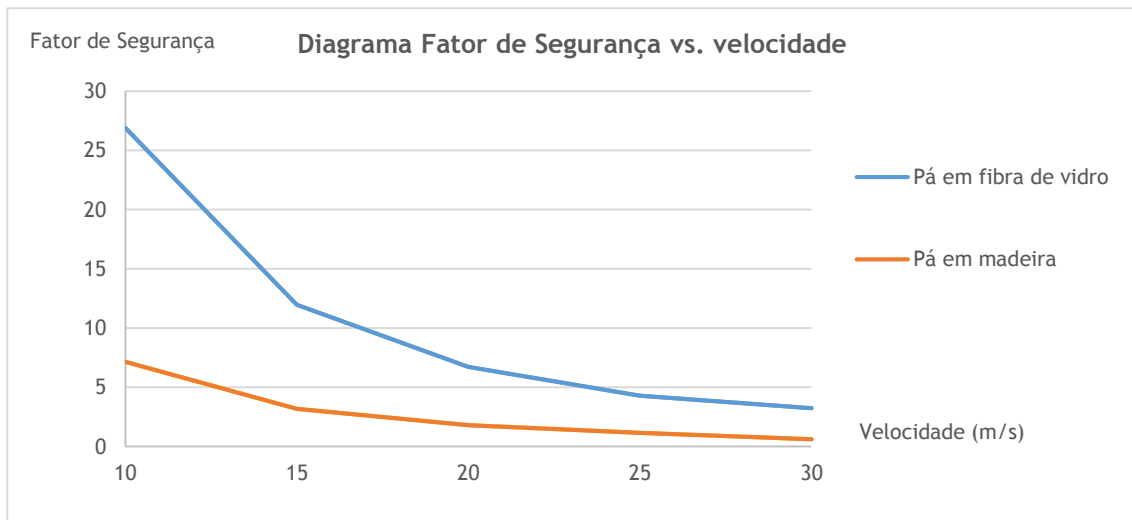


Figura 4.45 - Evolução do fator de segurança com a velocidade do vento.

## 4.5 Comparação de resultados

Depois de recolhidos todos os valores obtidos na execução dos ensaios, procedeu-se a uma comparação, dos valores obtidos para a tensão máxima, deslocamento e fator de segurança nas pás. Os gráficos do deslocamento para as várias situações estudadas não foram apresentados para não sobrecarregar a apresentação gráfica da dissertação. Todos os valores obtidos são para os esforços resultantes de um funcionamento da turbina eólica a um vento incidente de 30 m/s.

Tabela 4.2 - Comparação dos resultados obtidos para a força centrífuga.

Força Centrífuga			
	Tensão máxima (MPa)	Deslocamento máximo (mm)	Fator de segurança mínimo
Pá em compósito de epóxi-fibra de vidro com furação simples	891	2,32	3,23
Pá em madeira com furação simples	89	6,32	0,61
Pá em compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla	491	1,16	5,85
Pá em madeira com furação dupla	25	6,56	1,52

No ensaio que diz respeito à força centrífuga, constata-se que o menor valor para o deslocamento máximo pertence ao ensaio da pá em compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla. Já o menor valor de tensão máxima pertence ao ensaio da pá em madeira com furação dupla. Esta variação de valores entre pás de materiais diferentes deve-se ao facto de esses mesmos materiais possuírem propriedades mecânicas diferentes que influenciam o seu comportamento na presença da força centrífuga. Contudo, o ensaio que apresenta o valor mais elevado para o fator de segurança mínimo é o correspondente ao da pá em compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla. Este resultado permite descrever a madeira como um material mais frágil que o compósito de epóxi-fibra de vidro, pois apesar de registar tensões máximas inferiores, o seu limite de cedência também é inferior ao do material compósito. Portanto, esta é a razão pela qual o compósito de epóxi-fibra de vidro se manifesta como um material vantajoso, pois apesar de a pá produzida neste material possuir maior massa, neste caso consegue resistir a uma tensão superior em 3 vezes a tensão máxima que sofreu. O deslocamento máximo é superior no ensaio com a pá de compósito de epóxi-fibra de vidro com furação simples. Este resultado provém do facto de a pá estar fixa em apenas um ponto, tendo maior tendência para se deformar.

Tabela 4.3 - Comparação dos resultados obtidos para as cargas aerodinâmicas.

Força Aerodinâmica			
	Tensão máxima (MPa)	Deslocamento máximo (mm)	Fator de segurança mínimo
Pá em compósito de epóxi-fibra de vidro com furação simples	231	13,3	12,4
Pá em madeira com furação simples	2,58	1,80	21
Pá em compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla	134	3,52	21,4
Pá em madeira com furação dupla	1,80	1,79	29,7

Relativamente aos ensaios à força aerodinâmica, o valor mais elevado do fator de segurança mínimo pertence à pá em madeira com furação dupla. As pás em compósito de epóxi-fibra de vidro também obtiveram resultados satisfatórios uma vez que os valores obtidos para o fator de segurança mínimo são semelhantes aos revelados nos ensaios com pás em madeira. A força aerodinâmica tem um papel menos significativo na análise da resistência das pás por ser significativamente inferior à força centrífuga.

Tabela 4.4 - Comparação dos resultados obtidos para as forças em conjunto.

Forças Conjuntas			
	Tensão máxima (MPa)	Deslocamento máximo (mm)	Fator de segurança mínimo
Pá em compósito de epóxi-fibra de vidro com furação simples	872	3,80	3,29
Pá em madeira com furação simples	68,7	12,3	0,79
Pá em compósito de epóxi-fibra de vidro com furação dupla	520	12,8	5,52
Pá em madeira com furação dupla	26,2	7,76	1,45

Por fim, ensaiando as duas forças a atuar em simultâneo, de modo a simular um funcionamento mais real da turbina eólica, podem ser retiradas as seguintes conclusões: 1) a pá com apenas um furo como ponto de fixação é a menos resistente de todas; 2) a pá em compósito de epóxi-fibra de vidro, quer com furação simples, quer com furação dupla apresenta um fator de segurança mínimo sempre superior ao apresentado pela pá em madeira; 3) a pá de madeira com furação simples apresenta um fator de segurança mínimo de 0,79 o que revela que a pá não suporta os esforços resultantes do funcionamento da turbina eólica uma velocidade do vento incidente de 30 m/s.



## 5. Conclusões

Neste último capítulo é elaborada uma revisão dos objetivos propostos para a dissertação, é realizada uma recapitulação do trabalho desenvolvido e são sugeridas indicações para trabalhos a desenvolver futuramente.

Este trabalho teve como objetivo primordial estudar o processo de construção de uma pá em compósito de resina epóxi reforçada por fibra de vidro para uma microturbina eólica destinada a autoconstrução e pertencente à família de turbinas projetadas por Hugh Piggott (Piggott, 2013).

A dissertação iniciou-se com uma introdução na qual foram descritas as características e aplicações desta família de turbinas eólicas de forma a enquadrar os objetivos propostos no trabalho.

No capítulo 2 foi feita uma revisão da evolução histórica do aproveitamento da energia eólica pelo ser humano, seguindo-se a apresentação dos vários tipos de turbinas eólicas atualmente em funcionamento. Procedeu-se seguidamente à descrição dos elementos essenciais que constituem uma microturbina eólica, assim como os tipos de microturbinas eólicas existentes. Foi introduzido o conceito de limite de Betz, o qual define a potência máxima extraível por uma turbina eólica do total disponível na massa de ar em movimento que a atravessa. Foram também referidas as aplicações mais comuns deste género de turbinas e o procedimento utilizado para o fabrico de pás em madeira e compósito de epóxi-fibra de vidro.

Seguidamente, no capítulo 3, procedeu-se à descrição da construção da pá em compósito de resina epóxi reforçada por fibra de vidro, sendo descrito o processo de desenho computacional da pá no programa SolidWorks que possibilitou a criação do molde para o fabrico da pá. Sendo o molde fabricado através de maquinaria CNC em poliuretano, foi necessário obter o código de maquinaria através de um outro programa, da firma Vectric, o qual permitiu também prever o resultado final da maquinaria. Prosseguiu-se com a descrição da maquinaria e o facto de, após algumas tentativas, terem surgido resultados de acordo com as expectativas de qualidade pretendidas. A fixação pouco consistente das placas de poliuretano e a definição do centro absoluto da fresadora no local errado foram os fatores determinantes para que as tentativas iniciais não resultassem como esperado, pois provocaram uma deslocação das placas durante o processo de maquinaria, alterando o local onde esta foi realizada. Um outro erro cometido teve origem na colagem das placas de poliuretano que não foi suficientemente consistente e permitiu que as placas se separassem a meio do processo de maquinaria.

Descreveu-se o fabrico da pá, o qual consistiu na aplicação de resina e endurecedor no molde, juntamente com tiras de fibra de vidro e tecido desmoldante, tendo seguidamente inserido as

duas partes do molde de uma só vez num saco e retirado todo o ar para que a fibra assumisse a forma da pá presente no molde.

No capítulo 4 descrevem-se os ensaios computacionais efetuados no programa de simulação estrutural Cosmos Works relativos à resistência da pá.

Compararam-se os resultados para uma pá em madeira com os de uma pá de compósito de epóxi-fibra de vidro e ainda dois tipos de furação para fixação das pás. As forças simuladas nos ensaios foram: a força centrífuga e a força aerodinâmica. Os resultados obtidos consistiram na tensão máxima existente na pá, no deslocamento máximo presente e no fator de segurança mínimo que a pá apresenta. Todas as simulações foram relativas aos esforços resultantes do funcionamento da turbina eólica quando exposta a um vento incidente, perpendicularmente ao plano de rotação das pás, de 30 m/s. Esta é uma situação limite e hipotética, dado a esta velocidade do vento o mecanismo aerodinâmico de proteção da turbina ter sido já ativado, o qual consiste em colocar o plano de rotação das pás não perpendicular ao vento incidente.

Dos ensaios realizados pôde concluir-se que, para ambos os materiais de fabrico estudados, compósito de epóxi-fibra de vidro e madeira, a pá com um único furo de fixação é a menos resistente de todas pois todos os esforços decorrentes da fixação se concentram num único furo.

A pá em compósito de epóxi-fibra de vidro, quer com furação simples, quer com furação dupla é sempre mais resistente que a pá em madeira pois apresenta um fator de segurança sempre superior a esta. Concluiu-se ainda que pá em madeira com furação simples não consegue suportar os esforços resultantes do funcionamento da turbina eólica a uma velocidade do vento incidente de 30 m/s pois apresenta um fator de segurança de 0,79 quando o mínimo possível teria de ser de 1.

Através do estudo realizado e dos conhecimentos adquiridos podem enumerar-se algumas sugestões acerca de novos trabalhos relacionados com o realizado na presente dissertação.

Uma vez demonstrado que a pá em compósito de epóxi-fibra de vidro apresenta bons resultados a nível de rigidez estrutural, seria pertinente realizar um estudo sobre o seu comportamento aerodinâmico em conformidade com o estudo já realizado para a pá em madeira.

Outra proposta de estudo seria a utilização real deste tipo de pás aplicadas no rotor de uma microturbina eólica com a função de carregar pequenas baterias destinadas a iluminação exterior doméstica.

Dado o carácter computacional do desenho e fabrico da pá em compósito de epóxi-fibra de vidro, o qual contrasta com o fabrico manual das pás em madeira, poder-se-ia tirar partido do rigor permitido pela maquinação CNC para produzir pás com perfis aerodinâmicos de forma complexa desenvolvidos especificamente para micro turbinas (Somers et al., 2003).



## Referências bibliográficas

Azo Materials. E-Glass Fibre [Online]. Acedido a 5 março 2015, em <http://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=764>

Batista, N.A.M.C. (2013). Novo aerogerador de eixo vertical integrado numa rede inteligente em contexto urbano. Tese de Doutoramento, Universidade de Évora, Portugal.

Bhattacharya, A. (2010). The effect of blade angle and size on wind turbine performance. [Online] The American Statistical Association (ASA). Acedido a 11 maio 2015, em <http://www.amstat.org/education/posterprojects/pdfs/2010/2010grade7-9secondplaceproject.pdf>

Corbyn, A. & Little, M. (2008). Fibre glass wind turbine blade manufacturing guide [Online]. Engineering for change. Acedido a 18 maio 2015, em [https://www.engineeringforchange.org/static/content/Energy/S00019/blade\\_manufacture\\_guide.pdf](https://www.engineeringforchange.org/static/content/Energy/S00019/blade_manufacture_guide.pdf)

Coutinho, J.R.V. (2012). Aspectos analíticos no estudo de impactos gerados por ruídos e estruturas de aerogeradores. Monografia (graduação), Centro de Ciências e Tecnologia - Universidade Estadual do Ceará, Brasil.

Estanqueiro, A. & Simões, T. (2010). Aproveitamento de energia eólica em ambiente urbano e construído. Renováveis Magazine, nº2, 44-49. Acedido a 15 maio 2015 em [http://repositorio.lneg.pt/bitstream/10400.9/1178/1/RenovaveisMagazine\\_2010.pdf](http://repositorio.lneg.pt/bitstream/10400.9/1178/1/RenovaveisMagazine_2010.pdf)

Ferreira, A.A.A. (2011). Sistema de produção de energia eólica. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto, Portugal.

Giovanella, C.F.M. (2004). Testes de Turbinas Eólicas de Eixo Vertical em Escala. [Online] Pontifícia Universidade do Rio Grande do Sul (PUCRS). Acedido a 16 maio 2015, em <http://www.pucrs.br/ce-eolica/2004/2004-4-PUCRS.pdf>

Gipe, P. (2004). Wind Power: Renewable Energy for Home, Farm, and Business. White River Junction, Vermont: Chelsea Green Publishing Company.

Horn, D.A. (2010). Análise numérica da esteira aerodinâmica formada por uma turbina eólica com dimensionamento ótimo de Betz. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

Lima, M.R. (2009). O uso da energia eólica como fonte alternativa para solucionar problemas de energia e bombeamento de água subterrânea em locais isolados. Trabalho de conclusão de curso para obtenção do título de especialização, Universidade Federal de Lavras, Brasil.

Lima, R.M.R (2012). Estudo e implementação de sistema híbrido de microgeração. Tese de Mestrado, Escola de Engenharia - Universidade do Minho, Portugal.

Marques, J. (2004). Turbinas eólicas: modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil.

Material Property Data. African Mahogany Wood [Online]. Acedido a 9 março 2015, em <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=8188e7e1f11b4deb9fd67fe18d83e272&ckck=1>

Mathew, S., Philip, G.S. (2012). Wind turbines: Evolution, Basic principles, and Classifications. In A. Sayigh (Ed.), *Comprehensive Renewable Energy* (93-111). Elsevier.

MatWeb. Overview of materials for 7000 Series Aluminum Alloy [Online]. Acedido a 1 junho 2015, em <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ab9706916818406b80c22b7f39db0c78>

MatWeb. Overview of materials for Low Alloy Steel [Online]. Acedido a 1 junho 2015, em <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d1bdbccde4da4da4a9dbb8918d783b29>

Monteiro, J.P., Silvestre, M.R., Piggott, H. & André, J.C. (2013). Wind tunnel testing of a horizontal axis wind turbine rotor and comparison with simulations from two Blade Element Momentum codes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 123, 99-106.

Nath, C. (2012). Wind turbine design: Can small be beautiful? [Online]. Wiki-cleantech. Acedido a 17 maio 2015, em <http://wiki-cleantech.com/wind-energy/wind-turbine-design-can-small-be-beautiful>

Patel, H. & Damania, S. (2013). Performance prediction of horizontal axis wind turbine blade. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 2, Issue 5, 1401-1406. Acedido a 20 maio 2015, em [http://www.ijirset.com/upload/may/16\\_PERFORMANCE.pdf](http://www.ijirset.com/upload/may/16_PERFORMANCE.pdf)

Piggott, H. (2000). *Wind Power Workshop: Building your own turbine*. CAT Publications.

Piggott, H. (2013). A Wind Turbine Recipe Book: The axial flux windmill plans (2013 Metric PDF Edition).

Pires, J.C.P. (2010). Estudo de rotor para turbina eólica de eixo horizontal de pequeno porte com aplicação de modelagem e simulação virtual. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

Resende, F.O., (2011). Evolução tecnológica dos sistemas de conversão de energia eólica para ligação à rede. eL-P Engineering and Technology Journal, V. 2 (2011), 22-36. Acedido a 10 maio 2015, em <http://revistas.ulusofona.pt/index.php/revistae-lp/article/view/1991/1555>

Somers, D.M. & Maughmer, M.D. (2003). Theoretical Aerodynamic Analyses of Six Airfoils for Use on Small Wind Turbines [Online]. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Acedido a 28 maio 2015, em <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/33295.pdf>

Song, Q. (2012). Design, Fabrication, and Testing of a New Small Wind Turbine Blade. MASC Thesis, University of Guelph, Canada.

The Engineering Toolbox. Drag coefficient [Online]. Acedido a 4 março 2015, em [http://www.engineeringtoolbox.com/drag-coefficient-d\\_627.html](http://www.engineeringtoolbox.com/drag-coefficient-d_627.html)

The Engineering Toolbox. Fibers in Polymer Composites [Online]. Acedido a 5 março 2015, em [http://www.engineeringtoolbox.com/polymer-composite-fibers-d\\_1226.html](http://www.engineeringtoolbox.com/polymer-composite-fibers-d_1226.html)

Wind-turbine-models.com. [Online]. Acedido a 1 junho 2015, em <http://en.wind-turbine-models.com/foto/565/>

Wood, D. (2011). Small Wind Turbines: Analysis, Design and Application. London: Springer.