

# **Desenvolvimento de Pás Eólicas em Materiais Sustentáveis**

**Daniel Filipe Araújo**

Relatório da Dissertação Final Submetida a  
**Escola Superior de Tecnologia e de Gestão**  
**Instituto Politécnico de Bragança**

Para a obtenção do grau de Mestre em  
**Energias Renováveis e Eficiência Energética**

**Dezembro 2015**

# **Desenvolvimento de Pás Eólicas em Materiais Sustentáveis**

**Daniel Filipe Araújo**

Relatório da Dissertação Final Submetida a  
**Escola Superior de Tecnologia e de Gestão**  
**Instituto Politécnico de Bragança**

Para a obtenção do grau de Mestre em  
**Energias Renováveis e Eficiência Energética**

Orientador:

Professor Doutor Luís Frólén Ribeiro

**Dezembro 2015**

# Agradecimentos

Em primeiro lugar quero demonstrar o meu sincero agradecimento ao meu orientador, Professor Doutor Luís Frólén Ribeiro, pois sem ele teria sido impossível realizar este projeto. Obrigado pela orientação, companheirismo e interesse demonstrados.

Ao Professor José Manuel Alves Ribeiro, pelo tempo despendido, paciência e conhecimentos transmitidos, o meu muito obrigado.

Ao Engenheiro José Enrique Carvalho Santos, pelo tempo precioso que dispensou comigo aquando da impressão das págs, envio os meus sinceros agradecimentos.

À Escola Superior de Tecnologia e Gestão, obrigado pela oportunidade e pelos recursos fornecidos que necessitei ao longo deste trabalho.

A todo o grupo *Enhanced WT*, em especial ao Jorge Paulo, o meu muito obrigado pelas dicas e conhecimentos fornecidos.

Quero também agradecer a toda a minha família, em especial aos meus pais, por me apoiarem sempre e por nunca deixarem que me faltasse nada. Esta dissertação também é vossa!

Quero deixar um agradecimento especial a todos os meus amigos que me acompanharam durante esta etapa, em especial ao meu grande amigo Rui Faria, por tudo o que fez por mim. Conseguimos!

Por último, um especial agradecimento à minha namorada, por ter sido sempre paciente comigo, e por ter estado ao meu lado, sempre que precisei.

# Resumo

Esta dissertação apresenta um passo na transformação de um aerogerador já existente, num aerogerador mais sustentável, sendo o foco a construção das pás através do BEM (Blade Element Method).

Pretende-se que as pás sejam construídas com materiais sustentáveis.

Foram determinados os coeficientes e forças aerodinâmicas das pás construídas num túnel aerodinâmico, nomeadamente as forças de sustentação e resistência, tendo sido obtidos, após várias tentativas de impressão 3D dos modelos, resultados bastante promissores. As pás impressas foram sujeitas a velocidades entre os 4,3 m/s e 19,3 m/s, e a diferentes ângulos de ataque, variando os mesmos entre  $-20^\circ$  e  $30^\circ$ .

Foi testada a teoria do casamento de perfis, para se poder extrair o maior rendimento possível da pá final construída. Devido ao fato de esta mesma teoria não ser totalmente compatível com o BEM, a pá final apresentou alguns erros críticos, apresentando uma depressão entre os perfis escolhidos, sendo matéria de estudos futuros.

Foram modeladas digitalmente duas pás com os perfis NACA 2414 e NACA 4415 para serem testadas no túnel e, após a sua impressão 3D e com base nos valores obtidos dos testes, foram modeladas aquelas que são consideradas as finais.

O perfil NACA 2414 apresenta melhor desempenho a velocidades de vento mais baixas, sendo que possui o melhor desempenho para um número de Reynolds de 45632 e para um ângulo de ataque de  $10^\circ$ . Quanto ao perfil NACA 4415, o melhor desempenho obtém-se para o mesmo número de Reynolds, sendo que o melhor ângulo de ataque será  $15^\circ$ . Este mesmo perfil é mais adequado para velocidades de vento mais elevadas.

Palavras-chave: Concentrador-Difusor; pás aerodinâmicas; BEM.

# Abstract

This dissertation presents a step in the transformation of an existing wind turbine, into a more sustainable turbine, being the focus the construction of aerodynamic blades through BEM.

It is intended that the blades are constructed with sustainable materials.

The aerodynamic characteristics of the constructed blades were tested in an aerodynamic wind tunnel, in particular the lift and drag forces, having been obtained, after several print 3D models attempts, promising results. The printed blades were subjected to speeds between 4.3 m/s and 19.3 m/s and different angles of attack, between  $-20^{\circ}$  and  $30^{\circ}$ .

It was tested the wedding theory profiles, to be able to extract the highest possible efficiency of the final blade constructed. Due to the fact that this same theory is not fully compatible with the BEM, the final aerodynamic blade made exhibit some critical errors, presenting a depression between the chosen profiles, being theme of future works.

Two blades were digitally modelled with the NACA 2414 and NACA 4415 profiles and further tested in the tunnel and, after the 3D print and base on the obtained results, it were modelated those that are considered the finals.

The NACA 2414 profile presents a better performance at lower wind speeds, having the better performance at an Reynolds number of 45632 and an attack angle of  $10^{\circ}$ . As NACA 4415 profile, the better performance is obtained at the same Reynolds number, being the better attack angle  $15^{\circ}$ . This profile is more appropriate to higher wind speeds.

KeyWords: Concentrator-diffuser; blade aerodynamics; BEM.

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação e Objetivos . . . . .	1
1.2	Estado da Arte . . . . .	2
1.3	Estrutura da Tese . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Conceitos Teóricos</b>	<b>8</b>
2.1	Limite de <i>Betz</i> . . . . .	8
2.2	Perfis Aerodinâmicos . . . . .	8
2.3	Blade Element Momentum Method (BEM) . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Ensaio e Técnicas Experimentais</b>	<b>17</b>
3.1	Cálculos da Potência Espectável . . . . .	17
3.2	Pás Aerodinâmicas - Construção e Testes no Túnel Aerodinâmico . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Discussão de Resultados</b>	<b>34</b>
4.1	Pás Eólicas - Resultados . . . . .	34
4.2	Perfis Propostos . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>44</b>
5.1	Conclusões . . . . .	44
5.2	Trabalhos Futuros . . . . .	45

# Lista de Figuras

1.1	Algumas das 18 turbinas eólicas verticais V2 (rotor tipo Savonius) omnidirecionais com cerca de 5,6 m de altura (Venger (2015)). . . . .	3
1.2	Edifício da OMRF onde se podem visualizar, no topo, as turbinas instaladas (Venger (2015)). . . . .	3
1.3	Vários tipos de sistemas de concentração de vento (adaptado de Paulo (2013)). . . . .	4
1.4	Protótipo <i>Enhanced WT</i> testado a 12 metros de altura, num ambiente livre de construções (Maia (2014)). . . . .	5
1.5	Catedral Cardboard, na Nova Zelândia. Um dos muitos projetos criados por Shigeru Ban (Ban (2015)). . . . .	6
2.1	Caraterísticas dos perfis aerodinâmicos (adaptado de Houghton & Carpenter (2005)). . . . .	9
2.2	Volume de controlo modificado para a forma de um elemento anular $dr$ , para ser usado no modelo BEM (adaptado de Hansen (2008)). . . . .	11
2.3	Divisão da pá aerodinâmica em $N$ elementos com comprimento $dr$ (Kunkunk (2011)). . . . .	11
2.4	Representação das forças normal e tangencial ao plano do rotor, sendo $R$ a soma entre as forças $L$ e $D$ (adaptado de Hansen (2008)). . . . .	13
3.1	Coefficiente de potência ( $C_p$ ) em relação a vários <i>tip speed ratio</i> ( $\lambda$ ), considerando vários tipos de turbinas eólicas (adaptado de Hau (2000)). . . . .	18
3.2	Túnel aerodinâmico subsónico da <i>Armfield</i> , modelo C2. . . . .	20
3.3	Balanças analíticas utilizadas para retirar os valores resultantes das medições. A balança vertical ao túnel mede a força de sustentação exercida na pá, enquanto que a que se encontra horizontalmente mostra os valores de resistência a que a mesma está sujeita. . . . .	21
3.4	Gráfico da calibração do túnel de vento (Paulo (2013)). . . . .	22
3.5	Impressora <i>3D Cube</i> durante a impressão de uma das pás. . . . .	23
3.6	Perfil NACA 6409 9% (AirfoilTools (2015)). . . . .	24
3.7	Perfil NACA 63-206 (AirfoilTools (2015)). . . . .	24

3.8	Perfil NACA 2408 (AirfoilTools (2015)). . . . .	24
3.9	Perfil AG09 (Schwartz (1992)). . . . .	24
3.10	Perfil NACA 6409 9% impresso. Os erros de impressão são principal- mente visíveis no topo da pá. . . . .	25
3.11	Perfil NACA 2414 (AirfoilTools (2015)). . . . .	25
3.12	Perfil NACA 4415 (AirfoilTools (2015)). . . . .	26
3.13	Perfil NACA 2414 após a sua construção digital. . . . .	26
3.14	Perfil NACA 4415 após a sua construção digital. . . . .	27
3.15	Pás impressas com os perfis NACA 2414 e NACA 4415, respetivamente. . . . .	28
3.16	Imperfeições presentes após impressão (à esquerda) e sua correção (à di- reita). Ambos os modelos continham exatamente os mesmos erros. . . . .	28
3.17	Distribuição da pressão para o ângulo de ataque = $0^\circ$ (Houghton & Car- penter (2005)). . . . .	30
3.18	Distribuição da pressão para o ângulo de ataque = $6^\circ$ (Houghton & Car- penter (2005)). . . . .	30
3.19	Distribuição da pressão para o ângulo de ataque = $15^\circ$ (Houghton & Car- penter (2005)). . . . .	30
3.20	Perfil NACA 2414 após a sua construção digital, com correção do tama- nho da corda. . . . .	31
3.21	Perfil NACA 4415 após a sua construção digital, com correção do tama- nho da corda. . . . .	31
3.22	Pás impressas com os perfis NACA 4415 e NACA 2414, respetivamente. . . . .	32
3.23	Diferença entre os dois tipos de pás impressas. À esquerda, um exemplo das pás com 2 cm de corda. À direita encontra-se uma das pás com a correção para 4 cm de corda. . . . .	33
4.1	Valores obtidos de $C_D$ em relação a $\alpha$ relativamente ao perfil NACA 2414. . . . .	35
4.2	Valores obtidos de $C_L$ em relação a $\alpha$ relativamente ao perfil NACA 2414. . . . .	36
4.3	Valores obtidos de $C_L - C_D$ em relação a $\alpha$ relativamente ao perfil NACA 2414. . . . .	37
4.4	Valores obtidos de $C_D$ em relação a $\alpha$ relativamente ao perfil NACA 4415. . . . .	38
4.5	Valores obtidos de $C_L$ em relação a $\alpha$ relativamente ao perfil NACA 4415. . . . .	39
4.6	Valores obtidos de $C_L - C_D$ em relação a $\alpha$ relativamente ao perfil NACA 4415. . . . .	40
4.7	Resultado obtido após casar os dois perfis. A depressão situa-se entre a troca de perfis. . . . .	42
4.8	Várias vistas da pá final construída a partir do perfil NACA 2414. . . . .	43
4.9	Várias vistas da pá final construída a partir do perfil NACA 4415. . . . .	43

# Lista de Tabelas

3.1	Exemplo de modelo de testes do perfil NACA 2414 para a velocidade, $U$ (m/s), de 4,29 e para diferentes ângulos de ataque $\alpha$ ( $^\circ$ ), obtendo-se os valores das forças de resistência $F_D$ e de sustentação $F_L$ . . . . .	29
4.1	Torção e corda calculadas seguindo o BEM, para os vários elementos $N$ , com diferentes raios $r$ (m), torções $\alpha$ ( $^\circ$ ) e cordas $c$ (m). . . . .	41

# Nomenclature

BEM Blade Element Method

C-D Convergente-Divergente

UWT Urban Wind Turbines

OMRF Oklahoma Medical Research Foundation

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação e Objetivos

Desde sempre, o ser humano procura ter uma melhor qualidade de vida, fazendo com que o espaço circundante seja confortável para cada situação em questão. Para que isto possa acontecer, torna-se necessário, de uma forma proporcional, o aumento do consumo de combustíveis, de modo a obter o tipo de energia necessário. Os combustíveis fósseis possuem um papel importante na obtenção desta energia, mas sendo, contudo, finitos a uma escala temporal pequena demais para que possam ser consumidos sem restrições.

As energias renováveis tornaram-se, há algum tempo, uma forma de contrabalançar esta finitude. A energia eólica desempenha um papel importante neste grupo, tendo a sua presença na produção de energia elétrica aumentado nos últimos anos.

As áreas urbanas são pontos de alto consumo de energia. No sentido de se poder tirar vantagem do potencial cinético presente nestas áreas, surgiram as UWT (*Urban Wind Turbines*), aproximando os mecanismos de produção de energia elétrica ao consumidor, tornando a produção descentralizada e reduzindo as perdas de transmissão. Contudo, por muitas vantagens que este tipo de turbinas possam ter, continuam a ter um custo muito elevado para alguns consumidores.

O objetivo principal deste trabalho é estudar os coeficientes e forças de uma pá de uma turbina, passando por uma escolha de novos perfis aerodinâmicos até à impressão e testes num túnel aerodinâmico de modelos à escala. Estas pás serão utilizadas na transformação de uma turbina já existente, um protótipo *Enhanced WT*, que possui a principal característica de ter o rotor inserido num modelo encapsulado, denominado por C-D (Convergente-Divergente).

## 1.2 Estado da Arte

A energia cinética presente no vento é aproveitada há muitos anos pelo homem para bombagem de água, moagem de grãos, navegação marítima, entre outros (Hansen (2008)). Há várias especulações quanto à origem dos moinhos. Alguns autores afirmam que foram encontrados restos de moinhos no Egito, porém sem nenhuma prova conclusiva. A primeira informação viável quanto à origem dos mesmos data do ano de 644 a.c. (Hau (2000)), perto da fronteira Persa-Afegã. Os moinhos de eixo vertical foram provavelmente inventados na Europa e, de acordo com a primeira informação viável, tiveram origem na Normandia, no ano de 1180. No século XVII, começaram a aparecer, na Europa, moinhos em que as pás dos mesmos eram feitas de velas, de forma a melhorar a sua eficiência (Borges & Ribeiro (2009)). O papel do vento como uma das maiores fontes energéticas existentes tomou uma das primeiras posições no ranking global do século XX. Contudo, devido ao aparecimento de outras tecnologias de conversão de combustíveis fósseis, no ano de 1950 o uso da energia cinética pareceu ser esquecida. Foi no ano de 1960 que emergiram as primeiras indicações de uma reviravolta, e nos anos 90 a indústria do vento reemergiu, sendo esta época também marcada pela construção de turbinas maiores, tanto em tamanho como em potência, e do desenvolvimento *offshore*.

Começaram a surgir novas ideias para o aproveitamento deste tipo de energia, ideias estas que se demonstraram viáveis tanto a nível económico como a nível de produção, tais como abordar as áreas urbanas, pois devido ao enorme tamanho das turbinas e ao fraco potencial do vento existentes nas mesmas, nunca foram abordadas devidamente. Porém, após alguns estudos, foi comprovado que estas áreas possuem um certo potencial, criado pelos edifícios envolventes, que fazem com que o vento seja muitas vezes canalizado através deles de uma forma que não era expectável. Comprovado o potencial, começaram a ser projetadas turbinas de tamanho mais reduzido, capazes de captar este potencial referido, como também os próprios edifícios começaram a ser projetados de forma a aumentarem a velocidade do vento que passa através deles ou até a canalizar o mesmo de forma a que seja aproveitado através de turbinas colocadas no topo destes edifícios. O edifício pertencente à *Oklahoma Medical Research Foundation* (OMRF) é um exemplo deste tipo de aproveitamento. Este foi construído para aumentar a velocidade do vento que nele embate para o dobro, tendo instaladas, no topo do edifício, 18 turbinas verticais de rotor tipo Savonius, produzindo anualmente aproximadamente 85.500 kWh (Venger (2015)). Exemplos deste tipo de instalação são apresentados nas Figuras 1.1 e 1.2.



Figura 1.1: Algumas das 18 turbinas eólicas verticais V2 (rotor tipo Savonius) omnidirecionais com cerca de 5,6 m de altura (Venger (2015)).



Figura 1.2: Edifício da OMRF onde se podem visualizar, no topo, as turbinas instaladas (Venger (2015)).

Apesar de este tipo de construções ser ótima em termos de aproveitamento do potencial cinético presente no vento, as construções já existentes estão desprovidas da arqui-

tetura necessária para tal e, aquando da construção, é necessário um grande empreendimento de todas as partes relacionadas com a construção propriamente dita. Posto isto, foram criados dispositivos para ajudar ao desempenho das turbinas, sendo estas, como já referido, de porte menor e sujeitas a ventos mais fracos e mais turbulentos. F.Bet & Grassmann (2002) testaram um dispositivo deste género, realizando várias simulações numéricas, sendo que os resultados obtidos mostraram-se promissores: um aumento em 100% da potência da turbina. O dispositivo usado tem o nome de difusor. O mesmo envolve a turbina, sendo que a área da secção reta do difusor aumenta. A Figura 1.3 apresenta os três tipos de concentradores existentes.



Figura 1.3: Vários tipos de sistemas de concentração de vento (adaptado de Paulo (2013)).

Wang et al. (2008) realizaram também simulações com este tipo de solução, sendo que o dispositivo testado era do tipo C-D, tendo obtido resultado de igual forma promissores: um aumento em 50% da velocidade do vento e em 125% da energia extraída. Este trabalho irá ter como base o trabalho de Paulo (2013), onde o mesmo construiu um modelo de turbina horizontal com 6 pás, com um difusor tipo C-D instalado de modo a aumentar a velocidade do vento recebido pela turbina como também a eficiência da mesma. A imagem que se segue demonstra o trabalho final do autor intitulado projeto *Enhanced WT*, com a colaboração de outros colegas que também contribuíram para realização do mesmo, estando a turbina já instalada e a produzir. Está apresentada a Figura 1.4 onde se pode visualizar um protótipo de teste instalado.



Figura 1.4: Protótipo *Enhanced WT* testado a 12 metros de altura, num ambiente livre de construções (Maia (2014)).

Um dos principais objetivos desta tecnologia passa por tornar este tipo de turbinas mais apelativas, em termos económicos, para os diversos consumidores, visto ser um sistema onde a produção de energia elétrica passa a ser descentralizada, sendo dada a possibilidade de se tornarem mais independentes em termos energéticos. Porém, alguns consumidores continuam a não ter recursos financeiros suficientes para poderem adquirir uma turbina deste tipo.

Posto isto, e tendo como base o trabalho com papel de Shigeru Ban, surgiu a ideia de construir a turbina acima referida em materiais sustentáveis, para ser mais apelativa em termos monetários e ambientais. O trabalho de Shigeru Ban é mundialmente conhecido. Apenas com tubos de cartão, o arquiteto japonês já projetou centenas de estruturas por todo o mundo, sendo que algumas possuem o propósito de ajuda humanitária. Um dos projetos mais emblemáticos do autor é a catedral de *CardBoard*, na Nova Zelândia, construída em 2013. Após a catedral ter sido vítima de uma derrocada, Shigeru Ban ergueu a mesma novamente usando como principal material de construção tubos de cartão, sendo os mesmos produzidos através de reciclagem de papel, e tornando a catedral num monumento único e forte estruturalmente. Como se pode visualizar na Figura 1.5, mesmo as cadeiras da catedral são constituídas de cartão.



Figura 1.5: Catedral Cardboard, na Nova Zelândia. Um dos muitos projetos criados por Shigeru Ban (Ban (2015)).

### 1.3 Estrutura da Tese

Esta dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos. No Capítulo 1, Introdução, são apresentados os principais objetivos para este projeto assim como o estado de arte relativamente ao tema. O Capítulo 2, Conceitos Teóricos, apresenta a teoria abordada na execução de todo o trabalho, incluindo o BEM. O conteúdo prático está apresentado no Capítulo 3, Ensaios e Técnicas Experimentais, onde são expostos todos os cálculos e técnicas abordadas de modo a alcançar o objetivo pretendido, assim como alguns dos resultados obtidos. No Capítulo 4 estão apresentados os resultados finais como também uma discussão sobre os mesmos, estando intitulado Discussão dos Resultados. As conclusões deste trabalho estão apresentadas no último capítulo, sendo este o Capítulo 5, Conclusões, como também alguns dos possíveis trabalhos futuros relacionados com o tema.



# Capítulo 2

## Conceitos Teóricos

### 2.1 Limite de *Betz*

De uma forma muito simples, o limite de Betz afirma que apenas podem ser extraídos 59,3% da energia cinética presente num fluxo de ar que passa por uma zona tubular e que contém a mesma secção transversal relativamente ao rotor ou qualquer outro tipo de gerador de energia elétrica (Okulov & van Kuik (2012)).

Esta teoria, atribuída a Albert Betz, pode ser demonstrada analiticamente e ocorre quando a velocidade do fluido através do rotor toma valores iguais a  $2/3$  da velocidade do fluxo livre. Convertendo este valor para a eficiência correspondente, obtém-se o valor de  $16/27$ , o máximo teórico (Bergey (1979)).

Para se poder obter 100% de eficiência era necessário bloquear por completo o fluxo a jusante do rotor, o que é impossível. Esta afirmação foi estabelecida pela teoria do disco atuador, tendo em conta as leis de conservação do fluxo. Esta mesma teoria afirma que qualquer dispositivo é substituído por um disco permeável com uma carga distribuída (Okulov & van Kuik (2012)).

Este limite, base da aerodinâmica da energia eólica, é inúmeras vezes apontado como o ciclo de Carnot da energia eólica, pois o valor não depende do tipo de transformador de energia.

### 2.2 Perfis Aerodinâmicos

Os perfis aerodinâmicos são a base da construção das pás. Existem inúmeros tipos de perfis disponíveis, como também é possível criar o próprio perfil através de vários cálculos matemáticos, que não serão apresentados neste trabalho.

Estes mesmos perfis possuem várias características, sendo as mais importantes a corda, o bordo de ataque, o bordo de fuga, a curvatura superior e inferior e o ângulo de ataque, que podem ser visualizadas na Figura 2.1.

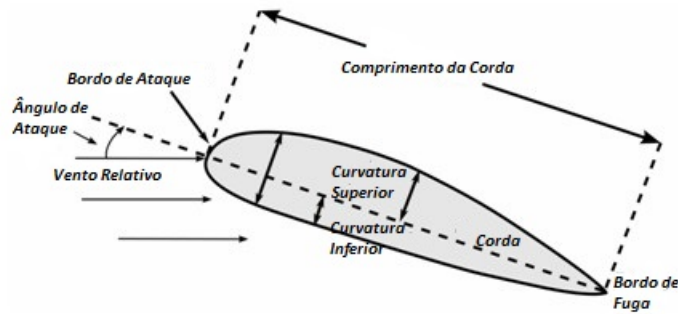


Figura 2.1: Características dos perfis aerodinâmicos (adaptado de Houghton & Carpenter (2005)).

A força de sustentação é uma força que atua na pá perpendicularmente à direção do fluxo de ar. Já a força de resistência toma a mesma direção e sentido relativamente ao mesmo fluxo de ar.

A fórmula que se segue, derivada da equação de Rayleigh (Houghton & Carpenter (2005)), é muitas vezes usada na aerodinâmica para cálculos de forças.

$$C_F = \frac{F}{\rho \times U^2 \times D^2} \quad (2.1)$$

sendo  $F$  a força aerodinâmica em  $N$ ,  $\rho$  a massa específica do ar em  $kg/m^3$ ,  $U$  a velocidade do fluxo em  $m/s$  e  $D$  a área do objeto de estudo em  $m^2$ .

Porém, não é normal, no campo da aerodinâmica, usar esta equação desta forma, tendo sido feitas algumas alterações. Se o fluido em questão for incompressível, a expressão  $\rho U^2$  é substituída pela que descreve a pressão dinâmica do mesmo fluido,  $\frac{1}{2}\rho U^2$ . Também se torna conveniente substituir a área  $D^2$  por uma área  $S$ , sendo que esta pode representar a área física real, tal como a forma da asa. Posto isto, a resultante destas modificações é uma equação que permite obter o coeficiente de força aerodinâmica, sendo o mesmo adimensional.

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2} \times \rho \times U^2 \times S} \quad (2.2)$$

A partir desta equação, é possível calcular os coeficientes de sustentação e resistência, pelas seguintes fórmulas.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \times \rho \times U^2 \times S} \quad (2.3)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \times \rho \times U^2 \times S} \quad (2.4)$$

sendo que neste caso  $F_L$  e  $F_D$  são, respetivamente, a força de sustentação e a força de resistência medidas na pá, enquanto que  $S$  é dado pelo produto da corda e a altura da pá (Álvaro Henrique Rodrigues (1991)).

Aquando da realização dos cálculos para determinar estes coeficientes, a impressão geral que se obtém é de que estes tomam valores unitários. Porém, devido a estudos e desenvolvimentos recentes na área, mais especificamente no que toca às pás, os resultados podem chegar aos 10 ou mais valores (Houghton & Carpenter (2005)).

### 2.3 Blade Element Momentum Method (BEM)

O BEM pode ser definido como a junção de duas teorias: a teoria do momento, que faz uma análise de volume de controlo para estudar as forças na pá com base na quantidade de movimento linear e angular; e a teoria dos elementos de pá, que faz a análise a um determinado segmento da pá em estudo.

Nesta teoria, aspetos como número de pás, ângulo de ataque ou as várias cordas existentes na pá, são excluídas. Porém, estes aspetos serão considerados, como se vai verificar mais à frente neste mesmo capítulo. O BEM adiciona à teoria da quantidade de movimento os acontecimentos locais localizados na pá. É normalmente introduzido o fator de perda de Prandtl (Hansen (2008)), que adiciona um fator relativo ao número de pás, para que seja possível executar os cálculos sem considerar um número infinito de pás. Para melhor poder explicar esta teoria, é introduzido um tubo representando um determinado caudal sendo descrito como tendo  $N$  elementos de altura  $dr$ , como se pode verificar na Figura 2.2.

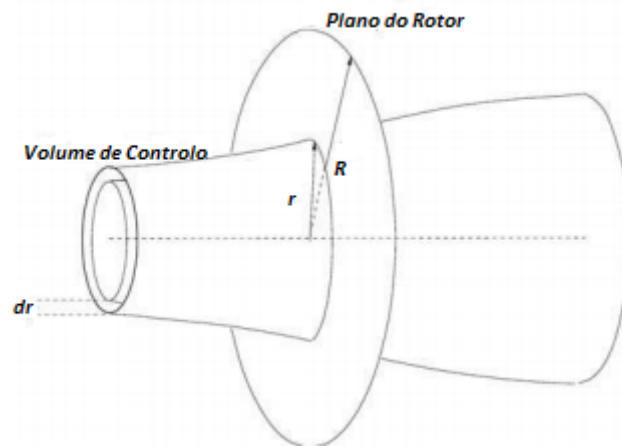


Figura 2.2: Volume de controle modificado para a forma de um elemento anular  $dr$ , para ser usado no modelo BEM (adaptado de Hansen (2008)).

Com esta teoria é possível calcular as cargas estacionárias assim como potência para vários valores de velocidade de vento e ângulos de ataque. Para se poderem realizar estes cálculos, é necessário dividir a pá em  $N$  elementos de comprimento  $dr$ , como se pode verificar na Figura 2.3. Esta teoria afirma que não existem diferenças entre as várias secções da pá, ou seja, não existe fluxo entre os vários elementos (Hansen (2008)).

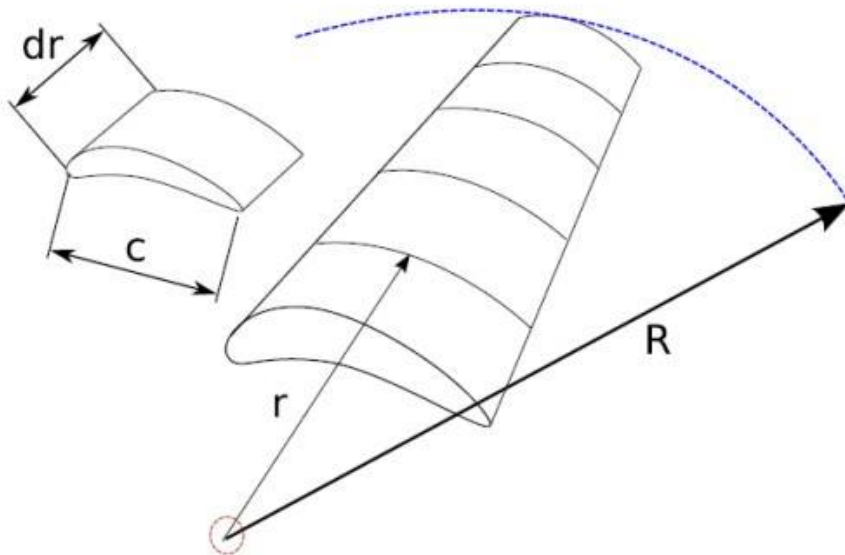


Figura 2.3: Divisão da pá aerodinâmica em  $N$  elementos com comprimento  $dr$  (Kulunk (2011)).

Nesta mesma teoria são assumidos dois pontos importantes:

- Não existe qualquer dependência radial, ou seja, o que acontece num dos elementos da pá não é sentido nos restantes elementos da mesma.

- As forças a que a pá é sujeita (sustentação e resistência) são constantes em cada elemento designado.

Existem várias equações relativas a este método que é necessário resolver. Segundo Hansen (2008), para conseguir extrair os resultados pretendidos com o BEM, é necessário ter em conta duas equações: a equação relativa ao impulso do disco atuador no volume de controlo acima descrito e a quantidade de movimento em cada elemento anular. As equações estão descritas de seguida, respetivamente:

$$dT = 4 \times \pi \times r \times \rho \times U_0^2 \times a \times (1 - a) dr \quad (2.5)$$

$$dM = 4 \times \pi \times r^3 \times \rho \times U_0 \times \omega \times a \times (1 - a) dr \quad (2.6)$$

sendo  $r$  o raio do disco atuador em  $m$ ,  $a$  o fator de indução axial e  $\omega$  a velocidade angular em *radianos*.

O passo (*pitch*) local da pá,  $\theta$ , é o ângulo entre a corda da pá e o plano de rotação, sendo dado pela soma entre o ângulo do passo  $\theta_p$  e a torção da pá,  $\beta$ . Já o ângulo  $\varphi$  pode ser descrito como a diferença angular entre o plano de rotação e a direção tomada pela  $U_{rel}$ . Posto isto, conclui-se que  $\alpha$ , o ângulo de ataque, é dado por:

$$\alpha = \varphi - \theta \quad (2.7)$$

Se os coeficientes de sustentação e resistência forem conhecidos, os valores de sustentação e resistência por unidade de comprimento podem ser adquiridos através das seguintes equações:

$$L = \frac{1}{2} \times \rho \times U_{rel}^2 \times c \times C_L \quad (2.8)$$

$$D = \frac{1}{2} \times \rho \times U_{rel}^2 \times c \times C_D \quad (2.9)$$

sendo  $c$  a corda em  $m$ .

Porém, o que é importante obter são as forças normal e tangencial ao plano do rotor, sendo que se torna necessário projetar as forças de resistência e sustentação nestas mesmas direções, como se pode verificar na Figura 2.4.

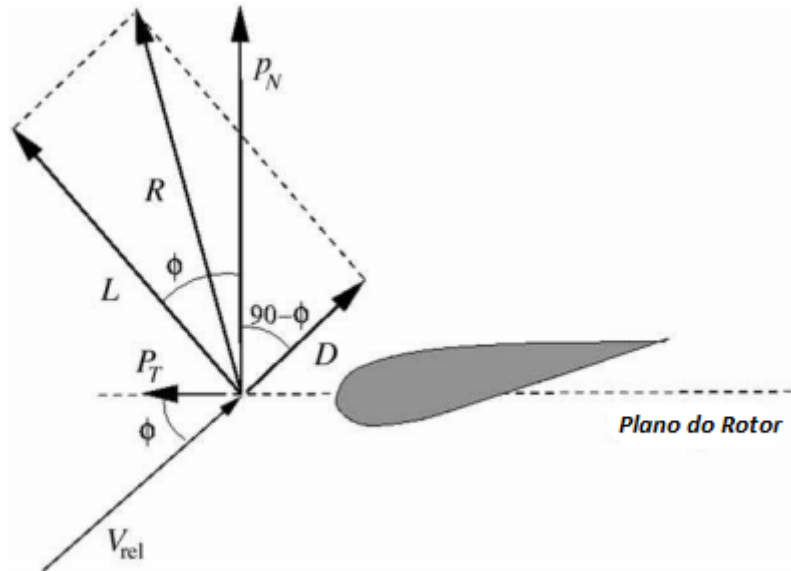


Figura 2.4: Representação das forças normal e tangencial ao plano do rotor, sendo R a soma entre as forças L e D (adaptado de Hansen (2008)).

Estas duas forças, normal e tangencial, são dadas pelas seguintes equações, respectivamente:

$$p_N = L \cos \phi + D \sin \phi \quad (2.10)$$

$$p_T = L \sin \phi - D \cos \phi \quad (2.11)$$

Normalizando as equações e sabendo que:

$$C_N = \frac{p_N}{\frac{1}{2} \times \rho \times U_{rel}^2 \times c} \quad (2.12)$$

$$C_T = \frac{p_T}{\frac{1}{2} \times \rho \times U_{rel}^2 \times c} \quad (2.13)$$

Obtém-se as seguintes equações normalizadas:

$$C_N = C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi \quad (2.14)$$

$$C_T = C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi \quad (2.15)$$

Como  $p_N$  e  $p_T$  são forças por comprimento, as equações do impulso do disco e do binário do rotor são descritas pelas seguintes equações:

$$dT = B \times p_N dr \quad (2.16)$$

$$dM = r \times B \times p_T dr \quad (2.17)$$

Onde  $B$  representa o número de pás associadas ao aerogerador e  $r$  a posição radial do volume de controlo. Substituindo nestas mesmas equações os fatores conhecidos e demonstrados anteriormente, surgem as seguintes equações:

$$dT = \frac{1}{2} \times \rho \times B \times \frac{U_0^2 \times (1-a)^2}{\sin^2 \varphi} \times c \times C_N dr \quad (2.18)$$

$$dM = \frac{1}{2} \times \rho \times B \times \frac{U_0 \times (1-a) \times \omega \times r \times (1+a)'}{\sin \varphi \times \cos \varphi} \times c \times C_T \times r dr \quad (2.19)$$

O objetivo de todas estas deduções passa por encontrar o fator de indução axial  $a$ , e a sua derivada  $a'$ . Este fator axial pode ser descrito como o declive da reta formada pela variação típica do coeficiente de sustentação com o ângulo de ataque, sendo que este mesmo declive não é afetado pelo número de Reynolds.

$$a = \frac{1}{\frac{4 \times \sin^2 \varphi}{\sigma \times C_N} + 1} \quad (2.20)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \times \sin \varphi \times \cos \varphi}{\sigma \times C_T} - 1} \quad (2.21)$$

Onde  $\sigma$  representa a fração da área anular no volume de controlo que é preenchido pelas pás e é dado por:

$$\sigma(r) = \frac{c(r) \times B}{2 \times \pi \times r} \quad (2.22)$$

Uma vez que foram demonstradas todas as equações necessárias para o BEM, torna-se agora necessário apresentar os passos para se poder obter os valores das cargas estacionárias, do impulso e potência para vários valores de velocidade.

Porém, devido ao facto de que, para este projeto, não se pretende obter estes valores mas sim a corda e torção ideal para cada segmento de pá, torna-se necessário introduzir algumas alterações neste método que, segundo Hansen (2008), podem ser introduzidas sem qualquer tipo de implicações. Posto isto, seguem-se os passos necessários para se poder calcular a torção e corda para cada segmento da pá.

1. Dividir a pá em  $N$  elementos.
2. Calcular  $\Omega$  (velocidade angular),  $\lambda_r$  (variação da velocidade de ponta relativamente ao raio do segmento  $r$ ) e  $\omega_r$  (velocidade rotacional), que são dados pelas seguintes equações:

$$\Omega = \frac{30 \times \lambda \times V_0}{\pi \times r} \quad (2.23)$$

$$\lambda_r = \frac{\Omega \times \pi \times r}{30 \times V_0} \quad (2.24)$$

$$\omega_r = \frac{\lambda V_0}{r} \quad (2.25)$$

sendo  $V_0$  a velocidade da fluxo de ar em  $m/s$ ,  $r$  o raio do segmento em estudo em  $m$  e  $\lambda$  a variação da velocidade de ponta.

3. Assumir que para a primeira iteração,  $a$  e  $a'$  são nulos.
4. Calcular  $\beta$  e  $\varphi$ .  $\varphi$  é dado pela Equação 2.7 acima demonstrada e  $\beta$  (torção do segmento da pá), para a primeira iteração, é dado por:

$$\beta = 90 - \frac{2}{3} \times \tan^{-1} \times \frac{1}{\lambda_r} \quad (2.26)$$

5. Após obter estes valores, é necessário encontrar o valor de  $C_L$  característico. Para isso, utilizando os dados fornecidos sobre o perfil acerca do seu comportamento, mais especificamente valores de  $C_L$  e  $\varphi$ , executa-se uma regressão linear com base no valor de  $\varphi$  calculado de modo a encontrar o valor de  $C_L$  correspondente.

6. Após ter sido encontrado o valor, é necessário calcular  $a$  e  $a'$ . Estes novos valores são dados pelas fórmulas:

$$a = \left(1 + \frac{4 \times \cos\beta \times \cos\beta}{\sigma \times C_L \times \sin\beta}\right)^{-1} \quad (2.27)$$

$$a' = \frac{1 - 3 \times a}{4 \times a - 1} \quad (2.28)$$

7. Para a segunda iteração, utilizam-se equações diferentes para  $\beta$  e  $a$ , sendo que estas serão usadas para as restantes iterações. O novos valores de  $\beta$  e  $a'$  são calculados pelas seguintes fórmulas, utilizando os valores de  $a$  e  $a'$  resultantes do passo anterior:

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{\lambda_r \times (1 + a')}{1 - a}\right) \quad (2.29)$$

$$a' = \frac{\sigma \times C_L}{4 \times \lambda_r \times \cos\beta} \times (1 - a) \quad (2.30)$$

8. Após se terem obtido estes valores, deve ser calculado o delta  $a$ , e se o mesmo for bastante próximo de 0, serão os valores obtidos nessa mesma iteração que serão usados para o segmento da pá em estudo. Se for superior a 0 em grande número, deve recomeçar-se uma nova iteração, partindo do passo 5.

Posto isto, devem ser repetidos estes passos para todos os segmentos designados para a pá.

# Capítulo 3

## Ensaaios e Técnicas Experimentais

### 3.1 Cálculos da Potência Espectável

O primeiro passo tomado neste projeto consistiu no cálculo da potência espectável para este caso.

Segundo Hansen (2008), a potência característica de um aerogerador pode ser retirada a partir da seguinte fórmula:

$$P = C_p \times \mu \times \frac{1}{2} \times \rho \times \pi \times R^2 \times U_0^3 \quad (3.1)$$

sendo,

- $C_p$ – Coeficiente de potência;
- $\mu$ – Eficiência mecânica e elétrica expectável, geralmente na ordem dos 90%;
- $\rho$ – Massa específica do ar (kg/m<sup>3</sup>);
- $R$ – Raio da pá (m);
- $U$ – Velocidade média do vento (m/s);

Em primeiro lugar, foi necessário encontrar a velocidade média característica do local onde o aerogerador irá atuar. Para este caso, como o mesmo irá funcionar em países quentes, recolheram-se a partir do motor de pesquisa Windfinder (2014), velocidades médias do vento de três localidades do continente asiático, sendo as mesmas Riyadh (Sri Lanka), Ar Rayyan (Qatar) e Amwaj Inland (Bahrein), sendo as velocidades médias do vento dos mesmos 12 km/h, 15,4 km/h e 19,6 km/h, respetivamente. Posto isto, a velocidade utilizada para os cálculos toma o valor médio de 15,6 km/h. Devido à presença do C-D, que aumenta a velocidade do fluxo de ar que passa pelas pás, o mesmo valor da

velocidade deve ser aumentado entre 1 a 2 m/s, sendo que neste caso optou-se por escolher o valor máximo. Para que os cálculos sejam o mais corretos possível, é necessário também considerar a hipótese de rajadas de vento de velocidade superior à estipulada, e sendo assim será adicionado 1 m/s à velocidade média que será utilizada, sendo a mesma de 26,4 km/h, cerca de 7,33 m/s.

De seguida, foi necessário encontrar o coeficiente de potência ( $C_p$ ). Na Figura 3.1 estão relacionados os coeficientes de potência ( $C_p$ ) em relação a várias velocidades de ponta ( $\lambda$ ), considerando vários tipos de turbinas.

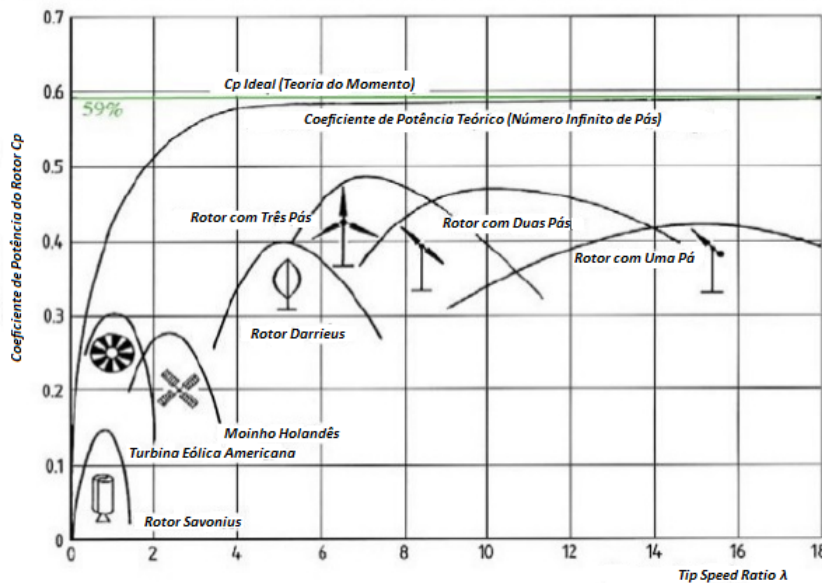


Figura 3.1: Coeficiente de potência ( $C_p$ ) em relação a vários *tip speed ratio* ( $\lambda$ ), considerando vários tipos de turbinas eólicas (adaptado de Hau (2000)).

Como a turbina estará sujeita a ventos fracos, foi considerado que a mesma terá 4 pás. Sendo assim, foi admitido um  $C_p$  de 0,25, valor médio adotado neste tipo de situações.

Para o cálculo da massa específica do ar ( $\rho$ ), recorreu-se às tabelas termodinâmicas como auxílio para a realização dos cálculos. Este valor pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$\rho = \frac{P}{R \times T} \quad (3.2)$$

sendo,

- $P$ – Pressão absoluta (Pa).
- $R$ – Constante específica dos gases (para o ar, considera-se o valor de 287,058 J/kg.K).

- $T$  – Temperatura absoluta (K).

Sendo que os valores utilizados para a pressão e para a temperatura foram retirados, como as velocidades do vento, do motor de busca Windfinder (2014) e tomam os valores de, respetivamente, 95000 Pa e 293,15 K, obtém-se o seguinte resultado:

$$\rho = \frac{95000}{287,06 \times 293,15} = 1,1289 \text{ kg/m}^3 \quad (3.3)$$

Por último, foi considerado um raio de pá de cerca de 1 m.

Sendo assim, a potência espectável para a turbina seria:

$$P = 0,25 \times 0,9 \times \frac{1}{2} \times 1,1289 \times \pi \times 1^2 \times 7,33^3 = 157 \text{ W} \quad (3.4)$$

## 3.2 Pás Aerodinâmicas - Construção e Testes no Túnel Aerodinâmico

Para escolher o tipo de perfil mais adequado para esta situação, optou-se por se realizar alguns testes práticos no túnel aerodinâmico presente na Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança, a fim de verificar de uma forma mais prática e correta o desempenho de cada perfil estudado. Os vários testes realizados foram executados no túnel aerodinâmico subsónico da marca *Armfield*, modelo C2, apresentado na Figura 3.2.



Figura 3.2: Túnel aerodinâmico subsônico da *Armfield*, modelo C2.

Este mesmo túnel contém uma secção de ensaio, sendo a mesma constituída por material transparente de modo a que o utilizador possa visualizar a pá durante todo o processo, como se pode ver na figura anterior, e um ventilador de extração, que fornece mais estabilidade em relação aos outros tipos de ventiladores, pois é colocado mais afastado da secção de trabalho e não necessita de uma câmara de tranquilização, câmara esta usada aquando da presença de ventiladores que provocam alterações no fluxo de ar, nomeadamente oscilações que nestes casos devem ser sempre evitadas. Com este mesmo túnel é possível retirar os valores de sustentação e resistência através de duas balanças analíticas, como é possível visualizar na Figura 3.3.

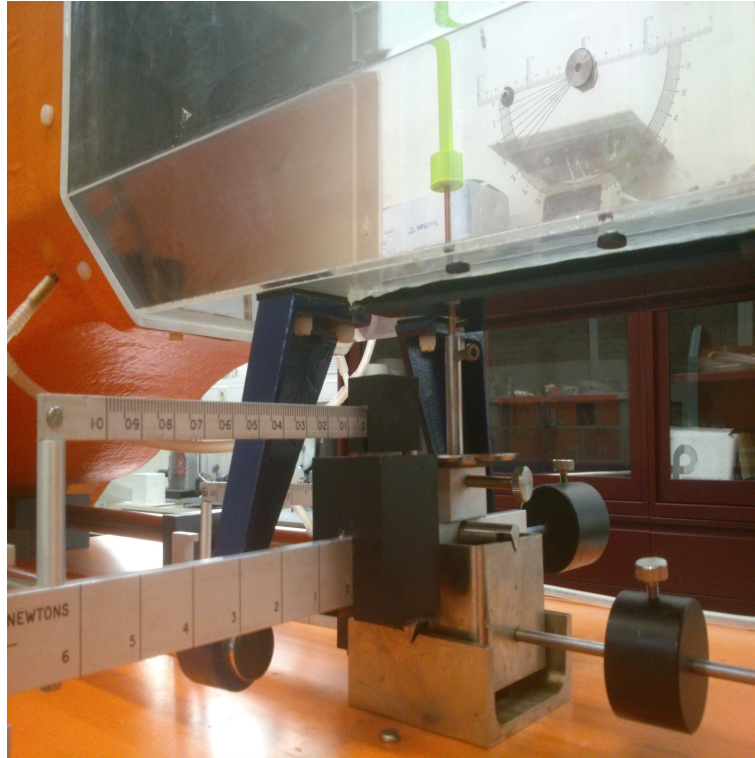


Figura 3.3: Balanças analíticas utilizadas para retirar os valores resultantes das medições. A balança vertical ao túnel mede a força de sustentação exercida na pá, enquanto que a que se encontra horizontalmente mostra os valores de resistência a que a mesma está sujeita.

Este túnel aerodinâmico permite ao utilizador recriar várias velocidades de vento, sendo que o mesmo, porém, trabalha através de frequência. Através de calibrações internas, a razão de transformação seria dada pela seguinte fórmula:

$$U_{\infty} = 0,469 \times F + 0,28 \quad (3.5)$$

sendo  $U_{\infty}$  a velocidade em m/s e  $F$  a frequência em Hz. Porém, esta razão não corresponde à realidade, sendo que na prática não mostra ser correta. Para contornar este problema, Paulo (2013), através de testes de calibração, construiu um gráfico que relaciona a frequência de trabalho escolhida com a velocidade correspondente. Posto isto, concluiu-se que a razão da conversão seria de  $1 \text{ Hz} = 0,429 \text{ m/s}$ . O mesmo gráfico está apresentado na Figura 3.4.

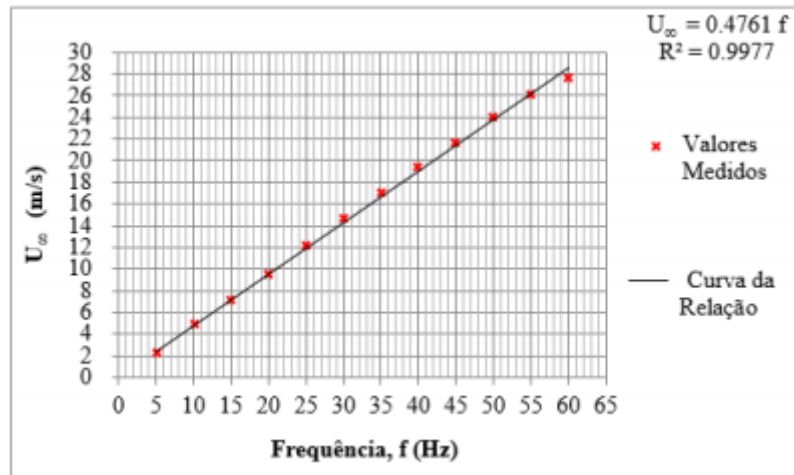


Figura 3.4: Gráfico da calibração do túnel de vento (Paulo (2013)).

O passo seguinte consistiu na construção das pás para se realizarem os testes no túnel aerodinâmico acima mencionado.

A maior parte dos perfis escolhidos foram retirados da ferramenta *online Airfoil Tools*, que possui uma vasta gama de perfis, assim como vários dados sobre os mesmos, tais como valores de  $C_L$  e  $C_D$  para vários números de Reynolds em função do ângulo de ataque  $\alpha$ . Para a construção das pás é necessário ter em conta alguns aspetos. Devido às dimensões da secção de trabalho do túnel aerodinâmico, é impossível realizar os testes com um protótipo à escala real. Segundo Oliveira & Lopes (2012), torna-se necessário encontrar um fator de escala para contornar este problema. Sendo assim, o fator de escala é dado pela seguinte expressão:

$$L_r = \frac{L_p}{L_m} \quad (3.6)$$

sendo  $L_p$  o tamanho do protótipo e  $L_m$  o tamanho do modelo com que se executarão os testes. Assim sendo, torna-se necessário averiguar as dimensões máximas que a pá poderá ter para que se possa trabalhar com a mesma sem qualquer tipo de restrição. As dimensões da área de trabalho do túnel aerodinâmico são 30,6 x 30,4 x 45,7 cm. As pás foram impressas na impressora *3D Cube*, que usa plástico como material para realizar as impressões (a impressora está apresentada na Figura 3.5). As dimensões da área de trabalho da mesma são de 15 x 15 x 15 cm.

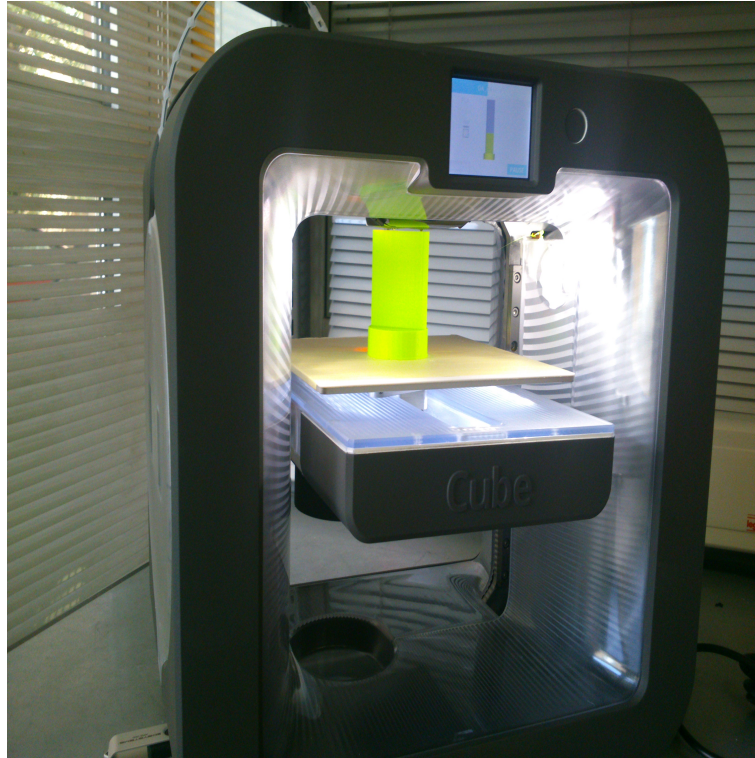


Figura 3.5: Impressora 3D *Cube* durante a impressão de uma das pás.

Posto isto, torna-se necessário calcular o fator de escala utilizando as medidas relativas à impressora 3D, visto serem menores em comparação com as do túnel aerodinâmico. Para que as pás tenham o melhor desempenho possível e para que se possa colocar as mesmas na zona de trabalho do túnel de vento, é necessário fazer acompanhar da mesma uma base sólida com cerca de 1,5 cm de altura e diâmetro igual ao comprimento da corda da pá em questão, base esta que irá conter um orifício onde se colocará um suporte metálico com 11 cm de comprimento e 0,4 cm de diâmetro, tendo o mesmo a função de unir a pá a ambas as balanças. Sendo assim, a pá apenas pode ter 13 cm de altura, deixando-se uma pequena margem para evitar erros de impressão. O fator de escala, portanto, será:

$$L_r = \frac{100 \text{ cm}}{13 \text{ cm}} = 7,69 \quad (3.7)$$

Como foi descrito no capítulo 2, segundo o BEM, não existem quaisquer diferenças entre os vários elementos da pá. Esta característica torna-se bastante útil aquando da realização dos testes no túnel aerodinâmico, visto que apenas é necessário construir um destes mesmos elementos, sem qualquer torção.

Após várias discussões com o grupo de trabalho relacionado com este projeto, concluiu-se que para a construção em tamanho real das pás seriam mais apropriados perfis aerodinâmicos o mais finos possível, ou seja, os perfis que tomassem os menores valores para

as linhas de curvatura superior e inferior. Estando reunidas todas estas informações, o próximo passo tomado foi a escolha dos perfis a testar.

Numa primeira instância foram escolhidos quatro perfis, sendo os mesmos o perfil NACA 6409 9%, Naca 63-206, Naca 2408 e AG09, que podem ser visualizados nas seguintes figuras:

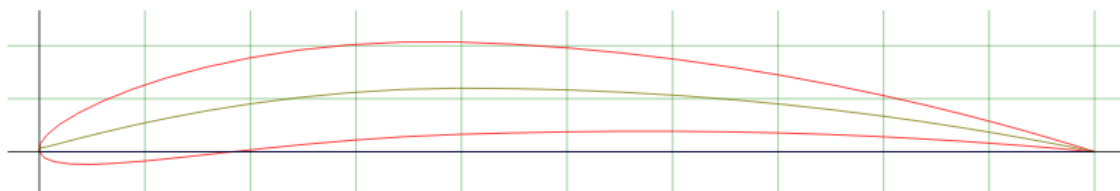


Figura 3.6: Perfil NACA 6409 9% (AirfoilTools (2015)).

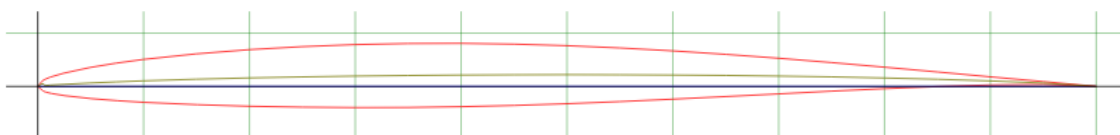


Figura 3.7: Perfil NACA 63-206 (AirfoilTools (2015)).

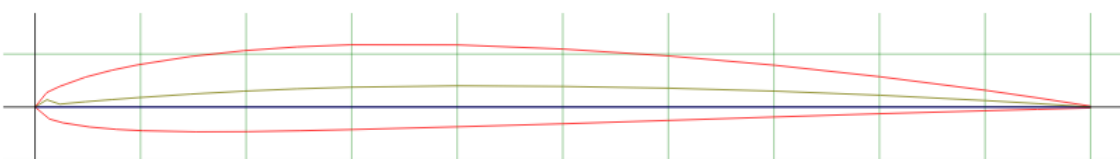


Figura 3.8: Perfil NACA 2408 (AirfoilTools (2015)).

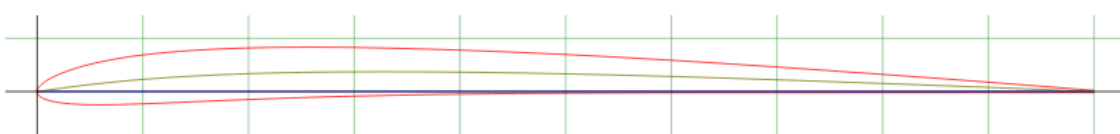


Figura 3.9: Perfil AG09 (Schwartz (1992)).

Posto isto, e sabendo a altura já anteriormente designada para a construção dos protótipos (13 cm), foi necessário atribuir uma corda aos mesmos. Visto que, para a realização dos testes, pode ser atribuído qualquer valor para o tamanho da corda, foi escolhido o valor de 2 cm, aproximadamente.

O *software* escolhido para a construção digital das pás foi o *SolidWorks*, visto que é o mais apropriado para este tipo de situações.

Porém, aquando da impressão das mesmas na impressora 3D anteriormente mencionada, surgiu um problema. Foi impossível imprimir estas pás devido ao facto das restrições presentes na impressora no que toca ao tamanho das peças a imprimir, isto é,

os perfis eram demasiados finos para que a impressora pudesse concluir a impressão de forma correta, restrições estas que eram desconhecidas até ao momento. Apenas um perfil foi impresso, estando o mesmo apresentado na Figura 3.10, onde se pode visualizar os defeitos presentes na impressão.

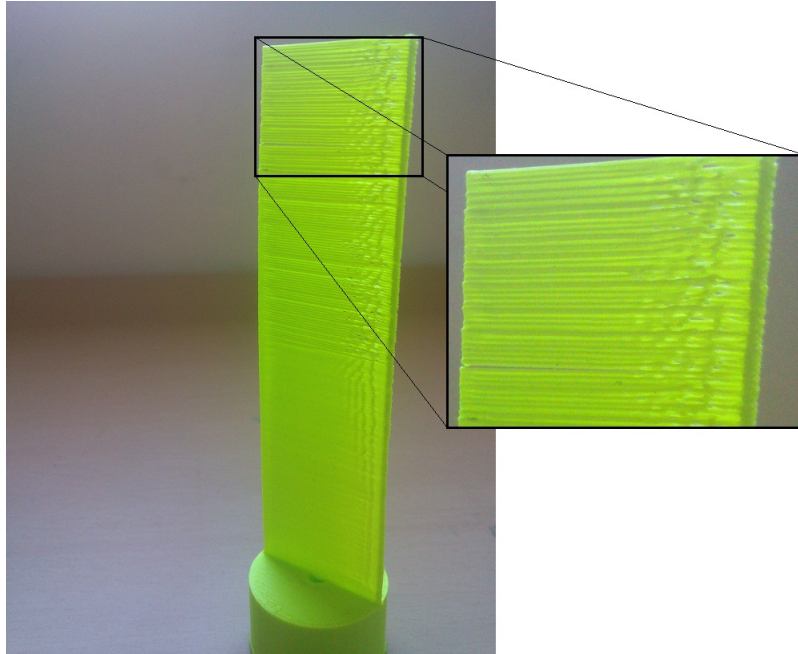


Figura 3.10: Perfil NACA 6409 9% impresso. Os erros de impressão são principalmente visíveis no topo da pá.

Devido a este entrave, foi necessário optar por utilizar perfis com uma espessura maior, de modo a que este erro não fosse novamente cometido.

Sendo assim, dois novos perfis foram escolhidos: os perfis NACA 2414 e NACA 4415. Ambos estão apresentados nas figuras seguintes.

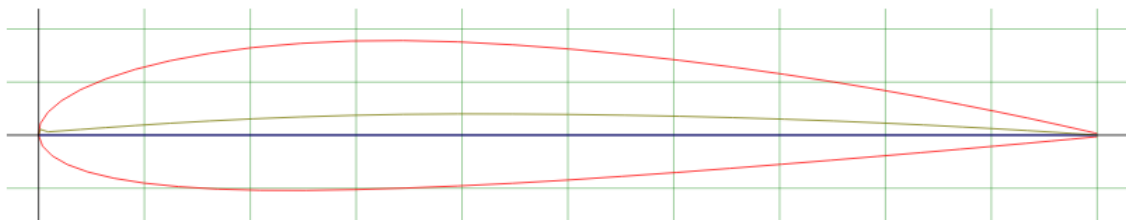


Figura 3.11: Perfil NACA 2414 (AirfoilTools (2015)).

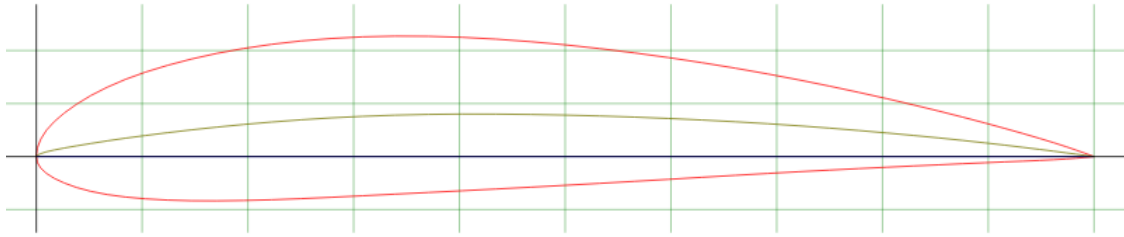


Figura 3.12: Perfil NACA 4415 (AirfoilTools (2015)).

O passo seguinte consiste na construção das pás digitalmente. Foi usado o mesmo *software* que anteriormente e, finalizada a construção, foram obtidos os resultados apresentados nas Figuras 3.13 e 3.14.

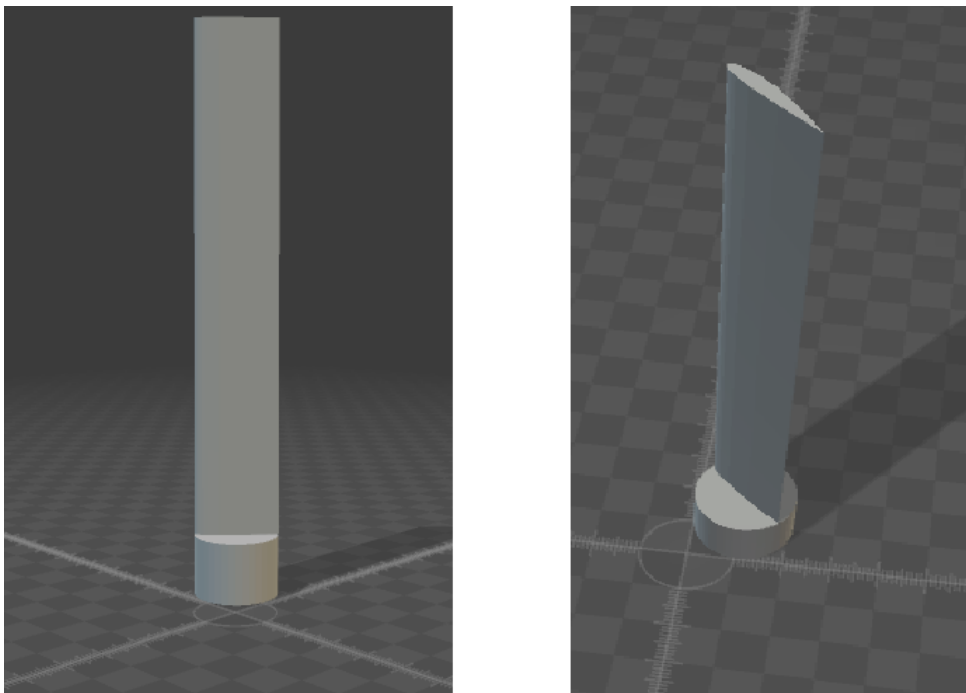


Figura 3.13: Perfil NACA 2414 após a sua construção digital.

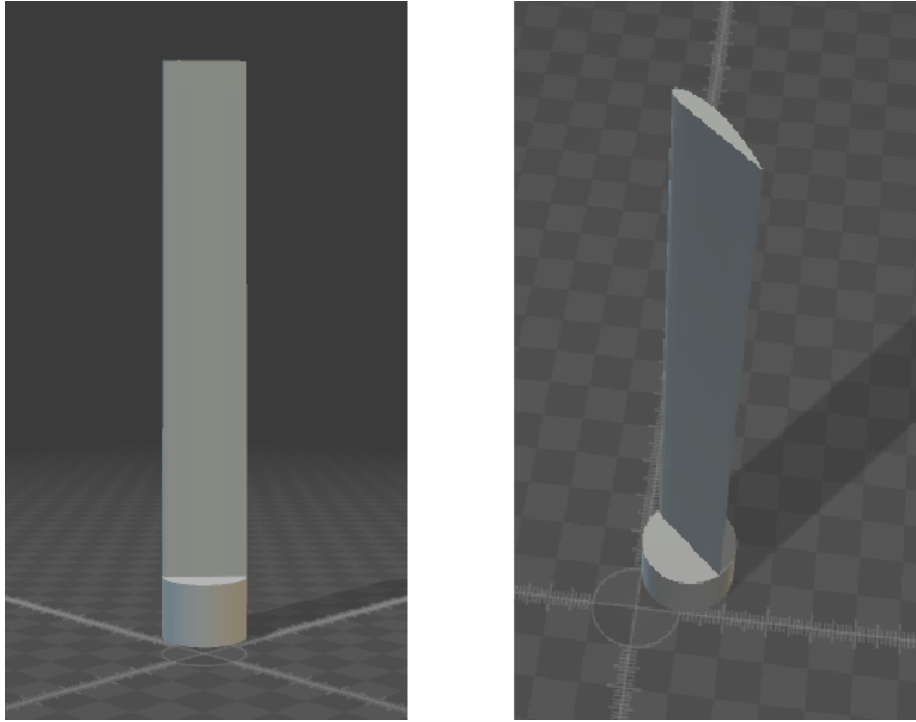


Figura 3.14: Perfil NACA 4415 após a sua construção digital.

De salientar que foram utilizadas as mesmas medidas que anteriormente. Após esta etapa, guardando os ficheiros com a extensão *.stl* de modo a serem compatíveis com a impressora 3D anteriormente mencionada e após a respetiva impressão, foram obtidos os seguintes resultados, apresentados na Figura 3.15.



Figura 3.15: Pás impressas com os perfis NACA 2414 e NACA 4415, respectivamente.

Porém, como os perfis possuem detalhes que tornam algumas das partes da pá muito finas, mais propriamente o bordo de fuga, a impressão surge com alguns erros que devem ser resolvidos manualmente. Para o fazer foi necessário limar o bordo de fuga das duas pás para que a saliência desaparecesse. A Figura 3.16 apresenta as imperfeições referidas e a pá após intervenção.

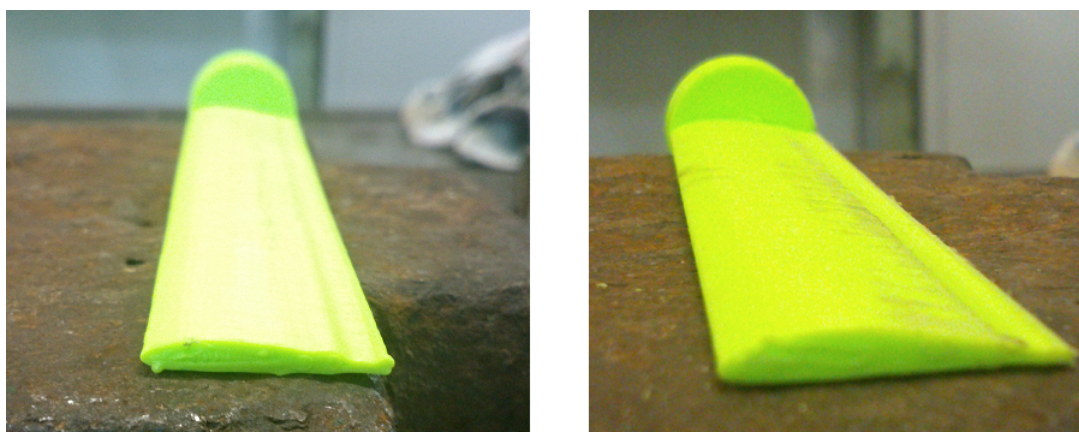


Figura 3.16: Imperfeições presentes após impressão (à esquerda) e sua correção (à direita). Ambos os modelos continham exatamente os mesmos erros.

Após conclusão do acabamento de ambas as pás, o passo seguinte passou por realizar

os testes necessários no túnel de vento.

O objetivo da realização dos testes no túnel aerodinâmico apresentado anteriormente passa pela recolha de dados relativos às forças de sustentação e resistência a que a pá é sujeita, relativamente a vários ângulos de ataque e várias velocidades de vento. Para que estes testes fossem realizados de forma mais rápida e simples foi construído um plano de trabalho, contendo o mesmo várias hipóteses a serem testadas aquando da realização destes mesmos testes. De seguida está apresentado na Tabela 3.1 um exemplo de um dos planos de trabalho, de modo a que melhor se possa compreender o *modus operandi*.

Tabela 3.1: Exemplo de modelo de testes do perfil NACA 2414 para a velocidade,  $U$  (m/s), de 4,29 e para diferentes ângulos de ataque  $\alpha$  ( $^\circ$ ), obtendo-se os valores das forças de resistência  $F_D$  e de sustentação  $F_L$ .

$U$ (m/s)	$\alpha$ ( $^\circ$ )	$F_D$ (N)	$F_L$ (N)
4,29	-20	0,56	-0,90
	-15	0,46	-0,90
	-10	0,36	-0,89
	-5	0,33	-0,30
	0	0,31	0,30
	5	0,31	0,75
	10	0,34	1,10
	15	0,48	0,86
	20	0,54	0,78
	25	0,75	0,82
	30	0,87	0,88

Este plano de ataque consiste em, para uma velocidade de 4,29 (tomando o valor de 10 Hz no inversor do túnel, o menor valor que é possível testar) e para vários ângulos de ataque (variando os mesmos entre  $-20^\circ$  e  $30^\circ$ ), extrair as forças de sustentação e resistência a que cada pá é sujeita em cada situação. Foram utilizadas 8 frequências diferentes, sendo as mesmas 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 e 45 Hz.

Porém, durante a realização dos testes, surgiram dois problemas que possivelmente interferiam com os resultados extraídos. Como a corda escolhida era pequena, as baixas frequências (de 10 a 20 Hz) eram muito difícil extrair os valores relativos às forças a que a pá estava sujeita, uma vez que as balanças presentes não apresentavam praticamente quaisquer mudanças, ou seja, os valores das forças eram baixos demais de modo a serem lidos de uma forma correta. Devido ao fato das pás serem muito finas, apesar dos perfis possuírem uma largura superior relativamente os anteriores, ao executar os testes com a frequência de 30 Hz (aproximadamente 13 m/s), ambas as pás começavam a vibrar, principalmente no topo, prejudicando assim os resultados a partir destas frequências. Esta situação deve-se ao facto da distribuição de pressões ao longo da pá. Quanto maior o ângulo de ataque introduzido, maior será a pressão exercida perto do bordo de ataque. Se a pá não for suficientemente robusta para aguentar esta pressão, começará a vibrar,

prejudicando o seu desempenho. De seguida estão apresentadas algumas figuras onde se pode verificar a distribuição da pressão exercida na pá para vários ângulos de ataque.

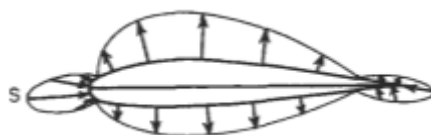


Figura 3.17: Distribuição da pressão para o ângulo de ataque =  $0^\circ$  (Houghton & Carpenter (2005)).



Figura 3.18: Distribuição da pressão para o ângulo de ataque =  $6^\circ$  (Houghton & Carpenter (2005)).

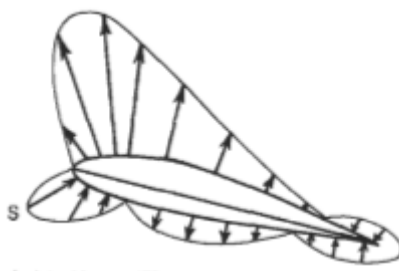


Figura 3.19: Distribuição da pressão para o ângulo de ataque =  $15^\circ$  (Houghton & Carpenter (2005)).

Sendo assim, tornou-se necessário reconstruir as pás para que este problema fosse resolvido. Visto que o tamanho reduzido da corda foi a origem do mesmo, deduziu-se que a corda das novas pás deveria ser aumentada para a dobro, eliminando assim as vibrações presentes a altas frequências no túnel de vento.

Posto isto, o tamanho da corda passou a ser de 4 cm, aproximadamente. Para obter os perfis com esta nova corda, basta inserir o valor pretendido aquando da busca na ferramenta *online AirfoilTools*. Foram tomados todos os passos descritos anteriormente utilizados para a construção das pás anteriores. De seguida estão apresentados nas Figuras 3.20 e 3.21 os resultados obtidos após a construção digital.

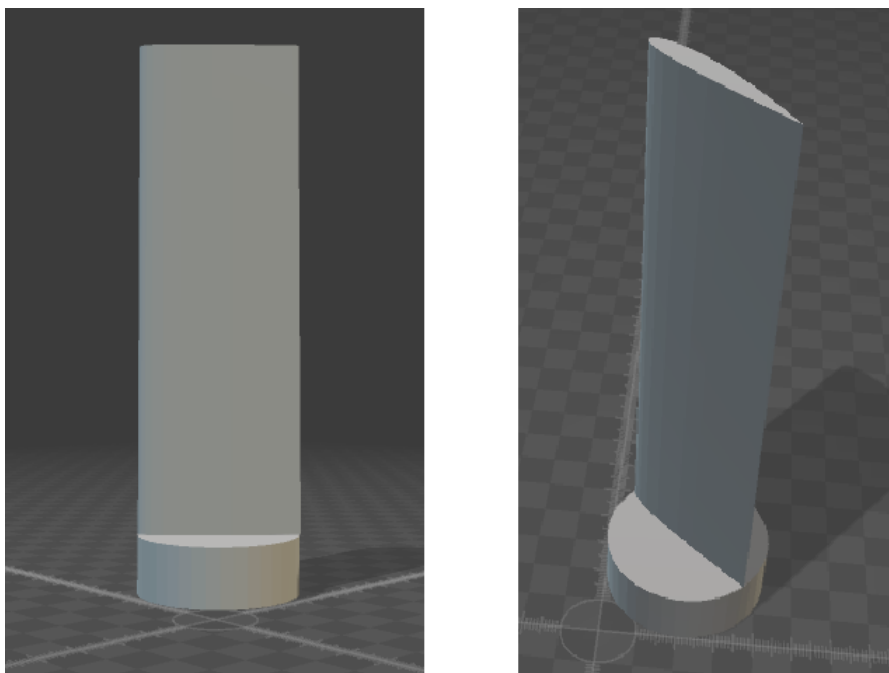


Figura 3.20: Perfil NACA 2414 após a sua construção digital, com correção do tamanho da corda.

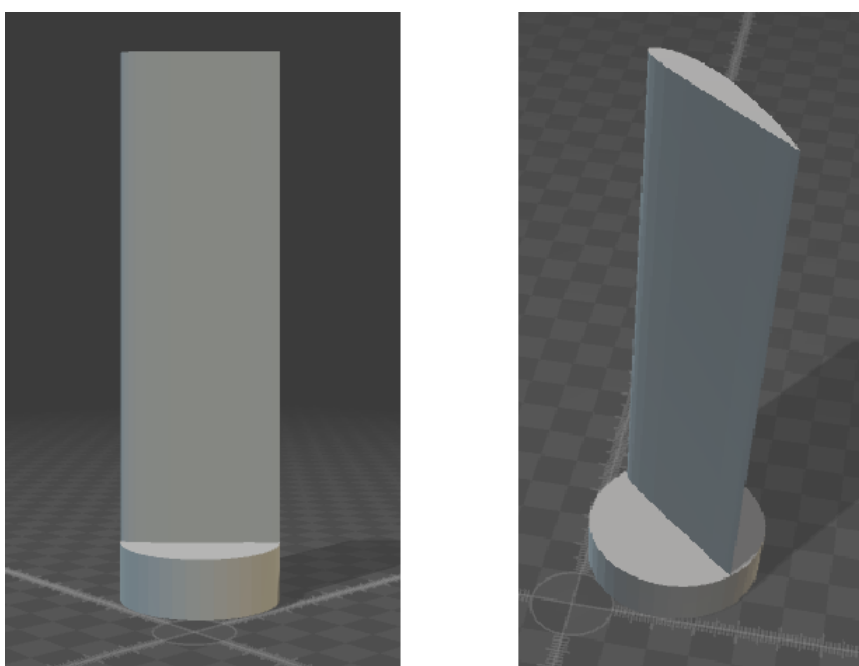


Figura 3.21: Perfil NACA 4415 após a sua construção digital, com correção do tamanho da corda.

Após os novos modelos terem sido impressos, obtiveram-se os seguintes resultados apresentados na Figura 3.22.

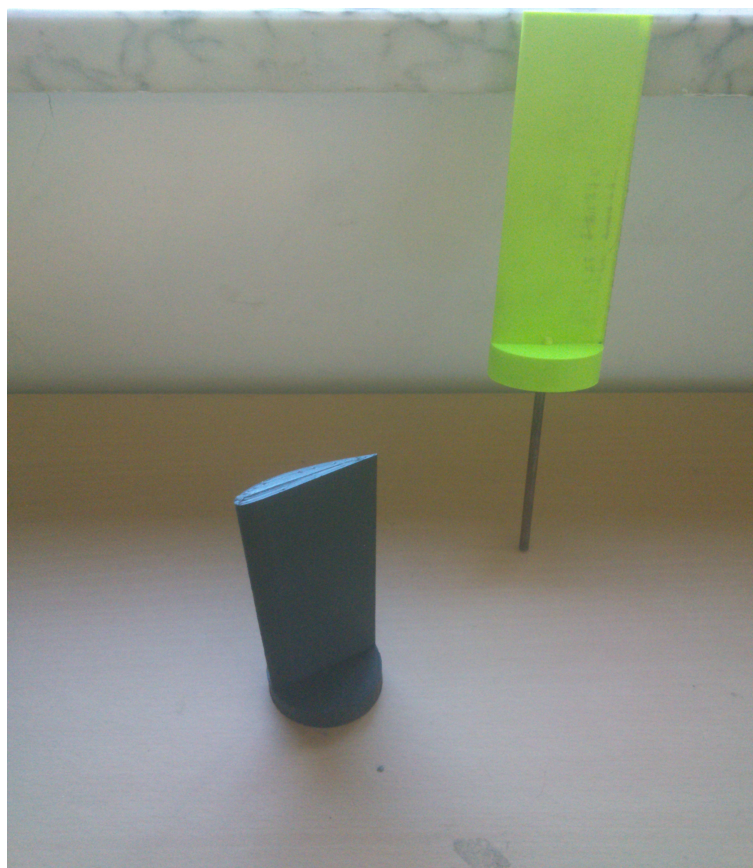


Figura 3.22: Pás impressas com os perfis NACA 4415 e NACA 2414, respetivamente.

Neste caso, apenas a pá com o perfil NACA 2414 necessitou de tratamento pós impressão. De salientar que esta mesma pá contém o suporte metálico inserido.

Foram realizados os testes com ambas as pás, seguindo o plano de trabalho anteriormente mencionado. Não foi encontrado qualquer erro durante as medições: ambas as pás não sofreram qualquer vibração mesmo a altas frequências e os valores registados nas balanças eram o suficientemente elevados (tomavam valores próximos de 1 N) para que pudessem ser medidos corretamente.

A figura que se segue retrata a diferença de tamanho entre os dois tipos de pás impressas.



Figura 3.23: Diferença entre os dois tipos de pás impressas. À esquerda, um exemplo das pás com 2 cm de corda. À direita encontra-se uma das pás com a correção para 4 cm de corda.

# Capítulo 4

## Discussão de Resultados

### 4.1 Pás Eólicas - Resultados

Após terem sido realizados todos os testes e registados todos os valores relativos aos mesmos, para as duas pás, o próximo passo passou pelo tratamento destes mesmos resultados.

Para melhor visualização dos valores das forças a que cada pá foi sujeita, foram elaborados três gráficos para cada pá com o auxílio do *software MatLab*, sendo que dois deles contêm os valores de  $C_L$  e  $C_D$  em relação aos vários ângulos de ataque  $\alpha$ , enquanto que o terceiro mostra a relação entre  $C_L$ - $C_D$  e novamente os vários ângulos de ataque a que as pás foram sujeitas. Todas as linhas destes gráficos obtidos possuem o número de Reynolds correspondente, dado pela seguinte fórmula:

$$Re = \frac{\rho \times U \times D}{\mu} \quad (4.1)$$

sendo  $U$  a velocidade do vento correspondente,  $D$ , para este caso, o tamanho da corda usado e  $\mu$  a viscosidade característica.

Segundo Álvaro Henrique Rodrigues (1991), aquando da construção das pás, o melhor ângulo a ser usado está relacionado com a diferença entre  $C_L$  e  $C_D$ . Quanto maior for esta diferença, mais adequado será o ângulo em questão. De salientar que este mesmo ângulo deve ser o ângulo total da pá, isto é, a soma de todos os ângulos do total de segmentos em que a pá foi dividida. De seguida estão apresentados os gráficos elaborados para cada um dos perfis escolhidos.

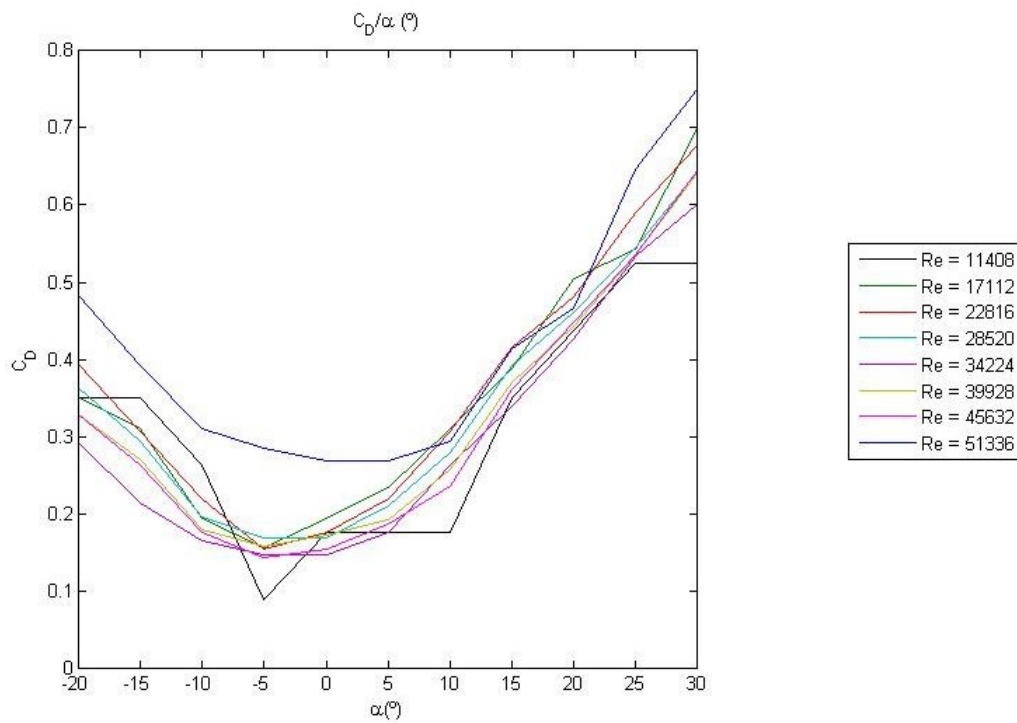


Figura 4.1: Valores obtidos de  $C_D$  em relação a  $\alpha$  relativamente ao perfil NACA 2414.

Os valores obtidos para  $C_D$  estão dentro dos parâmetros normais relativamente aos números de Reynolds apresentados. De notar que para o valor de Reynolds de 11408, a curva apresenta uma queda anormal quando  $C_D$  toma o valor de 0,1 e o ângulo de ataque é igual a  $-5^\circ$ . Esta queda pode ser explicada como sendo uma resistência induzida provocada pela forma da pá dada pelo perfil escolhido. Esta resistência pertence a um grupo de três resistências que se podem encontrar, sendo as mesma a resistência induzida, resistência de forma ou resistência parasita.

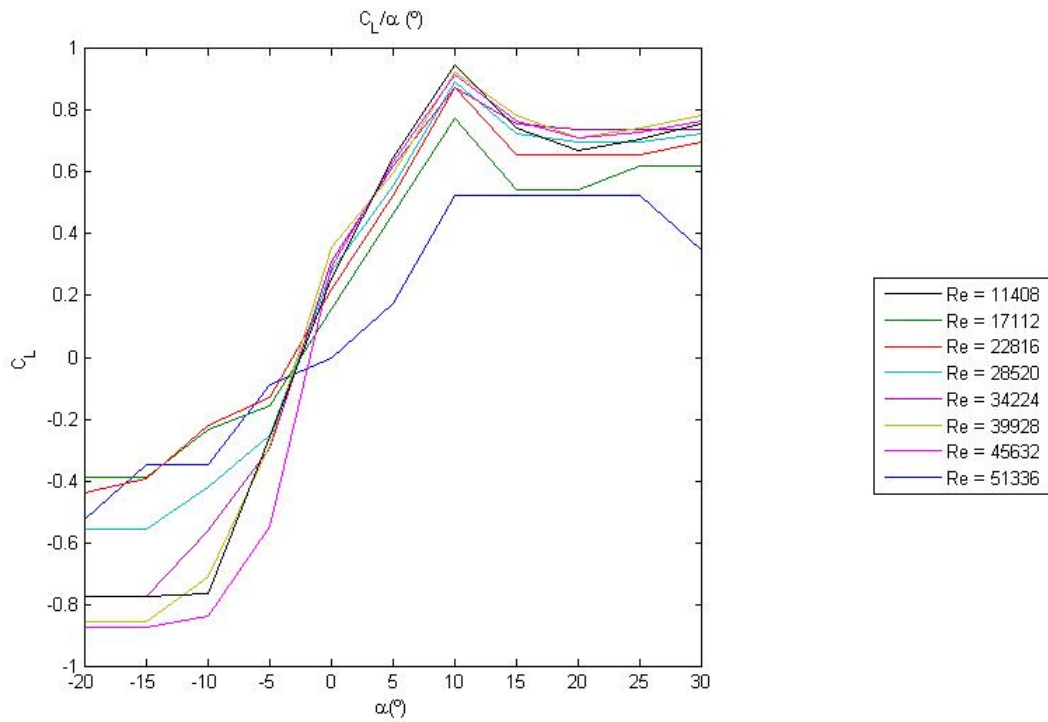


Figura 4.2: Valores obtidos de  $C_L$  em relação a  $\alpha$  relativamente ao perfil NACA 2414.

Como se pode verificar na Figura 4.2, o perfil NACA 2414 mostrou uma ótima performance relativamente os valores de  $C_L$  obtidos, sendo que estes valores são normalmente adquiridos neste tipo de situação.

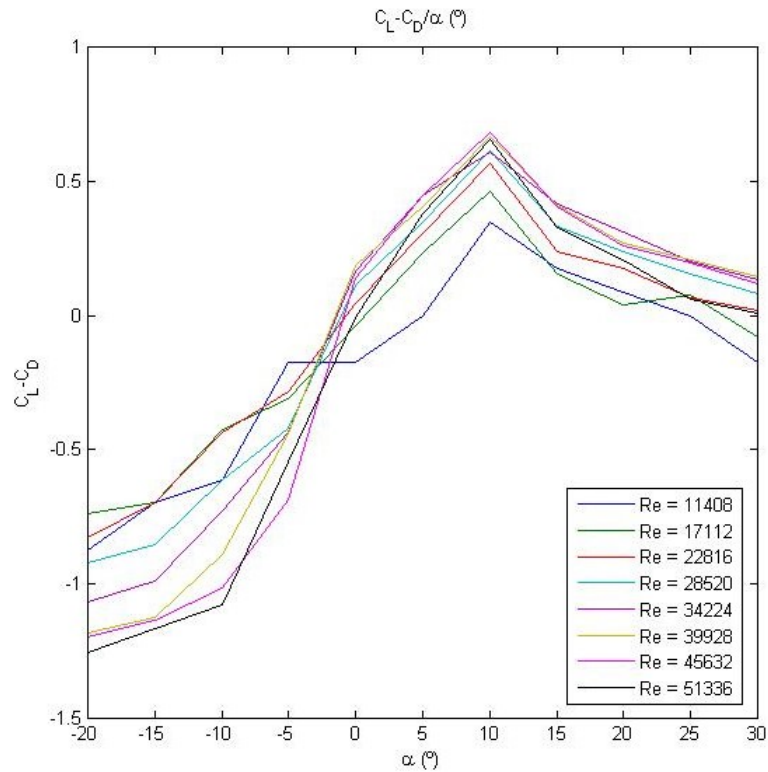


Figura 4.3: Valores obtidos de  $C_L - C_D$  em relação a  $\alpha$  relativamente ao perfil NACA 2414.

Após o tratamento dos dados obtidos neste gráfico apresentado pela Figura 4.3, pode concluir-se que o melhor ângulo de ataque para este perfil (maior  $C_L - C_D$ ) é de  $10^\circ$ , sendo que o número de Reynolds associado ao mesmo é igual a 45632.

Quanto à pá relacionada com o perfil NACA 4415, após a execução dos testes conclui-se que possui melhor desempenho a velocidades de vento mais elevadas, como se pode constatar nos gráficos apresentados de seguida.

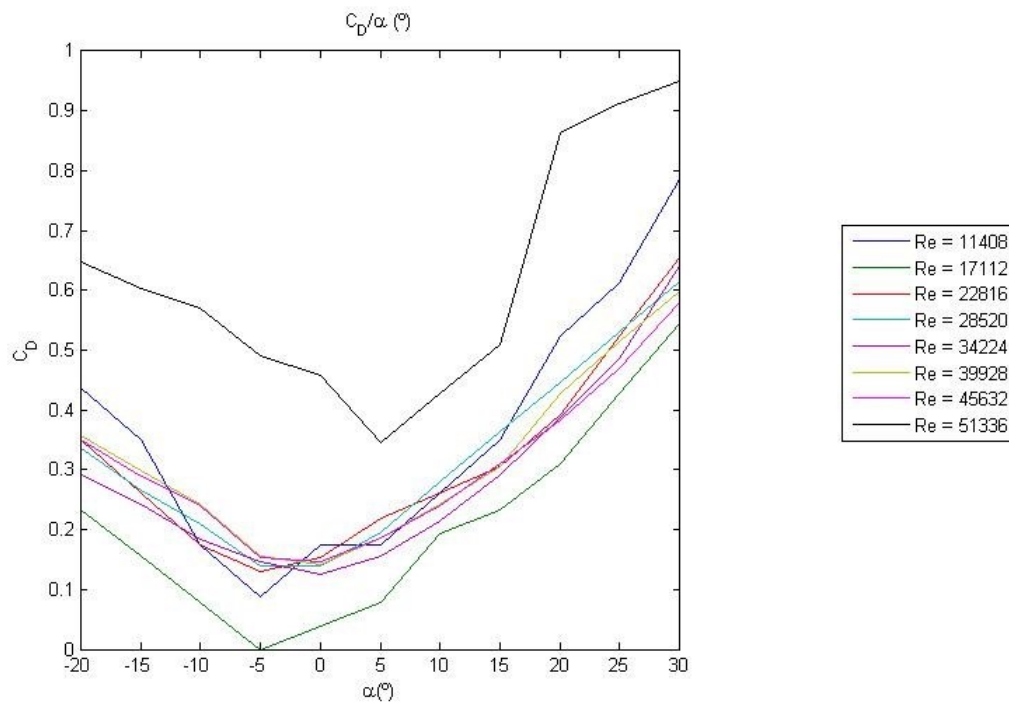


Figura 4.4: Valores obtidos de  $C_D$  em relação a  $\alpha$  relativamente ao perfil NACA 4415.

Os valores de  $C_D$  obtidos para este perfil são os esperados neste tipo de literatura, não existindo curvas anormais relativamente aos valores medidos. Para um Reynolds elevado, neste caso 51336, foram obtidos valores bastante altos de  $C_D$ , o que torna este perfil mais apto para velocidades de mais elevadas.

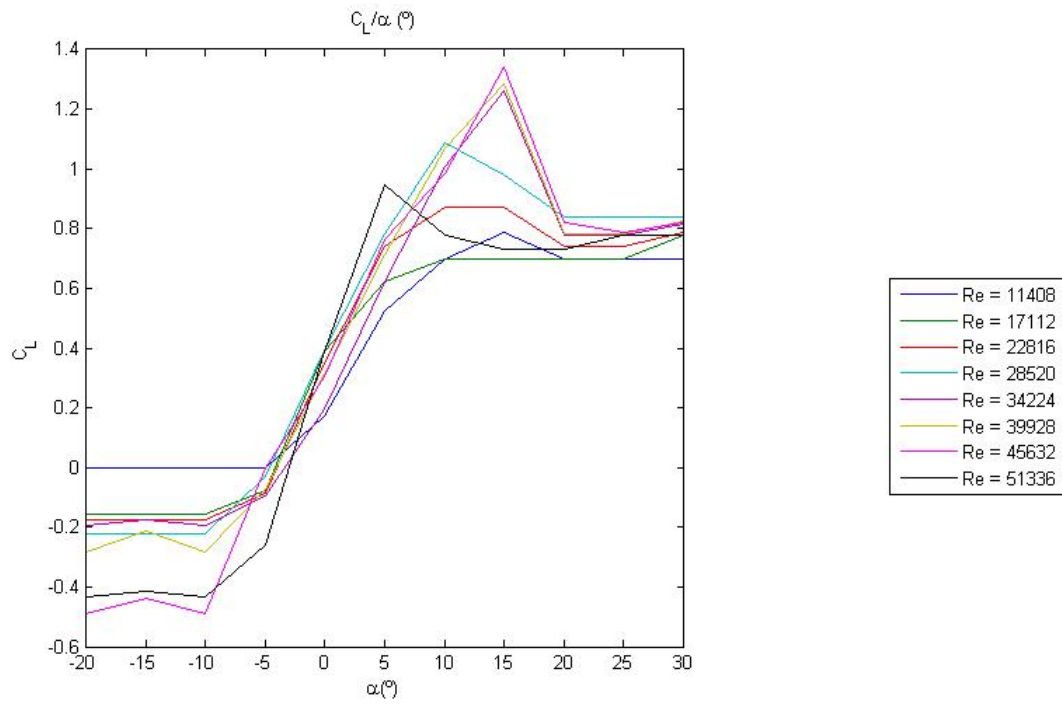


Figura 4.5: Valores obtidos de  $C_L$  em relação a  $\alpha$  relativamente ao perfil NACA 4415.

Quanto aos valores de  $C_L$  apresentados na Figura 4.5, com este perfil foram medidos valores mais elevados em comparação ao perfil anterior, também para valores de Reynolds mais elevados.

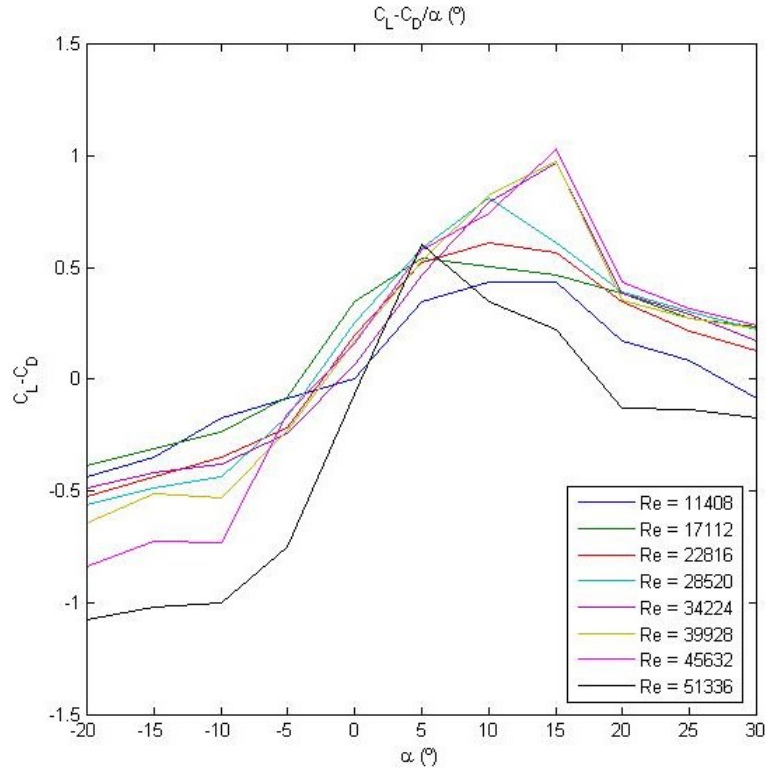


Figura 4.6: Valores obtidos de  $C_L - C_D$  em relação a  $\alpha$  relativamente ao perfil NACA 4415.

Neste caso, o maior valor para  $C_D - C_L$  é dado quando o ângulo de ataque é de  $15^\circ$ , quando o valor de Reynolds é igual ao caso anterior, 45632, como se pode verificar na Figura 4.6.

Foram construídas, no total, seis pás para serem testadas no túnel aerodinâmico, sendo que não se obtiveram resultados relativamente às primeiras quatro, devido ao facto de serem demasiado finas para poderem ser impressas corretamente. De seguida foram escolhidos dois novos perfis que apresentaram alguns defeitos depois da impressão, sendo estes eliminados facilmente. Porém, como foi explicado anteriormente, os testes no túnel aerodinâmico tiveram que ser cancelados pois as pás começavam a vibrar a velocidades de vento elevadas, prejudicando os resultados obtidos, para além de que os valores obtidos eram demasiadamente reduzidos (tomavam valores perto de 0 N) para que pudessem ser lidos corretamente. Foram posteriormente construídas duas novas pás, com a corda aumentada para o dobro relativamente aos anteriores para eliminar as implicações descritas. Foram realizados oitenta e oito ensaios para cada pá, variando os mesmos entre as frequências de 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz, 35 Hz, 40 Hz e 45 Hz e entre os ângulos  $-20^\circ$ ,  $-15^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$  e  $30^\circ$ .

## 4.2 Perfis Propostos

Após se terem recolhido todos os dados possíveis acerca dos dois perfis mencionados anteriormente, mais especificamente os valores das forças aerodinâmicas a que as pás estiveram sujeitas no túnel aerodinâmico, surge um novo passo, que passa pela construção da pá aerodinâmica com as características desejadas.

Para tal, foi necessário calcular através do BEM (ver secção 2.3) as características físicas da pá, nomeadamente a torção e corda correspondentes a cada segmento da pá. Sabendo que se dividiu a pá em dez segmentos e que foram seguidos todos os passos do método, apresenta-se na Tabela 4.1, os resultados obtidos.

Tabela 4.1: Torção e corda calculadas seguindo o BEM, para os vários elementos  $N$ , com diferentes raios  $r$  (m), torções  $\alpha$  ( $^\circ$ ) e cordas  $c$  (m).

$N$	$r$ (m)	$\alpha$ ( $^\circ$ )	$c$ (m)
1	0,1	48,4	0,62
2	0,2	52,4	0,57
3	0,3	59,4	0,48
4	0,4	65,2	0,39
5	0,5	69,6	0,32
6	0,6	73,0	0,27
7	0,7	75,6	0,23
8	0,8	77,5	0,20
9	0,9	79,0	0,18
10	1	79,9	0,16

O próximo passo tomado consistiu na construção digital da pá, com estas características. Decidiu-se, porém, criá-la de modo diferente às anteriores: em vez de utilizar só um perfil, tendo que optar pelo melhor a velocidades de vento mais baixas ou o oposto, surgiu a opção de casar perfis. Esta técnica consiste em que, na mesma pá, constem dois perfis, normalmente devido ao facto de que existem perfis com melhor desempenho na base na pá, e outros que se destacam na topo da mesma, como aconteceu neste caso. O perfil NACA 2414 mostrou um melhor desempenho a velocidades de vento mais baixas, sendo que o seu rendimento será maior se ficar na base da pá, pois é aqui que a velocidade de vento toma este tipo de valores. Já o perfil NACA 4415 mostrou ser melhor a velocidades de vento mais elevadas, sendo que irá representar melhor o seu papel no topo da pá que será construída, sendo que é nesta parte da pá onde a maior parte da potência é extraída.

Posto isto, foi decidido que o perfil NACA 2414 ocuparia apenas 1/3 da pá, sendo colocado na base, enquanto que o outro perfil ocuparia o restante. A torção seria dada na base da pá, ou seja, apenas no perfil NACA 2414. Foram obtidos os resultados apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2.

Porém, após a conclusão do desenho, foi encontrada uma depressão na pá, que deveria ser inexistente. A depressão que se pode visualizar nas figuras seguintes é a consequência

da incompatibilidade dos dois perfis escolhidos. Esta falha está situada na translação de um perfil para o outro, pois os perfis não possuem uma constituição semelhante, sendo o perfil NACA 4415 mais fino em relação ao perfil NACA 2414. A depressão pode ser visualizada na Figura 4.7.

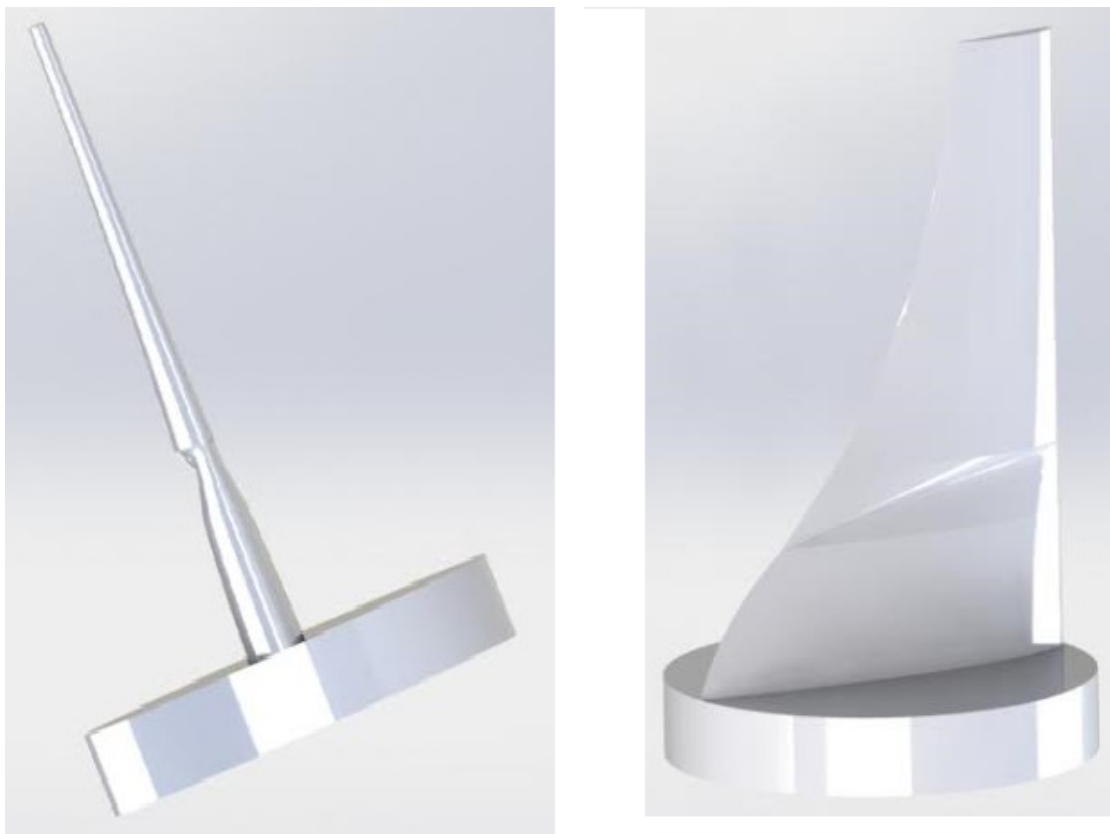


Figura 4.7: Resultado obtido após casar os dois perfis. A depressão situa-se entre a troca de perfis.

Como se pôde ver na imagem, não foi dada qualquer torção às pás, sendo que se fosse aplicada a torção calculada, a depressão seria ainda mais elevada. Em todo este projeto, antes de dar qualquer torção às pás finais, foram construídas sem torção de modo a que se pudesse analisar as mesmas quanto à existência de erros como este.

Sendo assim, a ideia de casar perfis foi cancelada, optando-se por construir duas pás com os perfis mencionados. De seguida estão apresentadas nas Figuras 4.8 e 4.9 as duas pás finais que foram construídas, estando ambas livres de erros semelhantes ao que a pá anterior ficou sujeita.

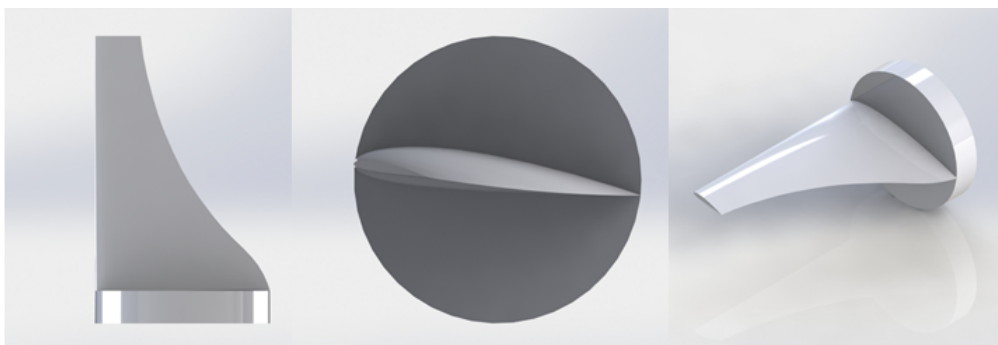


Figura 4.8: Várias vistas da pá final construída a partir do perfil NACA 2414.

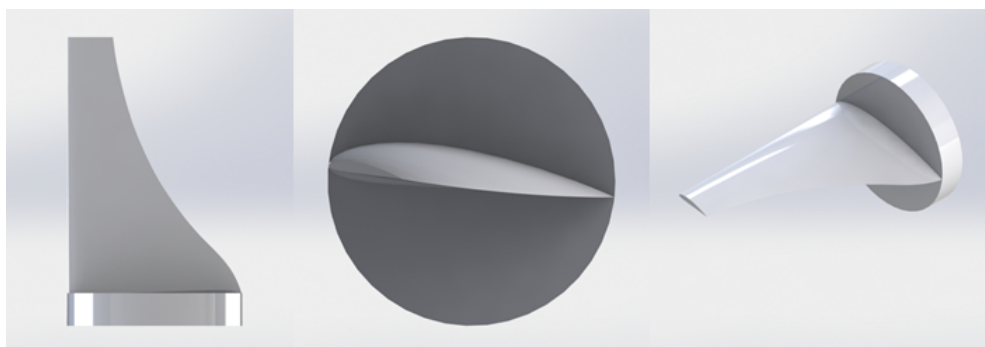


Figura 4.9: Várias vistas da pá final construída a partir do perfil NACA 4415.

Ambas as pás possuem a torção calculada e apresentada anteriormente, sendo a mesma dada ao longo da pá.

# Capítulo 5

## Conclusão

### 5.1 Conclusões

Neste trabalho foram construídas duas pás com o fim de serem utilizadas na transformação de um aerogerador já existente, mais precisamente um protótipo *Enhance WT*, num mais sustentável.

Foram construídas e impressas oito pás, sendo que as primeiras quatro apresentavam erros de impressão devido a possuírem um perfil muito fino. As duas pás seguintes, construídas a partir de um perfil aerodinâmico mais robusto, mostraram um péssimo desempenho aquando dos testes realizados no túnel de vento, visto que começavam a vibrar no topo a velocidades elevadas, prejudicando assim os resultados obtidos. As duas pás finais, com a correção da corda para o dobro face às pás anteriores, apresentaram bom desempenho, tendo sido obtidos bons resultados.

As pás aerodinâmicas foram construídas digitalmente com base nos resultados obtidos provenientes do túnel aerodinâmico que se encontra na Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança. As pás foram testadas em várias velocidades, variando estas entre 4,29 m/s e 19,31 m/s e entre os números de Reynolds de 11408 e 51336, respetivamente, estando sujeitas paralelamente a variações angulares entre os  $-20^\circ$  e os  $30^\circ$ .

Os resultados obtidos relativamente aos testes realizados mostraram ser bastantes promissores. Como se pode visualizar nos gráficos relativamente aos valores obtidos para as forças aerodinâmicas, as pás apresentam comportamentos que são normais neste tipo de situações: os valores obtidos para  $C_D$  e  $C_L$  tomam valores baixos, maioritariamente decimais, chegando a valores de 1,3. Quanto às pás digitalmente obtidas, construídas com base na teoria BEM, pode concluir-se que ficaram aquém das expectativas, no que toca ao casamento de perfis. Como foi apresentado anteriormente no capítulo 3, o objetivo era casar dois perfis de modo a obter a melhor performance aerodinâmica, extraindo assim o potencial dos mesmos. Porém, a pá obtida apresenta anomalias provenientes da inconsistência entre os dois perfis. Para poder obter melhores resultados, os perfis devem, de

certo modo, ter curvaturas semelhantes. As pás obtidas usando os perfis separadamente apresentam boa consistência física, sendo que o formato é o normalmente obtido no que toca a exercícios que possuem dados semelhantes aos apresentados neste projeto. O perfil NACA 2414 obtém o melhor desempenho para velocidade de vento menores, para um ângulo de ataque de  $10^\circ$  e para um número de Reynolds de 45632. Já o perfil NACA 4415 mostra melhores resultados a velocidade de vento mais elevadas, sendo que o melhor desempenho é obtido para um ângulo de  $15^\circ$  e para um número de Reynolds de 45632.

Pode concluir-se que as pás apresentadas estão aptas para a sua construção propriamente dita, utilizando materiais sustentáveis (tais como madeira, papel e tecido), estando mesmo assim sujeitas a alterações após a recolha de dados relativamente aos testes que deverão ser feitos aquando da construção do aerogerador em escala real, pois estes mesmos testes irão demonstrar a aptidão das pás acima referida.

## 5.2 Trabalhos Futuros

Como um dos trabalhos futuros apresenta-se a construção das pás finais, de modo a ser testado o seu desempenho. Sendo assim, de seguida segue a lista dos possíveis trabalhos futuros que poderão surgir com este projeto:

- Escolha dos materiais a serem utilizados na construção do aerogerador, estando entre as possibilidades madeira para a formação do esqueleto das pás, arame para uma melhor consistência das mesmas, materiais para o revestimento (papel, resina, entre outros).
- Construção de um modelo à escala para verificar a consistência física relativamente aos materiais utilizados.
- Construção das pás em escala real.
- Planeamento e construção dos restantes componentes do aerogerador (bases, torre e C-D).
- Revisão dos conceitos teóricos relativamente à técnica de casamento de perfis.

# Bibliografia

AirfoilTools (2015).

URL: <http://airfoiltools.com/>

Ban, S. (2015).

URL: <http://www.shigerubanarchitects.com/>

Bergey, K. H. (1979), 'The lanchester-betz limit', *Journal of Energy* **3**(6), 382–384.

Borges, A. D. & Ribeiro, J. M. A. (2009), *Energia Eólica*, Vol. 362 of *Didática, Ciências Aplicadas*.

F.Bet & Grassmann, H. (2002), 'Upgrading conventional wind turbines', *Renewable Energy* **28**, 71–78.

Hansen, M. O. L. (2008), *Aerodynamics of Wind Turbines*, Earthscan.

Hau, E. (2000), *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*.

Houghton, E. & Carpenter, P. (2005), *Aerodynamics for Engineering Students*, Butterworth-Heinemann.

Kulunk, E. (2011), *Aerodynamics of Wind Turbines, Fundamentals and Advanced Topics in Wind Power*, InTech.

Álvaro Henrique Rodrigues (1991), Estudo experimental do comportamento aerodinâmico de uma turbina eólica de eixo horizontal de pequena potência, PhD thesis, FEUP.

Maia, L. A. B. (2014), Experimental and numerical study of a diffuser augmented wind turbine - dawt, Master's thesis, Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e Gestão.

Okulov, V. L. & van Kuik, G. A. M. (2012), *Wind Energy, The Betz - Joukowsky limit: on the contribution to rotor aerodynamics by the British, German and Russian scientific schools*, Wiley Online Library.

Oliveira, L. A. & Lopes, A. G. (2012), *Mecânica dos Fluídos*, LIDEL.

Paulo, J. A. R. (2013), Construção, desenvolvimento e otimização de concentrador e difusor para turbina eólica, Master's thesis, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Bragança.

Schwartz, F. (1992), *Eppler-Profile / Werner Thies*, VTH.

Venger (2015).

**URL:** <http://www.verticalwindturbineinfo.com/vawt-manufacturers/venger-wind-vertical-axis-wind-turbines/>

Wang, F., Bai, L., Fletcher, J., Whiteford, J. & D.Cullen (2008), 'The methodology for aerodynamic study on a small domestic wind turbine with scoop', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **96**, 1–24.

Windfinder (2014).

**URL:** <http://pt.windfinder.com/>