



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

# **Estudo dos Padrões de Vorticidade na Esteira de uma Asa em Movimento de Translação**

## **Idealização e Projeção de uma Instalação Experimental**

**Rodolfo Batista de Sá Lopes**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Aeronáutica**  
(ciclo de estudos integrado)

Orientador: Prof. Doutor André Resende Rodrigues da Silva

**Covilhã, outubro de 2018**



# Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador, Professor Doutor André Resende Rodrigues da Silva, por toda a disponibilidade e apoio prestado durante este trabalho. Agradeço a dedicação, encorajamento e conhecimento transmitido.

Também gostaria de demonstrar a minha gratidão pela oportunidade de pertencer e trabalhar em atividades de investigação do AeroG - *Aeronautics and Astronautics Research Center*, presidido pelo Professor Doutor Jorge Barata, que sempre se mostrou disponível para me ajudar, dar sugestões e transmitir o seu conhecimento e experiência.

Não podia deixar de reconhecer também, todo o interesse e apoio prestado pelo Doutor Fernando Manuel da Silva Pereira das Neves, que sempre se mostrou disponível para me ajudar no trabalho e melhorar o mesmo, assim como a ajuda prestada pelo Doutor Pedro Jorge Ferreira Alves.

Ao meu colega de curso e amigo, Emanuel Camacho, por todo o suporte que me prestou neste desafio a que ambos nos propusemos.

Agradeço ao Técnico de Laboratório, Senhor Rui Manuel Tomé Paulo, sempre incansável e perfeccionista na ajuda prestada para a construção de toda a instalação experimental, assim como ao Técnico Senhor Rui Eugénio da Silva Barata por me ter ajudado na parte inicial do trabalho.

Aos clubes de ciclismo Viseu 2001 | BTT100Rumo, Pedaladas C.C. e seus integrantes, por toda a compreensão demonstrada durante o tempo em que me dediquei a tempo inteiro à elaboração do presente trabalho.

Por último, mas não menos importantes, agradeço a toda a minha família e amigos, em especial aos meus pais e irmão pelo suporte, compreensão, dedicação, apoio e encorajamento a dar sempre mais e melhor de mim.

*“Success is not final, failure is not fatal. It is the courage to continue that counts.”*

Winston Churchill

Rodolfo Lopes  
Covilhã, outubro de 2018



# Resumo

Os veículos aéreos existentes atualmente, embora sejam eficientes nas condições de cruzeiro, perdem muito do seu desempenho em manobras e fases do voo que não esta. Pelo contrário, o voo efetuado pelos seres vivos na Natureza demonstra uma adaptação ideal e eficiência elevada para cada fase do voo. A produção de sustentação e impulso também é feita em simultâneo pelas mesmas estruturas, as asas. Inversamente, nos veículos atuais existe a separação da sustentação, produzida nas asas, e impulso, produzido pelos motores.

A biomimética é uma área da ciência que tem por objetivo o estudo das estruturas biológicas e das suas funções, procurando aprender com a Natureza, as suas estratégias e soluções, utilizando esse conhecimento em diferentes domínios da ciência, neste caso a Engenharia Aeronáutica. Aos novos veículos aéreos baseados na imitação da Natureza, dá-se o nome de MAV's ou NAV's, significando micro/nano veículos aéreos, respetivamente. O desempenho aerodinâmico destes pequenos veículos é, de uma maneira geral, governado por fenómenos de baixos números de Reynolds.

Analogamente ao que acontece na Natureza com o bater das asas dos seres vivos, este é um trabalho experimental com o objetivo de recriar os movimentos de uma asa batedora e visualizar os variados padrões de vorticidade presentes na sua esteira. A asa experimenta um movimento oscilatório vertical e sem alteração da sua incidência (movimento translacional). Idealizou-se, projetou-se e construiu-se uma instalação experimental composta por uma asa de 44cm de envergadura, perfil NACA 0012, corda de 10cm e um ângulo de incidência de  $0^\circ$  à porta de um túnel de vento. O túnel de vento foi calibrado para as velocidades de saída do escoamento de  $U_\infty = 1m/s$ ,  $U_\infty = 1.7m/s$  e  $U_\infty = 2.58m/s$ , representando  $Re = 6\ 580$ ,  $Re = 11\ 200$  e  $Re = 17\ 000$ , respetivamente. A asa experimenta uma oscilação vertical com amplitudes entre 0.5cm ( $h = 0.05$ ) até 2.8cm ( $h = 0.28$ ). As frequências adimensionais ( $k$ ) testadas pertencem à gama de  $0 \leq k \leq 6$  e a velocidade de batimento de adimensional ( $kh$ ) variou entre  $0.0 \leq kh \leq 0.6$ . A técnica de visualização consistiu na inserção de fumo no escoamento, alinhado com uma folha de laser. As imagens da esteira foram gravadas a uma taxa de 500fps e um ângulo de  $60^\circ$  com o plano da esteira.

Os resultados obtidos, para  $kh = 0.0$ , demonstram a existência de uma esteira com resistência ao avanço. No que toca a condições com a asa em movimento, não foi possível obter resultados para  $Re = 17\ 000$ , assim como apresentar resultados para  $kh = 0.1$ . Consequentemente, não foi possível obter conclusões sobre o comportamento da asa entre na gama de  $0.0 < kh < 0.2$ . Os resultados obtidos para  $Re = 11\ 200$  e  $Re = 6\ 580$  permitiram concluir que, a transição entre resistência ao avanço e produção de impulso pela asa, ocorre algures na gama  $0.2 \leq kh \leq 0.3$ .

Acima deste intervalo,  $0.4 \leq kh \leq 0.6$ , apenas se testaram  $Re = 6\,580$ . Aqui obtiveram-se resultados coincidentes com uma esteira representativa de produção de impulso.

Nos vários ensaios também foi possível obter a libertação forçada de vórtices (um par de vórtices em sentido contrário por ciclo) e a libertação harmónica (dois pares de vórtices em sentido contrário por ciclo). Os diferentes valores de  $Re$  testados também parecem ter tido alguma influência no tipo de esteira desenvolvida.

Reforçou-se a conclusão de que a velocidade de batimento adimensional ( $kh$ ), sozinha, é insuficiente para caracterizar o regime de funcionamento da asa. Parâmetros como a amplitude adimensional ( $h$ ), frequência reduzida ( $k$ ) e  $Re$  devem ser considerados em separado.

## Palavras-chave

Biomimética, Estudo Experimental, Asa Batedora, Vórtices, Esteira, Estrada de Von Kármán, Resistência ao Avanço, Transição, Esteira Neutra e Impulso.

# Abstract

Currently existing air vehicles, although efficient in the cruise conditions, lose much of their performance in manoeuvres and phases of the flight such as takeoff, landing, turn or climbing. On the other hand, the flight performed by some animals in Nature demonstrates an ideal adaptation and high efficiency for each flight phase. The production of lift and thrust is performed by the same structures, the wings. On the contrary, in nowadays vehicles, there is a separation of the lift force, produced by the wings, and thrust, produced by engines.

Biomimicry, also denominated as Biomimetics, is an area of science that aims to study biological structures and their functions, seeking to learn, from Nature, its strategies and solutions. This knowledge can be applied in different fields of science, such as Aeronautical Engineering. These new air vehicles, based on the imitation of Nature, are named MAV's (Micro Air Vehicle) or NAV's (Nano Air Vehicle). The aerodynamic performance of these small vehicles is generally governed by low Reynolds numbers.

As the animals in Nature wave their wings to create thrust and lift, the scope of this experimental work is to recreate a plunging wing (with no pitch movement) and visualize the vortex shedding patterns on the wake. An experimental arrangement was designed and built in order to study this problem. It was used a 44cm spanwise and a 10cm chordwise wing with a NACA 0012 profile. The wing was placed at the exit (300mm x 402mm) of a wind tunnel with a pitch angle of 0°. The tunnel was calibrated to a flow speed of  $U_\infty = 1m/s$ ,  $U_\infty = 1.7m/s$  and  $U_\infty = 2.58m/s$  and respective Reynolds numbers of  $Re = 6\,580$ ,  $Re = 11\,200$  and  $Re = 17\,000$ . The wing was tested with amplitudes between 0.5cm ( $h = 0.05$ ) to 2.8cm ( $h = 0.28$ ). The reduced frequencies ( $k$ ) tested were on the range of  $0 \leq k \leq 6$ , whereas the nondimensional plunging speed ( $kh$ ) varied from  $0.0 \leq kh \leq 0.6$ . The technique for the wake visualization consisted on the insertion of smoke on the flow, aligned with a laser sheet. The images of the wake were recorded at a rate of 500fps and an angle of 60° with the plane of the wake.

The results obtained for  $kh = 0.0$  show the existence of a drag-producing wake, as expected. For  $kh > 0.0$ , it was not possible to obtain results for  $Re = 17\,000$ , as well as presenting the visualization of the wake for  $kh = 0.1$ . Consequently, it was not possible to obtain conclusions about wing behaviour in the range of  $0.0 < kh < 0.2$ . The results obtained for  $Re = 11\,200$  and  $Re = 6\,580$  allowed to conclude that the transition between a drag-producing wake to a thrust-producing wake occurs somewhere in the range of  $0.2 \leq kh \leq 0.3$ . Above this range, for  $0.4 \leq kh \leq 0.6$ , only  $Re = 6\,580$  were tested. These results display an identical pattern of a representative thrust-producing wake.

In the performed tests, it was also possible to obtain the forcing frequency vortex shedding type (one pair of vortices shed, per cycle, in the opposite direction) and the harmonic region vortex shedding type (two pairs of vortices shed, per cycle, in the opposite direction). The different values of tested  $Re$  also seem to influence the type of the wake developed.

The conclusion reinforced that the nondimensional plunging speed ( $kh$ ), alone, is insufficient to characterize the operating regime of the wing. Parameters such as the nondimensional plunge amplitude ( $h$ ), the reduced frequency ( $k$ ), considered separately, seem to offer a more effective characterization of the wake, as well as the individual consideration of the  $Re$  number.

## Keywords

Biomimetic, Biomimicry, Experimental Study, Plunging Airfoil, Vortex, Wake, Von Kármán Street, Drag, Transition, Neutral Wake and Thrust

# Conteúdo

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
Nomenclatura	xvii
Lista de Acrónimos	xix
1 Introdução	1
1.1 Biomimética - o voo natural e a inspiração para a Aeronáutica	1
1.2 Motivação	2
1.3 Revisão Bibliográfica	4
1.3.1 Padrões de vorticidade na esteira	9
1.3.2 Eficiência propulsiva de uma asa batedora	23
1.3.3 Estudos em pássaros, insetos e outros animais	29
1.3.4 Produção de energia	32
1.4 Objetivos	34
1.5 Organização	35
2 Método Experimental	37
2.1 Instalação Experimental	37
2.1.1 Motor e controlador	38
2.1.2 Estrutura	43
2.1.3 Túnel de Vento	44
2.1.4 Velocidades estudadas	45
2.1.5 Sistema de fumo	45
2.1.6 Laser	47
2.1.7 Câmara	47
2.2 Calibração	48
2.2.1 Software MEXE02 v3.32.0.0	48
2.2.2 Medição das frequências	51
2.2.3 Túnel de Vento	53
2.2.3.1 Turbulência e Escalas de Kolmogorov	56
3 Resultados	61
3.1 Introdução	61
3.2 Vórtices característicos	65
3.3 Visualização	66
3.3.1 $kh = 0.0$	66

3.3.2 $kh = 0.2$	67
3.3.3 $kh = 0.3$	69
3.3.4 $kh = 0.4$	74
3.3.5 $kh = 0.5$	76
3.3.6 $kh = 0.6$	77
3.4 Análise de Resultados	78
3.5 Comparação com a Literatura	82
3.5.1 Jones et al. [21] (1998)	82
3.5.2 Lai et al. [23] (1999)	82
3.5.3 Andersen et al. [31] (2017)	82
4 Conclusões e Trabalhos Futuros	83
4.1 Conclusões	83
4.2 Trabalhos Futuros	85
Referências	87
Anexo 1 - Controlador do Motor	93
Anexo 2 - Abstract submetido para Conferência	97

# Lista de Figuras

Figura 1.1	Classificação de veículos aéreos e seres vivos voadores segundo o seu peso; (a) Classificação pelo número de Reynolds proposto [1]; (b) Relação com a velocidade de cruzeiro [2].....	4
Figura 1.2	Diferenças principais entre o voo tradicional efetuado pelas aeronaves atuais e o voo natural [3].....	5
Figura 1.3	Esquema da velocidade na ponta da asa e velocidade de voo em função da massa apresentado por Ho et al. [17] (2003) .....	6
Figura 1.4	Esquema do efeito Knoller-Betz por Platzer et al. [1] (2008): (a) Movimento descendente; (b) Movimento ascendente.....	7
Figura 1.5	Padrões de esteira apresentados por Jones et al. [21] (1998); (a) Esteira indicativa de resistência ao avanço para $kh = 0.29$ ; (b) Esteira indicativa de produção de impulso para um $kh = 0.6$ .....	11
Figura 1.6	Padrões de esteira apresentados por Jones et al. [21] (1998); (a) Esteira indicativa de transição (força nula) para $kh = 0.46$ ; (b) Esteira defletida ou de modo duplo para $kh = 1.5$ .....	12
Figura 1.7	Esquemas de Lai et al. [23] (1999); (a) Libertação de vórtices aos pares em cada metade de ciclo; (b) Vários padrões de vorticidade segundo valores de $kh$ .....	14
Figura 1.8	Mapa da esteira para o caso da asa em translação apresentado por Andersen et al. [31].....	17
Figura 1.9	Esteira de uma asa um movimento puro translacional com $kh = 0.4$ ; (a) Simulação 3D vista de cima, Platzer et al. [4] (2008); (b) Resultado experimental obtido por Lai et al. [23] (1999).....	24
Figura 1.10	Aproveitamento de um escoamento de fluido para a produção de energia, [42]; (a) Escoamento laminar numa asa; (b) Aumento da sustentação devido ao LEV. (c) Produção de energia através do movimento translacional da asa. $V_{rel}$ representa a velocidade relativa do escoamento.	34
Figura 2.1	Instalação experimental.....	38
Figura 2.2	Dimensões do motor elétrico. Imagem editada de [63].....	39
Figura 2.3	Motor elétrico acoplado com o atuador linear: (a) Imagem da instalação; (b) Esquema da montagem com as dimensões do atuador. Editado de [64]..	39
Figura 2.4	Controlador do motor, versão ARD-CD [65]: (a) Imagem do controlador; (b) Dimensões do controlador em mm.....	40
Figura 2.5	Cabo de programação de dados CC05IF-USB [66].....	40
Figura 2.6	Esquema de conexão de todos os componentes ao controlador. Editado de [67].....	41

Figura 2.7	Representação dos canais [68]: (a) Canal de entrada CN8; (b) Canal de saída CN9.....	42
Figura 2.8	Montagem final dos circuitos de saída e de entrada no controlador.....	43
Figura 2.9	Asa construída em madeira de balsa; (a) Estrutura de ferro, motor e asa; (b) Asa aparafusada na haste.....	44
Figura 2.10	Túnel de vento: (a) Saída do túnel com a asa; (b) Parte principal do túnel.....	44
Figura 2.11	(a) Controlador da máquina de fumo; (b) Máquina geradora de fumo; (c) Líquido utilizado na máquina.....	46
Figura 2.12	Dispositivo de inseminação de fumo; (a) Peças individuais; (b) Peça com tubagem interior; (c) Dispositivo final montado; (d) Dispositivo no interior do túnel.....	46
Figura 2.13	Laser utilizado na instalação.....	47
Figura 2.14	Câmara Photron FASTCAM mini UX50 com as lentes Tokina MACRO 100 F2.8 D.....	48
Figura 2.15	Programação de um ciclo de oscilação, composto por duas linhas, no Software MEXE02.....	49
Figura 2.16	Montagem da instalação para filmagem do motor e posterior cálculo da frequência.....	52
Figura 2.17	Tempo dos ciclos no Software FASTCAM.....	53
Figura 2.18	Posição das guilhotinas 1 ( $g_1$ ) à esquerda e 2 ( $g_2$ ) à direita [70 ].....	53
Figura 2.19	Controlador do túnel de vento [70].....	54
Figura 2.20	Micromanómetro utilizado, apresentando os valores lidos sob a forma de $mmH_2O$ .....	56
Figura 2.21	Esteira sem asa; (a) $Re = 6\ 580$ (500fps); (b) $Re = 11\ 200$ (1000fps); (c) $Re = 17\ 000$ (2000fps).....	57
Figura 3.1	Medição do comprimento e inclinação da esteira filmada.....	64
Figura 3.2	Esquematização de um vórtice do tipo “cogumelo”.....	65
Figura 3.3	Esteira com asa imóvel; (a) Caso 0.1, $kh = 0.0$ , $Re = 6\ 580$ ; (b) Caso 0.2, $kh = 0.0$ , $Re = 11\ 200$ ; (c) Caso 0.3, $kh = 0.0$ , $Re = 17\ 000$ ; Círculos vermelhos: vórtices no sentido anti-horário; Círculos verdes: vórtices no sentido horário.....	66
Figura 3.4	Visualização da esteira do caso 1 ( $kh = 0.2$ , $h = 0.05$ , $Re = 6\ 580$ ); (a) Esteira; (b) Esquematização.....	68
Figura 3.5	Visualização da esteira do caso 2 ( $kh = 0.2$ , $h = 0.05$ , $Re = 11\ 200$ ); (a) Esteira; (b) Esquematização.....	69
Figura 3.6	Visualização da esteira do caso 3 ( $kh = 0.3$ , $h = 0.05$ , $Re = 6\ 580$ ); (a) Esteira; (b) Esquematização.....	70
Figura 3.7	Visualização da esteira do caso 4 ( $kh = 0.3$ , $h = 0.1$ , $Re = 6\ 580$ ); (a) Esteira; (b) Esquematização.....	71

Figura 3.8	Esquematização da esteira do caso 3.5 ( $kh = 0.3, h = 0.075, Re = 6\,580$ )...	72
Figura 3.9	Visualização da esteira do caso 5 ( $kh = 0.3, h = 0.1, Re = 11\,200$ ) (a) Esteira; (b) Esquematização.....	72
Figura 3.10	Visualização da esteira do caso 6 ( $kh = 0.3, h = 0.19, Re = 11\,200$ ); (a) Esteira; (b) Esquematização.....	73
Figura 3.11	Visualização da esteira do caso 7 ( $kh = 0.4, h = 0.1, Re = 6\,580$ ); (a) Esteira; (b) Esquematização.....	74
Figura 3.12	Esquematização da esteira do caso 8 ( $kh = 0.4, h = 0.19, Re = 6\,580$ ).....	75
Figura 3.13	Visualização da esteira do caso 9 ( $kh = 0.5, h = 0.1, Re = 6\,580$ ).....	76
Figura 3.14	Visualização da esteira do caso 10 ( $kh = 0.5, h = 0.19, Re = 6\,580$ ).....	76
Figura 3.15	Visualização da esteira do caso 11 ( $kh = 0.5, h = 0.28, Re = 6\,580$ ).....	77
Figura 3.16	Visualização da esteira do caso 12 ( $kh = 0.6, h = 0.28, Re = 6\,580$ ).....	77
Figura 3.17	Plano $k - h$ para os casos testados a $Re = 11\,200$ .....	78
Figura 3.18	Plano $k - h$ para os casos testados a $Re = 6\,580$ .....	79
Figura 3.19	Plano $k - h$ para todos os casos testados.....	79



# Lista de Tabelas

Tabela 1.1	Resumo dos trabalhos efetuados sobre padrões de vorticidade na esteira de uma asa batidora.....	19
Tabela 1.2	Resumo dos trabalhos efetuados sobre o estudo de coeficientes em asas batedoras.....	27
Tabela 2.1	Características do motor elétrico.....	39
Tabela 2.2	Características do atuador linear.....	39
Tabela 2.3	Valores da viscosidade e massa específica do ar utilizadas no cálculo de $Re$ .....	45
Tabela 2.4	Valores de velocidade em função do número de Reynolds.....	45
Tabela 2.5	Características do laser.....	47
Tabela 2.6	Valores de “step” colocados no programa para as diferentes amplitudes de movimento.....	50
Tabela 2.7	Valores de velocidade, aceleração e desaceleração colocados no programa e respectivas frequências máximas para cada amplitude.....	52
Tabela 2.8	Valores utilizados no cálculo.....	55
Tabela 2.9	Calibração para 1m/s.....	55
Tabela 2.10	Calibração para 1.7m/s.....	55
Tabela 2.11	Calibração para 2.58m/s.....	56
Tabela 2.12	Viscosidade cinemática do ar ( $\nu_{ar}$ ), comprimento $l$ e velocidades $u$ utilizadas.....	58
Tabela 2.13	Parâmetros da turbulência para os vários valores de Reynolds.....	58
Tabela 3.1	Apresentação de todas as condições planeadas. A amarelo estão as condições com frequência superior à do motor. A branco estão as esteiras sem interesse. A azul estão as esteiras que vão ser apresentadas no trabalho.....	63
Tabela 3.2	Parâmetros referentes a todos os casos apresentados.....	64
Tabela 3.3	Identificação do regime de funcionamento da asa para cada caso.....	80
Tabela 3.4	Fenómenos de libertação dominantes nos casos analisados.....	80



# Nomenclatura

## Caracteres Romanos

Símbolo	Designação/Descrição	Unidades
$A$	Espessura da esteira	$m$
$a$	Amplitude de batimento	$^{\circ}$
$b$	Envergadura da asa	$m$
$c$	Corda do perfil	$m$
$D$	Espessura do perfil	$m$
$d$	Distância	$m$
$C_p$	Coefficiente de potência	-
$C_t$	Coefficiente de tração	-
$f$	Frequência de batimento	$Hz$
$g$	Aceleração da gravidade	$m/s^2$
$g_1, g_2$	Guilhotinas que permitem controlar a velocidade do escoamento	$mm$
$h$	Amplitude de batimento adimensional	-
$k$	Frequência reduzida	-
$l$	Comprimento característico do escoamento	$m$
$P$	Potência requerida para mover a asa	$W$
$p_{ar}$	Pressão do ar	$Pa$
$p_T$	Pressão total ou de estagnação	$Pa$
$p_0$	Pressão estática	$Pa$
$q$	Pressão dinâmica	$Kg/m. s^2$
$q_{\infty}$	Pressão dinâmica do escoamento de aproximação	$Kg/m. s^2$
$R_{ar}$	Constante universal dos gases perfeitos para o ar	$J/Kg.K$
$Re$	Número de Reynolds	-
$Sr$	Número de Strouhal	-
$T$	Força de impulso	$N$
$T_{ar}$	Temperatura do ar	$K$
$U$	Velocidade do escoamento	$m/s$
$U_{\infty}$	Velocidade do escoamento de aproximação	$m/s$
$U_{eff}$	Velocidade do ar relativo	$m/s$
$u$	Velocidade característica do escoamento	$m/s$
$u_{\eta}$	Escala de velocidade de Kolmogorov	$m/s$

## Caracteres Gregos

$\alpha$	Ângulo de ataque	°
$\alpha_{eff}$	Ângulo de ataque efetivo	°
$\varepsilon$	Taxa média de dissipação de energia por unidade de massa	$m^2/s^3$
$\eta$	Eficiência propulsiva da asa em voo	-
$\eta_l$	Escala de comprimento de Kolmogorov	$m$
$\theta$	Ângulo de batimento da asa	°
$\mu_{ar}$	Viscosidade dinâmica do ar	$kg/m.s$
$\nu$	Viscosidade cinemática	$m^2/s$
$\nu_{ar}$	Viscosidade cinemática do ar	$m^2/s$
$\rho$	Massa específica	$Kg/m^3$
$\rho_{ar}$	Massa específica do ar	$Kg/m^3$
$\rho_{\acute{a}gua}$	Massa específica da água	$Kg/m^3$
$\tau_\eta$	Escala de tempo de Kolmogorov	$s$

## Lista de Acrónimos

2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
AC	<i>Alternating Current</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
fps	<i>frames per second</i>
HALE	High-Altitude Long-Endurance
LDV	<i>Laser Doppler Velocimetry</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LEV	<i>Leading Edge Vortex</i>
MAV	<i>Micro Air Vehicle</i>
NAV	<i>Nano Air Vehicle</i>
PIV	<i>Particle Image Velocimetry</i>
RSV	<i>Rotational Stopping Vortex</i>
SUAV	<i>Small Unmanned Aerial Vehicle</i>
TEV	<i>Trailing Edge Vortex</i>
TV	<i>Translational Vortex</i>
UAV	Unmanned Aerial Vehicle



# Capítulo 1

## Introdução

Este é um trabalho experimental fundamentado em tecnologias biomiméticas de propulsão. A biomimética é uma área da ciência que tem por objetivo o estudo das estruturas biológicas e das suas funções, procurando aprender com a Natureza, as suas estratégias e soluções, utilizando esse conhecimento em diferentes domínios da ciência, neste caso a Engenharia Aeronáutica. O nome biomimética provém da combinação das palavras gregas *bíos*, que significa vida e *mímesis* que significa imitação. Na Natureza existem milhões de espécies de insetos e pássaros, o que representa uma gigantesca base de dados para soluções inspiradas em sistemas biológicos tendo em vista a resolução de problemas de Engenharia. Neste trabalho ir-se-á estudar em específico o comportamento de uma asa com movimento puramente translacional, semelhante ao bater das asas de pássaros e outros seres vivos. A asa experimentará várias amplitudes de movimento, frequências e a velocidade do escoamento de aproximação também será alterada.

Este primeiro capítulo está dividido em cinco subgrupos. É apresentada uma introdução do tema da biomimética e a sua relevância na área da Engenharia Aeronáutica. É seguida por uma motivação do trabalho, aprofundando o tema da biomimética e em que medida este trabalho acrescenta conhecimento e evolução nesta área. No terceiro subgrupo é feita uma revisão bibliográfica enquadrada no estado da arte, objetivos do trabalho e organização do mesmo. Na revisão bibliográfica, de uma forma geral, são apresentados topo o tipo de trabalhos que já foram realizados em torno da biomimética, abordando várias vertentes. São apresentados os resultados e conclusões de cada um e a sua relevância prática/teórica na presente dissertação. Segue-se um subgrupo com os objetivos propostos para este trabalho e outro com a organização do mesmo.

### 1.1 Biomimética - o voo natural e a inspiração para a Aeronáutica

O primeiro grande exemplo de biomimética relacionado com a Aeronáutica foi o estudo do voo das aves de forma a poder ser transferido conhecimento de biologia para patamares tecnológicos. No século XVI Leonardo Da Vinci estudou o voo de pássaros e desenvolveu várias máquinas voadoras inspiradas na Natureza. A capacidade de voar das aves é totalmente dependente de uma série de adaptações que permitiram a conquista do ambiente aéreo. O Homem pretendeu obter esse conhecimento de modo a permitir o voo humano. Na Aeronáutica, a biomimética inspira sobretudo no século XXI, mas o interesse do Homem pela natureza na busca por soluções inovadoras que bio mimetizem o voo de pássaros e insetos vem desde há muitos anos. Estes veículos fabricados pelo Homem têm como objetivos a imitação da Natureza,

o entendimento do seu funcionamento e, conseqüentemente, a melhoria da performance em voo. O voo dos pássaros e insetos é uma das formas mais complexas de locomoção no reino animal. Em cada instante durante o batimento da asa, estes envolvem muitos movimentos complexos. As suas capacidades de manobra são notáveis e, de longe, superiores a toda capacidade de manobra de qualquer veículo voador fabricado pelo homem. Esse fato capturou a atenção do Homem desde sempre e atualmente são cada vez mais os estudos feitos envolvendo este tema.

## 1.2 Motivação

O desempenho aerodinâmico de pequenos veículos aéreos é, de uma maneira geral, governado por fenômenos e efeitos de baixos números de Reynolds. As características e pontos fortes de perfis que foram desenhados para serem eficientes a elevados números de Reynolds, superiores a 500 000, deterioram-se rapidamente assim que baixamos destes valores. Esta perda no desempenho deve-se muito devido a fenômenos envolvendo a camada limite como por exemplo a separação do escoamento. Para operar a baixos números de Reynolds, as regras clássicas da aerodinâmica e controle já não são válidas e é necessário, portanto, um novo entendimento de todos os fenômenos físicos que regem este tipo de voo. Surge assim uma nova inspiração no projeto de pequenos veículos aéreos, muito eficientes e baseado em tecnologias biomiméticas. A motivação deste trabalho está, portanto, conectada à biomimetização de meios de propulsão alternativos, nomeadamente imitação do voo efetuado por diversos seres vivos na Natureza, como por exemplo pássaros e insetos. Os veículos aéreos existentes atualmente, embora sejam eficientes nas condições de cruzeiro, perdem muito do seu desempenho em manobras e fases do voo que não esta. A grande vantagem deste tipo de voo, baseado na Natureza, em contraste com o voo efetuado por veículos desenvolvidos pelo Homem é a adaptação ideal para cada fase do voo, permitindo atingir eficiências muito superiores assim com uma grande manobrabilidade. A produção de sustentação e impulso também é feita ao mesmo tempo e pelas mesmas estruturas, as asas, ao contrário do que acontece nos veículos atuais em que existe a separação da sustentação, produzida nas asas, e impulso, produzido pelos motores.

Este é um tema cujo interesse tem aumentado significativamente nos últimos anos, muito devido à importância crescente atribuída aos veículos aéreos não tripulados, ou UAV's (*Unmanned Aerial Vehicles*), que efetuam missões importantes sem a presença física do Homem (desde missões de vigilância, reconhecimento militar, meios de socorro, área de segurança, detecção de materiais nucleares, químicos, etc.). O avanço das tecnologias, em geral, tem levado à miniaturização dos UAVs, abrindo essa miniaturização, a novos desafios, aplicações e novas missões. Para missões específicas, alguns destes veículos têm sido substituídos por pequenos veículos aéreos não tripulados, ou SUAVs (*Small Unmanned Aerial Vehicles*).

Na continuação desta miniaturização dos veículos não tripulados, e na busca de novas e mais eficientes maneiras de voar, em 1997 a DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) iniciou um programa de pesquisa a que deu o nome de *MAV Project*. O acrónimo MAV designa Micro Veículo Aéreo (do inglês, *Micro Air Vehicle*). Estes veículos terão de contar com capacidade para voo dentro de edifício (*indoors*), portabilidade no transporte, capacidade furtiva, voar com alta manobrabilidade a baixas velocidades e com capacidade de realizar voo pairado. Os MAV's são definidos como veículos extremamente pequenos e muito leves com um comprimento máximo de 15cm e um peso total não superior a 100 gramas. No que diz respeito ao número de Reynolds estes veículos trabalham na gama entre  $10^4$  e  $10^5$ . Mais tarde, em outubro de 2005, a DARPA lançou um novo programa de Nano Veículos Aéreos, ou NAV's (*Nano Air Vehicle*). Este tinha o objetivo de desenvolver veículos ainda mais pequenos, com um comprimento máximo de 10cm, pesos menores de 10g, com a capacidade de efetuar missões dentro ou fora de edifícios e operando a uma gama de número de Reynolds entre  $10^3$  e  $10^4$ .

O objetivo dos programas apresentados e dos trabalhos consequentemente desenvolvidos é produzir novas tecnologias para serem implementadas em novos tipos de veículos voadores (MAV's e NAV's) que ofereçam melhores comportamentos aerodinâmicos e eficiências de voo. As características impostas a este tipo de veículos como baixa altitude, elevada autonomia, baixas velocidades (até 100 Km/h), baixos tamanhos e massas juntamente com exigentes capacidades de descolagem, subida, voo pairado ou em espera, manobrabilidade, furtividade e rápida resposta a rajadas, estão muito além das capacidades dos veículos de asa fixa ou com rotor alguma vez construídos pelo Homem. Assim, conforme as exigências do voo vão sendo cada vez maiores e as escalas de tamanho e velocidade vão diminuindo, aproximamo-nos das condições encontradas no voo efetuados pela maior parte dos seres vivos na Natureza.

Seres vivos como pássaros e insetos têm sido inspiração nestes estudos pois possuem uma enorme capacidade de adaptação no voo e manobrabilidade, resultado de uma evolução de milhões de anos. A existência de vários tipos de asas e perfis no mundo vivo, assim como o ajuste do movimento de rotação, amplitude e frequência de batimento fazem com que este tipo de voo seja extremamente complexo e adaptado especialmente para cada condição de operação. Por isso é que as suas performances são, de longe, muito superiores a qualquer veículo já construído pelo homem nestes regimes. A produção simultânea de sustentação e impulso, pelas asas, também é fundamental para a obtenção de elevados desempenhos. Neste tipo de voo, estas duas grandezas não devem ser consideradas em separado.

Todas estas características cativaram a atenção do ser humano para tentar perceber todos os mecanismos presentes neste tipo de voo. No entanto, apesar de nas últimas décadas tenham sido realizados variados estudos na área que já levaram à construção de alguns MAV's, estão longe da complexidade e manobrabilidade de organismos vivos e ainda existem muitos desafios relativos à plena compreensão de todos os fenómenos instáveis envolvidos neste tipo de voo.

O interesse deste tema na indústria aeronáutica baseia-se na continuação dos trabalhos de pesquisa efetuados para construção de MAV's e NAV's e poder aplicar as mesmas tecnologias a uma escala maior de aeronaves. Isto representaria um enorme avanço com novos conhecimentos de voo, pois quando comparada com os meios utilizados hoje em dia na aviação pelo Homem, é uma forma muito mais eficiente de voar.

### 1.3 Revisão Bibliográfica

Nos últimos anos o número de estudos envolvendo este tema tem aumentado bastante. Nesta secção será apresentada uma revisão global dos variados trabalhos efetuados na área ao longo dos anos, dando uma maior atenção ao tema das esteiras características de asas batedoras. Temas envolvendo a flexibilidade das asas demonstram também a grande importância deste parâmetro na geração de força propulsiva e sustentação. Outros estudos na área de escoamento perturbado demonstram que é possível ter algum controlo sobre os fenómenos do mesmo através de métodos de controlo. Conclusivamente, existe um elevado interesse em estudar e perceber todos os fenómenos envolvidos no movimento de asas, seja um movimento puramente translacional, rotativo ou formado pelo acoplamento de ambos. A junção ou não destes dois movimentos é utilizada pelos seres vivos em sua vantagem e será revisto e explicado mais à frente neste trabalho. Na literatura a maior parte do trabalho foi feito na gama específica de baixos números de Reynolds, cerca de  $10^4$ , o que está nos valores expectáveis de operação de um MAV ou de um NAV, que está compreendido na gama entre  $10^3$  e  $10^5$ . No caso das aeronaves atualmente construídas pelo homem podem-se atingir Reynolds de 1,600,000 no caso de um planador ou de 2,000,000,000 no caso de um Boeing 747. Barata et al. [1] (2015) apresentaram uma relação para o voo entre o número de Reynolds das aeronaves, veículos e seres vivos e o seu respetivo peso (figura 1.1 (a)). Tennekes [2] (1996) fez um esquema semelhante em que relacionou o peso e a velocidade de cruzeiro (figura 1.1 (b)).

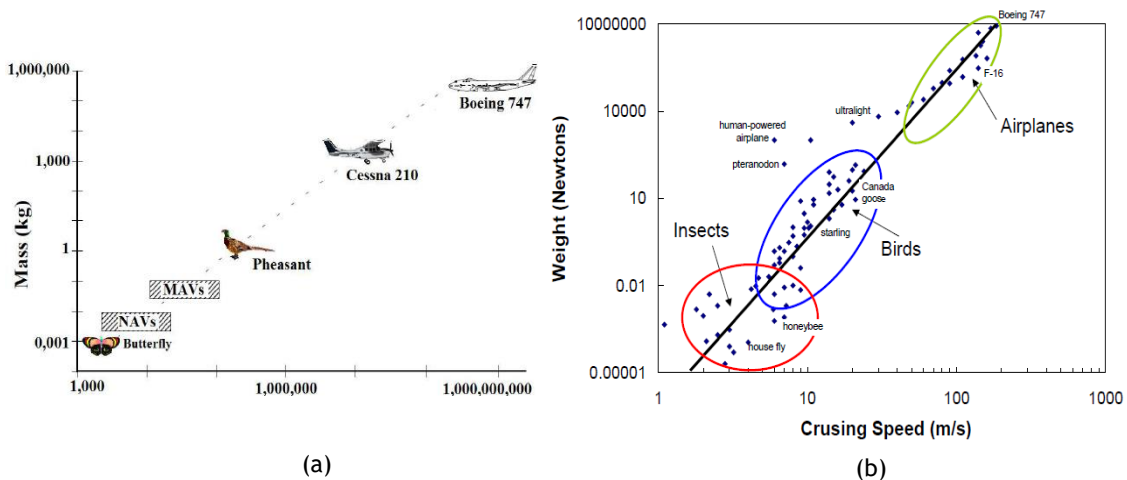


Figura 1.1. Classificação de veículos aéreos e seres vivos voadores segundo o seu peso; (a) Classificação pelo número de Reynolds [1]; (b) Relação com a velocidade de cruzeiro [2].

A figura 1.2 sugere as principais diferenças entre o voo tradicional e este novo conceito baseado na Natureza. As aeronaves tradicionais voam com asa de asa fixa a elevados números de Reynolds em que qualquer tipo de perturbação que possa resultar na transição de escoamento laminar a turbulento, é de evitar. Quer-se sobretudo escoamento laminar e evitar qualquer tipo de turbulência. A produção de impulso é feita nos motores enquanto as asas são responsáveis pela sustentação. No voo natural estas grandezas são produzidas ao mesmo tempo e pelas mesmas estruturas, as asas. O efeito de baixos números de Reynolds agrava-se com presença de escoamento perturbado, instável e transiente devido ao bater das asas, originando a elevados ângulos de ataque e complexos padrões de vorticidade emanados pelas asas. Verificam-se elevadas oscilações na produção de sustentação, impulso ou resistência ao avanço.

O movimento das asas pode dividir-se em movimento puramente translacional (do inglês, *pure plunge/heaving*), movimento de rotação (do inglês, *pitch*) ou ambos acoplados em que se chama apenas de movimento de batimento (do inglês, *flapping*). Todos estes fenómenos instáveis e variáveis com o tempo, fazem com que o estudo na área e compreensão de todos os fenómenos físicos seja ainda mais complexo.

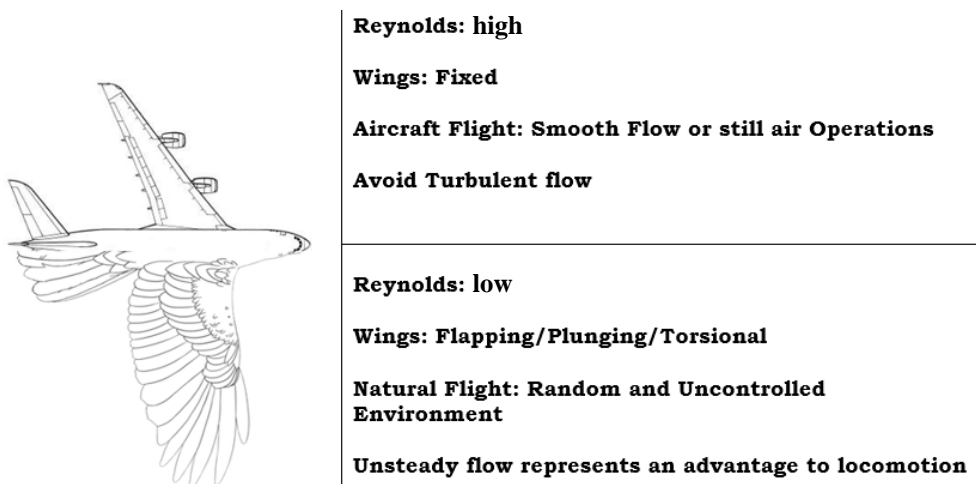


Figura 1.2. Diferenças principais entre o voo tradicional efetuado pelas aeronaves atuais e o voo natural [3].

A operação de MAV's e NAV's, tal como descrita anteriormente, é feita em condições de escoamento perturbado e transiente, daí a complexidade do voo e necessidade de um estudo aprofundado de todos os fenómenos adjacentes a esta condição. Por isso, uma metodologia de escoamento estacionário, não é apropriada, como comprova a figura 1.3.

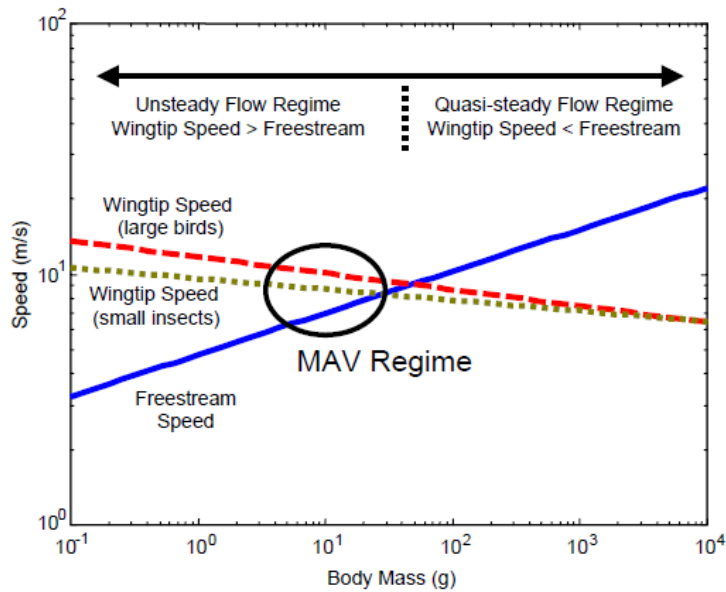


Figura 1.3. Esquema da velocidade na ponta da asa e velocidade de voo em função da massa apresentado por Ho et al. [3] (2003).

Existem várias revisões de estudos na área [3-7], desde avanços no conhecimento da aerodinâmica deste voo, validação de métodos numéricos, implementação de novos materiais e desenvolvimento de MAV's e NAV's. Ho et al. [3] (2003), por exemplo, fizeram um trabalho de revisão dos fenômenos de aerodinâmica instável e escoamento transiente onde também estudaram fenômenos aeroelásticos e estratégias de controlo do escoamento. Platzer et al. [4] (2008), fez um estudo de revisão de conhecimento adquirido no campo da aerodinâmica em asas batedoras. Ashraf et al. [7] (2009) fizeram diversos estudos numéricos num potencial veículo para elevadas altitudes e durações de missão chamado de veículo "HALE" (high-altitude long-endurance).

Os autores Knoller [8] (1909) e Betz [9] (1912) foram os primeiros a verificarem que a velocidade do ar relativo  $U_{eff}$  numa asa batidora, sofre alteração, criando um ângulo de ataque efetivo  $\alpha_{eff}$  na asa (figura 1.4). Este ângulo de ataque origina uma força normal perpendicular ao escoamento de aproximação. Esta força pode ser decomposta numa força perpendicular ao perfil, sendo chamada de força de sustentação, e uma força de impulso. A média temporal desta força é positiva. Devido aos primeiros autores que o verificaram, este efeito que leva à produção de impulso numa asa batidora é mais conhecido como efeito de Knoller-Betz.

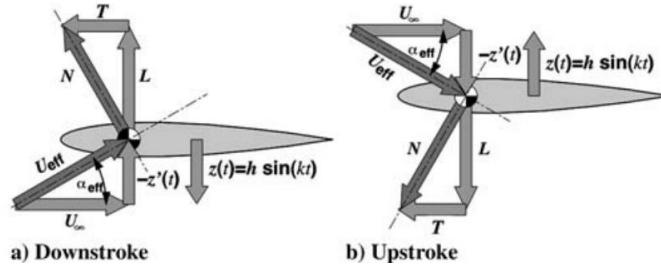


Figura 1.4. Esquema do efeito Knoller-Betz por Platzer et al. [4] (2008): (a) Movimento descendente; (b) Movimento ascendente.

Mais tarde Katzmayr [10] (1922) foi o primeiro a verificar experimentalmente o efeito Knoller-Betz quando mediu uma força de impulso numa asa estacionária sujeita a um escoamento oscilante. Taylor et al. [11] (2003) analisou e catalogou as frequências e amplitudes de batimento de várias espécies de pássaros, morcegos e insetos. Eles descobriram que estes animais voadores operam numa gama específica de número de Strouhal entre 0.2 e 0.4. Este número de Strouhal é definido na equação (1.1). A frequência de batimento é representada por  $f$ ,  $A$  corresponde à espessura da esteira e  $U_\infty$  é a velocidade do escoamento de aproximação. O parâmetro  $A$  é definido como o comprimento varrido pela ponta do perfil no movimento vertical de batimento. Taylor et al. [11] (2003) definiu  $A$  na equação (1.2) em que a envergadura da asa é representada por  $b$  e  $\theta$  é o ângulo do batimento da asa. A sua análise demonstra que o número de Strouhal, ou  $Sr$ , é um parâmetro muito importante na caracterização da eficiência do voo de animais voadores.

$$Sr = \frac{f A}{U_\infty} \quad (1.1)$$

$$A = b \sin(\theta/2) \quad (1.2)$$

A importância deste número adimensional já tinha sido reconhecida por Birmaum [12] (1924) que efetuou as primeiras simulações de asas batedoras em escoamento incompressível utilizando a teoria de escoamento potencial linear (do inglês, *linearized potential flow theory*). O mesmo autor reconheceu que o modelo Knoller-Betz omitia uma parte muito importante da física de uma asa batedora que estava relacionada com a libertação de vórtices no bordo de fuga. Ele mostrou que este tema é governado por uma relação entre duas velocidades características, o que o levou a desenvolver um novo parâmetro adimensional  $k$  a que chamou de frequência reduzida (equação 1.3). O parâmetro  $c$  diz respeito à corda do perfil.

$$k = \frac{2\pi f c}{U_\infty} \quad (1.3)$$

O produto  $f c$  é uma medida da velocidade de batimento da asa e, conseqüentemente, o parâmetro  $k$  é uma medida da velocidade de batimento em relação à velocidade de voo. Este

parâmetro  $k$  também pode ser visto como uma relação de dois comprimentos característicos como o comprimento da corda  $c$  do perfil e comprimento de onda da libertação de vórtices dado por  $U_\infty/2\pi f$ . Outro número adimensional é a amplitude de batimento adimensional  $h$  (equação 1.4). Este número caracteriza a amplitude de batimento  $a$  em relação à corda  $c$  da asa.

$$h = \frac{a}{c} \quad (1.4)$$

Segundo Platzer et al. [4], utilizando o parâmetro  $A$ , podemos relacionar o produto  $kh$  com o número de Strouhal (equação 1.5).

$$kh = 2\pi(a/A)Sr \quad (1.5)$$

No caso de um movimento de batimento puramente translacional e sem rotação do perfil, a razão  $\frac{a}{A} = 1/2$  pois a espessura da esteira  $A = 2a$ . Assim a equação (1.5) simplifica na equação (1.5.1).

$$kh = \pi Sr \quad (1.5.1)$$

Assim, as gamas de operação, dos animais voadores, descobertas por Taylor et al. [11] (2003) que correspondem a  $0.2 < Sr < 0.4$  são equivalentes a  $0.63 < kh < 1.26$ . O parâmetro  $kh$  também pode ser visto como uma classificação adimensional da velocidade de batimento da asa, pois  $k$  é uma medida da velocidade de batimento em relação à velocidade de voo e  $h$  é uma amplitude adimensional.

Segundo Platzer et al. [4] (2008) é possível relacionar o valor de  $kh$  com o ângulo de ataque efetivo criado por uma asa batidora é apresentado na equação (1.6). A partir desta equação pode-se verificar que, os valores de eficiências máximas descobertos por Taylor et al. [11] (2003), correspondem a ângulos de ataque efetivos entre  $32.2^\circ$  e  $51.7^\circ$ .

$$\alpha_{eff} = \arctan(kh) \quad (1.6)$$

Von Kármán et al. [13] (1934) apresentaram a primeira explicação para a produção de resistência ao avanço ou de impulso, consoante a observação, localização e orientação dos vórtices numa esteira. Na mesma altura Theodorsen [14] (1935) encontrou uma solução para o problema de um perfil em oscilação em escoamento potencial incompressível. Isto permitiu a Garrick [15] (1936) simular e prever a produção de impulso e eficiência propulsiva em perfis oscilatórios. Tal como a análise feita por Birmaum [12] (1924), foi necessário assumir a teoria das pequenas perturbações (do inglês, *small disturbance theory*), limitando a análise a placas planas a oscilar com pequena amplitude. Com o passar dos anos e a evolução das capacidades de cálculo dos computadores, esta limitação foi sendo retirada e passou a ser possível entrar

em conta com efeitos derivados da forma do perfil. Tais abordagens entram em conta com a distribuição de fontes e vórtices ao longo da superfície do perfil e são chamadas de métodos dos painéis (do inglês, *panel method*). Finalmente nos últimos anos tornou-se possível abandonar a teoria do fluido invíscido e alcançar soluções baseadas em equações de Navier-Stokes e Euler. Estas três abordagens básicas, isto é, teoria do escoamento potencial linear, método dos painéis, e soluções de Navier-Stokes, são descritas mais detalhadamente por Cebeci et al. [16] (2005).

De seguida são apresentadas as restantes equações, fundamentais para o entendimento das secções à frente apresentadas. A equação 1.7 diz respeito à pressão dinâmica  $q$ ,  $\rho$  é a massa específica do fluido e  $U$  a velocidade do escoamento. As equações 1.8 e 1.9 dizem respeito aos coeficientes de potência e tração, respetivamente, onde  $P$  é a potência requerida para mover a asa batidora e  $T$  é a tração produzida pela mesma asa. Devido ao termo “tração” não ser a melhor tradução do inglês *thrust* para a língua portuguesa [17], neste trabalho, sempre que não se trata de um coeficiente, ir-se-á referir sempre a “impulso” quando se trata desta grandeza. Por sua vez a equação 1.10 diz respeito à eficiência propulsiva da asa em voo, sendo calculada pela razão entre os coeficientes de tração e de potência. A equação 1.11 é uma outra maneira de chegar à igualdade apresentada pela equação 1.5.1.

$$q = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (1.7)$$

$$C_p = \frac{P}{q_\infty c} \quad (1.8)$$

$$C_t = \frac{T}{q_\infty c} \quad (1.9)$$

$$\eta = \frac{T U}{P} = \frac{C_t}{C_p} \quad (1.10)$$

$$kh = \frac{2\pi f a}{U_\infty} = \frac{f A}{U_\infty} \pi = \pi Sr \quad (1.11)$$

### 1.3.1 Padrões de vorticidade na esteira

Para uma melhor perceção e entendimento dos fenómenos físicos por detrás da produção de tração numa asa batidora, é necessário observar as mudanças nos padrões de vórtices libertados pela mesma, tal como apontado por Von Kármán et al. [13] (1934). O estudo dos padrões de vorticidade na esteira de uma asa batidora é sem dúvida o ponto de partida para percebermos melhor como funciona este mecanismo e de que maneira pode ser ou não útil ao ser humano. É, portanto, uma caracterização do regime de funcionamento da asa e uma das investigações base por detrás de asas batidoras.

Freymuth [18] (1988) fez ensaios experimentais em ar. Visualizou a estrada de Von Kármán invertida, indicativa de produção de uma força de impulso. Verificou isto para ambos os movimentos, puramente rotacional (do inglês, *pure pitch*) e puramente translacional (do inglês, *pure plunge*), da asa. Sugeriu, para trabalhos futuros, acoplar estes dois movimentos. Também visualizou o descolamento do escoamento no topo do perfil e no bordo de ataque que originou, em ambos os casos, aumento de resistência ao avanço e perda de força de impulso. Uma vez entendidos os fenômenos propulsivos básicos associados a uma asa batidora, sugeriu aumentar a complexidade incluindo efeitos tridimensionais e testando novos perfis, nomeadamente com curvatura. Mais tarde, o mesmo autor Freymuth [19] (1989) efetuou os estudos semelhantes, mas agora sem velocidade relativa do escoamento, em ar parado numa tentativa de reproduzir o voo pairado. Conseguiu demonstrar que combinando os movimentos de translação e rotação da asa, esta consegue produzir elevados coeficientes de tração nestes ambientes.

Por sua vez, Koochesfahani [20] (1989) estudou a forma da esteira de uma asa batidora, em água. Variou o tipo de movimento (sinusoidal/não-sinusoidal) da asa, da amplitude e da frequência de batimento. Provou que estas grandezas estão diretamente relacionadas com o tipo de esteira criada. Sugeriu um estudo mais aprofundado do tema através da existência de um controlo independente de todos estes parâmetros (forma do movimento, amplitude, frequência) para produção de diferentes esteiras. Identificou a esteira de resistência nula como sendo aquela em que os vórtices aparecem alinhados numa linha reta horizontal e deu o nome de frequência crítica, dependente da amplitude de batimento, para a frequência na qual a asa começa a produzir força de impulso. Para um tipo de esteira específica, identificou, na mesma esteira, características de jato e de resistência ao avanço.

Mais tarde, Jones et al. [21] (1998), em água, estudaram uma asa em movimento de pura translação. Testaram vários valores de  $kh$  e para  $kh = 0.29$ , visualizaram a esteira normal ou também Estrada de Von Kármán. Esta esteira é indicativa de produção de resistência ao avanço (figura 1.5 (a)). Verifica-se que os vórtices na fila de cima rodam no sentido horário e os de baixo no sentido anti-horário. Visualizaram também a Estrada de Von Kármán invertida, para um  $kh = 0.6$ , que indica a produção de impulso (figura 1.5 (b)). Nesta esteira os vórtices na fila de cima rodam no sentido anti-horário e os de baixo no sentido horário. Esta distribuição de vórtices cria um fluxo de fluido entre as duas filas, sendo isto característico de um perfil de jato. A oscilação da asa cria assim um jato e, como reação, uma força de impulso é exercida na asa. Mediram o perfil do jato usando LDV.

Ambas as esteiras representadas na figura 1.5 possuem vórtices que são caracterizados por, aos pares, terem uma forma parecida com cogumelos, sendo mesmo chamados de vórtices do tipo cogumelo (do inglês, *mushroomlike vortices*). Na figura 1.5 (a) é possível verificar que a orientação dos vórtices tipo cogumelo é apontada para montante do escoamento, sugerindo uma força neste sentido que representa a força de resistência característica desta esteira. Por

sua vez, na figura 1.5 (b) os cogumelos já apontam ligeiramente para jusante, indicando uma força neste sentido que representa a produção de impulso nesta esteira.

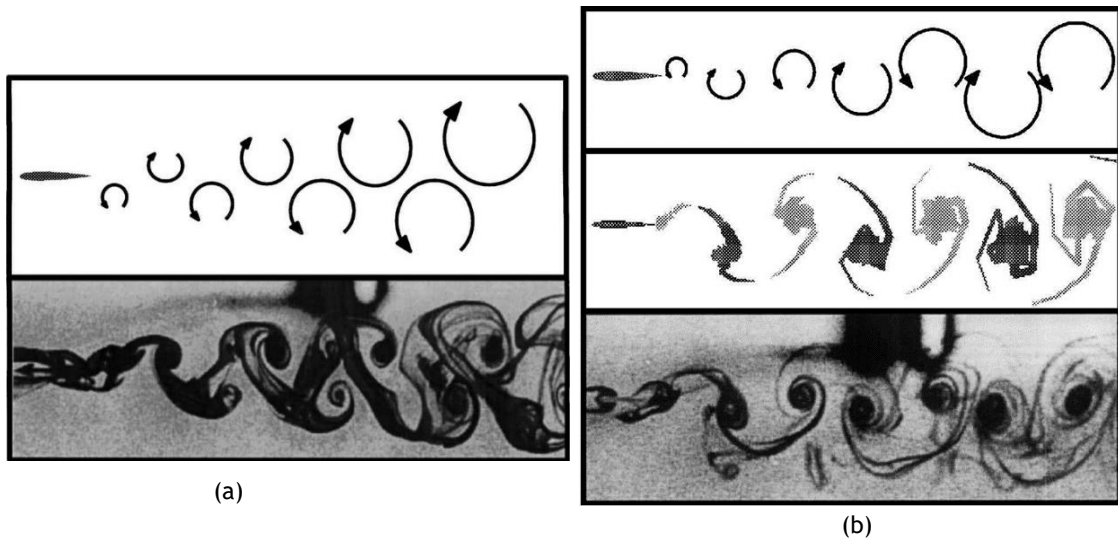


Figura 1.5. Padrões de esteira apresentados por Jones et al. [21] (1998); (a) Esteira indicativa de resistência ao avanço para  $kh = 0.29$ ; (b) Esteira indicativa de produção de impulso para um  $kh = 0.6$ .

Está claro que a transição da resistência ao avanço para produção de impulso se dá quando passado um certo valor de  $kh$ . Neste caso os autores identificaram esse valor como sendo um  $kh = 0.46$  (figura 1.6 (a)). Aqui a esteira da asa é representativa de uma força nula, ou seja, não existe resistência ao avanço nem produção de impulso. Neste caso os vórtices encontram-se todos alinhados numa única fila horizontal, havendo libertação de vórtices aos pares em que um gira no sentido horário e outro no sentido anti-horário. Assim os vórtices anulam-se aos pares e nenhuma força, seja de resistência ou impulso, é produzida. A orientação dos cogumelos também parece confirmar esta teoria, já que os mesmos apontam no sentido vertical, sugerindo a ausência de forças no sentido paralelo ao escoamento aproximação.

Para valores de  $kh = 1.5$ , identificaram a estrada defletida ou de modo duplo (do inglês, *dual-mode*) (figura 1.6 (b)). Esta esteira é característica de geração simultânea de impulso e sustentação e já tinha sido reportada por Bratt [22] (1953), apesar de o mesmo autor não ter comentado o caso. A alternância entre deflexão para cima ou para baixo da esteira parece estar relacionada com pequenas perturbações e esta alternância não é periódica. Neste caso, a orientação dos vórtices tipo cogumelo é bem evidente da força resultante produzida na esteira. A orientação dos mesmos no sentido jusante do escoamento e para cima, faz indicar a presença de uma força neste mesmo sentido, sendo decomposta numa força de sustentação (para cima) e de impulso (sentido jusante do escoamento).

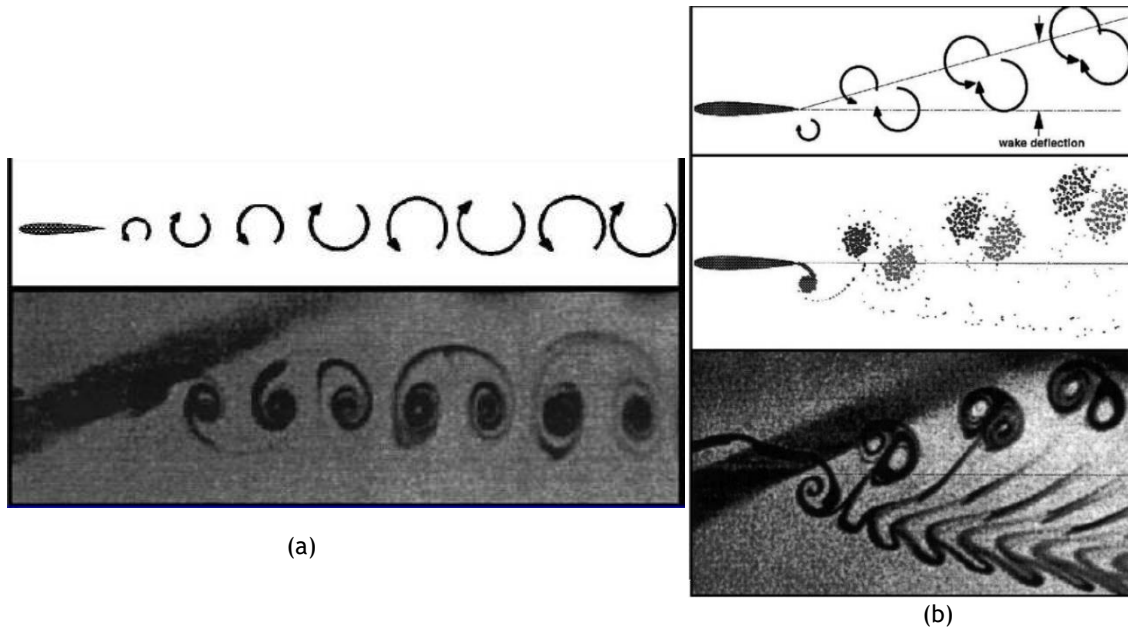


Figura 1.6. Padrões de esteira apresentados por Jones et al. [21] (1998); (a) Esteira indicativa de transição (força nula) para  $kh = 0.46$  ; (b) Esteira defletida ou de modo duplo para  $kh = 1.5$ .

Os mesmos autores compararam os resultados experimentais obtidos por métodos numéricos invíscidos como o método dos painéis, revelando concordância de uma maneira geral. Isto provou que estes fenômenos são maioritariamente de natureza invíscida, incluindo a esteira de modo duplo, e que o método utilizado é bastante preciso. Tanto para valores de  $kh$  inferiores a 0.3 ou superiores a 2, os métodos numéricos invíscidos revelaram algumas incoerências com os resultados, sugerindo que os fenômenos nestas condições são em grande parte derivados de efeitos viscosos.

Lai et al. [23] (1999), em água, aprofundaram o trabalho efetuado na área de asas em pura translação por Jones et al. [21] (1998). Verificaram que, para uma asa estacionária em escoamento uniforme, também existe a libertação de um padrão específico de vórtices, consequência da libertação natural de vórtices (do inglês, *Natural Vortex Shedding*), que forma a Estrada de Von Kármán. Este fenômeno também é associado às esteiras de corpos não-fuselados sujeitos a um escoamento com velocidade diferente de zero. Os autores mediram as velocidades médias das esteiras de asas batedoras em várias condições de funcionamento, através da técnica de LDV.

Para  $kh$  superiores a 0.25 obtiveram uma velocidade máxima na esteira superior à velocidade do escoamento de aproximação. Para  $kh$  superior a 0.36 obtiveram coeficientes de tração positivos, ao contrário de Jones et al. [21] (1998) que apenas identificaram esta condição para valores de  $kh$  superiores a 0.46. Apesar disto obtiveram resultados semelhantes, em geral, com os apresentados por Jones et al. [21] (1998), nomeadamente na esteira de modo duplo.

Estabeleceram uma margem de  $kh$  para a qual deixa de existir resistência por parte da asa e esta passa a criar uma força de impulso para a gama de  $0.2 \leq kh \leq 0.4$ .

Esquemmatizaram, de uma forma geral, os vários tipos de esteira segundo um valor  $kh$  (Figura 1.7 (c)). Inicialmente para um valor  $kh = 0$  em que perfil não oscila surge a estrada de Von Kármán. A orientação dos vórtices do tipo cogumelo aponta no sentido montante do escoamento, sugerindo força de resistência ao avanço.

Quando se aumenta o valor de  $kh$  para a gama  $0.1 \leq kh \leq 0.2$  existe a libertação de vórtices aos pares, por meio ciclo de oscilação, como esquematizado na figura 1.7 (a). Este tipo de libertação múltipla parece estar relacionada com o fenómeno de transição de resistência ao avanço para a produção de uma força de impulso. Lai et al. [23] (1999) explicou que cada par de vórtices é libertado pelo mesmo lado do perfil, intradorso ou extradorso, no tempo de meio ciclo e tem o mesmo sentido de rotação. Mais tarde, Young et al. [24] (2007), explicou este tipo de libertação como uma interação entre a libertação natural que origina a estrada de Von Kármán e a libertação de vórtices derivada do movimento de translação.

Para  $0.3 \leq kh \leq 1$ , Lai et al. [23] (1999) sugeriram a orientação verificada na figura 1.5 (b) em que os cogumelos deixam a sua orientação vertical e começam a apontar no sentido jusante do escoamento, indicando impulso. Esta libertação está esquematizada na figura 1.7 (b). Aqui a transição já se deu e a libertação de vórtices muda, apenas libertando um vórtice por cada meio ciclo de batimento. Os vórtices da fila de cima que giram no sentido anti-horário, são libertados pela superfície de baixo (intradorso) quando perfil chega ao topo de cima do movimento, enquanto que os vórtices da fila de baixo que rodam no sentido horário, são libertados pela superfície de cima (extradorso) quando o perfil chega à posição mais abaixo do seu movimento.

A situação de  $kh > 1$  referente ao modo duplo ou esteira defletida também já foi explicada através da figura 1.6 (b), pelos mesmos autores.

No geral, a figura 1.7 (c) deve ser considerada apenas como uma escala de evolução da esteira e os valores de  $kh$  apresentados devem ser considerados apenas como referência. Isto porque os mesmos autores, para valores iguais de  $kh$  obtiveram esteiras um pouco diferentes, sugerindo que os valores de  $k$  e  $h$  devem ser tidos em conta separadamente e não apenas como produto dos dois como  $kh$ . Koochesfahani [20] (1989) já tinha apontado esta possibilidade, mas não desenvolveu muito pois os seus estudos estavam numa fase muito inicial e não era possível tirar resultados muito conclusivos.

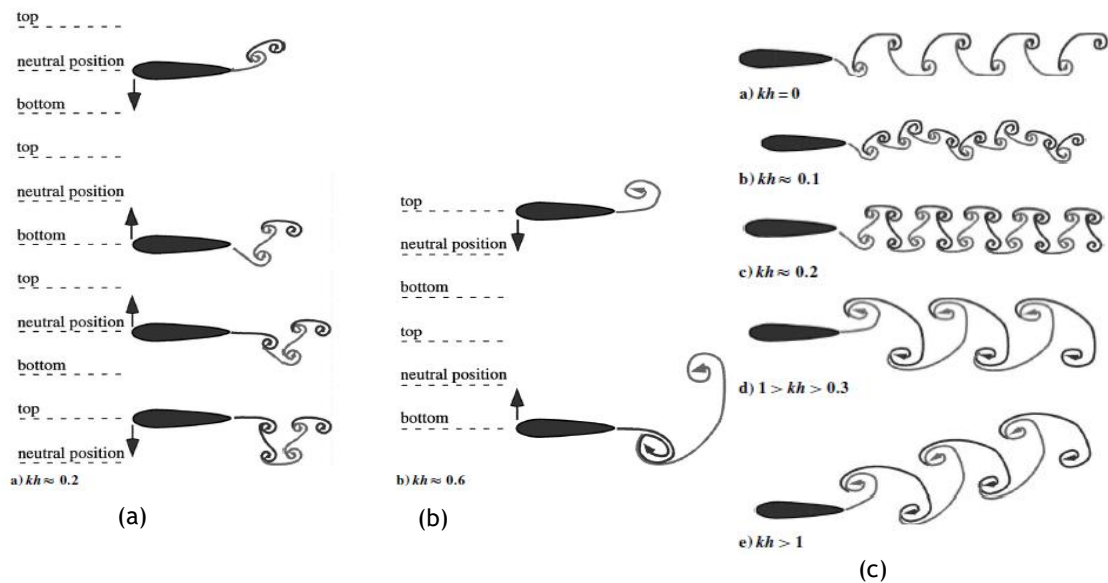


Figura 1.7. Esquemas de Lai et al. [23] (1999); (a) Libertação de vórtices aos pares em cada metade de ciclo; (b) Vários padrões de vorticidade segundo valores de  $kh$ .

A conclusão de que os valores adimensionais  $k$  e  $h$  devem ser tratados em separado e não apenas como  $kh$ , foi reforçada por Young et al. [25] (2004). Estes autores concluíram que este resultado é válido para valores de  $k$  menores do que 4. Eles reproduziram numericamente os resultados obtidos por Lai et al. [23] (1999), simulando escoamento turbulento e laminar para as mesmas condições. Em geral, foram as simulações laminares que apresentaram melhor concordância com os resultados obtidos experimentalmente por Lai et al. [23] (1999). A velocidade do escoamento teve pouca influência na estrutura da esteira, apesar de ser importante nas forças previstas pelo método.

Os resultados mais importantes foram obtidos na simulação das esteiras com libertação de vórtices aos pares. As simulações laminares e turbulentas mostraram diferentes esteiras devido ao diferente comportamento do escoamento no bordo de fuga. O modelo turbulento reduziu a extensão da região de separação no bordo de fuga, reduzindo a força da libertação natural de vórtices, transformando uma esteira com libertação de vórtices aos pares, numa esteira com um único vórtice por meio ciclo. A força aerodinâmica apenas diferiu quando há separação no bordo de ataque (esta separação foi simulada com sucesso devido ao código NS), sugerindo que estes efeitos são de maior importância na determinação de forças. Os efeitos no bordo de fuga do perfil têm influência na esteira, mas apresentam um efeito secundário nas forças aerodinâmicas.

Young et al. [26] (2001) continuaram as simulações de escoamento laminar e turbulento para uma asa em movimento puro translacional. Compararam o coeficiente de tração médio ( $C_{t\text{méd}}$ ) calculados com métodos NS com os resultados obtidos pelo código de Garrick [15] (1936) e obtiveram alguns desvios, sobretudo para valores de  $k$  superiores a 4, onde os efeitos viscosos

são mais pronunciados. Reforçaram a ideia apresentada por Young et al. [25] (2004) da dependência das esteiras nos parâmetros individuais de  $k$  e  $h$ , pois visualizaram diferentes esteiras para o mesmo  $kh$ . Por isso, sugeriram a existência de um fenômeno a que chamaram de “*phase-lock*” e que é responsável por esta diferença na esteira.

Mais tarde, os mesmos autores, Young et al. [24] (2007) responderam às questões colocadas por Young et al. [26] (2001). Reproduziram novamente os resultados experimentais de Lai et al. [23] (1999). Desenvolveram uma nova escala de classificação de esteiras com base nos vários regimes de libertação de vórtices em função do fenômeno de libertação dominante. Até aqui a única escala utilizada baseava-se apenas na identificação de esteiras com resistência ao avanço e esteiras com produção de força de impulso, sendo quase diretamente proporcional ao valor de  $kh$ .

Os autores explicaram a libertação natural (*natural shedding region*) em que domina a frequência de libertação natural de vórtices e os vórtices libertados são derivados desta condição. Descreveram também a libertação forçada (*forcing frequency*) (figura 1.7 (b)) em que domina a frequência de translação/batimento e o vórtice libertado por meio ciclo é derivado desta condição. Finalmente concluíram, mais uma vez, que os valores de  $k$  e  $h$  devem se considerados em separado. Isto porque existe uma zona específica no plano  $k - h$  em que há a interação entre a frequência de libertação natural e a frequência de translação/batimento da asa, chamada de zona harmónica (*harmonic region*). Esta interação origina a libertação de dois vórtices por meio ciclo (figura 1.7 (a)). Este fenômeno foi analogamente observado em cilindros oscilantes por Patnaik et al. [27] (1999).

Os vórtices emitidos pela asa descritos anteriormente também podem ser classificados segundo a fase de libertação e a zona do perfil onde ocorre a mesma. Kurtulus et al. [28] (2008) fizeram um estudo numérico e experimental onde identificaram os principais tipos de vórtices libertados numa asa batidora com movimento rotacional e translacional. Os resultados foram coincidentes com os estudos de Birch et al. [29] (2003) e Freymuth [19] (1989), que fizeram um estudo semelhante. Distinguíram 3 tipos principais de vórtices como o vórtice de bordo de ataque ou LEV (do inglês, *Leading-Edge Vortex*), vórtice translacional ou TV (do inglês, *Translational Vortex*) que é gerado no bordo de fuga ou também chamado de TEV (do inglês, *Trailing-Edge Vortex*) e finalmente o RSV (do inglês, *Rotational Stopping Vortex*) que também é gerado no bordo de fuga, mas durante a fase rotacional da asa (asas com movimento puramente translacional não apresentam este tipo de vórtice na esteira). Ainda distinguíram as diferentes fases do ciclo em que o mesmo tipo de vórtices era libertado, distinguindo assim algumas variações no mesmo tipo de vórtices. Os autores sugeriram um trabalho mais aprofundado na área para distinção das contribuições de forças aerodinâmicas na fase rotacional e translacional e medição das mesmas.

Mais recentemente, Kudela [30] (2015) fez simulações em 2D para números de Reynolds muito baixos ( $10^2$ ). Simulou um perfil elítico a oscilar com movimento de rotação e translação. Obteve várias imagens de vorticidade e linhas de corrente. Concluiu que todos os fenômenos dependem fortemente na vorticidade e esta origina forças imprevisíveis. Neste caso reconheceu a impossibilidade de voo estável. Obteve, por exemplo, imagens da esteira defletida (geração simultânea de tração e sustentação).

Andersen et al. [31] (2017) obtiveram resultados mais ou menos concordantes com Lai et al. [23] (1999) e Jones et al. [21] (1998) no que toca à transição de modos. Fizeram estudos experimentais em túnel de filme de sabão e reproduziram numericamente as esteiras de um perfil em puro movimento de rotação e outro em puro movimento de translação. Os resultados numéricos e experimentais foram comparados e revelaram concordância, confirmando a utilidade da técnica experimental em filme de sabão. Neste trabalho os autores utilizam uma nomenclatura ligeiramente diferente da apresentada inicialmente nesta dissertação. Para melhor compreensão do leitor, a nomenclatura deste artigo é apresentada abaixo pelas equações 1.12, 1.13 e 1.14. A letra  $D$  representa a espessura do perfil. A equação 1.12 representa o número de Strouhal baseado na espessura do perfil. A equação 1.13 representa a amplitude reduzida baseada na espessura do perfil. A equação 1.14 representa o número de Strouhal baseado na amplitude.

$$St_D = \frac{Df}{u_\infty} \quad (1.12)$$

$$A_D = \frac{2a}{D} \quad (1.13)$$

$$St_a = Sr = \frac{f2a}{u_\infty} = \frac{fA}{u_\infty} \quad (1.14)$$

Os autores mapearam, em função de  $A_D$  e  $St_D$ , os vários tipos de esteiras formadas no perfil em translação (Figura 1.8.). A linha tracejada representa um valor de  $St_a = 0.16$  ou  $kh = 0.5$ . A linha azul representa a transição de resistência ao avanço para produção de impulso e é quase constante para o mesmo valor de  $kh = 0.5$ . Para a classificação do tipo de esteira, os autores usaram a simbologia introduzida por Williamson et al. [32] (1988), onde  $mS + nP$  significa  $m$  vórtices simples e  $n$  pares de vórtices libertados por ciclo de oscilação. Assim, os sinais “+” representam esteiras do tipo  $2S + 2P$ , os círculos brancos representam esteiras de Von Kármán (resistência ao avanço), círculos cinzentos representam estradas de Von Kármán invertidas (impulso), os quadrados pretos esteiras  $2S$  com os vórtices alinhados (força nula), os triângulos cinzentos esteiras do tipo  $2P$  e os losangos brancos esteiras com vórtices periódicos com regiões embaçadas (do inglês, *periodic vortex wakes with blurry vorticity regions*). Os círculos amarelos dizem respeito a resultados práticos obtidos pelos autores.

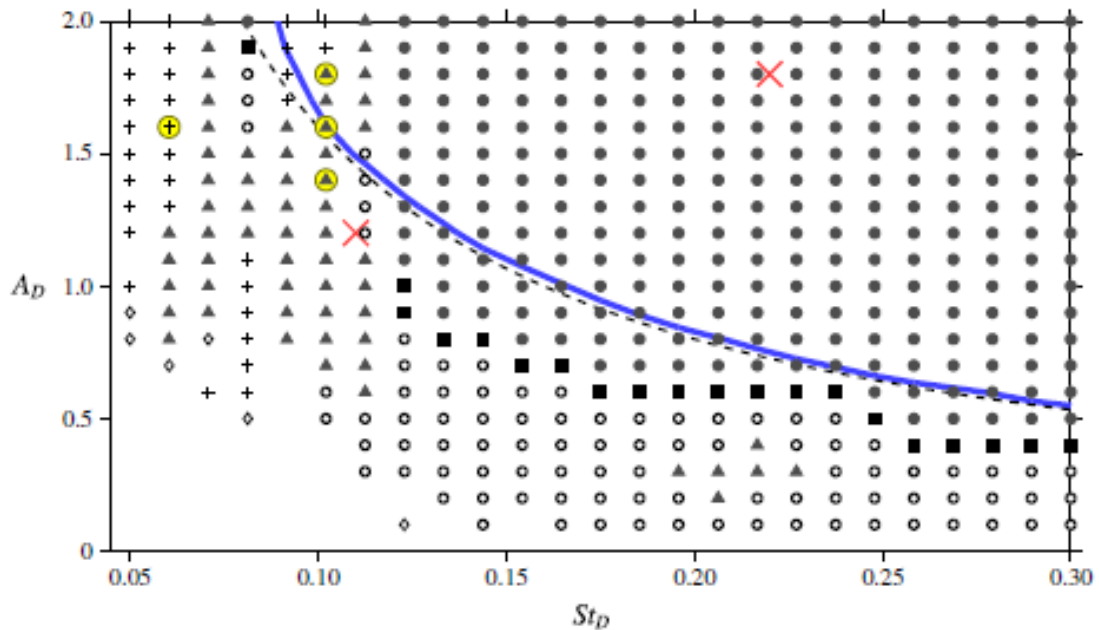


Figura 1.8. Mapa da esteira para o caso da asa em translação apresentado por Andersen et al. [31].

Os autores também mapearam para o caso do perfil em rotação e os resultados foram muito semelhantes aos apresentados acima pelo perfil em translação. A diferença está nos valores da transição de resistência ao avanço para produção de propulsão e na estrutura das esteiras a baixas frequências e elevadas amplitudes.

Os estudos envolvendo asas em pura rotação e em pura translação continuou com Zhang [33] (2017) que aprofundou os estudos de Andersen et al. [31] (2017). No caso da asa em movimento de rotação, o autor chegou à conclusão que as asas precisam de bater/oscilar 75% mais rápido para criar a mesma força de impulso, reforçando a tese de que uma asa em pura rotação não tem vantagem prática. Este movimento apenas é vantajoso quando acoplado ao movimento de translação. O autor sugere que para trabalhos futuros se tente determinar qual dos tipos de movimento gasta menos energia na criação de impulso, por exemplo. Também é sugerido que se estudem a interação entre várias asas batedoras e as suas esteiras.

A maioria dos trabalhos apresentados até aqui consideraram quase sempre o funcionamento das asas ou perfis sujeitos a escoamentos livres uniformes e nunca tiveram em conta a possibilidade da presença de um escoamento de corte (do inglês, *shear flow*) que pudesse interferir com a libertação dos vórtices e até mesmo a sua evolução na esteira. Recentemente, Yu et al. [34] (2018) estudou numericamente a influência deste tipo de escoamento no desenvolvimento dos vórtices gerados. Concluíram que para o movimento de uma asa em pura rotação a esteira é defletida e torna-se assimétrica. Para a asa em batimento puro translacional a interação entre LEV's e TEV's é afetada, assim como a sua evolução. O movimento oscilatório envolvendo rotação e translação da asa, neste tipo de escoamento, pode promover a geração instável de sustentação. De uma forma geral nem geração média de impulso nem a frequência

das estruturas aerodinâmicas foi afetada. Foram afetadas a sua amplitude, taxa de crescimento e padrões espaciais. Em certas condições do escoamento de corte, a sustentação produzida foi aumentada, assim como a força propulsiva.

Em forma de conclusão desta secção pode-se dizer a maioria dos trabalhos analisados apenas apresenta uma coerência muito geral nos resultados. Isto significa que a estrutura das esteiras é relativamente conhecida, mas os fenómenos não estão bem esclarecidos, nomeadamente o de transição, modo duplo, etc. As condições de funcionamento também parecem influenciar de uma forma muito complexa os resultados, havendo variados parâmetros a serem considerados, ao mesmo tempo, para o estudo das esteiras. Não há, por isso, uma gama específica em que se possa afirmar com certeza que um fenómeno conhecido ocorre, mas sim uma zona de funcionamento onde é provável a sua ocorrência, já que nos variados estudos foram reportados fenómenos idênticos, mas em condições ligeiramente diferentes.

De seguida, na tabela 1.1, está um resumo dos trabalhos mais importantes apresentados sobre o estudo de padrões de vorticidade na esteira.

Tabela 1.1 Resumo dos trabalhos efetuados sobre padrões de vorticidade na esteira de uma asa batidora.

Referência	Autores	Parâmetros testados	Experiências	Observações
[18]	Freymuth	Experimental em ar; Movimento: translação ou rotação; Identificador: Tetracloreto de titânio ( $TiCl_4$ ); Perfil: NACA 0015; $1\ 700 < Re < 12\ 000$ ; $0.07 < k < 2.7$ ; $0.2 < h < 1$ ; $0.07 < kh < 0.54$ ; $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ .	Visualizou a estrada de Von Kármán invertida no movimento puramente rotacional e no movimento puramente translacional. Visualizou o descolamento do escoamento no topo do perfil para $\alpha = 10^\circ$ e no bordo de ataque para $\alpha = 0^\circ$ .	O descolamento do escoamento, em ambos os casos, originou aumento da resistência ao avanço e conseqüente diminuição de impulso. No caso de elevados ângulos de ataque ou elevadas amplitudes para frequências demasiado baixas, existe o descolamento massivo no bordo de ataque que origina a perda total de impulso e ganho de resistência ao avanço.
[19]	Freymuth	Experimental em ar; Movimento: Translação e rotação; Identificador: Tetracloreto de titânio ( $TiCl_4$ ); Perfil: Placa plana; $Re = 1\ 700$ ; $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ .	Fez o estudo em ambiente de ar parado para simular o voo pairado.	Através da visualização da esteira, conseguiu mostrar que a asa alcança elevados coeficientes de tração no ambiente pairado. A esteira apresentou uma configuração de vórtices simples e característicos de um jato.
[20]	Koochesfahani	Experimental em água; Movimento: translação e rotação; Perfil: NACA 0012; Técnica: <i>Laser Doppler Velocimetry</i> (LDV); $Re = 12\ 000$ ; $k = 1.67$ ; $2^\circ < \alpha < 4^\circ$ .	Estudou a forma da esteira através do movimento sinusoidal/não-sinusoidal, amplitude e frequência. Identificou a esteira de força nula/transição como sendo aquela em que os vórtices aparecem alinhados numa linha reta. Identificou a existência de uma frequência “crítica” para o qual começa a produção de impulso e que depende da amplitude do movimento. Verificou a existência de um fluxo axial no seio dos vórtices da esteira.	A magnitude do fluxo axial reportado aumenta linearmente com frequência e amplitude e pensa-se que resulta da condição de não escorregamento reforçado pelas paredes laterais do canal. A frequência de formação de vórtices diminui com o aumento da amplitude. Para movimento não-sinusoidal de “S=38%” identificou, no mesmo escoamento, características de jato e esteira de resistência ao mesmo tempo.

Tabela 1.1 Resumo dos trabalhos efetuados sobre padrões de vorticidade na esteira de uma asa batidora (continuação).

Referência	Autores	Parâmetros testados	Experiências	Observações
[21]	Jones, Dohring e Platzer	Experimental (água) e numérico; Movimento: translação; Perfil: NACA 0012 e NACA 0015; Técnica: <i>Laser Doppler Velocimetry</i> (LDV); $3.6 < k < 12.3$ ; $0.08 < h < 0.12$ ; $0.29 < kh < 1.5$ .	Investigação da produção de impulso numa asa batidora. Testaram vários valores de $kh$ e visualizaram a esteira normal (indicativa de resistência ao avanço), invertida (impulso) e mista (transição). Compararam-se resultados numéricos e experimentais.	Para $kh$ superiores a 1, identificaram a estrada defletida ou de modo duplo, sinónimo de impulso e sustentação. A oscilação aleatória e não periódica da estrada defletida sugere que pequenos distúrbios estão na sua origem. Classificação destes fenómenos, para $0.3 < kh < 2$ como sobretudo invíscidos. Fora desta gama os efeitos viscosos têm mais influência.
[23]	Lai e Platzer	Experimental em água; Movimento: translação; Perfil: NACA 0012; Técnica: <i>Laser Doppler Velocimetry</i> (LDV); $20\ 000 < Re < 5\ 000\ 000$ ; $7.5 < k < 31.4$ ; $0.0125 < h < 0.1$ ; $0.098 < kh < 1.57$ .	Mediram as velocidades médias das esteiras das asas batidoras para várias condições. Visualizaram a libertação de vórtices natural para uma asa estacionária em escoamento uniforme. Relacionaram linearmente a velocidade máxima das mesmas com o valor $kh$ .	Explicaram a transição desde o regime de resistência ao avanço ( $kh < 0.2$ ) para a produção de impulso ( $kh > 0.4$ ). O coeficiente de tração aumenta com $kh$ e é positivo para $kh > 0.36$ . Esquematizaram o modo duplo para $kh > 1$ .
[24]	Young e Lai	Estudo numérico NS do experimental [23]; Movimento: translação; Perfil: NACA 0012; $Re = 20\ 000$ ; $1 < k < 10$ ; $0.0125 < h < 0.1$ ; $0.0025 < kh < 0.05$ .	Reproduziram numericamente as condições de Lai et al. [23] (1999). Explicaram a libertação múltipla de vórtices por meio ciclo como sendo o resultado da interação entre a frequência de libertação natural de um corpo não fuselado e a frequência de translação.	Identificaram os vários regimes de libertação de vórtices em função do fenómeno de libertação dominante. Libertação natural, zona harmónica e libertação forçada. A esteira foi dependente tanto de $k$ como $h$ para estes números de $Re$ . Esta dependência é esperada diminuir com o aumento de $Re$ .
[25]	Young e Lai	Estudo numérico NS do experimental [23]; Movimento: translação; Perfil: NACA 0012; $Re = 20\ 000$ ; $2 < k < 8$ ; $0.0125 < h < 0.075$ ; $0.05 < kh < 0.3$ .	Comparação com os estudos experimentais de Lai et al. [23]. Estudaram os tipos de esteira deixadas pelo perfil para diferentes velocidades, amplitudes, frequências e tipo de escoamento (turbulento ou laminar).	A velocidade do escoamento tem influência nas forças previstas apesar de ter pouca influência na estrutura da esteira. As simulações laminares e turbulentas mostram diferentes esteiras apesar das forças aerodinâmicas só diferirem quando há separação no bordo de ataque. Os efeitos do bordo de fuga apesar de terem influência na estrutura da esteira, apresentam um efeito secundário na sustentação e impulso.

Tabela 1.1 Resumo dos trabalhos efetuados sobre padrões de vorticidade na esteira de uma asa batidora (continuação).

Referência	Autores	Parâmetros testados	Experiências	Observações
[26]	Young e Lai	Simulação numérica NS do experimental [23]; Perfil: NACA 0012; Movimento: translação; $Re = 30\ 000$ ; $4 < k < 20$ ; $0.001 < h < 0.05$ .	Simularam o escoamento numa asa batidora para regime laminar e turbulento. Simularam a libertação de vórtices natural para uma asa estacionária, semelhante ao que acontece com corpos não fuselados. Explicaram o “ <i>phase-lock</i> ” como sendo uma interferência entre a frequência de translação da asa e a frequência de libertação natural de vórtices, que resulta na libertação de 2 vórtices por meio ciclo de movimento.	Verificaram que a simulação em regime laminar se aproximava mais dos resultados experimentais. Mostraram a libertação dupla e simples de vórtices em cada meio ciclo de batimento. Para o mesmo $kh$ obtiveram esteiras diferentes. Para os valores de $Re$ testados, a esteira é fortemente dependente dos valores de $k$ e $h$ .
[27]	Patnaik	Simulação numérica NS.	Verificou, em cilindros oscilantes, a interação entre a frequência de libertação natural e a frequência de translação do cilindro, que resulta na libertação múltipla de vórtices por ciclo de oscilação.	A identificação dos vórtices neste trabalho foi importante para compreender melhor o fenómeno de libertação múltipla de vórtices por meio ciclo de oscilação. Mais tarde, serviu de comparação para o mesmo fenómeno em asas batidoras.
[28]	Kurtulus, David e Farcy	Simulação numérica e experimental (PIV e folha de laser) em água; Técnica: Movimento: translação e rotação; Perfil: NACA 0012; $Re = 1\ 000$ .	Visualização e identificação dos principais tipos de vórtices formados numa asa batidora. Distinguiram os vários instantes em cada ciclo, onde se formam os mesmos tipos de vórtices.	Distinguiram-se 3 tipos principais de vórtices desde o LEV (leading edge vortex), TV (translational vortex) gerado no bordo de fuga e RSV (rotational stopping vortex) gerado no bordo de fuga durante a fase rotacional.
[30]	Kudela	Estudo numérico; Movimento: translação e rotação; $Re = 125$ .	Fizeram algumas simulações de um perfil elítico a oscilar.	Obtiveram, por exemplo, a esteira defletida (tração e sustentação).

Tabela 1.1 Resumo dos trabalhos efetuados sobre padrões de vorticidade na esteira de uma asa batidora (continuação).

Referência	Autores	Parâmetros testados	Experiências	Observações
[31]	Andersen, Bohr, Schnipper e Walther	Estudo experimental (túnel de filme de sabão) e numérico; Movimento: translação e rotação; $0.0 < Sr < 0.3$ .	Visualização e reprodução das esteiras de um perfil em rotação e translação. Fizeram gráficos onde mapearam, para os dois casos translação e rotação, os vários tipos de esteiras segundo a amplitude do movimento e $Sr$ .	Os dois gráficos ficaram semelhantes. A única diferença está no regime de transição e na estrutura da esteira a baixas frequências e elevadas amplitudes.
[32]	Williamson e Roshko	Estudo experimental;	Estudou a libertação de vórtices para a esteira de um cilindro a oscilar. Mapeou os vários tipos de esteiras para as diversas condições de operação.	Utilizou uma simbologia do tipo $mS+nP$ para classificar as esteiras em que $m$ significa o número de vórtices simples e $n$ o número de pares de vórtices libertados por ciclo de oscilação.
[33]	Zhang	Estudo experimental (túnel de filme de sabão) e numérico; Movimento: translação e rotação.	Aprofundou os estudos de Andersen et al. [31] (2017).	Uma asa batidora em movimento de rotação precisa de bater a uma frequência 75% mais elevada do que uma em movimento de translação para criar impulso.
[34]	Yu, Wang B., Wang Z. e Farokhi	Estudo numérico NS; Movimento: translação ou rotação; Perfil: NACA 0012.	São estudadas as estruturas e de vários tipos de vórtices, assim como a sua evolução, em asas batidoras (rotação e translação) sujeitas a escoamentos não uniformes (do inglês, <i>shear flow</i> ) e com uma barreira sólida.	No movimento de rotação a esteira é defletida e torna-se assimétrica. O movimento de translação, afeta a interação dos LEV's e TEV's. A frequência das estruturas não é alterada, mas sim a sua amplitude, taxa de crescimento e padrões espaciais das mesmas. Concluiu-se que para a mesma quantidade de sustentação, uma asa batidora perante um escoamento não uniforme e negativo, gera maior impulso do que uma com ângulo de ataque positivo num escoamento uniforme.

### 1.3.2 Eficiência propulsiva de uma asa batidora

Os variados estudos sugerem diferenças significativas no comportamento das asas para números de Reynolds diferentes. Young et al. [35] (2007) estudaram, numericamente, os parâmetros diretamente relacionados com a eficiência propulsiva numa asa batidora em rotação e translação, para baixos números de Reynolds. Calcularam os coeficientes médios de pressão, tração e encontraram uma eficiência propulsiva máxima para  $kh = 0.4$ ,  $Sr = 0.127$ , ou seja, um ângulo de ataque induzido de 22 graus. Embora este pico de eficiência consiga ser calculado através de métodos invíscidos, descobriram que é significativamente alterado quando há libertação de LEV's e resistência viscosa a baixos números de Strouhal. A baixos valores do número de Strouhal, os efeitos viscosos são mais pronunciados e a eficiência desce. Tal como Young et al. [25] (2004), também obtiveram problemas nas previsões numéricas quando existe libertação de LEV's e separação do escoamento. Estes problemas ocorrem devido a considerações invíscidas nos métodos numéricos utilizados. Esta separação que origina os LEV's, mostrou-se ser maioritariamente controlada pela frequência e tende a reduzir a eficiência propulsiva tanto a baixos como a elevados números de Strouhal. Segundo Platzer et al. [4] (2008), para elevados valores de Reynolds, os LEV's são muito importantes na produção de impulso, embora para valores baixos a sua importância seja ultrapassada pela libertação dos TEV's sob a forma de estrada de Von Kármán invertida. Os seus resultados mostram que, para um certo  $kh$ , é mais benéfico operar a elevados  $k$  e baixos  $h$  para minimizar o efeito dos LEV's. Na verdade, os estudos de Tuncer et al [36] (2005) reforçaram esta teoria quando, para baixos números de Reynolds, a libertação de LEV's leva à produção máxima de impulso, enquanto que apenas quando há menor libertação destes vórtices, é alcançada a máxima eficiência.

Young et al. [35] (2007) em geral, obtiveram eficiências propulsivas elevadas para a gama de  $0.1 < Sr < 0.4$ , confirmando as observações feitas por Taylor et al. [11] (2003) em várias espécies de seres vivos. Segundo Platzer et al. [4] (2008), estes picos de eficiência parecem estar relacionados com a zona de entrada em perda dinâmica da asa. Nesta zona, antes da separação do escoamento, parece haver um pico na produção de impulso e eficiência propulsiva. Depois deste pico, a separação do escoamento faz com que estes valores desçam repentinamente. Assim, a produção máxima de tração e eficiência propulsiva ocorre perto da zona de perda dinâmica da asa. Também concluíram que o número de Strouhal/ $kh$ , sozinho, volta a ser insuficiente para caracterizar a eficiência propulsiva e sugeriram mais trabalhos semelhantes na área, cobrindo outros valores de  $k$  e  $h$  e assim poder tirar conclusões mais gerais sobre todos os efeitos envolvidos.

A otimização de sustentação, impulso e eficiência é, por todas estas razões, um tema controverso envolvendo muitas variáveis. Zakaria et al. [37] (2017) estudaram o movimento puro translacional de uma asa batidora, com o objetivo de modelar uma gama de operação com maximização da sustentação produzida. Variaram a frequência assim como o ângulo de

ataque. Para valores entre os  $0^\circ$  e  $10^\circ$  as respostas de sustentação obtidas correspondem ao valor esperado na literatura desenvolvidos por Theodorsen [14] (1935). Acima desses ângulos há respostas não lineares e um novo modelo numérico foi desenvolvido com o auxílio de resultados obtidos em testes experimentais num túnel de água. Mediram as cargas na asa para todas as condições e assim construíram respostas de maximização de sustentação na asa. Esta maximização ocorreu para um valor de  $kh = 0.7$  e está relacionado com a libertação de um LEV, velocidade de propagação do seu núcleo no extradorso e capacidade de se manter “colado” ao mesmo. Esta condição foi explicada e visualizada em ensaios num túnel de água e daí explicaram todo o processo que leva ao aumento de sustentação por parte do LEV. O modelo desenvolvido tem em vista a sua implementação para uma rápida e eficiente resposta controlo de MAV's em manobras de grande amplitude.

A maior parte dos estudos envolvidos neste tema apenas levam em conta efeitos e comportamentos do escoamento a 2D. Embora seja do conhecimento dos cientistas que os efeitos 3D são fundamentais no ramo da aerodinâmica, só nos últimos tempos com a evolução tecnológica, foi possível introduzir métodos numéricos baseados nas equações de Euler e Navier-Stokes e assim efetuar estudos a 3D de asas batedoras. Platzer et al. [4] (2008) simularam a condição obtida por Lai et al. [23] (1999) e obtiveram a imagem representada na Figura 1.9 (a). De fato, Hall et al. [38] (2001) também efetuaram estudos 3D de uma asa batidora retangular e calcularam as condições de funcionamento em que a potência necessária fosse mínima. Ao chegarem a gamas de  $0.2 < Sr < 0.4$ , confirmaram os variados estudos apresentados como Taylor et al. [11] (2003) e Young et al. [35] (2007) que parecem estar em acordo quanto aos valores de eficiências propulsivas máximas

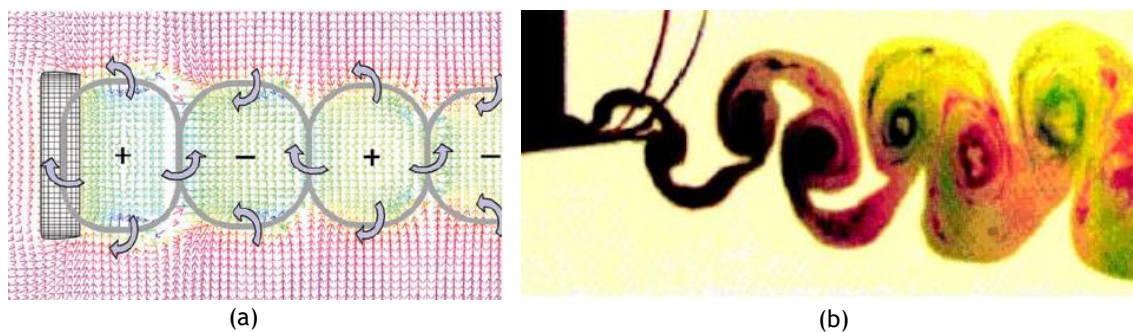


Figura 1.9. Esteira de uma asa um movimento puro translacional com  $kh = 0.4$ ; (a) Simulação 3D vista de cima, Platzer et al. [4] (2008); (b) Resultado experimental obtido por Lai et al. [23] (1999).

Também é conhecido que a estrutura do escoamento numa asa batidora com envergadura finita é muito mais complexo do que as simulações a 2D mostram. Parker et al. [39] (2005) confirmou este fato com simulações numéricas e apontou a libertação de vórtices de ponta asa como sendo o fator principal que interage e modifica a esteira normal esperada para uma asa 2D. Koochesfahani [20] (1989) nos seus estudos experimentais tinha reportado um fluxo axial nos

núcleos nos vórtices da esteira que estaria proporcionalmente relacionado com a amplitude e frequência de batimento da asa, mas não fez mais comentários devido à necessidade de um trabalho futuro mais aprofundado.

Outro grande tema acerca de asas batedoras é o estudo da influência da flexibilidade das mesmas no seu desempenho. Embora haja um crescente interesse em estudar a física por detrás de batimento em asas flexíveis, o desenvolvimento atual está fortemente restringido pela ainda falta de conhecimento nesta área. Akkala et al. [40] (2015) testaram e compararam experimentalmente, em água, duas asas flexíveis e uma rígida com o objetivo de estudar a influência na esteira. Variaram frequência e amplitude e concluíram que, embora para baixas frequências o comportamento das asas fosse semelhante, nos regimes acima a rigidez afetou o comportamento do escoamento. Por exemplo, a libertação dos LEV's foi retardada no caso das asas flexíveis, muito devido à flexibilidade das mesmas ao longo da sua corda, o que dificultou o descolamento do escoamento. Por sua vez os TEV's mostraram-se independentes da rigidez, sugerindo uma importância apenas do bordo de fuga na produção dos mesmos. No caso específico da asa rígida verificaram-se os maiores valores nos coeficientes de sustentação, mas também de potência, sugerindo uma maior energia necessária para mover a asa. No caso das asas flexíveis os coeficientes de tração foram mais elevados, tornando-as mais eficientes. Todos estes coeficientes mostraram-se dependentes do número de Strouhal nas asas flexíveis enquanto que na asa rígida mostraram-se dependentes apenas da amplitude de batimento.

No voo proporcionado por asas batedoras, vários parâmetros, nomeadamente a eficiência, são dependentes de efeitos de separação como provado por Zakaria et al. [37] (2017) e Young et al. [35] (2007), no caso dos LEV's e por Young et al. [25] (2004) de uma maneira geral. Muito semelhantemente ao concluído por Akkala et al. [40] (2015) no que toca ao retardamento da separação do escoamento no bordo de ataque, Geissler et al. [41] (2017) fizeram um estudo numérico com o objetivo de desenvolver técnicas de controlo da separação numa asa batedora em voo horizontal. Compararam o comportamento de uma asa com perfil fixo com uma em que o perfil deforma a 25% da corda em cerca de  $10^\circ$  e que origina uma deformação no bordo de ataque. Verificaram a formação dos vórtices esperados tanto no extradorso como no intradorso para a primeira asa. O aumento de sustentação na asa derivado da formação de LEV's já tinha sido reportado por Zakaria et al. [37] (2017) e explicado por Young et al. [42] (2014). Este fenómeno acontece devido à presença de um núcleo de baixa pressão no LEV que, depois de se formar, descola da superfície da asa. Isto origina uma perda repentina na sustentação e aumento da resistência ao avanço. No caso da asa deformada, no estudo de Geissler et al. [41] (2017), o bordo de ataque deformou para cima no movimento ascendente da asa e para baixo no movimento descendente. Assim, a formação de LEV's foi controlada e o descolamento do escoamento foi evitado. Conseguiram-se assim manter níveis de eficiência propulsiva mais elevados, sobretudo para maiores valores de amplitudes onde, geralmente, no caso da primeira asa, esta perde eficiência. Segundo os mesmos autores, para uma elevada eficiência ser

mantida, é de evitar a formação e libertação deste tipo de vórtices, conclusão apontada uns anos antes por Young et al. [35] (2007). O problema colocado por estes autores, e parcialmente estudado por Shyy et al. [43] (2007), reside no fato de muitos insetos e morcegos terem um perfil de asa quase reto, fazendo lembrar uma placa plana. Nestes casos o desenvolvimento e libertação destes vórtices é inevitável. No entanto, estes animais são ainda assim capazes de manter elevadas eficiências no voo.

Outra maneira de controlar a perda foi estudado por Câmara et al. [44] (2013) através da simulação numérica com uma asa de bordo de ataque em forma sinusoidal. Este tipo de bordo de ataque vê-se nas barbatanas da baleia de bossa ou baleia jubarte (*Megaptera novaeangliae*). Os autores compararam os resultados obtidos para esta geometria com os de uma asa normal infinita e conseguiram atrasar a perda e diminuir a resistência ao avanço para ângulos de ataque maiores. Como consequência, a sustentação diminuiu e a resistência aumentou a incidências menores. Esta forma de asa é inspirada no que se vê, sobretudo, em animais marinhos onde as suas barbatanas são utilizadas a elevadíssimos ângulos de ataque. Mais tarde, Delgado [45] (2018), estudou o mesmo problema, mas já com a implementação de um sistema de micro recolha de energia, tendo em vista um futuro sistema de controlo de perda híbrido. O mesmo concluiu que a implementação deste tipo de bordo de ataque melhorou o comportamento em perda e concluiu a viabilidade do sistema de recolha de energia.

Xie et al. [46] (2017) investigaram os mecanismos aerodinâmicos consequentes da formação de gelo em asas. A aplicação do trabalho está relacionada com a otimização de funcionamento de, por exemplo, turbinas eólicas. Compararam os coeficientes de resistência e sustentação derivados da formação de gelo numa asa batidora e numa asa estática. O caso específico da formação de gelo pode ser generalizado com a presença de qualquer outro “acessório” nas asas. No geral, a formação de gelo no bordo de ataque foi a que mais alterou as condições de funcionamento da asa, nomeadamente a razão de planeio. No caso de formação no bordo de fuga, o gelo afetou sobretudo a asa batidora, degradando o seu desempenho. De uma maneira geral mostrou-se que o gelo, ou outro qualquer acessório nestas condições, tem impacto negativo no desempenho da mesma, seja asa estacionária ou batidora.

Em modo de conclusão desta secção pode-se afirmar que existe uma zona de voo, nomeadamente uma gama de  $kh$  e  $Sr$  em que o voo tem eficiência máxima. Mas, novamente, esta conclusão parece não ser linear em todos os casos. Os parâmetros individuais têm elevada influência nas condições de voo, assim como na formação, evolução e libertação de vórtices. Cada caso é um caso especial, não se podendo tirar uma conclusão generalizada em relação a um ou outro fenómeno.

De seguida, na tabela 1.2, está um resumo dos trabalhos mais importantes apresentados sobre o estudo de coeficientes em asas batidoras

Tabela 1.2 Resumo dos trabalhos efetuados sobre o estudo de coeficientes em asas batedoras.

Referência	Autores	Parâmetros testados	Experiências	Observações
[35]	Young e Lai	Estudo numérico NS; Movimento: translação e rotação; Perfil: NACA 0012; $20\ 000 < Re < 40\ 000$ ; $0.175 < h < 0.75$ ; $0 < k < 6.3$ ; $0 < Sr < 0.6$ .	Testaram-se os coeficientes médios de pressão e de tração, assim como a eficiência propulsiva em função de $Sr$ , para vários métodos numéricos. Reportaram problemas em algumas previsões numéricas devido à libertação de vórtices no bordo de ataque a baixos $Sr$ .	A separação no bordo de ataque é maioritariamente controlada pela frequência e tende a reduzir a eficiência propulsiva. Pico de eficiência para $0.1 < Sr < 0.4$ e este parâmetro, sozinho, é insuficiente para caracterizar a eficiência propulsiva. A magnitude e localização do pico de eficiência é altamente dependente do tipo de movimento.
[37]	Zakaria, Taha e Hajj	Estudo experimental (ar e água) e otimização numérica; Movimento: translação; Perfil: Naca 0012; $Re = 80\ 000$ ; $0.15 < k < 0.95$ ; $0^\circ \leq \alpha_{med} \leq 65^\circ$	Estudaram o movimento puramente translacional na asa em ar, assim como variações no ângulo de ataque e diferentes frequências. Mediram-se as cargas na asa para todas estas condições e construíram-se assim respostas de maximização de sustentação na asa.	Para ângulos de ataque $0^\circ < \alpha < 10^\circ$ as respostas de sustentação obtidas correspondem ao valor esperado na literatura. Para gamas de $15^\circ < \alpha < 40^\circ$ , a resposta da sustentação é não linear. Otimizou-se um modelo numérico de maximização de sustentação segundo os resultados obtidos.
[40]	Akkala, Panah e Buchholz	Estudo experimental em água (PIV) Movimento: translação $Re = 8\ 500-10\ 000$ $0.2 < Sr < 0.6$ ; $0.2 < h < 0.5$ ; $1 < k < 2.5$ .	Testaram-se duas asas flexíveis e uma rígida para várias frequências reduzidas e números de Strouhal. Mediram-se os coeficientes de tração, potência e sustentação.	Para baixas frequências o comportamento foi semelhante. O "TEV" mostrou-se independente da rigidez. A libertação do "LEV" foi retardada para o caso das asas flexíveis. Nas asas flexíveis os valores de tração, potência e sustentação mostraram-se dependentes do número de Strouhal enquanto que para a asa rígida apenas a amplitude influenciou. Os maiores de valores do coeficiente de tração foram para as asas flexíveis, tornando-as mais eficientes enquanto que os maiores coeficientes de sustentação e potência se verificaram para a asa rígida. Verificaram um pico de eficiência para $0,25 < Sr < 0,35$ .

Tabela 1.2 Resumo dos trabalhos efetuados sobre o estudo de coeficientes em asas batedoras (continuação).

Referência	Autores	Parâmetros testados	Experiências	Observações
[41]	Geisler e van der Wall	Simulação numérica; Movimento: translação e rotação; $Re = 10^5$ .	Assemelharam o comportamento destes perfis ao de uma pá de helicóptero em voo horizontal em que também há formação de um LEV que inicialmente aumenta a sustentação, mas quando descola do perfil aumenta a resistência. Estudaram uma asa batidora em condição de voo horizontal. Compararam a asa rígida com uma deformada no bordo de ataque em cerca de 10 graus e a 25% da corda.	Verificaram a formação de vórtices tanto no intradorso como extradorso para o caso da asa rígida. Com a asa deformada foi possível controlar a formação de vórtices a partir do bordo de ataque e evitar o descolamento do escoamento. Assim, conseguiram-se manter níveis de eficiência propulsiva elevados, sobretudo para amplitudes maiores.
[44]	Câmara e Sousa	Estudo numérico; $Re = 160\ 000$ .	Estudaram a entrada em perda numa asa com o bordo de ataque sinusoidal.	Conseguiram atrasar a perda para ângulos de ataque maiores com o problema de reduzir a sustentação e aumentar o arrasto a ângulos menores.
[45]	Delgado	Estudo experimental em ar (PIV) e numérico; $70\ 000 < Re < 140\ 000$ .	Testou vários modelos de asas com bordo de ataque sinusoidal com diferentes geometrias. Para medição de forças utilizou uma balança aerodinâmica. Também testou a implementação de um sistema de micro recolha de energia, tendo em vista um futuro sistema de controlo de perda híbrido.	A implementação do bordo de ataque sinusoidal melhorou significativamente o comportamento em perda dos modelos testados. Também concluiu a viabilidade da implementação de um sistema piezoelétrico de micro recolha de energia.
[46]	Xie, Zhang, Luo e Huang	Estudo Simulação numérica; Movimento: translação e rotação; $Re = 135\ 000$ .	Investigação dos mecanismos aerodinâmicos numa asa estática e batidora sob condições de formação de gelo. Comparação dos dois casos. Aplicação prática para eólicas e sua performance em ambientes mais frios.	Maior tempo de formação de gelo e formação do mesmo no bordo de ataque, são as condições que mais influenciam a performance. O gelo no bordo de fuga causa uma diminuição de performance mais acentuada no caso da asa batidora. De uma maneira geral, a formação de gelo tem impacto negativo na performance da asa.

### 1.3.3 Estudos em pássaros, insetos e outros animais

O estudo dos seres vivos que se deslocam num fluido, como por exemplo ar (voadores) ou água (nadadores), tem o intuito de adquirir um maior conhecimento nestas áreas e a sua consequente aplicação no desenvolvimento de MAV's e NAV's.

Os insetos são de longe a espécie mais bem-sucedida a colonizar o planeta Terra, muito devido à sua elevada capacidade de adaptação e uma elevada capacidade de voo que resultou de 300 milhões de anos de evolução. Estes operam a baixos números de Reynolds, numa gama entre  $100 < Re < 10\,000$  (mosca doméstica,  $Re = 120$ ; abelha,  $Re = 1\,000$ ; borboleta,  $Re = 3\,900$ ). Os insetos variam peso, tamanho e estrutura, adaptando-se ao tipo de voo que mais beneficiam. Por exemplo, segundo Barata et al. [1] (2015), que catalogaram várias espécies de insetos, os insetos mais pequenos batem as asas mais rápido, podendo atingir frequências superiores a  $400\text{ Hz}$  na Ordem *Diptera*. Já os insetos maiores na Ordem *Odonata* atingem uma frequência máxima de  $40\text{ Hz}$ . Neste estudo fizeram uma análise anatómica tendo em vista as estruturas envolvidas no voo. Apresentaram os músculos utilizados no bater das asas, a sua disposição anatómica, assim como articulações entre o tórax e as asas que permitem perceber todo o processo de batimento das asas e a razão pela qual estes seres vivos conseguem voar tão bem. Todos os insetos possuem uma elevada manobrabilidade, muito superior à demonstrada por qualquer veículo já construído pelo homem. Os mesmos autores, distinguiram e explicaram o movimento das asas nas várias fases do voo. No geral o movimento do batimento das asas é bastante complexo, dividindo em duas fases translacionais (movimento ascendente e descendente) e duas fases rotacionais (supinação e pronação), descrevendo um movimento total da asa como um “8” (oito) deitado. Geralmente, há produção de sustentação e impulso em todo o processo apesar de, em alguns casos, o movimento que gera maior força/potência é a batida para baixo e para a frente, ao mesmo tempo (do inglês, *forward-downstroke*). O ajuste deste movimento geral é feito para cada condição em específico como por exemplo voo pairado, volta, voo planado, voo lateral, acelerações, voo para trás e até mesmo voo em condições climáticas adversas como forte chuva ou vento. Analisaram o trabalho efetuado por Truong et al. [47] (2012) e Aono et al. [48] (2013) e fizeram uma explicação dos vários tipos de vórtices gerados pelas asas dos insetos.

Ao contrário das aeronaves, os insetos têm as asas rugosas e com formas complexas que, juntamente com os movimentos das asas, lhes oferecem uma elevada capacidade de manobra. Barata et al. [49] (2016) reviram a anatomia da asa e descreveram aprofundadamente as asas dos insetos a nível de membrana, veias e classificaram a rigidez e elasticidade das mesmas como anisotrópica. Investigaram, por exemplo, a variação de espessura nas asas da libélula que, assim como a sua venação, aumenta da ponta para a raiz. Isto permite uma flexão da asa e a sua deformação, principalmente causada por forças de inércias e aerodinâmicas. Concluíram, que de uma maneira geral, não existe um controlo direto por parte dos insetos na

rigidez e forma das suas asas durante o voo. A sua forma e materiais é que determinam como se comporta em resposta às forças externas, uma vez que o movimento das asas é muito complexo. Esta é uma área que ainda necessita de grande investigação, nomeadamente na produção de materiais elásticos com propriedades semelhantes aos existentes nas asas de seres vivos voadores. Este tema foi mais tarde abordado por Lee et al. [50] (2018), que simularam numericamente a estrutura complexa e de flexibilidade variável das asas dos insetos. Analisaram a sua eficiência em voo pairado e voo de cruzeiro. Concluíram, de uma forma semelhante a Akkala et al. [40] (2015), que a flexibilidade/elasticidade da asa aumentam a geração de tração, tornando as asas mais eficientes. Concluíram também que nestas asas a produção de sustentação é maior. Provaram que estas duas grandezas diminuem com o aumento da razão ao avanço.

Alguns insetos parecem ter três fases distintas de voo. Dickinson et al [51] (1999) classificou a primeira como sendo a “*perda retardada*” (do inglês, *delayed stall*) em que a asa varre o ar com um ângulo de ataque elevado, depois a “*sustentação rotacional*” (do inglês, *rotational lift*) que significa um aumento do ângulo de ataque no final da batida, gerando sustentação extra e por fim a “*captura de esteira*” (do inglês, *wake capture*) em que a asa aproveita alguma energia contida sob a forma de turbilhões na esteira deixada para trás na última batida, recuperando assim alguma energia. É largamente aceite o conceito, hoje em dia, de que os insetos tiram partido do batimento a elevados ângulos de ataque e conseqüente descolamento do escoamento nas asas que aumenta a criação de vórtices nos regimes instáveis de escoamento. Conclui-se assim, que o LEV é o principal mecanismo de geração de sustentação utilizado pela maioria dos insetos.

Na verdade, as diferentes técnicas parecem variar com o tipo de inseto, tamanho, Reynolds, etc. Alguns insetos pequenos parecem desenvolver um mecanismo invíscido, de rápida e elevada criação de sustentação, chamado de “*Clap and Fling*”. Barata et al. [1] (2015) basearam-se no trabalho de Sane [52] (2012) e explicaram este mecanismo como estando associado, na maioria das vezes, à descolagem. Os insetos, ao mover as asas, criam efeitos de vórtices no ar que, com um segundo bater de asas, serve para criar uma espécie de jato e aumentar o impulso e sustentação. É feito, por exemplo, pela vespa calcária (*chalcid wasp*).

Com o objetivo de reproduzir alguns destes elevadíssimos coeficientes de sustentação demonstrados pelos insetos, Liang et al [53] (2017) simularam numericamente o movimento de uma asa semelhante à de um inseto. Chegaram à conclusão que a interação do LEV e TEV é fundamental para um elevado coeficiente de sustentação. Reforçaram a ideia de que, para otimizar a sustentação em diferentes estágios, é necessária uma adaptação do ângulo de ataque da asa. Estudaram também os coeficientes de resistência, distribuições de pressão e vorticidade.

Shyy et al. [43] (2007) explicaram detalhadamente como os insetos conseguem beneficiar da criação dos LEV e controlar a libertação dos mesmos. Eles simularam, numericamente, asas de vários insetos e estudaram o comportamento dos LEV para vários números de Reynolds. Para os valores de Reynolds mais baixos, cerca de 125 (mosca da fruta), a elevada sustentação é conseguida porque os efeitos viscosos são mais pronunciados e estes insetos conseguem manter os LEV junto à asa em todo o movimento descendente, sendo depois libertado pelo bordo de fuga. Este fenómeno foi simulado a 3D com soluções das equações de Navier-Stokes por Ramamurti et al. [54] (2001). Para os valores mais elevados, cerca de 6 000 (traça de falcão), Shyy et al. [43] (2007) concluíram que havia um maior fluxo axial no núcleo dos vórtices de bordo de ataque, formando um fluxo helicoidal e conseqüentemente maior sustentação. Na verdade, este fenómeno já tinha sido reportado por Ellington et al. [55] (2001) que explicaram que o fluxo axial estabiliza os LEV's, prolongando a ocorrência da perda e aumentando a sustentação.

Um dos insetos mais eficientes no voo é a libélula, que tem dois pares de asas também conhecidas pela configuração “*tandem*”. O trabalho efetuado por Lan [56] (1979) analisou a interação entre as duas asas da libélula e concluiu que esta configuração leva a uma maior produção de impulso de maior eficiência propulsiva porque a asa dianteira cria um escoamento oscilatório que a asa traseira converte em tração. De uma maneira geral, na vez da energia dos vórtices libertados pela asa dianteira ser desperdiçada, é convertida em tração pela asa traseira. Esta conclusão parece ir de encontro aos estudos de Katzmayer [10] (1922) que mediu a força de impulso numa asa parada sujeita a um escoamento oscilante. Young et al. [57] (2008) estudaram numericamente e a 3D Testaram várias frequências, amplitudes e rotações da asa e a sua influência no voo. Concluíram que os coeficientes de potência e força são independentes da frequência quando esta é superior a 5 Hz. Obtiveram valores de eficiência máxima para uma amplitude de  $\phi_0 = 34.5^\circ$ , muito próximos aos observados no voo pairado da libélula. Sugeriram trabalhos futuros para esclarecer os fenómenos responsáveis por este pico, parâmetros cinemáticos, consideração da flexibilidade das asas e efeitos de transição do escoamento laminar para turbulento.

Como já explicado, para cada estágio de voo, existe uma condição cinemática do movimento da asa que traz também a melhor eficiência e comportamento aerodinâmico. Normalmente estas condições são distintas por diferentes amplitudes e frequências, por exemplo. Luo et al. [58] (2017) estudaram o movimento que melhor conecte duas etapas distintas no voo de cruzeiro a que chamaram fase de ajuste. Otimizaram o algoritmo de forma a maximizar a força propulsiva e de sustentação nesta fase. Os resultados mostraram que o método utilizado traz bons desempenhos. Abriram portas a futuros estudos, não só no voo de cruzeiro como também na otimização da descolagem, aterragem e todo o tipo de manobras repentinas que necessitem de um rápido e progressivo ajuste no movimento das asas.

Barata et al. [49] (2016) estudaram também o caso específico de peixes e mamíferos nadadores. Estudaram as diferentes velocidades a que se deslocam e relacionaram com os vórtices criados pelas superfícies de controlo. No caso da baleia jubarte, esta possui “tubérculos” no bordo de ataque da barbatana peitoral. Esta forma, para um ângulo de ataque de  $10^\circ$ , demonstrou aumentar 4.8% na produção de sustentação, 10.9% de redução na resistência ao avanço e um aumento total de 17.6% na relação entre sustentação e resistência. O estudo de Câmara et al. [44] (2013) também foi neste campo, embora não tenham chegado a valores em específico.

Outros estudos envolvendo pássaros foram efetuados por autores como Provini et al. [59] (2014) e Barata et al. [60] (2017). Estes últimos estudaram o processo de descolagem e trajetória, num voo curto, de um pombo. Visualizaram, em alta-velocidade, todo o processo e mediram as forças aplicadas pelo pombo, no poleiro, na descolagem. Concluíram que o pombo, na descolagem, cria um impulso para a frente através do movimento do pescoço e da cabeça. O pombo descola sem gerar sustentação, saltando apenas para o ar e gerando, no poleiro, com as patas, uma força de cerca de 4 vezes o seu peso.

### **1.3.4 Produção de energia**

Os vários estudos na área de asas batedoras fizeram emergir uma nova aplicação para este tipo de mecanismo que não MAV's ou NAV's. Na realidade também podemos aproveitar esta nova tecnologia para produção de energia através da sua colocação em escoamentos de fluidos. À medida que a população mundial cresce, a necessidade e procura por energia também aumenta. As energias renováveis têm por isso um papel preponderante na manutenção do equilíbrio dos ecossistemas e substituição dos combustíveis fósseis. Energia pode ser extraída de um fluido em movimento de várias maneiras. Turbinas que usam uma ou mais asas oscilatórias, com movimento de translação e rotação, estão sob uma maior investigação nos últimos anos. Estas são uma boa alternativa às turbinas rotativas convencionais devido a vários fatores. Segundo Young et al. [42] (2014), existe um menor ruído produzido graças a velocidades mais baixas da asa, toda esta funciona no seu ponto ótimo de máxima extração de energia pois toda a asa se move à mesma velocidade e este tipo de turbinas pode ser colocado em águas rasas devido à possibilidade de a asa ser montada horizontalmente. Esta última condição resulta num funcionamento da asa perto de uma parede, por exemplo, o fundo de um rio ou canal. Karakas et al. [61] (2016) concluíram que a presença de paredes a uma certa distância do bordo de fuga da asa, traz grandes aumentos na energia extraída do escoamento. Estudaram, experimentalmente e numericamente, a extração de energia por parte de uma placa plana em movimento de rotação e translação e confinada pela presença de paredes laterais. A principal conclusão tirada do estudo foi o aumento da potência extraída, quando comparada com o caso de escoamento livre (sem paredes), em 29.57% no caso da presença de paredes laterais. Isto porque a sua presença influencia a formação e libertação dos vórtices da asa. Existe então

uma distância ideal a que as paredes devem ser colocadas de  $d/c = 0.5$  do bordo de fuga do perfil.

O trabalho de Yu et al. [34] (2018) também é importante nesta área, uma vez que estudou a influência de um escoamento não uniforme na esteira de uma asa batidora e de que maneira se pode tirar partido para produção de sustentação e conseqüentemente energia.

Em contraste com as turbinas rotativas em que a eficiência decresce para baixos números de Reynolds devido a efeitos viscosos, nas turbinas de asa oscilatória a produção de um LEV para baixos Reynolds leva ao aumento da eficiência como apontado por Choi et al. [62] (2013). Os autores simularam a captação de energia num escoamento uniforme para várias amplitudes e frequências reduzidas ( $0 < k < 5$ ). O estudo desta vez foi efetuado numa placa plana. Os resultados numéricos foram concordantes com modelos invíscidos, mesmo a baixos valores de Reynolds. Verificaram-se algumas discordâncias para ângulos de ataque maiores, em que as flutuações de sustentação e resistência são maiores. Nestes casos os efeitos viscosos tornam-se mais importantes. Isto acontece devido à separação do escoamento no bordo de ataque e a criação de um LEV como relatado nos estudos feitos por Jones et al. [21] (1998) e Young et al. [35] (2007). O valor de  $k$  para o qual as flutuações são máximas,  $k = 0.5$ , identificou-se ser como o valor que minimizava a potência requerida para mover o perfil.

Young et al. [42] (2014) fez uma revisão de todo o estudo efetuado neste campo de geração de energia por parte de asas batedoras. Investigaram o papel de alguns parâmetros como a cinemática e geometria da asa e descobriram que a cinemática tem a maior influência na produção de energia/potência. A maior eficiência é alcançada para elevados ângulos de incidência do perfil (acima de  $70^\circ$ ) e ângulos de ataque ( $30^\circ < \alpha < 40^\circ$ ) como indicado pela figura 1.10. Esta conclusão vem reforçar a ideia de que asas batedoras com rotação são mais eficientes a elevados ângulos de ataque. Nesta condição o escoamento descola da asa massivamente. Ao fazer com que o mesmo descole logo no bordo de ataque, cria-se um LEV com um núcleo de baixa pressão que faz com que a sustentação aumente, técnica também utilizada por insetos e estudada por Shyy et al. [43] (2007), tendo sido explicada mais tarde por Geissler et al. [41] (2017). A maior parte da potência extraída neste tipo de turbinas provém do movimento de translação da asa e não do de rotação, embora este último seja fundamental para criar um ângulo de ataque ideal com o escoamento. Embora estas turbinas tenham um enorme potencial e muitas vantagens, o seu desenvolvimento ainda está numa fase inicial e muitas são as questões que estão por responder. Em primeiro é necessário um grande trabalho ainda na otimização geométrica da asa e da sua cinemática (amplitudes de translação e rotação e suas fases, frequências, etc.). Em segundo lugar e por fim, coloca-se a questão do quanto melhor estes tipos de turbinas serão em relação aos meios de geração de energia que temos ao nosso dispor hoje em dia, daí a necessidade de aprofundar as pesquisas neste campo.

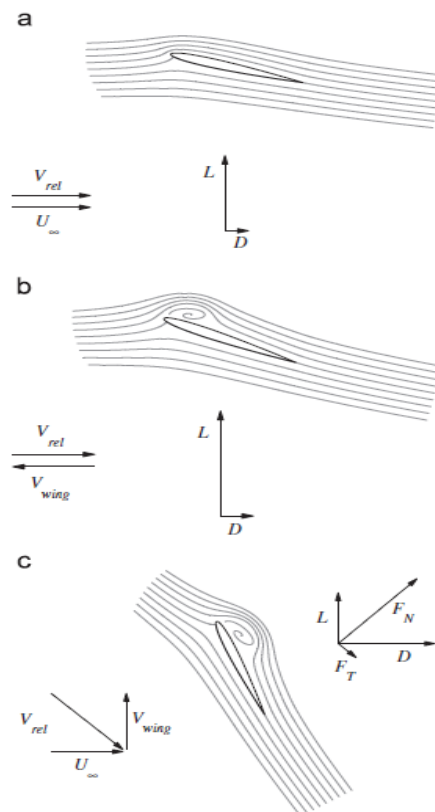


Figura 1.10. Aproveitamento de um escoamento de fluido para a produção de energia, [42]; (a) Escoamento laminar numa asa; (b) Aumento da sustentação devido ao LEV. (c) Produção de energia através do movimento translacional da asa.  $V_{rel}$  representa a velocidade relativa do escoamento  $U_{eff}$ .

## 1.4 Objetivos

Através da revisão bibliográfica apresentada foi possível mostrar que embora a biomimética seja um tema que parece estar a interessar muitos investigadores na área da engenharia e da biologia, ainda existe a necessidade de estudos mais aprofundados neste ramo. O estudo de esteiras em asas batedoras tem um objetivo claro, perceber os diferentes fenómenos presentes nas mesmas e classifica-los segundo as diversas condições de voo. Este estudo da esteira permite indicar, por exemplo, a partir de que condições a asa começa a produzir impulso. Esta informação é deveras importante, por exemplo, na construção de veículos aéreo e no controlo da produção de força propulsiva pelos mesmos.

Já existem alguns trabalhos com o intuito de descrever todos os fenómenos físicos envolvidos nestas esteiras, mas verificou-se que o tema ainda necessita de uma maior compreensão, em todos os aspetos. A maioria dos estudos foram efetuados em água e não em ar. Consequentemente, existe um grande interesse, na área da Engenharia Aeronáutica, em estudar os mesmos problemas em ar e comparar. Verificar se há diferenças nos fenómenos entre os dois meios e se sim, perceber quais as razões.

Um dos objetivos deste trabalho é idealização, projeção e construção de uma instalação experimental que permita a visualização da esteira de uma asa batidora em movimento de pura translação. Esta instalação tem que ser capaz de experimentar vários tipos de movimento da asa, alterando amplitude de movimento e frequência. Também deverá ter a capacidade de testar condições para diversas velocidades do escoamento de aproximação e consequentes números de Reynolds.

Estes 3 parâmetros (amplitude, frequência e  $Re$ ) originam 4 campos de análise distintos. O objetivo é determinar a influência de cada um deles (amplitude adimensional  $h$ , frequência reduzida  $k$ , velocidade de batimento adimensional  $kh$  e  $Re$ ) no problema, concluindo até que ponto influenciam funcionamento da asa e estrutura da esteira.

Os fenómenos físicos observados na esteira serão fundamentais para identificar os regimes de funcionamento da asa batidora. Tem-se como objetivo reproduzir alguns dos regimes reportados na literatura. Estes regimes incluem resistência ao avanço, regime de transição, produção de impulso e no último caso esteira defletida (produção de impulso e sustentação).

Também é um objetivo reproduzir os vários fenómenos de libertação de vórtices, classificando os mesmos. Estes tipos de libertação incluem libertação de vórtices natural, libertação de vórtices forçada e zona harmónica, como já introduzido na secção 1.3.1.

Também será importante identificar outros parâmetros como, por exemplo, comprimento de onda de libertação de vórtices.

## 1.5 Organização

O presente trabalho encontra-se organizado em quatro capítulos sendo eles Introdução, Método Experimental, Resultados e Conclusões, respetivamente.

O objetivo deste primeiro capítulo foi fazer uma introdução ao tema da biomimética, falando das suas vantagens e desvantagens e qual a sua relação com a Engenharia Aeronáutica. Também se explicaram as razões que levaram este trabalho a ser desenvolvido, justificando a contribuição do mesmo para o desenvolvimento do tema. Juntamente foi apresentado o estado da arte através uma revisão bibliográfica sobre os trabalhos científicos desenvolvidos até à data.

O segundo capítulo irá descrever toda a instalação experimental e cada componente da mesma. Ir-se-á explicar a sua projeção e construção, assim como o papel de cada componente. Por fim, vai-se descrever todo o trabalho de calibração feito na instalação, fundamental para que se possam validar os resultados obtidos.

O terceiro capítulo é dedicado à apresentação e análise de resultados. As imagens das esteiras obtidas serão exibidas, descrevendo as condições de funcionamento da asa em que cada uma foi obtida. Será feita uma análise a cada caso individual, descrevendo os fenômenos presentes e regime identificado. Por fim será apresentado uma análise dos resultados obtidos para uma melhor compreensão do leitor.

Por fim, no capítulo número quatro será apresentadas as conclusões do trabalho. Serão sugeridos trabalhos futuros e sugestões de caminhos a serem seguidos.

# Capítulo 2

## Método Experimental

Este segundo capítulo está dividido em duas secções. Na primeira secção será feita uma introdução de toda a instalação experimental e da sua disposição. Depois será apresentado cada componente da mesma e descrito em detalhe o seu funcionamento e o seu papel na instalação. Antes da utilização de qualquer aparelho é necessário recorrer à sua calibração para certificar que os resultados obtidos estão corretos. Na segunda secção será apresentado o método de calibração que se usou para se poderem validar os resultados obtidos no trabalho. Esta calibração envolve, sobretudo, o motor elétrico e o túnel de vento.

### 2.1 Instalação experimental

Da instalação experimental utilizada neste trabalho fazem parte um túnel de vento, uma câmara de filmar de alta velocidade, um laser, uma asa de perfil NACA 0012, um motor elétrico, uma estrutura metálica e uma máquina de fumo com sistema de inserção do fumo no interior do túnel.

A instalação está apresentada na figura 2.1. A câmara de alta velocidade foi colocada mais próxima da asa nesta figura para facilitar a descrição da instalação.

A asa (1) foi colocada à saída do túnel de vento (2) e está ligada ao motor (3) através de uma haste metálica (4) e este está suportado no chão através de uma estrutura metálica (5) com a base em madeira.

A máquina de fumo (6) faz inserção de fumo no interior do túnel através de tubagens (7). O laser (8) está colocado paralelamente ao escoamento. Este produz uma folha de laser, de baixo para cima, no plano vertical que passa no centro da asa e do túnel. A combinação do fumo com a folha laser permite fazer a visualização da esteira. A visualização é feita pela câmara de alta velocidade (9) que está colocada a 60° com o plano da folha de laser e a uma distância de 4.4m da asa. Todos estes componentes, assim como o seu funcionamento, serão descritos de seguida com maior pormenor.

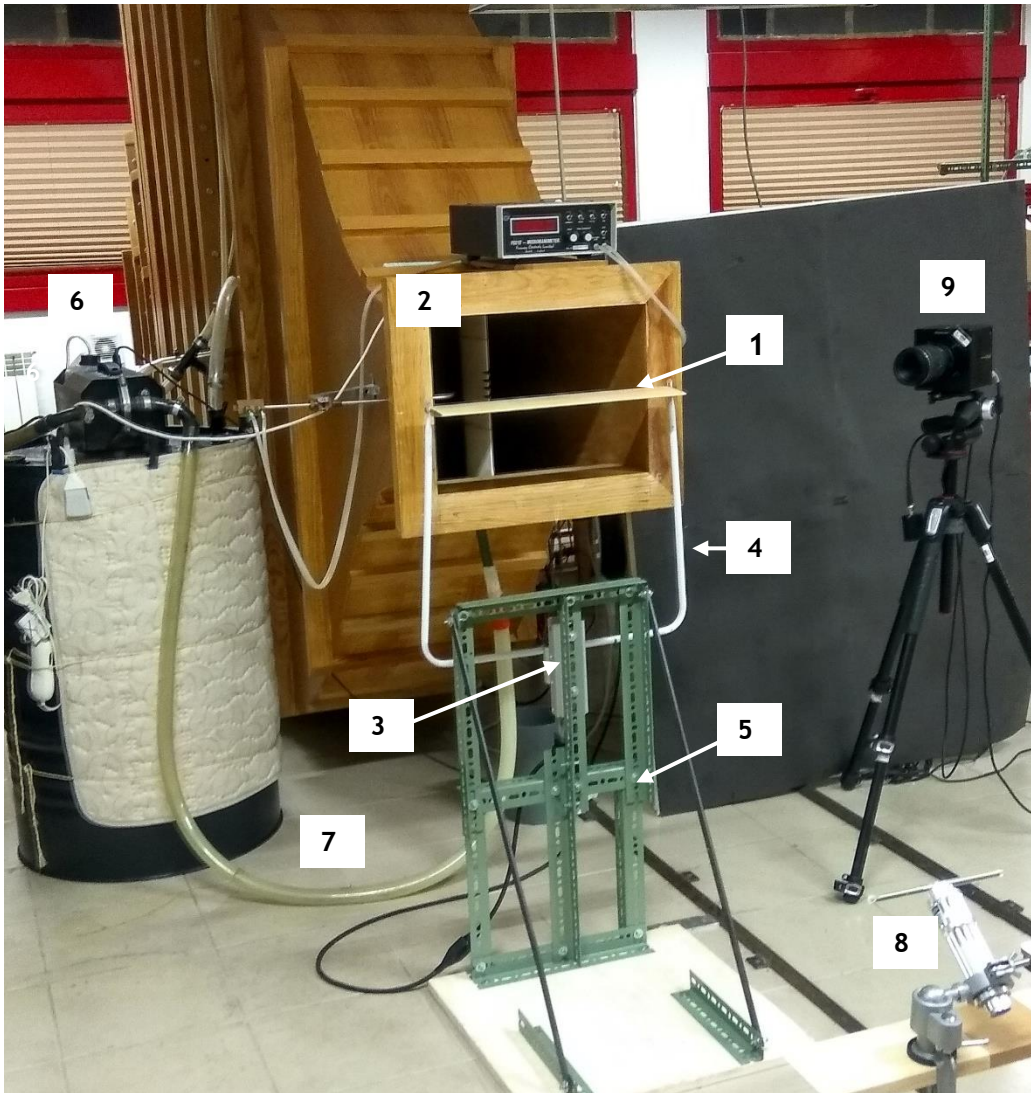


Figura 2.1 Instalação experimental.

### 2.1.1 Motor e controlador

Para o trabalho experimental utilizou-se um motor elétrico “AR series FLEX AC power input built-in controller type”, modelo ARM46AC da Oriental Motors ©. Este motor está acoplado a um atuador linear, modelo EASM4XE005 ARAC, possibilitando o movimento translacional da asa. Este conjunto é ligado a um controlador, modelo ARD-CD, que recebe e armazena a informação necessária ao funcionamento do motor. Os parâmetros de funcionamento são definidos no Software MEXE02 Versão 3.32.0.0. e a informação é depois transmitida ao controlador pelo cabo de programação de dados CC05IF-USB. A operação e controlo do motor são feitos através de LED’s de estado e interruptores, todos ligados ao controlador.

As características do motor elétrico são apresentadas na tabela 2.1 e as suas dimensões na figura 2.2.

Tabela 2.1 Características do motor elétrico.

Modelo	Tipo de Corrente	Tensão Máxima	Corrente máxima	Binário	Resolução de rotação	Velocidade máxima de rotação
ARM46AC	AC	340 V	0.49A	0.3 N·m	0.36°	4000 rot/min

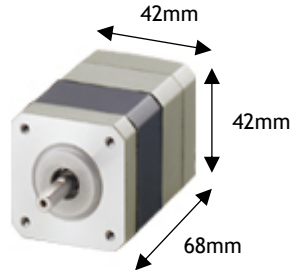


Figura 2.2 Dimensões do motor elétrico. Imagem editada de [63].

As características do atuador linear estão apresentadas na tabela 2.2.

Tabela 2.2 Características do atuador linear.

Modelo	Curso	Velocidade máxima	Máxima carga horizontal	Máxima força
EASM4XE005 ARAC	58.4mm	400mm/s	30Kg	200N

O motor elétrico acoplado com o atuador linear está representado na figura 2.3.

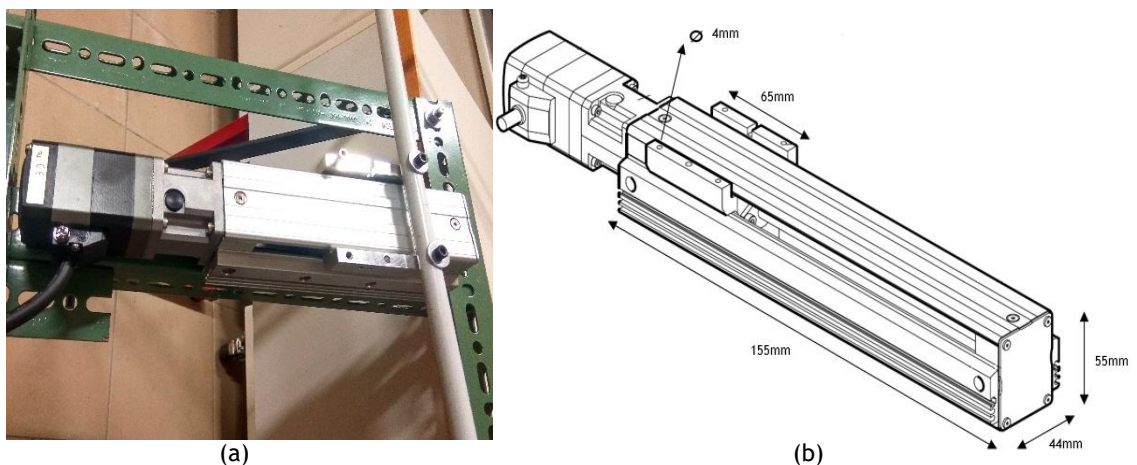


Figura 2.3 Motor elétrico acoplado com o atuador linear: (a) Imagem da instalação; (b) Esquema da montagem com as dimensões do atuador. Editado de [64].

O controlador, onde fica armazenada toda a informação necessária ao funcionamento do motor, encontra-se representado na figura 2.4. É também alimentado por corrente alternada AC.

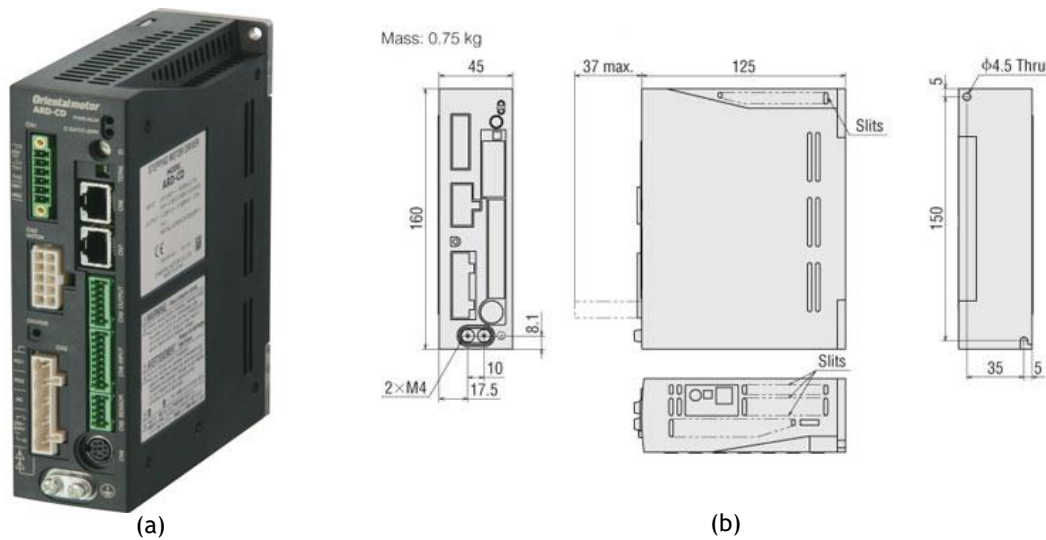


Figura 2.4. Controlador do motor, versão ARD-CD [65]: (a) Imagem do controlador; (b) Dimensões do controlador em mm.

É a partir do controlador que vão ser efetuadas todas as ligações. A primeira imagem do Anexo 1 mostra as conexões presentes na parte de trás do controlador. Apenas algumas delas serão utilizadas neste trabalho.

O cabo de programação “Data Setting Software Communication Cable”, CC05IF-USB, está representado na figura 2.5.



Figura 2.5 Cabo de programação de dados CC05IF-USB [66].

O esquema de montagem do conjunto está representado na figura 2.6. O controlador é alimentado, no canal 1 (CN1), por uma fonte de 24V e no canal 3 (CN3) é ligado diretamente à corrente. O motor liga-se ao canal 2 (CN2) e o canal 5 (CN5) fica livre pois não se utilizaram sensores externos.

Toda a programação no Software MEXE02 é transferida para o controlador pelo cabo de programação. Este cabo liga a saída USB do computador ao canal 4 (CN4) do controlador.

Os canais 8 e 9 são guardados para a interface. O canal 8 trata do controlo direto do motor por parte do utilizador e o canal 9 trata do estado do motor. As descrições dos canais 8 e 9 estão apresentadas na figura 2.7 e são as configurações de base do controlador.

Posteriormente cada uma das oito entradas (o sinal comum não conta) e das 6 saídas (novamente o sinal comum tem que estar sempre disponível) podia ser programada para mudar de função. No entanto tais ações não se consideraram necessárias pois as configurações de fábrica eram as suficientes para trabalhar com o motor nas condições pretendidas.

No canal de entrada CN8 apenas foram utilizados dois comandos, o sinal “*START*” para iniciar a operação do motor e o sinal “*ALM-RST*” para desativação do alarme automático do motor quando este excede algum parâmetro de funcionamento. É um mecanismo de segurança do motor que é ativado quando o mesmo excede qualquer condição de funcionamento como por exemplo uma temperatura ou velocidade. Quando o alarme dispara o motor deixa de funcionar. Para reestabelecer o funcionamento é necessário introduzir o sinal “*ALM-RST*” que, em inglês, é abreviação de “*ALARM RESET*”. São assim utilizadas as entradas número 2 (IN1) e número 8 (IN7). Também é utilizada a entrada número 9 (IN-COM1) que é o sinal comum.

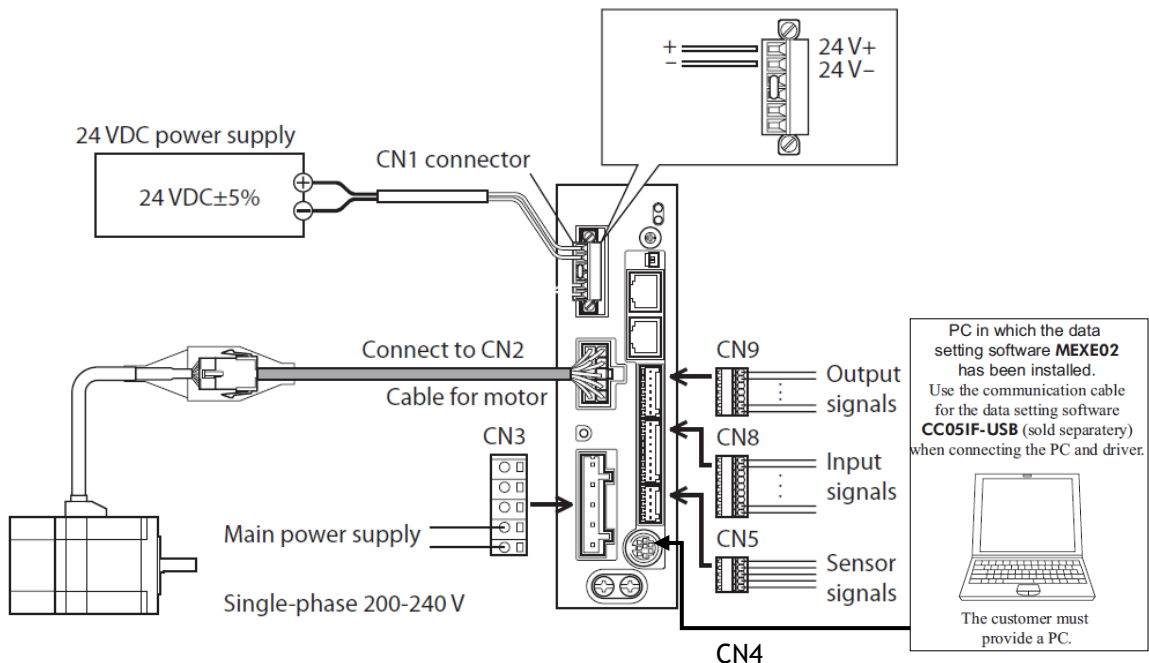


Figura 2.6 Esquema de conexão de todos os componentes ao controlador. Editado de [67].

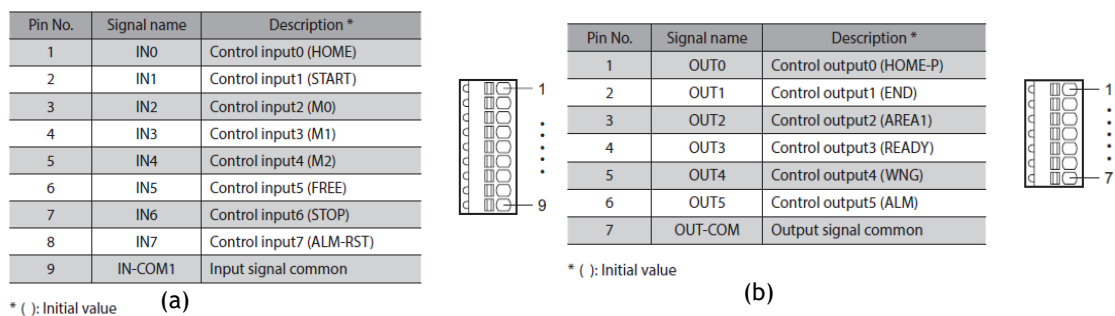


Figura 2.7 Representação dos canais [68]: (a) Canal de entrada CN8; (b) Canal de saída CN9.

No canal de saída CN9 foram escolhidos os sinais de estado número 1 (OUT0), 2 (OUT1), 4 (OUT3), 5 (OUT4), 6 (OUT5) e número 7 (OUT-COM). Apenas o número 3 (OUT2) não foi utilizado porque não se achou necessário. Estes sinais de estado do motor serão ligados, em circuito, a vários LED's (montagem irá ser explicada mais à frente) para assim se poder controlar o estado do motor. A saída número 1 (*HOME-P*) é ativada, ou seja, o LED é aceso, quando o motor está na posição definida como inicial (em inglês, *home*). A saída número 2 (*END*) é ativada quando o motor termina a tarefa, a saída número 4 (*READY*) quando o motor está pronto a ser utilizado e a saída número 5 (*WNG*) quando existe um estado de aviso (em inglês, *warning*) no funcionamento do motor, como por exemplo sobreaquecimento ou sobrecarga. A saída número 6 (*ALM*) está sempre ativa e quando o alarme de segurança é ativado, esta desliga-se.

O circuito dos sinais de saída e de entrada (sinais de controlo) do controlador do motor foram montados segundo a indicação do fabricante, presente na segunda figura do Anexo 1. Ambos os circuitos foram alimentados pela fonte de 24V. No circuito de saída (CN9) montaram-se LED's de cor verde e resistências de  $3K\Omega$ . Ligaram-se alguns interruptores no circuito de entrada para ativação do impulso do sinal de entrada. A entrada número 8 (IN7), referente ao controlo "*ALM-RST*", foi montado conforme o esquema e é ativado a partir do interruptor 2. A entrada número 2 (IN1), referente ao controlo "*START*", foi ligada diretamente à saída número 2 (OUT1) que representa a saída "*END*". Esta ligação foi feita com o interruptor 1. Este improviso deve-se ao fato de apenas existir a possibilidade de programar um ciclo do motor. Assim, para obter mais do que um ciclo contínuo no motor, ter-se-ia que ativar manualmente o controlo "*START*" cada vez que o motor terminava o ciclo anterior. Para corrigir este problema e de modo a obter ciclos infinitos de funcionamento, a entrada "*START*" está diretamente ligada à saída "*END*" sempre que o interruptor 1 estiver ligado. Desta maneira, logo que o motor termine o ciclo efetuado, a saída "*END*" é ativada. Com o interruptor ligado, este impulso será diretamente transmitido à entrada "*START*" para o motor efetuar novo ciclo. A montagem final do controlador do motor está representada na figura 2.8.

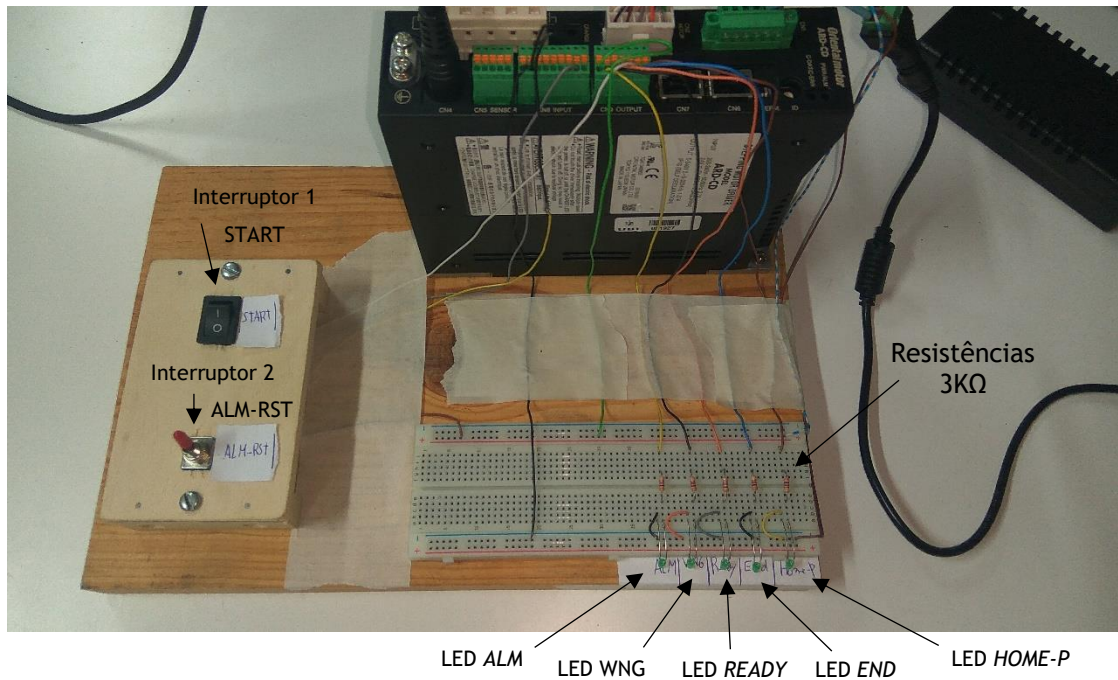


Figura 2.8 Montagem final dos circuitos de saída e de entrada no controlador.

A programação e funcionamento do motor irá ser explicado na secção 2.2

### 2.1.2 Estrutura

Construiu-se um suporte em barras de ferro apoiado numa tábua de madeira que por sua vez apoia no chão. Neste suporte de barras de ferro, está colocado um motor elétrico com o atuador linear, que permite o movimento ascendente e descendente da asa (movimento de batimento). Acoplado ao motor está uma haste de alumínio. Aparafusado à haste está uma asa de perfil NACA0012 construída em madeira de balsa com 10cm de corda e uma envergadura de 44cm (figura 2.9 (a)). A asa foi construída em madeira de balsa, lixada e foram aplicadas 2 camadas de verniz assim como um óleo para suavizar a superfície. Nas pontas, para uma melhor fixação à haste, colaram-se perfis construídos numa folha de alumínio. Depois foram efetuados os buracos para se poder aparafusar a asa à haste como ilustra a figura 2.9 (b). Para a asa ser instalada com um ângulo de incidência de zero graus ( $0^\circ$ ) e sem inclinação ao longo da sua envergadura, foram efetuadas medidas com uma régua de nível. Estas medidas foram efetuadas horizontalmente na asa, ao longo da sua envergadura e de seguida ao longo da corda.



(a)



(b)

Figura 2.9 Asa construída em madeira de balsa; (a) Estrutura de ferro, motor e asa; (b) Asa aparafusada na haste.

### 2.1.3 Túnel de Vento

A estrutura com o motor e asa foram colocados a 1cm da saída do túnel conforme a figura 2.10 indica. Esta está colocada com o bordo de ataque virado para o escoamento vindo do túnel de vento. Este é composto por um ventilador de potência de 15KW e um fluxo máximo de  $3000 \text{ m}^3/\text{h}$ . As dimensões da secção de saída do túnel em altura e largura são, respetivamente, de  $300\text{mm} \times 402\text{mm}$ .



(a)



(b)

Figura 2.10 Túnel de vento: (a) Saída do túnel com a asa; (b) Parte principal do túnel.

## 2.1.4 Velocidades estudadas

O objetivo do trabalho, assim como estudar várias condições de movimento da asa, também é testar números de Reynolds diferentes. Escolheu-se uma gama de números de Reynolds e a partir da equação 2.1 calcularam-se as velocidades necessárias. Na tabela 2.3 estão apresentados os valores de viscosidade do ar,  $\mu_{ar}$ , e da massa específica do ar,  $\rho_{ar}$ , que foram utilizados no cálculo. O valor da massa específica do ar ( $\rho_{ar}$ ) é obtido mais à frente a partir da equação 2.4, na secção 2.2.3, onde é descrita a calibração do túnel. Na tabela 2.4 estão apresentados os valores das velocidades a obter à saída do túnel para cada número de Reynolds pretendido. O valor de  $Re = 17\ 000$  foi o valor máximo pretendido para comparação com alguns estudos da literatura como, por exemplo, Platzer et al. [4] (2008). Os valores  $Re = 11\ 200$  e  $Re = 6\ 580$  correspondem a valores sucessivamente mais baixos sendo que este último foi propositado para corresponder exatamente à velocidade de  $1\text{m/s}$ .

$$Re = \frac{\rho_{ar} * U_{\infty} * c}{\mu_{ar}} \Leftrightarrow U_{\infty} = \frac{Re * \mu_{ar}}{\rho_{ar} * c} \quad (2.1)$$

Tabela 2.3 Valores da viscosidade e massa específica do ar utilizadas no cálculo de  $Re$ .

$\mu_{ar}$ [Kg/m.s]	$\rho_{ar}$ [Kg/m <sup>3</sup> ]
$1.79 \times 10^{-5}$	1.177

Tabela 2.4 Valores de velocidade em função do número de Reynolds.

$Re$	$U_{\infty}$ [m/s]
17 000	2.58
11 200	1.70
6 580	1.00

## 2.1.5 Sistema de fumo

Para a visualização do escoamento desenvolveu-se e construiu-se um sistema de libertação de fumo que causasse a menor perturbação possível no escoamento de aproximação na asa. O sistema é composto por uma máquina de fumo “Techno-Fog Jem” (Figura 2.11 (b)). Esta tem uma resistência de  $750W$ , um tempo de aquecimento de  $7\text{min}$  e possui um controlador (Figura 2.11 (a)) através do qual é possível regular a intensidade do fumo produzido e a frequência de libertação do mesmo. Na maioria dos casos o interruptor relativo à frequência de libertação de fumo (TIMER) foi mantido na posição “0” e como alternativa manteve-se premido o botão “FOG”, que permitiu uma emissão de fumo contínua durante o tempo em que o botão se mantivesse premido. Por sua vez o interruptor relativo à densidade de fumo libertado (LEVEL)

foi ajustado como se achou mais conveniente para os diferentes casos. A máquina tem um recipiente com o líquido indicado na figura 2.11 (c), através do qual produz o fumo.

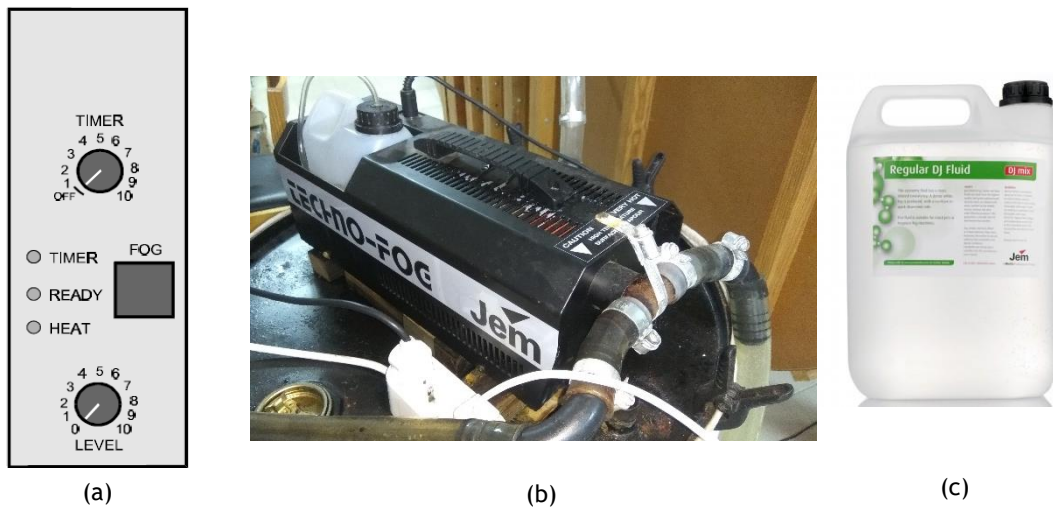


Figura 2.11 (a) Controlador da máquina de fumo; (b) Máquina geradora de fumo; (c) Líquido utilizado na máquina.

A saída de fumo na máquina está ligada a dois tubos através de uma peça em “T” (Figura 2.11 (b)). Através destes dois tubos flui ar a uma pressão e velocidade ajustável, arrastando o fumo consigo e percorrendo a mangueira que está ligada a um dispositivo que liberta o fumo perto da saída do túnel. Este dispositivo foi desenhado em Software e posteriormente impresso numa máquina 3D. Foi desenhado em 3 peças distintas (Figura 2.12 (a)) com tubagem interior para conduzir o fumo (Figura 2.12 (b)) e posteriormente montado (Figura 2.12 (c)) com as dimensões do convergente do túnel para ser colocado no interior do mesmo (Figura 2.12 (d)).

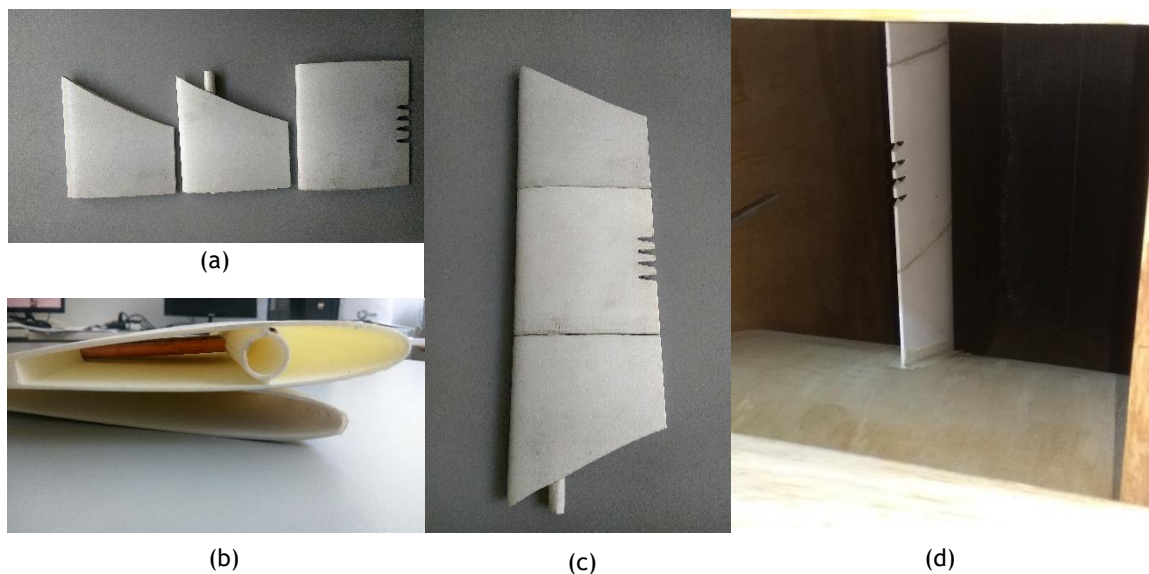


Figura 2.12 Dispositivo de inseminação de fumo; (a) Peças individuais; (b) Peça com tubagem interior; (c) Dispositivo final montado; (d) Dispositivo no interior do túnel.

Este dispositivo foi desenhado com a forma de um perfil NACA0012 e corda de 15cm para causar a menor perturbação possível no escoamento ao mesmo tempo que liberta o fumo para a visualização.

### 2.1.6 Laser

O laser utilizado no trabalho está apresentado na figura 2.13 e as suas características estão presentes na tabela 2.5.



Figura 2.13 Laser utilizado na instalação.

Tabela 2.5 Características do laser.

Cor	Comprimento de onda	Potência	Peso	Dimensões
Azul	445nm	3000mW	240g	145mm x 40mm

Este laser foi colocado junto ao chão para não perturbar o escoamento de saída no túnel. Foi então apontado para um provete de vidro, o que resultou na emissão de um feixe de luz no plano vertical e alinhado com o centro do túnel onde o fumo é libertado. O feixe também passa no centro da asa e tem a direção paralela ao escoamento. Desta maneira é possível iluminar as partículas de fumo libertado no túnel e assim visualizar os fenómenos na esteira como por exemplo a libertação e evolução dos vórtices.

### 2.1.7 Câmara

A aquisição de imagens de boa qualidade é fundamental na visualização e estudo da esteira neste trabalho. O modelo da câmara utilizada nas filmagens foi a Photron FASTCAM mini UX50 (figura 2.14) com uma resolução de 1280x1024 a uma taxa de imagem de 500fps. As lentes usadas são Tokina MACRO 100 F2.8 D. A câmara foi colocada a uma distância 440cm da asa e a um ângulo de cerca de 60° com o plano do laser, pois foi a posição que permitiu uma melhor visualização da esteira. O diafragma das lentes foi aberto o máximo possível para a posição 2.8 de modo a deixar o máximo de luz entrar pois as filmagens efetuaram-se no escuro e apenas com a luz do laser ligada.



Figura 2.14 Câmera Photron FASTCAM mini UX50 com as lentes Tokina MACRO 100 F2.8 D.

## 2.2 Calibração

Antes de se efetuar qualquer atividade experimental é necessário proceder à calibração de todo o material envolvido. Só desta maneira podemos ter a certeza que as medições efetuadas estão corretas. A calibração dividiu-se em duas partes, a calibração do túnel de vento e a calibração do conjunto do motor e controlador que permite alternar entre os diversos movimentos que a asa pode fazer.

### 2.2.1 Software MEXE02 v3.32.0.0.

Como já foi descrito anteriormente no capítulo 1, este trabalho tem como objetivo testar várias condições de escoamento e diferentes movimentos de batimento da asa. Estas condições de batimento variam entre diferentes amplitudes e diferentes frequências.

Inicialmente, de modo a mapear o funcionamento do motor e as suas limitações, escolheram-se quatro amplitudes diferentes para testar o motor. A primeira amplitude a ser escolhida foi ligeiramente inferior à amplitude máxima permitida pelo curso do atuador linear. Este permite um movimento máximo de  $5.84\text{ cm}$ . Optou-se por testar um movimento com um total de  $5.6\text{ cm}$  sendo a amplitude de  $5.6\text{ cm}/2 = 2.8\text{ cm}$ . Este valor foi escolhido porque se achou conveniente guardar uma ligeira folga em ambas as extremidades do atuador, cerca de  $1.2\text{ mm}$  ( $2.4\text{ mm}/2$ ). Assim o curso máximo do atuador é de  $58.4\text{ mm}$  ( $56\text{ mm} + 2.4\text{ mm}$ ). Esta escolha ocorreu porque no seu movimento de batimento, o motor está sujeito a grandes acelerações e desacelerações, sobretudo a elevadas frequências de batimento. Nesta condição, qualquer desvio mínimo do curso definido resultaria no choque da peça móvel com os batentes do atuador e consequente

ativação do alarme do mesmo, para além de poderem ocorrer danos permanentes. Assim, mesmo que as fortes acelerações e velocidades do atuador originem ligeiras saídas do curso definido, o motor não chocará com os batentes e possíveis avarias ou paragens no trabalho serão evitadas. Os outros valores de amplitude foram escolhidos para valores intermédios como 1.9 cm e 1 cm. Finalmente a amplitude mínima escolhida foi de 0.5 cm. Este valor foi escolhido devido ao fato de ser o valor de amplitude mais baixo que permitiu a produção de uma esteira razoável para filmagem. Para valores de amplitudes inferiores, os resultados não correspondiam aos pretendidos.

Com as quatro amplitudes de trabalho definidas o próximo passo foi programar o motor para cada uma dessas amplitudes. De seguida foi necessário testar a frequência máxima a que o motor conseguiria trabalhar para cada uma delas. Esta situação será explicada um pouco abaixo nesta secção. A programação foi feita no Software “MEXE02” Versão 3.32.0.0 e a informação transferida para o driver do motor (*ARD-CD stepping motor driver*). Abriu-se o programa e criou-se uma nova folha de programação. Nesta nova folha escolheu-se a série de motores “AR” e de seguida o tipo de controlador do motor, neste caso “*AR Built-in Crontoller [AC]*”. Na nova folha que é aberta existem 9 colunas e várias linhas de programação. Cada linha corresponde a uma ordem/movimento efetuado pelo motor com várias especificações, programadas nas várias colunas.

Como já descrito, esta versão de motores (*AR series*) não permite que o motor efetue, seguidamente, mais do que quatro linhas de programação seguidas. Devido a esta restrição optou-se por apenas fazer a programação de duas linhas. Estas duas linhas serão suficientes para efetuar corretamente um ciclo do motor. Uma linha enviará a ordem do movimento ascendente do motor e a outra do movimento descendente (figura 2.15). De seguida o ciclo termina. Quando interruptor 1 é ligado a ordem para a o motor começar o movimento é enviada e um ciclo será efetuado. Enquanto o interruptor permanecer ligado, o motor efetuará de maneira contínua um número infinito de ciclos, até se desligar o interruptor 1 novamente.

	Operation mode	Position [mm]	Destination [mm]	Operation function	Bus stop time [s]	Dist. time [s]	Speed limit [mm/s]	Acceleration [mm/s <sup>2</sup> ]	Deceleration [mm/s <sup>2</sup> ]
#0	Absolute (ABS)	9692	75000	Linked-motion 2	20.0	0.000	Disable	0.200	0.200
#1	Absolute (ABS)	200	75000	Single-motion	20.0	0.000	Disable	0.200	0.200
#2	Incremental (INC)	0	1000	Single-motion	20.0	0.000	Disable	1.000	1.000
#3	Incremental (INC)	0	1000	Single-motion	20.0	0.000	Disable	1.000	1.000
#4	Incremental (INC)	0	1000	Single-motion	20.0	0.000	Disable	1.000	1.000
#5	Incremental (INC)	0	1000	Single-motion	20.0	0.000	Disable	1.000	1.000
#6	Incremental (INC)	0	1000	Single-motion	20.0	0.000	Disable	1.000	1.000
#7	Incremental (INC)	0	1000	Single-motion	20.0	0.000	Disable	1.000	1.000
#8	Incremental (INC)	0	1000	Single-motion	20.0	0.000	Disable	1.000	1.000
#9	Incremental (INC)	0	1000	Single-motion	20.0	0.000	Disable	1.000	1.000

Figura 2.15 Programação de um ciclo de oscilação, composto por duas linhas, no Software MEXE02.

Em cada uma das nove colunas existe uma programação específica para a ordem que é dada ao motor na mesma linha. Em resumo cada linha tem a informação de para onde o motor se irá posicionar, a que velocidade, com que aceleração começa o movimento e com que desaceleração termina o mesmo.

Na primeira coluna especificou-se se se queria que o motor apenas incremente um comprimento à sua posição atual ou se, pelo contrário, se quer que ele avance para uma posição em absoluto. Neste caso escolheu-se a opção “*Absolute (ABS)*” pois quer-se que o motor avance para o ponto superior do movimento. De seguida o mesmo desloca-se para baixo até ao ponto inferior do seu movimento oscilatório. Na segunda coluna escolhe-se a posição (*step*) para o motor avançar. Esta medida é referente à de rotação do motor elétrico que, acoplado ao atuador linear, reflete-se numa outra medida de avanço em comprimento. Assim para cada 1000 unidades de “*step*” colocadas no programa, o atuador linear move-se 5.9 mm ou 0.59 cm. Este valor mediu-se de uma maneira precisa com um paquímetro. Assim para os vários comprimentos de amplitude escolhidos anteriormente, converteu-se para a medida em “*step*” a colocar no programa (tabela 2.6). É de salientar que o valor do “*step*” colocado é referente a duas vezes a amplitude do movimento pois corresponde à diferença entre o ponto máximo superior do movimento e o ponto inferior mínimo do movimento oscilatório. O valor colocado na linha 2 foi sempre de um “*step*” de 200 que é aproximadamente a dar a margem de 1.2 mm referida anteriormente.

Tabela 2.6 Valores de “*step*” colocados no programa para as diferentes amplitudes de movimento.

Amplitude [cm]	Amplitude de um ciclo [cm]	Diferença	Step	
			Linha 1	Linha 2
2.8	5.6	9492	9692	200
1.9	3.8	6441	6641	200
1.0	2.0	3390	3590	200
0.5	1.0	1695	1895	200

Depois disto passou-se para a terceira coluna onde foi a velocidade de rotação do motor elétrico em Hz. Mais uma vez a medida da velocidade efetiva (por exemplo em cm/s) no atuador linear vai ser diferente da colocada neste campo (em Hz), por isso os valores apresentados servirão apenas de guia. Os valores da velocidade de rotação foram alterados e testados para obter as diferentes frequências necessárias. Esta parte da calibração e medição da frequência de batimento do motor será apresentada no final desta secção. A próxima coluna que segue é a quarta e diz respeito à função da operação a programar. Neste caso, para a primeira linha utilizou-se a função “*Linked-motion 2*” que é utilizada quando na linha vem um comando de movimento numa direção contrária, como é o caso pois o motor sobe e depois desce. Na segunda linha utilizou-se a função “*Single-motion*” referente a um movimento único pois depois de o

motor descer o ciclo termina. A quinta, sexta e sétima colunas não foram utilizadas pois a sua programação não era necessária para o movimento pretendido do motor. A oitava e nona colunas são referentes à aceleração e desaceleração dos movimentos efetuados pelo motor, respetivamente. Estes parâmetros, juntamente com os valores da coluna 2, referentes à velocidade de rotação do motor, serão alterados em vários testes de tentativa/erro para obter os movimentos que melhor se adequem ao que se quer.

Finalmente, de modo a passar toda a informação para o controlador do motor, escolheu-se a ação “*Data writing (PC->Product)*”. De seguida, para operação do motor, bastou apenas ligar o interruptor 1. O processo de programação do motor teve que ser repetido para cada movimento diferente pretendido.

### **2.2.2 Medição das frequências**

O próximo passo foi, para cada amplitude de movimento, encontrar a frequência máxima de batimento do motor. Este passo demonstrou-se extremamente importante para definir os movimentos e condições que se poderiam simular, ou não.

No início do capítulo 3 serão apresentadas as condições que foram possíveis de filmar e as que não foram, por limitações do motor calculadas nesta secção. Para isto alteraram-se simultaneamente os valores da coluna 2 (velocidade do motor), coluna 8 e coluna 9 (aceleração e desaceleração) para ver qual combinação oferecia o melhor resultado.

Ao fim de alguns testes chegou-se à conclusão que o valor da aceleração e desaceleração não deveria ser diferente. Isto porque são dois parâmetros que estão interligados no ciclo do movimento e tornar um mais forte ou mais fraco do que o outro originaria um tipo de movimento não pretendido neste trabalho.

Também se concluiu que o valor destas colunas que traria uma rápida resposta de movimento e ao mesmo tempo não ativaria o alarme do motor seria o valor de 0.2s. É de recordar, tal como referido na secção 2.1.1, que qualquer tipo de movimento que exceda as cargas, temperaturas ou outra condição limite do motor, ativa um mecanismo de segurança do motor, neste caso o deu alarme, e este para de funcionar. Assim, para todos os testes, utilizou-se um valor de 0.2s nas colunas 8 e 9 referentes à aceleração e desaceleração respetivamente.

O valor da velocidade de rotação obtido foi o máximo conseguido, nas condições definidas, que não ativou o alarme do motor.

Após todos estes testes montou-se a instalação apresentada na figura 2.16. O objetivo final da instalação apresentada foi a filmagem, com a câmara de alta velocidade, do motor a trabalhar nas condições descritas na tabela 2.7 para cálculo da frequência de batimento. Este último parâmetro já é apresentado na última coluna da mesma tabela. A filmagem foi efetuada com a câmara de alta velocidade descrita na secção 2.1.7. Utilizou-se como interface o Software Photron FASTCAM Viewer v3610.

Tabela 2.7 Valores de velocidade, aceleração e desaceleração colocados no programa e respetivas frequências máximas para cada amplitude.

Amplitude [cm]	Velocidade de rotação do motor [Hz]	Acel/Desacel [s]	Frequência de batimento do motor [Hz]
2.8	75 000	0.2	3.41
1.9	75 000	0.2	4.66
1.0	85 000	0.2	8.11
0.5	80 000	0.2	11.6

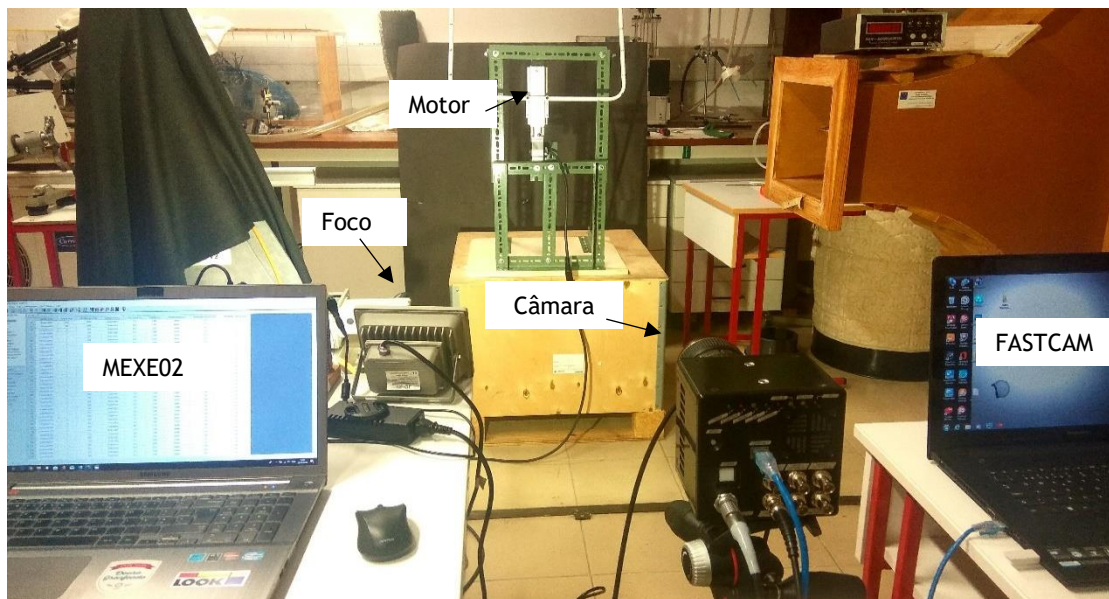


Figura 2.16 Montagem da instalação para filmagem do motor e posterior cálculo da frequência.

Filmou-se a uma velocidade de 1000fps e iluminou-se o motor com um foco de luz para melhor visualização. Através do mesmo software foi possível, no vídeo gravado, cortar uma parte do mesmo contendo um número exato de ciclos de movimento. Este tempo (figura 2.17) foi posteriormente dividido pelo número de ciclos que apresenta de modo a calcular um tempo médio por ciclo. Finalmente, e para obtenção da frequência, dividiu-se a unidade pelo tempo médio de um ciclo e obtiveram-se os valores das frequências apresentados na tabela 2.7. É de salientar

que estes são os valores máximos da frequência que o motor consegue atingir para uma dada amplitude.

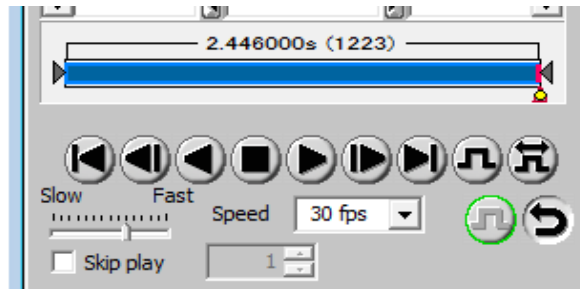


Figura 2.17 Tempo dos ciclos no Software FASTCAM.

Nos restantes tipos de movimentos, quando se pretendeu uma frequência inferior à frequência máxima do motor, repetiu-se todo o procedimento. Mantiveram-se os valores da aceleração/desaceleração e mudaram-se, num “jogo” de tentativa-erro, os valores da coluna 2 referente à velocidade de rotação e filmava-se novamente até se obter o valor da frequência pretendido.

### 2.2.3 Túnel de Vento

O túnel de vento possui duas guilhotinas com abertura máxima de  $130\text{mm}$  como representado na figura 2.18. O ventilador do túnel é regulado por um controlador que trabalha numa frequência de  $25\text{Hz}$  a  $50\text{Hz}$  (figura 2.19). De acordo com os testes efetuados por Vieira [69] (2012), seguiu-se a mesma metodologia e para obter um melhor controlo na velocidade de saída do escoamento no túnel de vento, optou-se por deixar a guilhotina 1 ( $g_1$ ) totalmente aberta. Assim, a variação na velocidade do escoamento é conseguida através da abertura da guilhotina 2 ( $g_2$ ) e da variação de frequência do controlador.

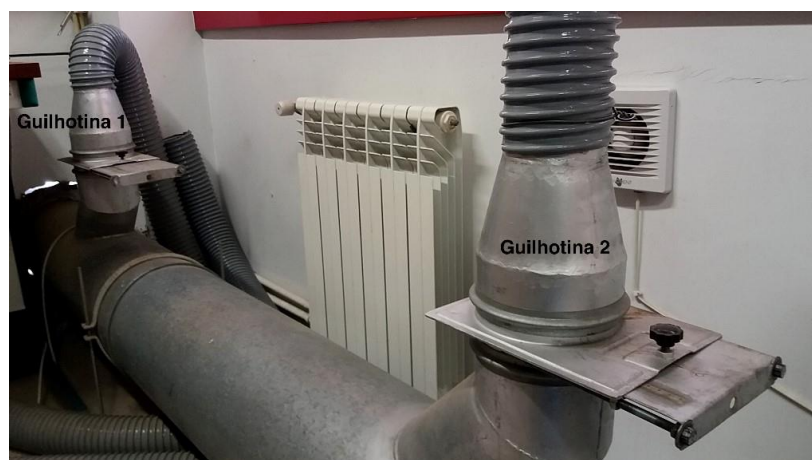


Figura 2.18 Posição das guilhotinas 1 ( $g_1$ ) à esquerda e 2 ( $g_2$ ) à direita [70].



Figura 2.19 Controlador do túnel de vento [70].

A calibração do túnel foi feita através da medição das velocidades na saída do mesmo através de um tubo de Pitot ligado a um micromanómetro (Figura 2.20). Este aparelho faz a leitura do diferencial entre pressão total/estagnação ( $p_T$ ) e pressão estática ( $p_0$ ), medidas no tubo. A diferença entre as duas corresponde a uma variação na pressão ( $\Delta p$ ). O micromanómetro apresenta os valores lidos de duas maneiras, sob a forma de um diferencial de pressão medido em  $mm$  de coluna de água ( $mmH_2O$ ) ou logo sob a forma de velocidade em  $m/s$ . Se optarmos pela medição direta da velocidade não são necessários cálculos adicionais. Se optarmos por ler o diferencial de pressão em  $mm$  de coluna de água é necessária uma conversão. Na equação 2.2 está apresentado o cálculo da velocidade do ar  $U_\infty$ , a partir do diferencial de pressões ( $p_T - p_0$ ) e da massa específica do ar  $\rho_{ar}$ .

Na equação 2.3 está representada a conversão de  $mm$  de coluna de água para uma pressão em  $Pa$ , em que  $\rho_{\acute{a}gua}$  representa a massa específica da água,  $g$  a aceleração da gravidade e  $mmH_2O$  a altura em  $mm$  de coluna de água. É de salientar a multiplicação por  $10^{-3}$  pois a medida da altura vem em  $mm$  e é necessário converter em  $m$ .

Por uma questão de simplicidade, considerou-se o ar um fluido perfeito. Através da equação 2.4 calculou-se a sua massa específica em que  $R_{ar}$  é a constante universal dos gases perfeitos para o ar,  $p_{ar}$  representa a pressão do ar em  $Pa$  e  $T_{ar}$  a temperatura do mesmo em  $K$ .

Na equação 2.2 substitui-se  $p_T - p_0$  pela equação 2.3 e  $\rho_{ar}$  pela equação 2.4 e obteve-se a equação 2.5. Os valores finais da velocidade do escoamento calculam-se então pela equação 2.5. Os parâmetros utilizados para o cálculo da mesma estão apresentados na tabela 2.8. É de salientar que os valores da pressão do ar  $p_{ar}$  e da sua temperatura  $T_{ar}$ , forma medidos através de um termómetro/barómetro presente no laboratório.

Tabela 2.8 Valores utilizados no cálculo.

$\rho_{\text{água}} [Kg/m^3]$ a $15^\circ C$	999
$g [m/s^2]$	9.81
$p_{ar} [Pa]$	$0.986 \times 10^5$
$R_{ar} [J/Kg.K]$	287
$T_{ar} [K]$	292

$$p_T = \frac{1}{2} \rho_{ar} U_\infty^2 + p_0 \Leftrightarrow U_\infty = \sqrt{\frac{2(p_T - p_0)}{\rho_{ar}}} \quad (2.2)$$

$$p_T - p_0 = \Delta p = \rho_{\text{água}} * g * mmH_2O * 10^{-3} \quad (2.3)$$

$$\rho_{ar} = \frac{p_{ar}}{R_{ar} * T_{ar}} \quad (2.4)$$

$$U_\infty = \sqrt{\frac{2(\rho_{\text{água}} * g * mmH_2O * 10^{-3})}{\frac{p_{ar}}{R_{ar} * T_{ar}}}} \quad (2.5)$$

Todas as calibrações foram feitas com a guilhotina 1 completamente aberta. Não houve necessidade de aumentar a frequência do controlador, pois conseguiram-se obter todas as velocidades pretendidas apenas abrindo a guilhotina 2. Assim as tabelas seguintes são referentes às calibrações com controlador a uma frequência de 25Hz, a guilhotina 1 completamente aberta e variou-se a abertura da guilhotina 2.

Tabela 2.9 Calibração para 1m/s.

$g_2 [mm]$	$mmH_2O$	$U_\infty [m/s]$
32	0,051	0,925
33	0,056	0,969
34	0,061	1,01
35	0,066	1,05

Tabela 2.10 Calibração para 1.7m/s.

$g_2 [mm]$	$mmH_2O$	$U_\infty [m/s]$
49	0,157	1,62
50	0,164	1,65
51	0,171	1,69
52	0,178	1,72

Tabela 2.11 Calibração para 2.58m/s.

$g_2$ [mm]	$mmH_2O$	$U_\infty$ [m/s]
110	0,374	2,49
115	0,390	2,55
120	0,399	2,58
125	0,410	2,61



Figura 2.20 Micromanómetro utilizado, apresentando os valores lidos sob a forma de  $mmH_2O$ .

### 2.2.3.1 Turbulência e Escalas de Kolmogorov

Outra parte importante da calibração do túnel foi a avaliação do escoamento de saída. Assim é apresentada a figura 2.21 com fotografias retiradas de filmagens para as 3 velocidades diferentes,  $1m/s$  (a),  $1.7m/s$  (b),  $2.58m/s$  (c) e consequentes  $Re$ . Aqui apenas se libertou fumo para se poder perceber a evolução do escoamento e a esteira desenvolvida nos 3 casos, sem a presença da asa. Com isto pretende-se mostrar a esteira desenvolvida no túnel e provar que todos os fenómenos visualizados e apresentados no capítulo 3 serão devido aos efeitos da asa e não devido a efeitos induzidos pelo próprio túnel.

É possível verificar que o escoamento apresenta características turbulentas. Numa tentativa de perceber se as filmagens conseguem captar a turbulência ou se, pelo contrário, integram os fenómenos no tempo, calcularam-se as escalas de Kolmogorov. Estes cálculos são apresentados à frente. Segundo os mesmos, a figura 3.2 (a), filmada a 500fps, captou o campo instantâneo. A figura 3.2 (b) teve que ser filmada a 1000fps para captar a turbulência e, por sua vez, a figura 3.2 (c) foi filmada a 2000fps para o mesmo efeito.

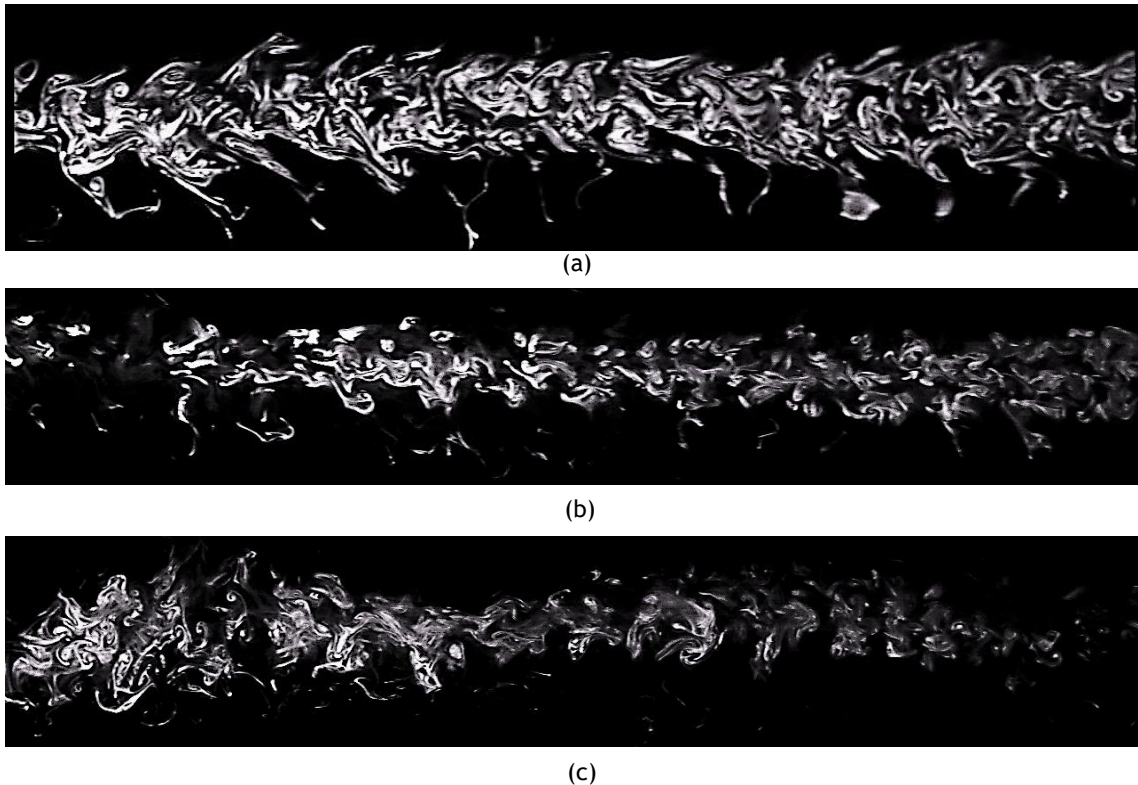


Figura 2.21 Esteira sem asa; (a)  $Re = 6\ 580$  (500fps); (b)  $Re = 11\ 200$  (1000fps); (c)  $Re = 17\ 000$  (2000fps).

O conceito de turbulência, embora de noção intuitiva, é difícil de definir com precisão. É um fenómeno caótico, aleatório, tri-dimensional, dissipativo, com grande capacidade de mistura, etc. As partículas do fluido misturam-se de uma forma não linear. Este fenómeno é associado a uma cascata de energia. Verifica-se a transferência de energia das grandes escalas, com a maior percentagem da energia cinética (turbilhões grandes), para as pequenas escalas (turbilhões pequenos) ou gama dissipativa. A energia cinética é associada a baixas frequências, grandes escalas ou grandes turbilhões. A dissipação viscosa é associada às grandes frequências, pequenas escalas ou pequenos turbilhões. É nesta gama que se processa a dissipação de energia turbulenta. O campo turbulento é essencialmente dissipativo e, para sobreviver, é necessário fornecer-lhe energia.

A sugestão de Kolmogorov foi de que as estruturas da turbulência, na cascata de energia, só podem evoluir de modo a que os fenómenos se concentrem em escalas cada vez menores. Aqui os efeitos viscosos dominam totalmente e a energia cinética turbulenta transforma-se em energia interna do escoamento (na forma de calor). As escalas de Kolmogorov caracterizam os fenómenos mais pequenos, onde a energia cinética turbulenta não é destruída pela viscosidade. Representam o final da cascata de energia. A este nível, o número de Reynolds é aproximado à unidade, o que está coerente com a teoria das mínimas escalas. O cálculo destas escalas é importante para caracterizar a turbulência do escoamento, seja através de comprimento, velocidade ou tempo. Os parâmetros  $\eta_l$ ,  $u_\eta$  e  $\tau_\eta$  são as escalas de Kolmogorov e só dependem

de  $\varepsilon$  e  $\nu_{ar}$ . Representam a escala de comprimento, de velocidade e de tempo, respetivamente. São calculadas a partir das equações 2.8, 2.9 e 2.10.

A letra  $\varepsilon$  representa a taxa média de dissipação de energia por unidade de massa e é calculada pela equação 2.6. As letras  $u$  e  $l$  representam a velocidade característica e o comprimento característico do escoamento, respetivamente. A letra  $l$  é o comprimento do maior turbilhão possível, neste caso a largura do túnel (0.402m). Por sua vez a letra  $\nu_{ar}$  representa a viscosidade cinemática do ar e é calculada pela equação 2.7. Os parâmetros  $\mu_{ar}$  e  $\rho_{ar}$  já foram introduzidos na tabela 2.3.

Na tabela 2.12 estão apresentadas as velocidades utilizadas assim como a viscosidade cinemática  $\nu$  e o comprimento  $l$ . Na tabela 2.13 estão apresentadas as escalas de Kolmogorov assim como as taxas médias de dissipação de energia por unidade de massa, para todos os escoamentos estudados.

$$\varepsilon = \frac{u^3}{l} \quad (2.6)$$

$$\nu_{ar} = \frac{\mu_{ar}}{\rho_{ar}} \quad (2.7)$$

$$\eta_l = \left(\frac{\nu_{ar}^3}{\varepsilon}\right)^{1/4} \quad (2.8)$$

$$u_\eta = (\varepsilon \nu_{ar})^{1/4} \quad (2.9)$$

$$\tau_\eta = (\nu_{ar}/\varepsilon)^{1/2} \quad (2.10)$$

Tabela 2.12 Viscosidade cinemática do ar ( $\nu_{ar}$ ), comprimento  $l$  e velocidades  $u$  utilizadas.

$\nu_{ar}$	$1.52 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
$l$	$0.402 \text{ m}$
$u_{(Re=6\ 580)}$	$1 \text{ m/s}$
$u_{(Re=11\ 200)}$	$1.7 \text{ m/s}$
$u_{(Re=17\ 000)}$	$2.58 \text{ m/s}$

Tabela 2.13 Parâmetros da turbulência para os vários valores de Reynolds.

$Re$	$\varepsilon \text{ [m}^2/\text{s}^3]$	$\eta_l \text{ [m]}$	$u_\eta \text{ [m/s]}$	$\tau_\eta \text{ [s]}$
6 580	2.488	$1.94 \times 10^{-4}$	0.0784	0.00247
11 200	12.2	$1.30 \times 10^{-4}$	0.117	0.00112
17 000	42.7	$9.52 \times 10^{-5}$	0.160	0.000596

Através do cálculo da escala de tempo da turbulência  $\tau_\eta$ , pode-se concluir se as filmagens obtidas a 500fps captam o campo instantâneo dos escoamentos ou se, pelo contrário, integram os fenômenos. No caso do escoamento para  $Re = 6\,580$ , a escala de tempo obtida foi  $\tau_\eta = 0.00247s$ . Esta esteira foi filmada a 500fps (figura 2.21 (a)), o que significa que apresenta imagens num intervalo de  $1s/500 = 0.002s$ . O valor de  $\tau_\eta$  representa o tempo mínimo que o escoamento turbulento necessita para se desenvolver. Conclusivamente, como  $\tau_\eta > 0.002s$ , significa que a taxa de aquisição de imagens é grande e obtêm-se intervalos de imagens inferiores ao tempo necessário para desenvolvimento da turbulência. Assim capta-se o campo instantâneo. Se, pelo contrário, o valor de  $\tau_\eta < 0.002s$ , significa que a taxa de aquisição de imagens é pequena e estas são obtidas num intervalo de tempo maior ao tempo de desenvolvimento da turbulência. Consequentemente as fotografias tiradas estão a integrar o escoamento.

A figura 2.21 (b) teve-se de filmar a uma taxa de 1000fps para obter intervalos de  $1s/1000 = 0.001s$ . Assim  $\tau_\eta > 0.001s$  e, analogamente ao explicado para o primeiro caso, o intervalo de captação de imagens é inferior à escala de tempo para  $Re = 11\,200$  e  $\tau_\eta = 0.00112s$ . Está provada que a figura 2.21 (b) captou o campo instantâneo. Para o escoamento de  $Re = 17\,000$ , teve que se filmar a 2000fps, com intervalos de  $1s/2000 = 0.0005s$  para  $\tau_\eta > 0.0005s$  e captar o campo instantâneo. Esta imagem está apresentada na figura 2.21 (c).

Provou-se assim que as esteiras mostradas na figura 2.21 captaram a turbulência do escoamento e não integraram os fenômenos no tempo. Estas são as esteiras produzidas pelo túnel de vento para as 3 velocidades distintas. Assim, todas as imagens apresentadas no capítulo 3, apresentarão fenômenos provenientes da presença da asa e do seu movimento e não fenômenos produzidos pelo próprio túnel.



# Capítulo 3

## Resultados

O objetivo deste terceiro capítulo é apresentar os resultados obtidos no desenvolver deste trabalho. O capítulo está dividido em cinco secções. A primeira secção tem como objetivo dar a entender ao leitor a forma como foram planeados os ensaios experimentais, o porquê de serem apresentados certos casos apenas e a razão pela qual não foram testadas mais hipóteses. A segunda secção apresenta uma introdução às estruturas básicas que são de esperar nas esteiras de asas em movimento de translação.

Na terceira secção são apresentadas as imagens das esteiras e será feita uma análise às mesmas. Está subdividida em várias subsecções, consoante o valor de  $kh$ . Serão identificados os fenómenos físicos presentes, tipo de libertação de vórtices e a sua evolução ao longo da esteira. Será identificada também a frequência de libertação de vórtices e a sua orientação espacial. Consequentemente será identificado o regime de funcionamento em que a asa se encontra, resistência ao avanço, fase de transição ou regime de produção de impulso.

Na quarta secção é apresentada uma análise dos resultados. Estes serão agrupados segundo parâmetros de funcionamento como a frequência reduzida  $k$ , amplitude reduzida  $h$  e número de Reynolds. Os vários resultados também serão analisados conforme os regimes identificados, tipos de libertação, fenómenos observados, etc.

Na quinta secção os resultados serão comparados com os reportados na literatura, analisando se estes foram coincidentes ou não.

### 3.1 Introdução

Os ensaios foram planeados segundo as 3 velocidades calibradas para o túnel de vento,  $1m/s$ ,  $1.7m/s$  e  $2.58m/s$ . Com o objetivo de ordenar e planejar os testes possíveis de serem feitos, apresenta-se a tabela 3.1. Esta tabela está organizada em 3 colunas principais, em que cada uma delas representa uma série de testes a uma velocidade de escoamento e consequente número de Reynolds de 6 580, 11 200 e 17 000, respetivamente.

Os testes estão organizados por linhas em que cada conjunto de 4 linhas representa as 4 amplitudes diferentes programadas no motor. São elas  $0.028m$ ,  $0.019m$ ,  $0.01m$  e  $0.005m$ . São também apresentados os respetivos valores de  $k$  para serem atingidas as condições de  $kh$  propostas do lado esquerdo da tabela. Estão apresentados os diversos valores de  $kh$  propostos desde 0.0, valor mínimo com a asa imóvel, até ao valor máximo de  $kh = 0.6$ . Este valor fixou-

se, pois, é o valor máximo de  $kh$  que é possível atingir para as velocidades de escoamento definidas e para a máxima frequência do motor. Pelos limites de funcionamento do mesmo, apresentados no capítulo 2, só há uma condição possível para atingir  $kh = 0.6$  e é para  $h = 0.28$ ,  $k = 2.142$ ,  $U_\infty = 1\text{m/s}$  e  $Re = 6\,580$ . Esta condição corresponde à frequência máxima do motor,  $3.41\text{ Hz}$ , para a mesma amplitude.

Para todas as outras amplitudes e velocidades de escoamento, é requerida uma frequência de oscilação do motor superior ao seu máximo. Assim, todas as condições idealizadas, inicialmente, e posteriormente impedidas de serem testadas devido ao impedimento do motor, estão assinaladas a amarelo. A frequência necessária para cada condição foi calculada pela equação 3.1, que deriva da equação 1.3.

Todas as outras condições possíveis foram filmadas. Dentro destes casos, nem todos apresentaram esteiras com interesse de serem apresentadas pois apresentam um comprimento de onda de libertação de vórtices, dado por  $U_\infty/2\pi f$ , demasiado grande para aparecer nas imagens.

Nestes casos, com fundo branco, a esteira apresentava uma forma semelhante à de uma asa estática e apenas com libertação natural de vórtices. A libertação forçada, devido ao movimento da asa, não era perceptível nas imagens gravadas. Estas esteiras não serão apresentadas neste trabalho pois não têm qualquer interesse tendo em conta o objetivo do mesmo, pois, como já referido, pouco diferem de uma esteira em que a asa está parada.

Os restantes casos apresentaram esteiras interessantes e suscetíveis de serem apresentadas neste trabalho. Será sobre essas esteiras, assinaladas a azul, que serão apresentados os resultados obtidos e será feita uma análise detalhada.

$$f = \frac{k U_\infty}{2 \pi c} \quad (3.1)$$

Na tabela 3.2 estão apresentados os 15 casos distintos assinalados a azul na tabela 3.1. Os casos de  $kh = 0.0$  estão divididos em 3, casos 0.1, 0.2 e 0.3, para os valores de Reynolds de 6 580, 11 200 e 17 000, respetivamente. Para além disto também irá ser apresentado um caso especial 3.5 (assinalado a amarelo) que irá ser explicado após ser apresentado o caso 4 mas que, desde já, são apresentadas as suas condições.

Tabela 3.1 Apresentação de todas as condições planeadas. A amarelo estão as condições com frequência superior à do motor. A branco estão as esteiras sem interesse. A azul estão as esteiras que vão ser apresentadas no trabalho.

	<i>Re</i> = 6 580			<i>Re</i> = 11 200			<i>Re</i> = 17 000		
	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>f</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>f</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>f</i>
<i>kh</i> = 0.0	0			0			0		
<i>kh</i> = 0.1	0.28	0.357	0.56	0.28	0.357	0.96	0.28	0.357	1.46
	0.19	0.526	0.83	0.19	0.526	1.42	0.19	0.526	2.16
	0.1	1	1.59	0.1	1	2.70	0.1	1	4.10
	0.05	2	3.18	0.05	2	5.41	0.05	2	8.21
<i>kh</i> = 0.2	0.28	0.714	1.13	0.28	0.714	1.93	0.28	0.714	2.93
	0.19	1.052	1.67	0.19	1.052	2.84	0.19	1.052	4.32
	0.1	2	3.18	0.1	2	5.41	0.1	2	8.21
	0.05	4	6.36	0.05	4	10.82	0.05	4	16.42
<i>kh</i> = 0.3	0.28	1.071	1.70	0.28	1.071	2.89	0.28	1.071	4.39
	0.19	1.578	2.51	0.19	1.578	4.27	0.19	1.578	6.48
	0.1	3	4.77	0.1	3	8.11	0.1	3	12.31
	0.05	6	9.5	0.05	6	16.23	0.05	6	24.63
<i>kh</i> = 0.4	0.28	1.428	2.27	0.28	1.428	3.86	0.28	1.428	5.86
	0.19	2.105	3.35	0.19	2.105	5.69	0.19	2.105	8.64
	0.1	4	6.36	0.1	4	10.82	0.1	4	16.42
	0.05	8	12.73	0.05	8	21.64	0.05	8	32.84
<i>kh</i> = 0.5	0.28	1.785	2.84	0.28	1.785	4.83	0.28	1.785	7.33
	0.19	2.631	4.18	0.19	2.631	7.12	0.19	2.631	10.80
	0.1	5	7.95	0.1	5	13.52	0.1	5	20.53
	0.05	10	15.91	0.05	10	27.05	0.05	10	41.06
<i>kh</i> = 0.6	0.28	2.142	3.41	0.28	2.142	5.79	0.28	2.142	8.79
	0.19	3.1578	5.02	0.19	3.157	8.54	0.19	3.157	12.96
	0.1	6	9.54	0.1	6	16.23	0.1	6	24.63
	0.05	12	19.09	0.05	12	32.46	0.05	12	49.27

Tabela 3.2 Parâmetros referentes a todos os casos apresentados.

Caso	$kh$	$U_{\infty}$ [m/s]	$Re$	$h$	$k$	$f$ [Hz]
0.1	0.0	1.00	6 580	0	0	0
0.2	0.0	1.70	11 200	0	0	0
0.3	0.0	2.58	17 000	0	0	0
1	0.2	1.00	6 580	0.05	4	6.37
2	0.2	1.70	11 200	0.05	4	10.82
3	0.3	1.00	6 580	0.05	6	9.55
3.5	0.3	1.00	6 580	0.075	4	6.37
4	0.3	1.00	6 580	0.1	3	4.77
5	0.3	1.70	11 200	0.1	3	8.12
6	0.3	1.70	11 200	0.19	1.58	4.27
7	0.4	1.00	6 580	0.1	4	6.37
8	0.4	1.00	6 580	0.19	2.1	3.35
9	0.5	1.00	6 580	0.1	5	7.96
10	0.5	1.00	6 580	0.19	2.63	4.19
11	0.5	1.00	6 580	0.28	1,78	2,84
12	0.6	1.00	6 580	0.28	2.14	3.41

Como explicado no capítulo 2, todas as filmagens foram efetuadas do mesmo local, com o mesmo ângulo e à mesma distância da asa. Antes de serem apresentadas quaisquer imagens das esteiras, é apresentada, na figura 3.1, uma fotografia do campo de filmagem da câmara, que irá ser sempre o mesmo. A câmara está a apontar para a asa (canto direito) e está uma régua colocada ao comprimento da esteira. É possível verificar que embora a filmagem seja a um ângulo de  $60^\circ$  com o plano da esteira, o fato de a câmara estar à mesma altura que a asa, faz com que a esteira apresentada seja alinhada na horizontal. Também é possível medir a distância da asa que a câmara consegue filmar a esteira. A régua aponta cerca de  $73\text{cm}$  no canto esquerdo, o que significa que as imagens apresentadas ao longo deste capítulo apresentarão uma esteira com um comprimento de cerca de 7 vezes a corda ( $10\text{cm}$ ) da asa.



Figura 3.1 Medição do comprimento e inclinação da esteira filmada.

## 3.2 Vórtices característicos

Antes de ser apresentada qualquer figura com a esteira da asa, existe um conceito que vai servir de base para a análise de todos os casos neste trabalho. Como introduzido no capítulo 1, em qualquer regime a asa vai libertar vórtices, sejam eles provenientes da própria resistência ao avanço (libertação natural) ou sejam provenientes do movimento de translação (libertação forçada). Os vórtices libertados vão-se apresentar sempre aos pares como esquematizado na figura 3.2. O vórtice da esquerda (círculo vermelho) roda no sentido anti-horário e o vórtice da direita (círculo verde) roda no sentido anti horário. Esta assunção de cores irá ser tomada ao longo de todo este capítulo. Assim, nos resultados obtidos, os vórtices girando em sentido horário estarão assinalados a verde, enquanto que os vórtices em sentido anti-horário estarão assinalados a vermelho.

A disposição destes dois vórtices cria a espécie de um jato (seta amarela) no meio do mesmo, o que sugere a existência de uma força neste mesmo sentido. Estes vórtices agrupados originam uma forma no escoamento semelhante a um cogumelo. Por esta razão estas estruturas são apelidadas de vórtices em “cogumelo” e aparece uma bem esquematizada na figura 3.2. A análise da orientação deste tipo de vórtices vai ser fundamental na classificação dos regimes em que a asa se encontra. Por exemplo, se o “cogumelo” estiver a apontar para montante do escoamento isto sugere a existência de uma força neste sentido, ou seja, resistência ao avanço. Se, por outro lado, o “cogumelo” estiver a apontar para jusante do escoamento, uma força de impulso está a ser produzida pela asa. Finalmente, se o “cogumelo” apenas apontar exatamente na vertical como é o caso da figura 3.2, não existem forças na direção do escoamento de aproximação, pelo menos na zona do “cogumelo” podendo existir efeitos viscosos ou inercias noutros locais e alheios a esta mesma estrutura.

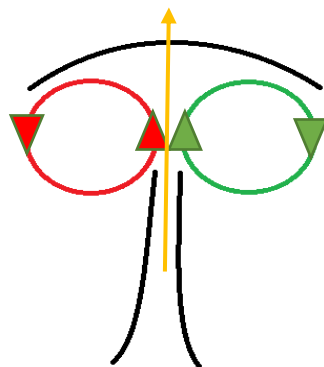


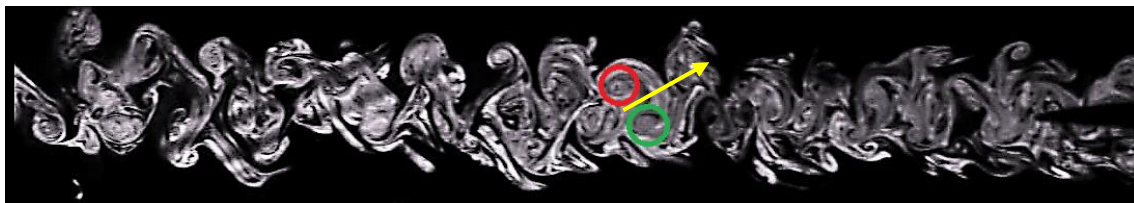
Figura 3.2 Esquematização de um vórtice do tipo “cogumelo”.

## 3.3 Visualização

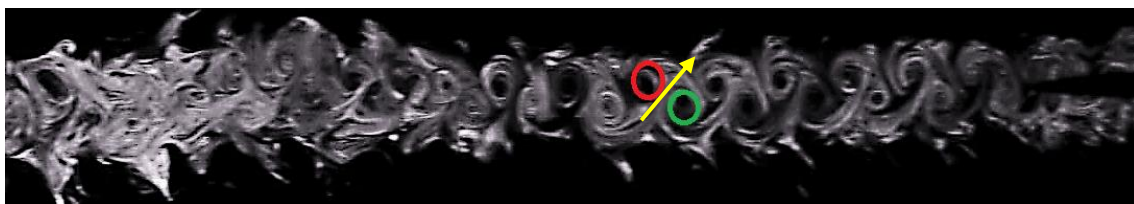
### 3.3.1 $kh = 0.0$

Na figura 3.3 são apresentados os primeiros casos de estudo para um  $kh = 0.0$ . O caso 0.1 para, para um valor de Reynolds de 6 580, está apresentado na figura 3.3 (a). O caso 0.2, para um valor de Reynolds de 11 200, está apresentado na figura 3.3 (b) e o caso 0.3 para um valor de Reynolds de 17 000 está apresentado na figura 3.3 (c). Em todos os casos é possível identificar também a esteira de Von Kármán, tal como reportado por Platzer et al. [4] (2008). Esta esteira desenvolve-se através da formação de duas filas de vórtices, uma fila acima da linha média da esteira girando em sentido anti-horário (assinalados a vermelho) e uma fila abaixo da linha média girando em sentido horário (assinalados a verde). A libertação do tipo de vórtices apresentados nesta figura ocorre devido aos efeitos viscosos entre a asa e o escoamento e chama-se, segundo Young et al. [24] (2007), libertação natural. Isto porque ocorre de uma forma natural conforme o fluido passa na asa e sem oscilação da mesma.

É possível identificar os vórtices do tipo “cogumelo”. Aqui estas estruturas parecem apontar para cima e no sentido montante do escoamento, como indicam as várias figuras, sugerindo a existência de uma força neste mesmo sentido, ou seja, uma força de resistência ao avanço.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.3 Esteira com asa imóvel; (a) Caso 0.1,  $kh = 0.0$ ,  $Re = 6\,580$ ; (b) Caso 0.2,  $kh = 0.0$ ,  $Re = 11\,200$ ; (c) Caso 0.3,  $kh = 0.0$ ,  $Re = 17\,000$ ; Círculos vermelhos: vórtices no sentido anti-horário; Círculos verdes: vórtices no sentido horário.

### 3.3.2 $kh = 0.2$

Na figura 3.4 está apresentada a esteira do caso 1 ( $kh = 0.2, h = 0.05, Re = 6\ 580$ ). Em cima, na figura 3.4 (a), está apresentada a esteira visualizada. Em baixo, na figura 3.4 (b), está apresentada uma esquematização da mesma, identificando os vórtices, linha média (a amarelo) e outras estruturas consideradas importantes.

Todos os casos daqui em diante serão apresentados com duas imagens (a) e (b) na mesma figura, assim como apresentado na figura 3.4. Esta organização tem como objetivo melhorar a compreensão dos fenómenos apresentados e identifica-los de uma maneira clara.

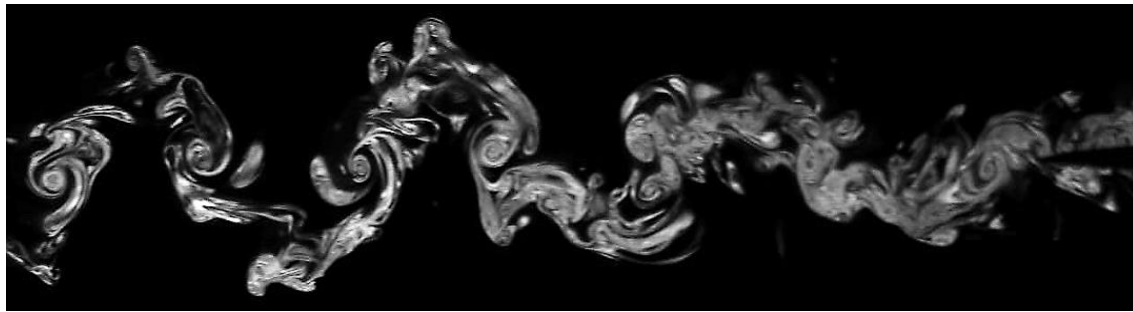
No caso 1 é possível identificar desde logo a presença de 3 pares de vórtices que resultam de 3 ciclos de movimento completos efetuados pela asa. Em cada ciclo a asa liberta 2 vórtices, um gira no sentido horário e o outro no sentido anti-horário. A libertação deste tipo de vórtices é dependente da frequência de translação da asa e por isso, segundo Young et al. [24] (2007), é apelidada de libertação forçada. Neste tipo de libertação o vórtice horário é libertado pelo intradorso quando a asa atinge o topo superior. O vórtice anti-horário é libertado pelo extradorso quando a asa atinge o topo.

É de salientar também que o escoamento e os vórtices só se tornam mais evidentes no lado esquerdo da imagem quando já tiveram mais tempo para se desenvolverem.

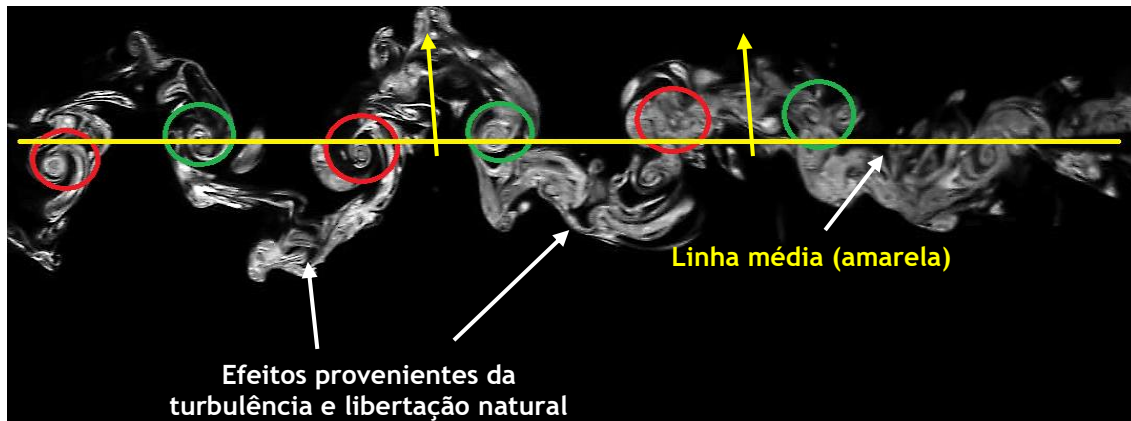
Na figura 3.4 (b) é possível verificar que os grandes vórtices estão todos mais ou menos alinhados (linha amarela), sendo que cada par se anula, pois, cada um gira em sentido oposto. Esta é uma estrutura de esteira característica da fase de transição entre a resistência ao avanço e a produção de impulso. Aqui os “cogumelos” deixaram a sua orientação para montante, como apresentado nos casos 0.1, 0.2 e 0.3, e estão orientados na vertical (setas amarelas). Esta orientação, mais uma vez, sugere uma esteira de transição.

Verificam-se também, entre os grandes vórtices, alguns efeitos provenientes da turbulência e vórtices reminiscentes da libertação natural. Estes efeitos estão indicados na figura 3.4 (b).

Lai et al. [23] (1999) reportou um caso com uma estrutura que apresentou algumas semelhanças ( $kh = 0.196, h = 0.0125, Re = 20\ 000$ ), mas apenas com os vórtices em cogumelo e sem estes efeitos “pelo meio”.



(a)



(b)

Figura 3.4 Visualização da esteira do caso 1 ( $kh = 0.2, h = 0.05, Re = 6\,580$ ); (a) Esteira; (b) Esquemática.

A esteira referente ao caso 2 ( $kh = 0.2, h = 0.05, Re = 11\,200$ ) está apresentada na figura 3.5 e apenas mudou a velocidade do escoamento de aproximação para  $1.7\text{m/s}$ ,  $Re = 11\,200$ . É uma esteira, que pelo fato de apresentar um valor de  $k$  igual ao do caso 1,  $k = 4$ , vai apresentar uma esteira com as “marcas” referentes mais ou menos à mesma quantidade de ciclos, ou seja, 3 ciclos completos de movimento.

Em cada ciclo é possível verificar que a asa liberta 2 pares de vórtices, um par que gira no sentido horário e outro que gira no sentido anti-horário. No movimento ascendente é libertado um vórtice horário e o outro é libertado quando a asa chega ao topo superior do movimento. É libertado um vórtice no movimento descendente e o outro quando a asa atinge o topo inferior do movimento, ambos no sentido anti-horário. Neste tipo de liberação verifica-se a interação entre a frequência de liberação natural e a frequência de translação, originando a liberação harmônica, segundo Young et al. [24] (2007). Este modo de liberação representa a transição da estrada de Von Kármán normal, para a estrada de Von Kármán invertida. É curioso que o fato de apenas se ter mudado o número de Reynolds em relação ao caso 1, isto afetou a estrutura da esteira, permanecendo no mesmo regime.

Um caso parecido, típico de transição, foi reportado por Lai et al. [23] (1999) para as condições de  $kh = 0.098, h = 0.0125$  e  $Re = 20\,000$ .

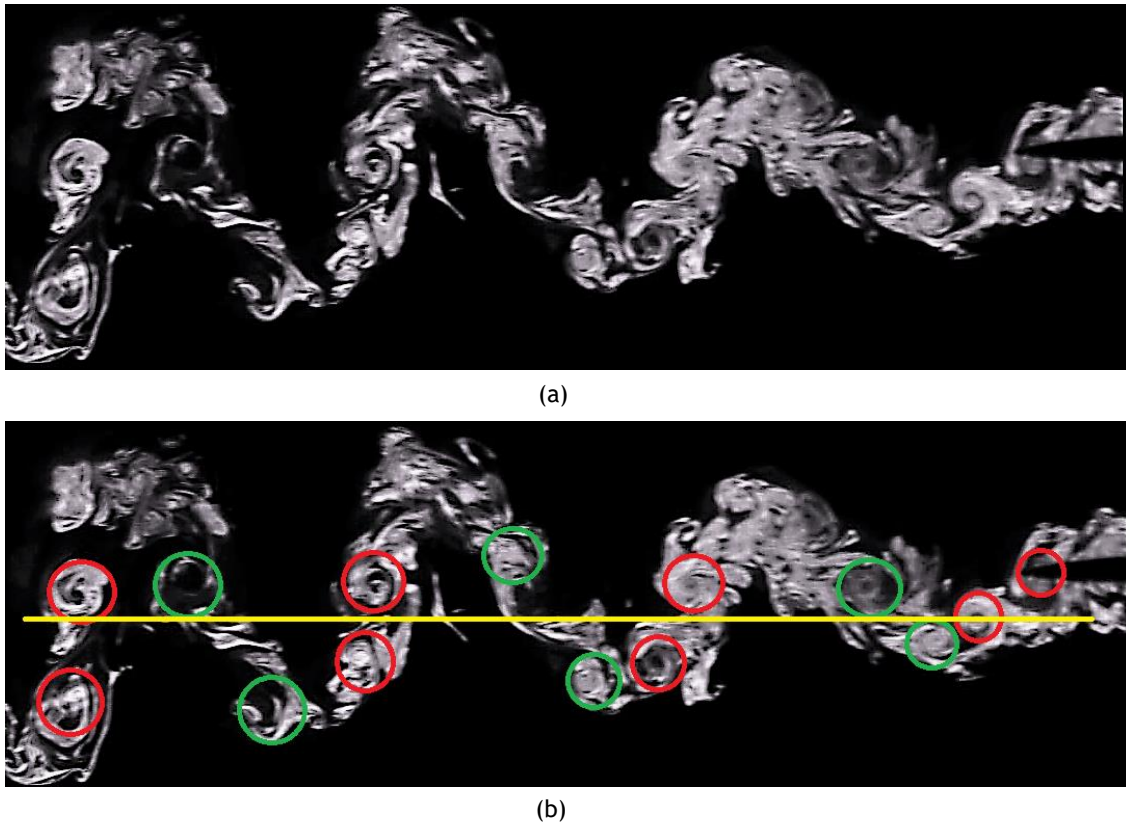


Figura 3.5 Visualização da esteira do caso 2 ( $kh = 0.2, h = 0.05, Re = 11\ 200$ ); (a) Esteira; (b) Esquematização.

### 3.3.3 $kh = 0.3$

De seguida, na figura 3.6, é apresentado o caso 3 ( $kh = 0.3, h = 0.05, Re = 6\ 580$ ). O valor de  $kh$  aumentou para 0.3 e é possível ver as marcas de mais de 4 ciclos completos na esteira.

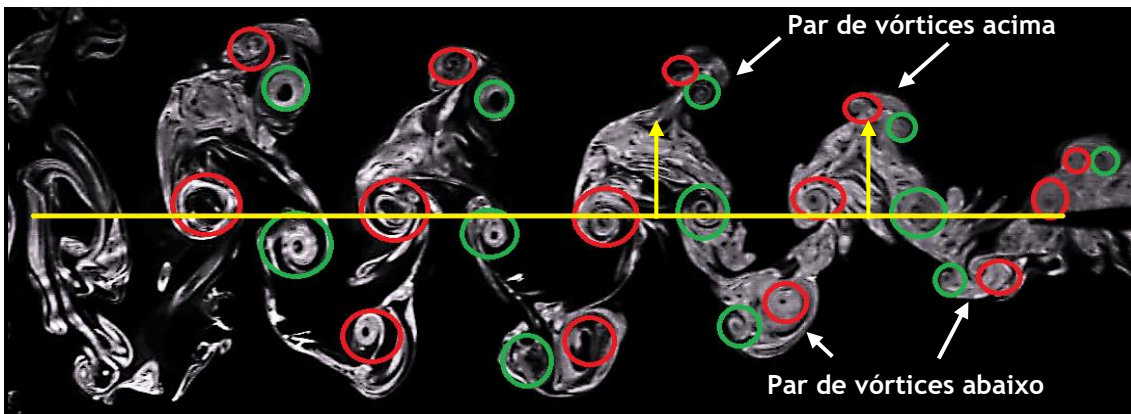
Em cada ciclo é evidente a libertação de um par de vórtices de sentido oposto que forma o “cogumelo”, libertação forçada. Este fenómeno de libertação já foi explicado no caso 1. De fato esta esteira é uma esteira muito semelhante à do caso 1. Tem o mesmo tipo de libertação e os vórtices estão alinhados, sendo um caso também de transição. A única diferença é que aqui o escoamento parece estar bem mais definido.

Nota-se que os pares estão alinhados quando libertados pela asa e se vão inclinando ligeiramente para montante do escoamento quando este se desenvolve. Para além disto, esta condição também causou alguns fenómenos mais complexos como por exemplo a libertação de um par de vórtices acima do cogumelo principal e outro par na linha inferior. Estes vórtices não foram reportados na literatura. A sua origem ainda não está bem esclarecida mas, terá a ver com efeitos viscosos provenientes da formação dos grandes vórtices na linha média.

No que toca aos grandes vórtices da linha média Lai et al. [23] (1999) reportou um caso muito semelhante a este para  $kh = 0.196, h = 0.0125$  e  $Re = 20\ 000$ .



(a)



(b)

Figura 3.6 Visualização da esteira do caso 3 ( $kh = 0.3$ ,  $h = 0.05$ ,  $Re = 6\,580$ ); (a) Esteira; (b) Esquemática.

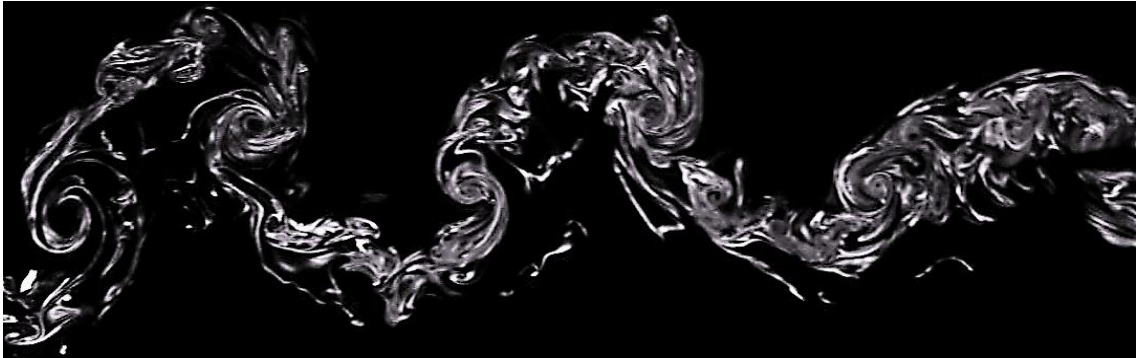
Na figura 3.7 está apresentado o caso 4 ( $kh = 0.3$ ,  $h = 0.1$ ,  $Re = 6\,580$ ). O número de Reynolds e  $kh$  mantiveram-se constantes, aumentou-se o valor de  $h$  para 0.1 e diminuiu-se o valor de  $k$  para 3. É possível identificar as marcas na esteira de cerca de 3 ciclos de movimento.

Em cada ciclo a asa libertou um par de vórtices em sentido contrário formando o “cogumelo”. Estamos perante a libertação forçada, em que o fenómeno de libertação dominante é a frequência de translação da asa. Este fenómeno de libertação dominante verificou-se no caso 1 e 3.

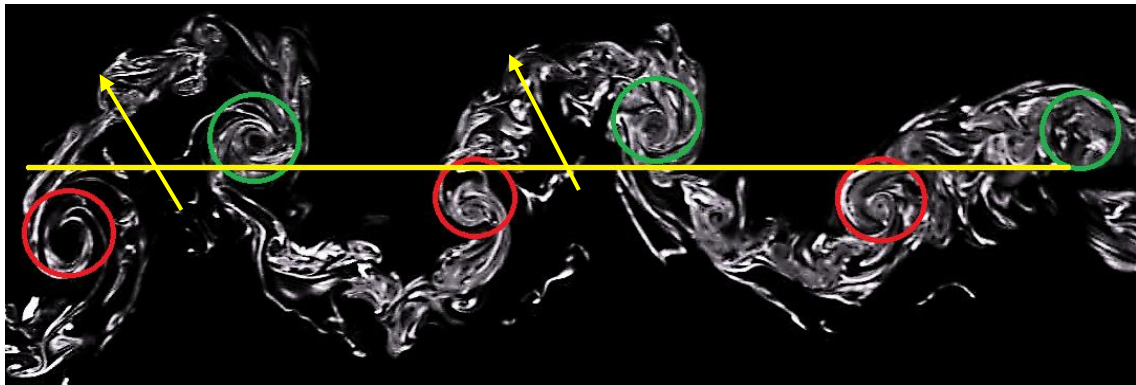
Através da linha média amarela podemos ver que os vórtices verdes (sentido horário) estão acima desta, enquanto que os vórtices vermelhos (sentido anti-horário) estão abaixo desta. Isto significa que na linha média é formado uma espécie de jato e, como reação, uma força de impulso é exercida na asa.

Este dado é curioso pois para o mesmo valor de  $kh$  e apenas alterando os valores individuais de  $k$  e  $h$ , em relação ao caso 3, a asa deixou de ter os “cogumelos” alinhados e passou a tê-los inclinados para jusante do escoamento. Consequentemente a estrutura de esteira mudou. Isto

prova a importância dos parâmetros  $h$  e  $k$  considerados individualmente e não apenas como  $kh$ , confirmando as conclusões de vários autores como, por exemplo, Young et al. [25] (2004). Lai et al. [23] (1999) reportou um caso bastante parecido para  $kh = 0.393$ ,  $h = 0.05$  e  $Re = 20\,000$ .



(a)



(b)

Figura 3.7 Visualização da esteira do caso 4 ( $kh = 0.3$ ,  $h = 0.1$ ,  $Re = 6\,580$ ); (a) Esteira; (b) Esquemática.

Dado o fato de o caso 3 e 4 terem apresentado esteira tão diferentes e distintas para os mesmos valores de  $kh$ , Reynolds e apenas com a mudança de  $h = 0.05$ , no caso 3, para  $h = 0.1$  no caso 4, achou-se conveniente encontrar a origem e quais as razões de tal discrepância. Para isso programou-se o motor, da mesma forma que foi feito e descrito até aqui, para uma amplitude intermédia destes 2 casos,  $h = 0.075$ .

A velocidade do escoamento foi mantida ( $Re = 6\,580$ ) e uma frequência de  $6.37\text{ Hz}$  para originar um  $k = 4$  e consequentemente o mesmo valor de  $kh = 0.3$ . A esteira obtida está apresentada na figura 3.8. A estrutura é de análise igual à que foi feita no caso 4. Isto significa que a transição para a esteira do caso 3 estará algures para uma amplitude  $0.075 < h < 0.1$  ( $kh = 0.3$  e  $Re = 6\,580$ ).

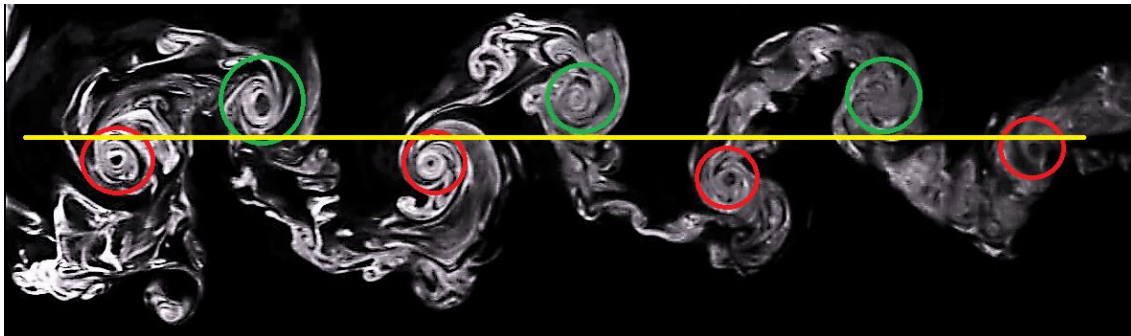


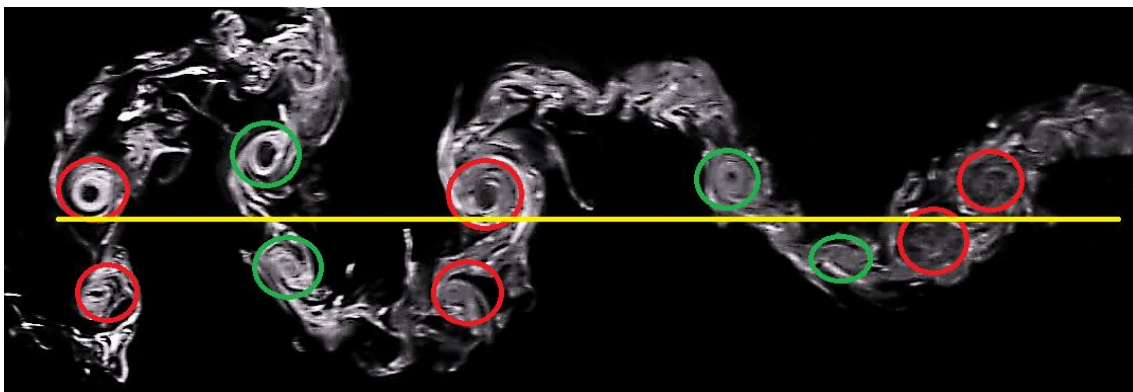
Figura 3.8 Esquemática da esteira do caso 3.5 ( $kh = 0.3, h = 0.075, Re = 6\,580$ ).

O caso 5 ( $kh = 0.3, h = 0.1, Re = 11\,200$ ) apresentado na figura 3.9, apresenta os mesmos valores de  $k$  e  $h$ . Apenas a velocidade do escoamento aumentou para  $1.7\text{m/s}$ , sendo  $Re = 11\,200$ .

É possível identificar as marcas de cerca de dois ciclos e meio de movimento na esteira. Esta estrutura é muito semelhante à estrutura do caso 2. A asa liberta 2 pares de vórtices por ciclo de oscilação, estando na zona de liberação harmônica. Este tipo de liberação também já foi explicado no caso 2. É curioso que o fato de apenas se ter mudado o número de Reynolds em relação ao caso 4, isto afetou a estrutura da esteira.



(a)



(b)

Figura 3.9 Visualização da esteira do caso 5 ( $kh = 0.3, h = 0.1, Re = 11\,200$ ) (a) Esteira; (b) Esquemática.

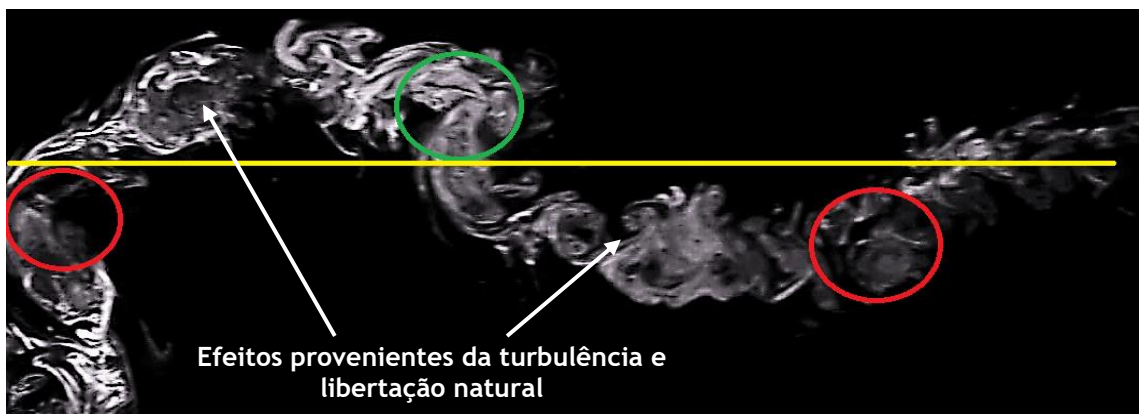
Lai et al. [23] (1999) reportou um caso com a mesma estrutura para  $kh = 0.196$ ,  $h = 0.025$  e  $Re = 20\ 000$ .

O caso 6 ( $kh = 0.3$ ,  $h = 0.19$ ,  $Re = 11\ 200$ ) apresentado na figura 3.10 manteve o número de Reynolds e o  $kh$ . Mudaram-se os valores individuais para  $h = 0.19$  e  $k = 1.58$ .

Apenas se identificam as marcas referentes a um ciclo e meio de oscilação. Aqui são visíveis os grandes vórtices libertados pela frequência de translação. Entres estes grandes vórtices são visíveis outros efeitos derivados da turbulência e que também podem conter vestígios de vórtices da libertação natural. Não é possível dizer que estamos presentes uma libertação forçada, natural ou zona harmónica. É possível identificar o vórtice superior como rodando no sentido horário e os inferiores no sentido contrário, criando uma espécie de jato na linha média. Se estes fossem os únicos efeitos, a esteira seria representativa de produção de impulso. Como os efeitos entre estes grandes vórtices são consideráveis, a esteira em forma de pode, ou não, ser anulada. Por esta razão, não é possível afirmar com certeza em que regime a asa se encontra.



(a)



(b)

Figura 3.10 Visualização da esteira do caso 6 ( $kh = 0.3$ ,  $h = 0.19$ ,  $Re = 11\ 200$ ); (a) Esteira; (b) Esquematização.

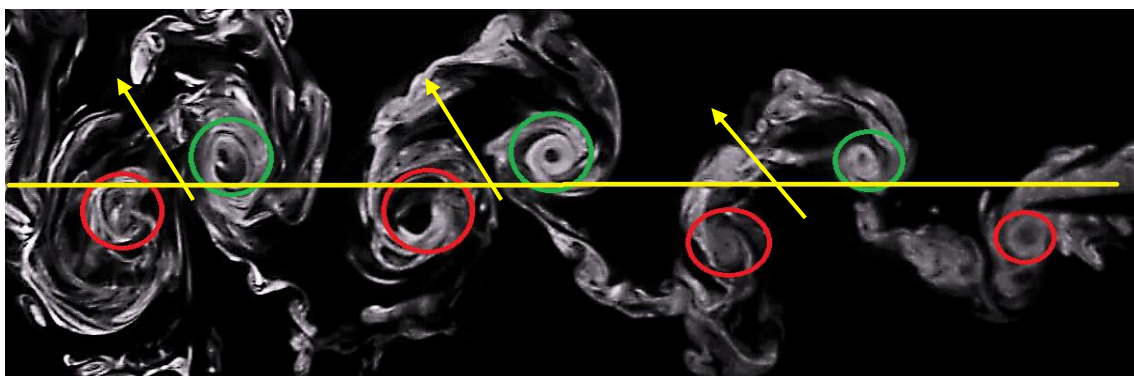
### 3.3.4 $kh = 0.4$

A partir daqui, só serão apresentadas esteiras a um número de Reynolds de 6 580, pois foi a única condição que permitiu a simulação de valores de  $kh$  mais elevados (0.4, 0.5 e 0.6). Os regimes apresentados serão todos muito semelhantes. Será possível identificar a libertação de um par de vórtices por ciclo, libertação forçada, pois o fenómeno de libertação dominante é a frequência de translação. Os “cogumelos” estão inclinados para jusante do escoamento com a criação de um jato na linha média e consequente produção de impulso pela asa. As esteiras são bem definidas e prevalecem os efeitos inerciais no escoamento.

O caso 7 ( $kh = 0.4, h = 0.1, Re = 6\,580$ ) é apresentado na figura 3.11. O valor de  $kh$  subiu para 0.4 e  $h$  diminuiu para 0.1. É possível identificar as marcas de cerca de 3 ciclos de movimento. A asa continua a libertar 1 par de vórtices por ciclo (libertação forçada), cada um em sentido contrário, notando-se perfeitamente a inclinação dos “cogumelos” para jusante (setas amarelas). Os vórtices na linha de cima rodam no sentido horário e os da linha de baixo em sentido anti-horário, originando assim um jato e, como reação, uma força de impulso é exercida na asa.



(a)



(b)

Figura 3.11 Visualização da esteira do caso 7 ( $kh = 0.4, h = 0.1, Re = 6\,580$ ); (a) Esteira; (b) Esquemática.

A asa está no regime de produção de impulso. Também é possível verificar já alguma dissipação do escoamento no final da esteira, no lado esquerdo da imagem. Lai et al. [23] (1999) reportou um caso muito idêntico para  $kh = 0.393$ ,  $h = 0.05$  e  $Re = 20\ 000$ .

O caso 8 ( $kh = 0.4$ ,  $h = 0.19$ ,  $Re = 6\ 580$ ) é apresentado na figura 3.12 e mantém o valor de  $kh = 0.4$  e subiu a amplitude para  $h = 0.19$ . Neste caso achou-se suficiente esquematizar apenas a esteira pois é um caso de análise semelhante ao caso anterior (caso 7). O comprimento de onda de libertação de vórtices forçados é menor, verificando-se apenas as marcas de 2 ciclos de movimento.

Em cada ciclo a asa liberta um par de vórtices (libertação forçada). Os vórtices horários estão na linha de cima e os anti-horários na linha de baixo. Os “cogumelos” estão orientados para jusante (setas amarelas) e há assim a criação de um jato de fluido na linha média da esteira. A asa está assim a produzir impulso. Jones et al. [21] (1998) reportou um caso com estrutura muito semelhante a este para  $kh = 0.589$ ,  $h = 0.075$  e  $Re = 20\ 000$ .

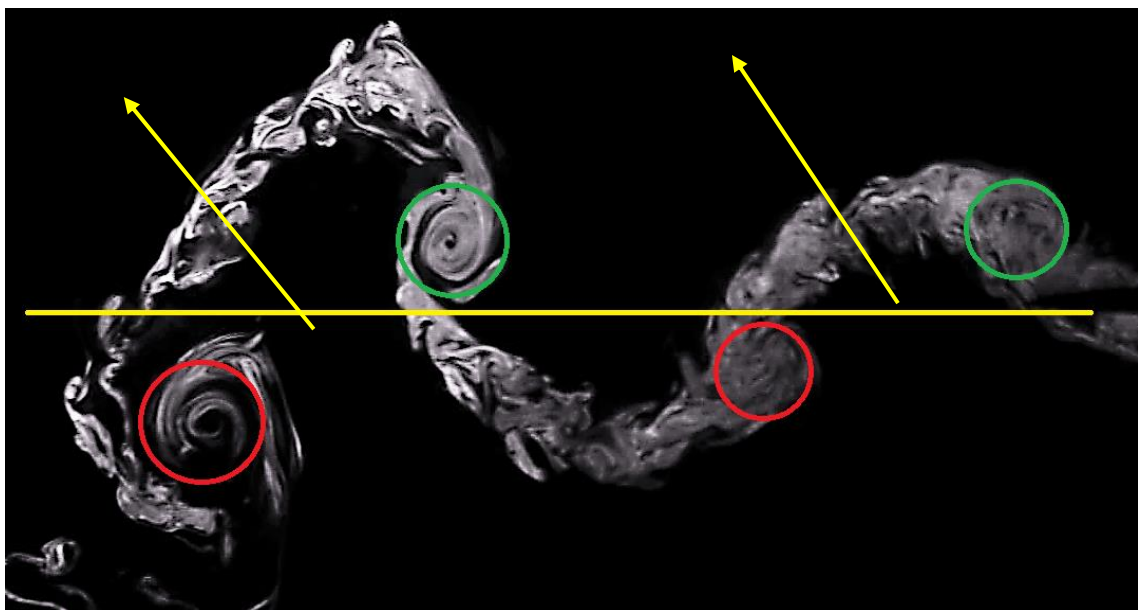


Figura 3.12 Esquematização da esteira do caso 8 ( $kh = 0.4$ ,  $h = 0.19$ ,  $Re = 6\ 580$ ).

Os próximos 4 casos (9 a 12) irão ser apresentados numa única imagem e sem esquematização pois a sua análise é toda muito semelhante aos casos de produção de impulso apresentados até aqui). É visível a libertação de um par de vórtices por ciclo de movimento, libertação forçada. É fácil a identificação de vórtices e pela análise da disposição dos mesmos, pode-se concluir que a asa está no regime de produção de impulso.

### 3.3.5 $kh = 0.5$

Os casos 9, 10 e 11 têm um  $kh = 0.5$  e  $Re = 6\,580$  e são apresentados nas figuras 3.13, 3.14 e 3.15, respectivamente. Têm estruturas muito semelhantes aos casos 7 e 8, conforme o comprimento de onda de libertação vai aumentando (menor  $k$ ). A sua caracterização é igual. Alguma da dissipação reportada no caso 7 na figura 3.11 é agora mais evidente nestes casos. Lai et al. [23] (1999) reportou um caso muito semelhante para  $kh = 0.785$ ,  $h = 0.1$  e  $Re = 20\,000$ .



Figura 3.13 Visualização da esteira do caso 9 ( $kh = 0.5, h = 0.1, Re = 6\,580$ ).



Figura 3.14 Visualização da esteira do caso 10 ( $kh = 0.5, h = 0.19, Re = 6\,580$ ).



Figura 3.15 Visualização da esteira do caso 11 ( $kh = 0.5, h = 0.28, Re = 6\ 580$ ).

### 3.3.6 $kh = 0.6$

Analogamente é apresentado o caso 12 na figura 3.16 com a produção de impulso para um  $kh = 0.6, h = 0.28$  e  $Re = 6\ 580$ . Verifica-se que com o aumento de  $kh$ , a dissipação do escoamento ao longo da esteira também aumenta. A disposição dos vórtices permanece igual e há uma maior inclinação dos “cogumelos”. Lai et al. [23] (1999) reportou um caso quase igual para  $kh = 0.785, h = 0.1$  e  $Re = 20\ 000$ .



Figura 3.16 Visualização da esteira do caso 12 ( $kh = 0.6, h = 0.28, Re = 6\ 580$ ).

### 3.4 Análise de Resultados

Nesta secção irá ser apresentada uma análise de todos os resultados sob a forma de resumo.

Na figura 3.17 estão distribuídas as condições testadas para um número de Reynolds de 11 200. Ao todo foram testados 4 casos nestas condições. No caso 0.2 a asa manteve-se estacionária e por isso observou-se a estrada de Von Kármán, pertencendo ao regime de resistência ao avanço. Os casos 2 e 5 apresentaram uma esteira de transição enquanto que o caso 6 não foi claro quanto ao regime.

Na figura 3.18 estão distribuídas as condições testadas para  $Re = 6\,580$ . Ao todo foram obtidos 10 casos. O caso 0.1, com a asa parada, apresentou resistência ao avanço. Os casos 1 e 3 já apresentaram uma esteira de transição. Todos os restantes (casos 3.5, 4, 7, 8, 9, 10, 11 e 12) apresentaram regime de produção de impulso.

Na figura 3.19 estão representados todos os casos testados.

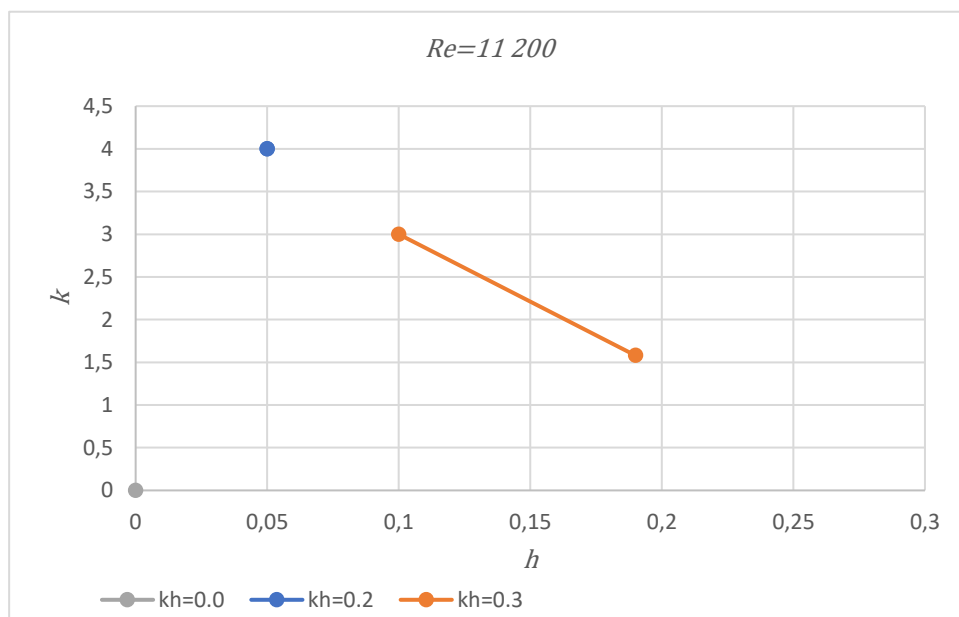


Figura 3.17 Plano  $k - h$  para os casos testados a  $Re = 11\,200$ .

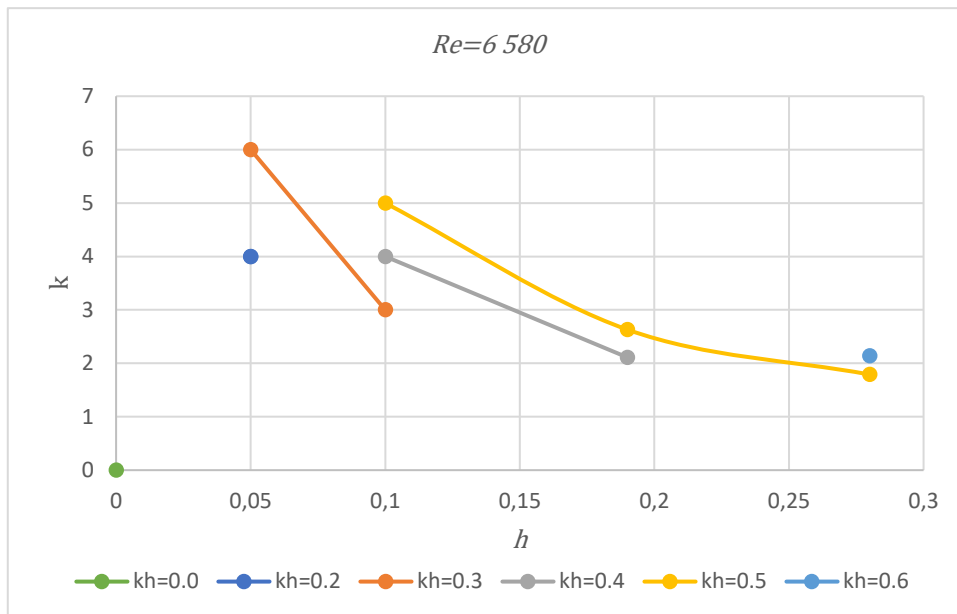


Figura 3.18 Plano  $k - h$  para os casos testados a  $Re = 6580$ .

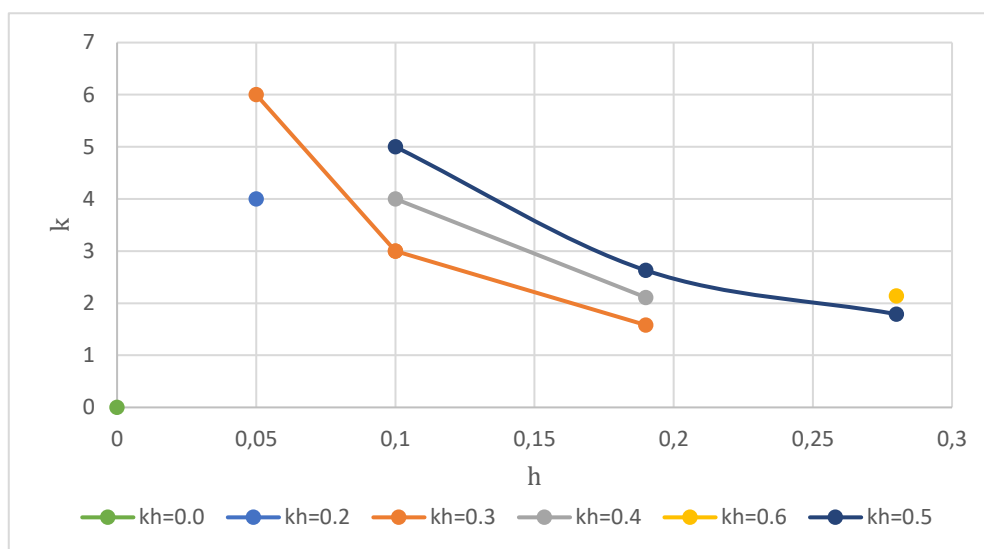


Figura 3.19 Plano  $k - h$  para todos os casos testados.

Na tabela 3.3 está apresentada a identificação dos regimes de cada caso analisado.

Por sua vez, na tabela 3.4 estão identificados os regimes dominantes de libertação de vórtices, descritos na secção anterior na análise de cada caso.

Tabela 3.3 Identificação do regime de funcionamento da asa para cada caso.

<i>kh</i>	Caso	Resistência ao avanço	Transição	Produção de impulso
0.0	0.1, 0.2 e 0.3	x		
0.2	1		x	
	2		x	
	3		x	
0.3	3.5			x
	4			x
	5		x	
	6	-	-	-
0.4	7			x
	8			x
0.5	9			x
	10			x
	11			x
0.6	12			x

Tabela 3.4 Fenómenos de libertação dominantes nos casos analisados.

Fenómeno de libertação dominante				
<i>kh</i>	Caso	Libertação Natural	Zona Harmónica	Libertação forçada
0.0	0.1, 0.2 e 0.3	x		
0.2	1			x
	2		x	
	3			x
0.3	3.5			x
	4			x
	5		x	
	6	-	-	-
0.4	7			x
	8			x
0.5	9			x
	10			x
	11			x
0.6	12			x

Pela análise dos resultados apresentados na tabela 3.3, é possível afirmar que foram reproduzidos os regimes de resistência ao avanço, regime de transição e produção de impulso com a estrada de Von Kármán invertida.

Verificaram-se bastantes dificuldades em obter valores de  $kh = 0.1$ . Isto porque para se obter uma esteira suscetível de ser analisada, o comprimento de onda de libertação dos vórtices forçados tem que ser pequeno o suficiente para se misturar com a libertação natural. Dado o baixo valor de  $kh$ , enquanto se tentava obter uma frequência  $f$  mais elevada para a libertação forçada de vórtices ser maior, o valor de  $h$  decrescia muito e ficava uma amplitude tão baixa que não era possível visualizar libertação forçada. Apenas era possível verificar libertação natural de vórtices e esse não é o interesse deste trabalho.

A transição de regimes parece ocorrer para a gama de  $0.2 \leq kh \leq 0.3$ . Nos casos 3 e 4, a esteira mudou de regime quando se alterou  $h$ , mantendo-se  $kh$  constante. Nos casos 4 e 5, a esteira mudou de regime quando se mantiveram  $k$  e  $h$  constantes, mudando  $Re$ .

Para  $kh \geq 0.4$ , verificaram-se apenas esteiras com produção de impulso.

Não foi possível obter o regime de esteira defletida com produção de impulso e sustentação simultânea pois este regime implica a existência de valores de  $kh$  muito elevados (superiores a 1.5), limitados pela instalação.

Pela tabela 3.4, pode-se afirmar que foram reproduzidos todos os tipos de libertação de vórtices descritos por Young et al. [24] (2007). Estes fenómenos são a libertação natural de vórtices, libertação forçada e zona de libertação harmónica.

Entre os casos 1 e 2, assim como entre os casos 4 e 5, verificou-se que, com a subida de  $Re$ , mantendo  $k$  e  $h$  constantes, o tipo de libertação mudou. Apenas se verificou libertação na zona harmónica para condições a  $Re = 11\ 200$ .

De entre as 4 condições testadas para  $kh = 0.3$ , todas as combinações de  $k$ ,  $h$  e  $Re$  parecem ter resultado em esteiras diferentes. Apenas uma combinação de  $k$ ,  $h$  e  $Re$  (caso 5), parece ter resultado em libertação harmónica.

## 3.5 Comparações com a Literatura

Nesta secção serão apresentadas comparações dos resultados obtidos com alguns trabalhos na literatura e critérios apresentados para classificação de esteiras. Os fenómenos de transição, libertação de vórtices e regimes serão analisados e comparados com os casos que já foram reportados, concluindo se houve semelhanças ou não e quais as razões mais prováveis.

### 3.5.1 Jones et al. [21] (1998)

No que toca à esteira no regime de transição e no regime de produção de impulso foi possível obter resultados muito semelhantes. O caso 3 ( $kh = 0.3$ ) aproxima-se muito ao caso de transição reportado pelos autores ( $kh = 0.46$ ), embora sem os pares de vórtices acima e abaixo da linha média. O caso 7 ( $kh = 0.4$ ) foi o caso obtido que mais se aproximou à esteira de impulso obtida pelos autores ( $kh = 0.6$ ). A diferença parece estar, sobretudo, no fato de os valores de  $kh$  não coincidirem exatamente.

Como já analisado e explicado na secção anterior, os casos de esteira defletida e resistência ao avanço (para uma asa não estacionária,  $kh \neq 0.0$ ) obtidos pelos autores não foram possíveis de recriar.

### 3.5.2 Lai et al. [23] (1999)

É de salientar que no presente trabalho variou-se o  $kh$  numa escala de 0.1 e os autores indicados fizeram-no numa escala de 0.2. Conforme se foram apresentando os resultados na secção 3.3, foi-se referindo se estes autores tinham reportado casos semelhantes ou não. De uma maneira geral verificaram-se resultados concordantes, embora para condições ligeiramente diferentes. Os casos menos concordantes, como descritos, aconteceram para gama  $0.2 \leq kh \leq 0.3$ .

Estes autores definiram a transição de modos para o intervalo  $0.2 \leq kh \leq 0.4$ . Este intervalo comprovou-se neste trabalho ( $0.2 \leq kh \leq 0.3$ ).

### 3.5.3 Andersen et al. [31] (2017)

Estes autores estudaram as esteiras num túnel de filme de sabão para um leque de casos muito superior aos apresentados neste trabalho, mas foi possível fazer uma pequena comparação. Aqui conseguiram-se reproduzir as esteiras com estrada de Von Kármán, Von Kármán invertido, esteiras do tipo 2S (dois vórtices simples por ciclo) com vórtices alinhados e esteiras 2P (dois pares de vórtices por ciclo). Aqui os autores definiram a transição para  $kh \approx 0.5$ , um pouco acima do verificado no presente trabalho,  $kh \approx 0.3$ .

# Capítulo 4

## Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste último capítulo são apresentadas as conclusões tiradas deste trabalho, tendo em conta os objetivos que foram propostos e os resultados obtidos. Será também indicada a sua contribuição para o tema da biomimética e, neste caso em específico, para o estudo das esteiras de asas batedoras. Será também apresentada uma secção com sugestões de caminhos a seguir em trabalhos futuros.

### 4.1 Conclusões

Como introduzido no capítulo 1, a maior parte dos trabalhos experimentais nesta área têm-se centrado em estudos em água, tendo pouca relevância na área da Aeronáutica. Por esta razão se decidiu iniciar o estudo, deste tema em específico, em ar. Idealizou-se, projetou-se e construiu-se uma instalação experimental que permitisse a visualização da esteira de uma asa batidora com movimento puramente translacional e com um ângulo de incidência de  $0^\circ$ .

Primeiramente, é de salientar, que todos os objetivos propostos e descritos no capítulo 1 foram cumpridos com sucesso. Toda a projeção e construção da instalação foi bem-sucedida. Esta ficou capaz de experimentar várias condições no funcionamento da asa, desde diferentes amplitudes e frequências, testando uma gama de  $0.0 \leq kh \leq 0.6$ . Também se testou a influência do número de Reynolds ( $Re$ ) na esteira.

Durante todo o trabalho, o ar mostrou-se ser um ambiente complexo e difícil de trabalhar, razão pela qual existem poucos trabalhos neste tipo de fluido. Uma das grandes dificuldades deste trabalho residiu na correta injeção de fumo no escoamento, para sua visualização. Pouco fumo não permitia a filmagem a taxas elevadas pois as partículas iluminadas pelo laser eram poucas. Demasiado fumo ofuscava a luz do laser e tornava alguns fenómenos e contornos da esteira pouco perceptíveis. A tarefa de obter boas imagens foi bastante desafiante, mas, concluída com sucesso.

Inicialmente estavam propostas três velocidades diferentes para testar, mas apenas os valores de Reynolds de 6 580 e 11 200 obtiveram resultados passíveis de serem apresentados, por razões já explicadas.

Neste trabalho comprovou-se a presença de alguma turbulência à saída do túnel. Este fenómeno foi caracterizado no capítulo 2 através do cálculo das escalas de Kolmogorov. A turbulência fez com que os fenómenos presentes nas esteiras fossem menos definidos devido à capacidade de

mistura dos turbilhões, comparativamente com os estudos laminares feitos em água. A influência da turbulência no desenvolvimento deste tipo de esteiras foi estudada por Young et al. [25] (2004). Assim, pode-se concluir que a divergência de alguns resultados neste trabalho, em relação à literatura, descritos na secção 3.5, pode ter origem neste fenómeno.

Uma das principais conclusões presentes neste trabalho é a de que o parâmetro  $kh$ , sozinho, é insuficiente para caracterizar a estrutura das esteiras. Tal como descrito na secção 3.4, a mudança de parâmetros individuais como  $h$ ,  $k$  ou  $Re$ , mantendo  $kh$  constante, resultou numa mudança da estrutura da esteira. A variação de  $Re$ , mantendo  $k$  e  $h$  constantes, demonstrou ser mais importante na mudança do tipo de libertação. A mudança dos parâmetros  $k$  e  $h$ , mantendo  $Re$  constante, revelou-se mais importantes na mudança do regime da asa.

Verificou-se que as condições que apresentam uma esteira de transição de modos pertencem ao intervalo  $0.2 < kh < 0.3$ . É aqui que a asa deixa de estar no regime de resistência ao avanço e passa para produção de impulso. A ocorrência dos fenómenos mais complexos parece acontecer nestas gamas mais baixas de  $kh$ . Por exemplo, o fenómeno de libertação harmónica apenas se verificou nesta gama, quando  $Re = 11\,200$ . Embora não seja um fenómeno claro, a razão parece residir no diferente comportamento do escoamento no bordo de fuga da asa, para diferentes  $Re$ . Como provou Young et al. [25] (2004), a redução da extensão da zona de separação no bordo de fuga, reduziu a força da libertação natural de vórtices. Isto alterou o tipo de libertação harmónica (2 pares por ciclo) para libertação forçada (1 par por ciclo). No primeiro caso, a Reynolds mais baixos (6 580), o ar descolou mais tarde do bordo de fuga pois os efeitos viscosos são mais pronunciados. Isto originou nos casos 1 e 4, esteiras com libertação forçada. Para Reynolds mais elevados, 11 200, o escoamento descolou mais cedo devido à sua maior inércia. Isto originou nos casos 2 e 5, uma libertação harmónica com 2 pares de vórtices por ciclo.

Foi possível reforçar as ideias apresentadas por Young et al. [24] (2007), que concluíram que existe uma combinação específica de  $k$  e  $h$ , no plano  $k-h$ , que resulta no fenómeno de libertação harmónica. Foram testados 4 casos para  $kh = 0.3$  (casos 3, 4, 5 e 6), variando  $h$ ,  $k$  e  $Re$ . Apenas a combinação do caso 5 ( $k = 3$ ,  $h = 0.1$  e  $Re = 11\,200$ ) parece ter resultado na interação descrita pelos autores, originando a libertação harmónica.

Acima destes valores,  $0.4 \leq kh \leq 0.6$ , os fenómenos foram relativamente simples de explicar e o regime de produção de impulso foi claro em todos os casos.

Apenas o caso 6 foi um caso duvidoso e o único que não ficou claro o regime em que se encontrava a asa.

## 4.2 Trabalhos Futuros

Apresentados todos os resultados experimentais obtidos neste trabalho, surge uma óbvia sugestão de trabalho futuro. A reprodução dos casos estudados experimentalmente através de simulações numéricas é sem dúvida o próximo passo a tomar para poder comprovar todos os resultados e conclusões obtidas neste trabalho.

No que toca a sugestões de trabalho experimental futuro surgiram várias questões que estão longe de estar completamente explicadas. Os casos que colocaram mais dúvidas são, por exemplo, os casos 4 ( $kh = 0.3, h = 0.1, Re = 6\ 580$ ) e 5 ( $kh = 0.3, h = 0.1, Re = 11\ 200$ ). Com os mesmos valores de  $k$  e  $h$ , a mudança no número de Reynolds não só alterou o tipo de libertação de vórtices como também o regime. Nos casos 3 ( $kh = 0.3, h = 0.05, Re = 6\ 580$ ) e 4 ( $kh = 0.3, h = 0.1, Re = 6\ 580$ ), uma ligeira mudança na amplitude originou uma mudança enorme no tipo de libertação e no regime. Ainda se tentou compreender melhor esta mudança com o estudo do caso 3.5 ( $kh = 0.3, h = 0.075, Re = 6\ 580$ ), mas este apresentou-se igual ao caso 4. Há uma zona, algures entre  $0.075 < h < 0.1$ , em que ocorre a mudança na estrutura. Seria fundamental responder, de uma forma mais clara, às questões referentes a estas mudanças na estrutura das esteiras.

Uma das questões fundamentais no estudo de asas batedoras, e que ainda não está bem esclarecido, são as condições para as quais ocorre a transição de regimes. Verificou-se que a transição se deu para valores na gama  $0.2 < kh < 0.3$ . Isto é apenas uma conclusão geral e seria interessante, em trabalhos futuros, estudar de uma maneira mais exaustiva esta gama de  $kh$ . A transição nesta gama dá-se para todos os valores de  $h$ ? Existem frequências que antecedam ou retardem a transição? Será que esta ocorre para todas as possibilidades de  $0.2 < kh < 0.3$ ? Testar diferentes valores de  $k$ , de  $h$  e de velocidades do escoamento seriam importantes para definir melhor a região de transição.

Os fenómenos mais complexos de libertação de vórtices parecem ocorrer para as gamas mais baixas de  $kh$ . Seria importante conseguir obter resultados para  $kh = 0.1$ , já que não foi possível se ser apresentada esta gama no presente trabalho.

A turbulência à saída do túnel também foi importante e teve influência nos resultados obtidos, nomeadamente no tipo de libertação consoante a mudança do número de Reynolds. O papel deste fenómeno nestes problemas ainda não está bem compreendido e seria importante reforçar ou reformular as ideias sobre ele apresentadas neste trabalho.

Um dos regimes fundamentais que não foi possível reproduzir neste trabalho foi a esteira defletida com produção simultânea de impulso e sustentação. Sugere-se que se testem velocidades de escoamento mais baixas. Assim será possível aumentar as gamas de  $k$  e consequentemente atingir valores de  $kh$  mais elevados. Neste trabalho chegou-se a  $kh = 0.6$ ,

mas com uma redução na velocidade do túnel seria possível aumentar este valor e tentar visualizar a esteira defletida.

Por fim também é sugerida a tentativa de uma ligeira mudança na instalação, transformando-a numa secção de testes fechada. Durante o presente trabalho, conforme saía do túnel encontrava ar em repouso presente na sala de laboratório e havia um arrastamento mútuo que pode ter influência nos resultados obtidos. Seria interessante implementar uma espécie de caixa em acrílico retangular à saída do túnel e comprovar se havia mudanças nos resultados ou não. Este dispositivo teria pequenas aberturas dos lados para possibilitar o movimento vertical da asa e esta estaria a oscilar dentro do mesmo. Assim o escoamento não seria perturbado pelo ar em repouso, mas sim pelas paredes do acrílico. Os fenómenos continuariam a ser vistos pois o acrílico é transparente. Uma análise das diferenças na esteira para as mesmas condições poderia oferecer conclusões importantes acerca da influência do tipo de escoamento de aproximação e outros fatores.

## Referências

- [1] J. M. M. Barata, F. M. S. P. Neves e P. A. R. Manquinho, “Comparative Study of Wing’s Motion Patterns on Various Types of Insects on Resemblant Flight Stages,” *AIAA Atmos. Flight Mech. Conf*, pp. 1-21, 2015.
- [2] Tennekes H. “The simple science of flight (from insects to jumbo jets),” Boston, MA: MIT Press, 1996.
- [3] S. Ho, H. Nassef, N. Pornsinsirak, Y. C. Tai e C. M. Ho, “Unsteady aerodynamics and flow control for flapping wing flyers,” *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 39, no. 8, pp. 635-681, 2003.
- [4] M. F. Platzer, K. D. Jones, J. Young e J. C. S. Lai, “Flapping Wing Aerodynamics: Progress and Challenges,” *AIAA J.*, vol. 46, no. 9, pp. 2136-2149, 2008.
- [5] K. V. Rozhdestvensky e V. A. Ryzhov, “Aerohydrodynamics of flapping-wing propulsors,” *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 39, no. 8, pp. 585-633, 2003.
- [6] W. Shyy *et al.*, “Recent progress in flapping wing aerodynamics and aeroelasticity,” *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 46, no. 7, pp. 284-327, 2010.
- [7] M. A. Ashraf, J. Young, J. C. S. Lai e M. F. Platzer, “Aerodynamic Analysis of Flapping-Wing Propellers For HALE Aircraft,” *AIAA Aerosp. Sci.*, pp. 1-15, 2009.
- [8] R. Knoller, “Die Gesetze des Luftwiderstandes,” *Flug- und Motortechnik (Wien)*, vol. 3, no. 21, pp. 1-7, 1909.
- [9] A. Betz, “Ein Beitrag zur Erklarung des Segelfluges,” *Zeitschrift fur Flugtechnik und Motorluftschiffahrt*, Vol. 3, pp. 269-272, 1912.
- [10] R. Katzmayr, “Effect of Periodic Changes of Angle of Attack on Behavior of Airfoils,” *NACA TM 147*, 1922.
- [11] G. K. Taylor, R. L. Nudds e A. L. R. Thomas, “Flying and swimming animals cruise at a Strouhal number tuned for high power efficiency,” *Nature*, vol. 425, no. 6959, pp. 707-711, 2003.
- [12] V. W. Birnbaum, “Das ebene Problem des schlagenden Flügels,” *Zeitschrift für Angew. Math. und Mech.*, vol. 4, no. 4, pp. 277-292, 1924.
- [13] T. Von Kármán e J. M. Burgers, “General Aerodynamic Theory—Perfect Fluids,” *Aerodynamic Theory*, edited by W. F. Durand, vol. 2, Julius Springer, p. 308, Berlin, 1934.
- [14] T. Theodorsen, “General Theory of Aerodynamic Instability and the Mechanism of Flutter,” *NACA Rept. 496*, 1935.
- [15] I. E. Garrick, “Propulsion of a Flapping and Oscillating Airfoil,” *NACA Rept. 567*, 1936.
- [16] T. Cebeci, M. F. Platzer, S. Chen, K. C. Chang e J. P. Shao, “Analysis of Low-Speed Unsteady Airfoil Flows,” Springer, Nova Iorque, 2005.
- [17] V. Brederode, “Fundamentos de aerodinâmica incompressível,” IST Press, 2014.

- [18] P. Freymuth, "Propulsive Vortical Signatures of Plunging and Pitching Airfoils," *AIAA J.*, vol. 26, no. 7, pp. 881-883, 1988.
- [19] P. Freymuth, "Thrust Generation by an Airfoil in Hovering Mode," *Exp. Fluids*, vol. 9, no. 1, pp. 17-24, 1989.
- [20] M. M. Koochesfahani, "Vortical Patterns in the Wake of an Oscillating Airfoil," *AIAA J.*, vol. 27, no. 9, pp. 1200-1205, 1989.
- [21] K. D. Jones, C. M. Dohring e M. F. Platzer, "Experimental and computational investigation of the Knoller-Betz effect," *AIAA J.*, vol. 36, no. 7, pp. 1240-1246, 1998.
- [22] J.B. Bratt, "Flow Patterns in the Wake of an Oscillating Airfoil," Aeronautical Research Council, pp. 17-24, 1953.
- [23] J. C. S. Lai e M. F. Platzer, "Jet Characteristics of a Plunging Airfoil," *Aiaa J.*, vol. 37, no. 12, pp. 1529-1537, 1999.
- [24] J. Young and J. C. S. Lai, "Vortex Lock-In Phenomenon in the Wake of a Plunging Airfoil," *AIAA J.*, vol. 45, no. 2, pp. 485-490, 2007.
- [25] J. Young and J. C. S. Lai, "Oscillation Frequency and Amplitude Effects on Plunging Airfoil Propulsion and Flow Periodicity," *AIAA J.*, vol. 50, no. 11, pp. 2308-2324, 2004.
- [26] J. Young e J. C. S. Lai, "Frequency and Amplitude Effects on the Wake of a Plunging Airfoil," *AIAA J.*, vol. 42, no. 10, pp. 163-166, 2001.
- [27] B. S. V. Patnaik, P. A. A. Narayana, and K. N. Seetharamu, "Numerical simulation of laminar flow past a circular cylinder," *J. Sound Vib.*, vol. 228, no. 3, pp. 459-475, 1999.
- [28] D. F. Kurtulus, L. David, A. Farcy e N. Alemdaroglu, "Aerodynamic characteristics of flapping motion in hover," *Exp. Fluids*, vol. 44, no. 1, pp. 23-36, 2008.
- [29] J. M. Birch e M. H. Dickinson, "The influence of wing-wake interactions on the production of aerodynamic forces in flapping flight," *J. Exp. Biol.*, vol. 206, no. 13, pp. 2257-2272, 2003.
- [30] H. Kudela e T. Kozlowski, "Flow patters generated by a flapping airfoil," *3rd Polish Congr. Mech.*, pp. 175-176, 2015.
- [31] A. Andersen, T. Bohr, T. Schnipper e J. H. Walther, "Wake structure and thrust generation of a flapping foil in two-dimensional flow," *J. Fluid Mech.*, vol. 812, R4, 2017.
- [32] C. H. K. Williamson e A. Roshko, "Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder," *J. Fluids Struct.*, vol. 2, no. 4, pp. 355-381, 1988.
- [33] J. Zhang, "Footprints of a flapping wing," *J. Fluid Mech.*, vol. 818, pp. 1-4, 2017.
- [34] M. Yu, B. Wang, Z. J. Wang e S. Farokhi, "Evolution of vortex structures over flapping foils in shear flows and its impact on aerodynamic performance," *J. Fluids Struct.*, vol. 76, pp. 116-134, 2018.
- [35] J. Young e J. C. S. Lai, "Mechanisms Influencing the Efficiency of Oscillating Airfoil Propulsion," *AIAA J.*, vol. 45, no. 7, pp. 1695-1702, 2007.
- [36] I. Tuncer e M. Kaya, "Optimization of Flapping Airfoils For Maximum Thrust and Propulsive Efficiency," *AIAA J.*, vol. 43, no. 11, pp. 2329-2336, 2005.

- [37] M. Y. Zakaria, H. E. Taha e M. R. Hajj, "Measurement and modeling of lift enhancement on plunging airfoils: A frequency response approach," *J. Fluids Struct.*, vol. 69, pp. 187-208, 2017.
- [38] K. C. Hall e S. R. Hall, "A rational engineering analysis of the efficiency of flapping flight," *Prog. Astronaut. Aeronaut.*, vol. 195, Cap. 13 pp. 249-279, 2001.
- [39] K. Parker, K. D. Von Ellenrieder e J. Soria, "Using stereo multigrid DPIV (SMDPIV) measurements to investigate the vortical skeleton behind a finite-span flapping wing," *Exp. Fluids*, vol. 39, no. 2, pp. 281-298, 2005.
- [40] J. M. Akkala, A. Eslam Panah e J. H. J. Buchholz, "Vortex dynamics and performance of flexible and rigid plunging airfoils," *J. Fluids Struct.*, vol. 54, pp. 103-121, 2015.
- [41] W. Geissler e B. G. van der Wall, "Dynamic stall control on flapping wing airfoils," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 62, pp. 1-10, 2017.
- [42] J. Young, J. C. S. Lai e M. F. Platzer, "A review of progress and challenges in flapping foil power generation," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 67, pp. 2-28, 2014.
- [43] W. Shyy and H. Liu, "Flapping Wings and Aerodynamic Lift: The Role of Leading-Edge Vortices," *AIAA J.*, vol. 45, no. 12, pp. 2817-2819, 2007.
- [44] J. F. D. Câmara J. M. M. Sousa, "Numerical Study on the Use of a Sinusoidal Leading Edge for Passive Stall Control at Low Reynolds Number," *51st AIAA Aerosp. Sci. Meet. Incl. New Horizons Forum Aerosp. Expo.*, 2013.
- [45] H. Delgado, "Novas Tecnologias Biomiméticas para a Aerodinâmica de Veículos Aéreos a Baixo Número de Reynolds," 2018.
- [46] L. Xie, X. Zhang, P. Luo e P. Huang, "Numerical study on the aerodynamic characteristics of both static and flapping wing with attachments," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 916, no. 1, 2017.
- [47] T. Van Truong, T. Q. Le, H. T. Tran, H. C. Park, K. J. Yoon e D. Byun, "Flow Visualization of Rhinoceros Beetle (*Trypoxylus dichotomus*) in Free Flight," *J. Bionic Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 304-314, 2012.
- [48] H. Aono e H. Liu, "Flapping wing aerodynamics of a numerical biological flyer model in hovering flight," *Comput. Fluids*, vol. 85, pp. 85-92, 2013.
- [49] J. M. M. Barata, F. M. S. P. Neves, P. A. R. Manquinho e T. A. J. Silva, "Propulsion for Biological Inspired Micro-Air Vehicles (MAVs)," *Open J. Appl. Sci.*, vol. 6, pp. 7-15, 2016.
- [50] N. Lee, S. Lee, H. Cho e S. J. Shin, "Effect of flexibility on flapping wing characteristics in hover and forward flight," *Comput. Fluids*, vol. 173, pp. 111-117, 2018.
- [51] M. H. Dickinson, F. O. Lehmann e S. P. Sane, "Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight," *Science*, vol. 284, no. 5422, pp. 1954-1960, 1999.
- [52] S. P. Sane, "Steady or Unsteady? Uncovering the Aerodynamic Mechanisms of Insect Flight," *J. Exp. Biol.*, pp. 349-351, 2012.
- [53] Z. Y. Liang, L. Wei, J. Yu Lu e X. hong Qin, "Numerical simulation of a two-dimensional flapping wing in advanced mode," *J. Hydrodyn.*, vol. 29, no. 6, pp. 1076-1080, 2017.

- [54] R. Ramamurti e W. C. Sandberg, "Computational Study of 3-D Flapping Foil Flows," *39th AIAA Aerosp. Sci. Meet. Exhib.*, pp. 1-10, 2001.
- [55] C. P. Ellington e J. R. Usherwood, "Lift and Drag Characteristics of Rotary and Flapping Wings," *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol. 195, Chap. 12, pp. 231-248, 2001.
- [56] C. E. Lan, "The unsteady quasi-vortex-lattice method with applications to animal propulsion," *J. Fluid Mech.*, vol. 93, no. 4, pp. 747-765, 1979.
- [57] J. Young, J. C. S. Lai e C. Germain, "Simulation and Parameter Variation of Flapping-Wing Motion Based on Dragonfly Hovering," *AIAA J.*, vol. 46, no. 4, pp. 918-924, 2008.
- [58] P. Luo, X. Zhang, P. Huang e L. Xie, "A study on the aerodynamic characteristics of airfoil in the flapping adjustment stage during forward flight," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 916, no. 1, pp. 0-11, 2017.
- [59] P. Provini, B. W. Tobalske, K. E. Crandell e A. Abourachid, "Transition from wing to leg forces during landing in birds," *J. Exp. Biol.*, vol. 217, no. 15, pp. 2659-2666, 2014.
- [60] J. M. Barata, T. J. Silva, F. P. Neves e A. R. Silva, "Experimental Analysis of Forces During Take-Off of Birds," *AIAA Inf. Syst. Infotech @ Aerosp.*, pp. 1-8, 2017.
- [61] F. Karakas, B. Zaloglu, I. Fenercioglu, C. Hoke, J. Young e M. F. Platzer, "On optimal oscillating - foil power generation in free and constrained flow," *54th AIAA Aerosp. Sci. Meet.*, pp. 2016-2070, 2016.
- [62] J. Choi, T. Colonius e D. Williams, "Dynamics and Energy Extraction of a Surging and Plunging Airfoil at Low Reynolds Number," *51st AIAA Aerosp. Sci. Meet. Incl. New Horizons Forum Aerosp. Expo.*, pp. 1-15, 2013.
- [63] O. Motors, "ARM46AC, 1.65 in. (42 mm) Closed Loop Stepper Motor," <https://catalog.orientalmotor.com/item/all-categories/ar-series-42mm-closed-loop-stepper-motors/arm46ac>, [Acesso em 23-07-2018].
- [64] O. Motors, "EASM4XE005ARAC, Motorized Linear Slide - Straight Type, X-axis Table," <https://catalog.orientalmotor.com/item/all-categories/ll-categories-y-components-motorized-linear-slides/easm4xe005arac>, [Acesso em 23-07-2018].
- [65] O. Motors, "ARD-CD, αSTEP AR Series Driver with Built-in Controller," <https://catalog.orientalmotor.com/item/s-short-range-servo-motor-drivers/-drivers-with-built-in-controller-stored-data-type/ard-cd>, [Acesso em 23-07-2018].
- [66] O. Motors, "CC05IF-USB, Data Setting Software Communication Cable," <https://catalog.orientalmotor.com/item/all-categories/ac-motor-accessories/cc05if-usb>, [Acesso em 23-07-2018].
- [67] O. Motors, "αSTEP AR Series Flex AC power input Built-in controller type Driver OPERATING MANUAL," 2012.
- [68] O. Motors, "αSTEP AR Series Flex AC power input Built-in controller type USER MANUAL," 2012.
- [69] D. F. C. Vieira, "Turbulent Structure of the Impact of a *ground vortex* Flow," Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2012.

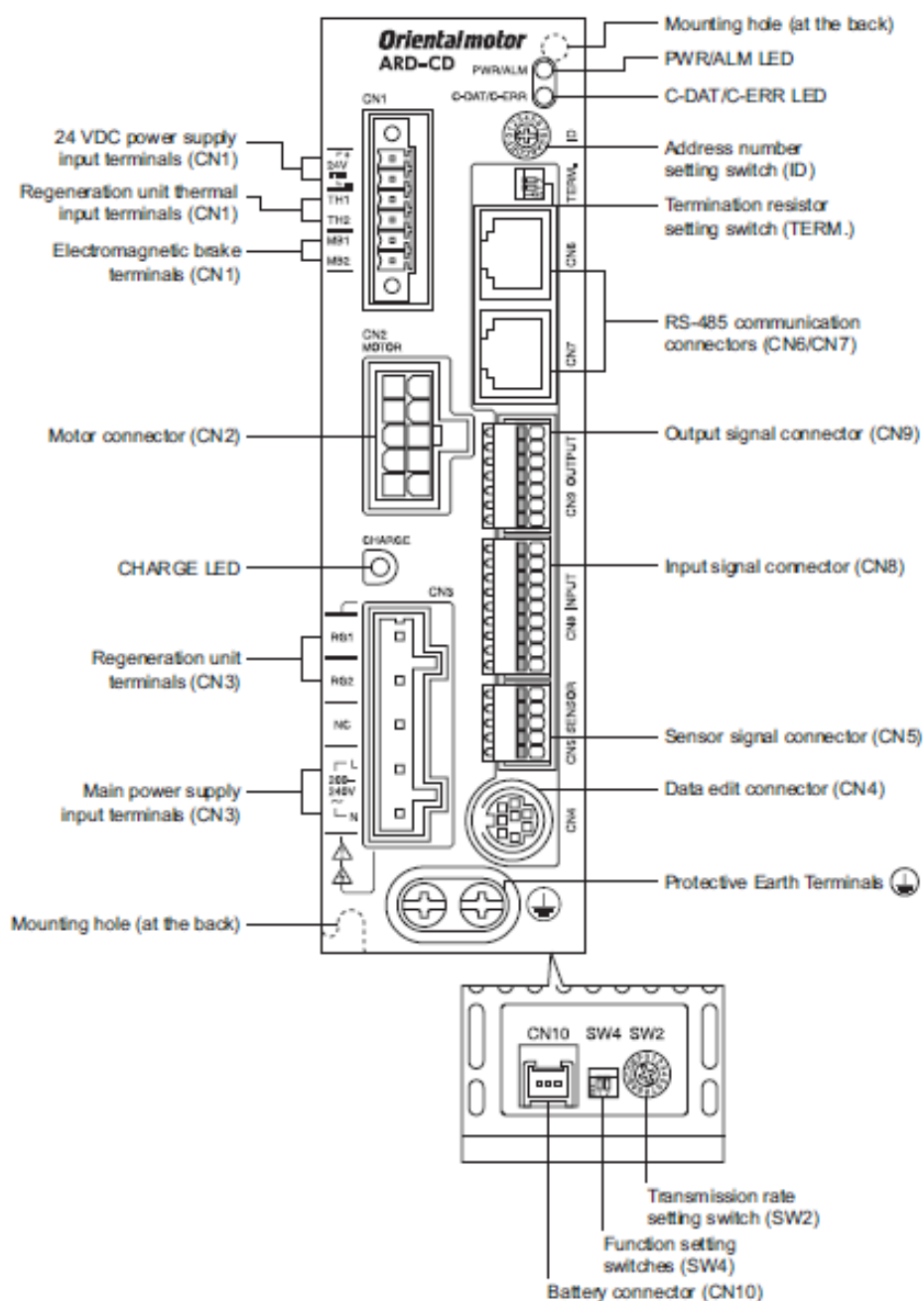
[70] A. T. S. Cerdeira, “Distribuição de Pressão de Jatos de Impacto Através de Escoamento Cruzado do F-35B”, Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, Junho 2017.

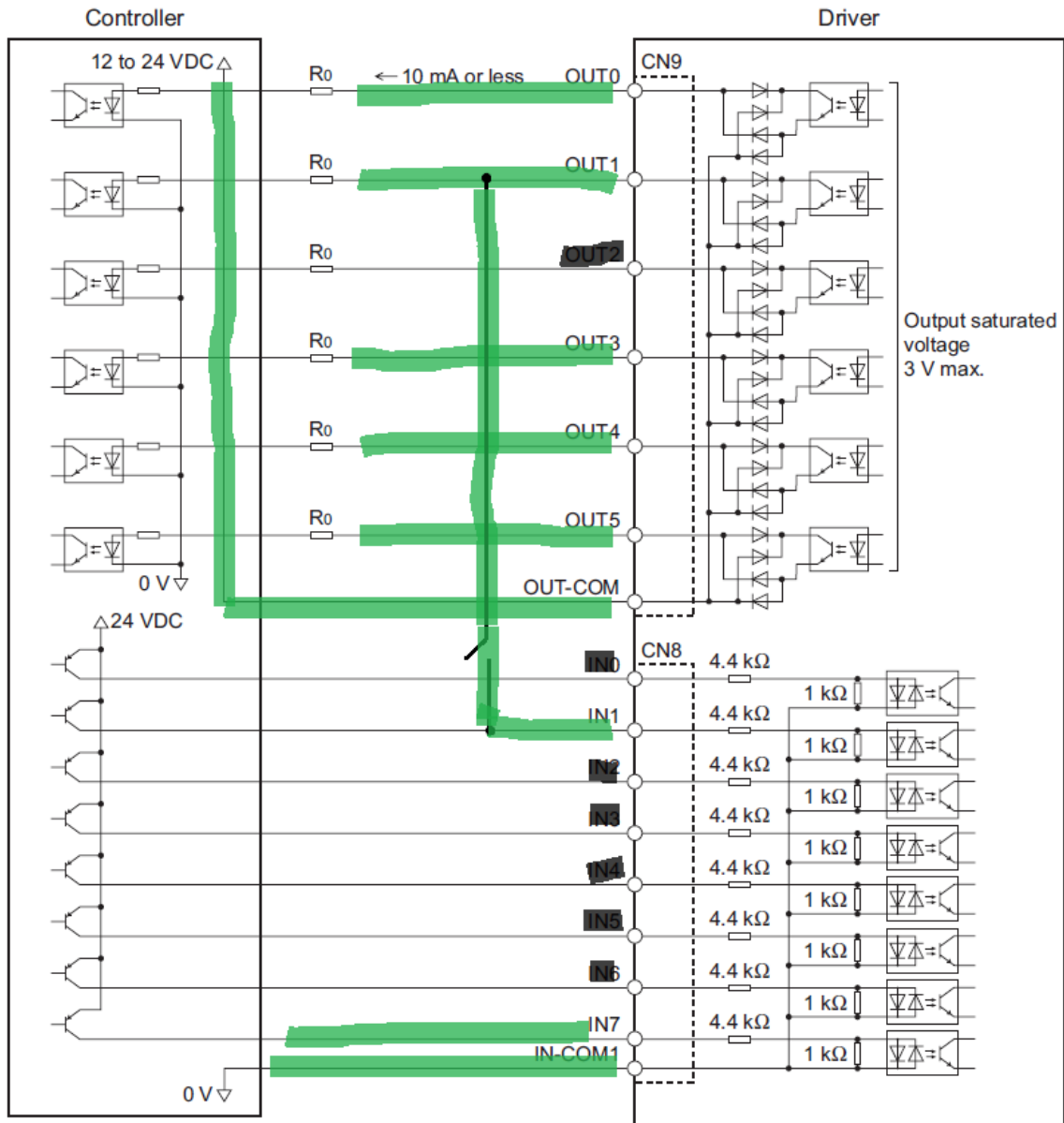


## **Anexo 1**

### **Controlador do motor**

■ Driver (Example: ARD-CD)





Editado de [68]



## **Anexo 2**

Abstract submetido para Conferência



**SUBJECT AREAS:** Turbulent Flows or Aerospace Applications  
(<https://www.astfe.org/tfec2019/>)

**ARTICLE TYPE:** ~~Full paper~~ – Extended Abstract – ~~Presentation Only~~

**TITLE No more than 175 symbols or 30 words (symbols left: 175; words left: 30):**

Numerical and Experimental Study of a Plunging Airfoil

**KEYWORDS:** Wake, Plunging airfoil, von Karman streets

**AUTHORS:**

Rodolfo Lopes<sup>1</sup>, Emanuel Camacho<sup>1</sup>, Fernando Neves<sup>1</sup>, André Silva<sup>1\*</sup>, Jorge Barata<sup>1</sup>

**ADDRESS:**

<sup>1</sup>Aerospace Sciences Department, University of Beira Interior, Rua Marques Avila e Bolama, 6201-001 Covilhã, Portugal

**ABSTRACT NO MORE THAN 3000 SYMBOLS OR 250 WORDS (LEFT: 3000; WORDS LEFT: 250)**

The interest in alternative ways of propulsion sparked research interest in flapping wing configurations. This topic attempts to fill in the gap with the development of “MAV’s” or Micro Air Vehicles, attaining a higher level of efficiency and aerodynamic behavior.

Experimental studies were performed on a wind tunnel involving a plunging airfoil (NACA 0012) to evaluate the influence of the motion's frequency and amplitude and, Reynolds number on the airfoil's wake and operating regime.

Unsteady aerodynamics analysis is employed by solving the discretized equations for continuity and momentum. Air at sea level was selected as the working fluid, while the realizable k- $\epsilon$  turbulence model together with the PISO algorithm for the coupling of pressure and velocity was used. The QUICK scheme, allowing for a coarser mesh with the same degree of accuracy as a refined one was selected. Moreover, a second order upwind space discretization, in a cell centered approach, and first order upwind discretization in time due to grid restrictions were selected.

Experimental visualization of the wake is obtained in order to better understand all the involved physics phenomena. Normal and inverted von karman streets are identified and filmed at 500fps using smoke tracer lighted by a 3W laser sheet.

\*Corresponding Author: andre@ubi.pt