

**Estudo Experimental do Movimento
Oscilatório Vertical de uma Placa Plana:
variação da espessura e da geometria do bordo
de fuga**
(versão corrigida após defesa)

Adriana Gabriela Ferreira Marques

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

Orientador: Prof. Doutor André Resende Rodrigues da Silva

dezembro de 2020

Agradecimentos

Em primeiro lugar tenho a agradecer a quem me proporcionou todas as ferramentas necessárias para a progressão dos meus estudos. Mãe, obrigada por todo o esforço investido na minha educação, por me apoiares em todas as jornadas e por sempre me incentivares a estudar, pois, tenho a certeza, se não fosse por toda essa dedicação, eu não estaria aqui hoje. Aos meus avós, Lurdes e Bernardino, um grande obrigada, por todo o carinho e encorajamento que sempre me deram para seguir os meus sonhos.

Ao meu namorado, Raphael, que foi um grande suporte ao longo de toda esta etapa. Obrigada por toda a compreensão e por nunca deixares de acreditar em mim. Mesmo longe, está sempre presente nos momentos difíceis para dar uma palavra de incentivo.

Agradeço à minha família da Covilhã, por estarem sempre lá, tanto na vida académica como na vida pessoal, por todos os momentos de desespero e alegria e por toda ajuda ao longo destes 5 anos. Sem estes meninos, a vida na Covilhã seria muito mais aborrecida.

Tenho também a agradecer ao Emanuel, por toda a paciência e dedicação. As nossas conversas foram, sem dúvida, cruciais para o desenvolvimento desta dissertação.

Gostaria também de agradecer ao Técnico de Laboratório, o senhor Rui Paulo, por estar sempre disponível para ajudar na adaptação da instalação experimental.

Por último, mas não menos importante, quero agradecer ao meu orientador Professor Doutor André Silva, por me proporcionar a oportunidade de explorar o mundo da biomimética. Agradeço por toda a confiança depositada no meu trabalho.

Resumo

A Natureza é uma grande fonte de inspiração para o desenvolvimento de sistemas de engenharia. A locomoção dos animais pelo batimento das suas asas é um processo aperfeiçoado ao longo de milhões de anos. O estudo dos perfis oscilantes torna-se essencial, de modo a perceber o movimento otimizado deste animais num ambiente aerodinâmico complexo e transiente. Assim, nesta dissertação procedeu-se à visualização dos fenómenos aerodinâmicos presentes na esteira e na superfície de três placas planas com diferentes espessuras e formas do bordo de fuga, sujeitas a um movimento de translação, para três números de Reynolds. Para além da influência das diferentes espessuras e geometrias do bordo de fuga, pretende-se analisar a influência do número de Reynolds, do número de Strouhal, da frequência reduzida, da amplitude adimensional e do ângulo de ataque efetivo máximo na produção de tração e na formação de vórtices do bordo de ataque (*LEV*). Os resultados obtidos apresentam uma boa concordância com trabalhos anteriores, uma vez que é no intervalo $0,1 \leq St \leq 0,2$ que se verifica o maior número de casos de produção de tração e transporte do *LEV* até ao bordo de fuga. Existem ainda casos em que o *LEV* se mantém ligado à asa durante os movimentos ascendente e descendente, originando extração de energia. Observa-se a influência óbvia da espessura nos fenómenos aerodinâmicos visualizados. Pelo contrário, as diferentes formas do bordo de fuga não produzem resultados muito distintos. A deteção de deflexão dos perfis para frequências maiores ou iguais a 3 Hz gerou resultados bastante interessantes e pouco abordados na literatura, como a observação de uma dupla estrada de von Kármán.

Palavras-chave

Biomimética; Asa batidora; Esteira; Forças aerodinâmicas; *LEV*; Vórtices; Movimento de translação.

Abstract

Nature is a great source of inspiration for the development of engineering systems. The locomotion of animals by the flapping of their wings is a process perfected over millions of years. The study of the oscillating airfoils becomes essential, in order to perceive the optimized movement of these animals in a complex and unsteady aerodynamic environment. Thus, in this dissertation the aerodynamic phenomena present in the wake and surface of three flat plates with different thicknesses and shapes of the trailing edge, subjected to a plunging movement, were visualized for three Reynolds numbers. Besides the influence of the different thicknesses and geometries of the trailing edge, it is intended to analyze the influence of the Reynolds number, the Strouhal number, the reduced frequency, the adimensional amplitude and the maximum effective angle of attack on the thrust production and the formation of leading edge vortices (LEV). The results obtained present a good agreement with previous works since it is in the 0.1 to 0.2 range Strouhal that the largest number of trust production and LEV convection occur. There are also cases in which the LEV remains attached to the wing during the ascending/descending movement, originating energy extraction. The obvious influence of thickness on the aerodynamic phenomena visualized is observed. On the contrary, the different shapes of the trailing edge do not produce distinct results. The detection of deflection of the airfoils for frequencies greater than or equal to 3 Hz was not mentioned in the previous works but generated very interesting results which are not addressed in the literature, like the observation of a double von Kármán vortex street.

Keywords

Biomimetics; Flapping Wing; Wake; Aerodynamic forces; LEV; Vortices; Plunging movement.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Motivação e Objetivos	2
1.2	Biomimética	4
1.3	Revisão Bibliográfica	5
1.3.1	Cinemática	5
1.3.2	Aerodinâmica a Baixos Reynolds	9
1.3.3	Asas Flexíveis	20
1.4	Organização da Dissertação	24
2	Método Experimental	25
2.1	Instalação Experimental	25
2.1.1	Túnel de Vento	26
2.1.2	Sistema de Fumo	26
2.1.3	Laser	27
2.1.4	Câmara de Alta Velocidade	28
2.1.5	Placas Planas	28
2.1.6	Motor	29
2.1.7	Anemómetro	30
2.2	Validação da Montagem Experimental	30
2.3	Procedimento	32
2.4	Condições em Estudo	32
2.5	Análise e Cálculo de Erros	33
2.5.1	Erros dos Instrumentos de Medição	34
2.5.2	Análise da Propagação de Erro	34
3	Resultados e Discussão	38

3.1 Caso Estático ($St = 0$)	39
3.2 Classificação das Esteiras Libertadas	40
3.3 Influência de k e h nas Dimensões das Estruturas de Vorticidade da Esteira	47
3.4 Formação e Comportamento de LEV	50
3.5 Extração de Energia	54
3.6 Ângulo de Ataque Efetivo	57
3.7 Flexibilidade	58
4 Conclusões e Trabalhos Futuros	65
Referências	68

Lista de Figuras

Figura 1 – Efeito do número de Reynolds na razão sustentação/resistência do perfil alar [2].	3
Figura 2 – Diagrama de voo [6].	5
Figura 3 – Primeira teoria de descrição da propulsão de asas batedoras [11].	6
Figura 4 – Eficiência propulsiva em função do número de Strouhal [16].	7
Figura 5 – Separação laminar e recolamento turbulento, onde S significa ponto de separação, T significa transição e R significa ponto de recolamento [19].	9
Figura 6 – Padrão de esteira indicativa de resistência ao avanço [21].	10
Figura 7 – Padrão de esteira indicativa de produção de tração [21].	10
Figura 8 – Padrão de esteira indicativo de zero resistência [21].	11
Figura 9 – Padrão de esteira indicativa de produção de tração e de sustentação [21].	11
Figura 10 – Transição da estrada de von Kármán com o aumento de kh [22].	12
Figura 11 – Contornos dos vórtices no movimento puramente translacional [1].	14
Figura 12 – Contornos da vorticidade observada num movimento puramente translacional [1].	14
Figura 13 – Eficiência propulsiva em função de k e h para (a) $Re = 17000$ e (b) $Re = 34000$ [16].	15
Figura 14 – Esquema da instalação: 1) túnel de vento, 2) câmara de alta velocidade, 3) controlador, 4) perfil colocado no suporte, 5) controlador de fumo, 6) laser, 7) sensor de pressão e temperatura, 8) computador, 9) anemómetro.	25
Figura 15 – Túnel de vento [60].	26
Figura 16 – (a) Máquina de fumo <i>Techo-Fog Jem</i> ; (b) Controlador da máquina de fumo; (c) Líquido utilizado na máquina [60].	27
Figura 17 – Sistema de libertação de fumo no túnel de vento: (a) pente desenvolvido por Camacho – AeroG e (b) favo de abelha com 6 mm.	27
Figura 18 – Laser [60].	28
Figura 19 – (a) Câmara de alta velocidade; (b) <i>Software Photron FASTCAM Viewer</i> [61].	28
Figura 20 – (a) Placas planas estudadas e (b) suporte.	29
Figura 21 – (a) Motor e atuador linear; (b) <i>Software MEXE02</i>	29
Figura 22 – (a) Anemómetro e (b) exemplo de medição de velocidade.	30
Figura 23 – Evolução da posição e da velocidade do movimento programado para $A = 7\text{ mm}$ e $f = 2,5\text{ Hz}$	31

Figura 24 – Evolução da posição e da velocidade do movimento programado para $A = 28 \text{ mm}$ e $f = 1,0 \text{ Hz}$	31
Figura 25 – Caso estático ($kh = 0$) para a placa de 5 mm com o bordo de ataque afiado, com o escoamento a a) 0,25 m/s, b) 0,50 m/s e c) 1,00 m/s.	39
Figura 26 – Caso estático ($kh = 0$) para a placa de 5 mm com ambos os bordos afiados, com o escoamento a a) 0,25 m/s, b) 0,50 m/s e c) 1,00 m/s.	39
Figura 27 – Caso estático ($kh = 0$) para a placa de 3 mm com o bordo de ataque afiado, com o escoamento a a) 0,25 m/s, b) 0,50 m/s e c) 1,00 m/s.	40
Figura 28 – Esteira libertada para o caso de $St = 0,084$, $h = 0,210$ e $k = 1,257$ para cada placa plana estudada.	45
Figura 29 – Esteira libertada para o caso de $St = 0,126$, $h = 0,210$ e $k = 1,885$ para cada placa plana estudada.	46
Figura 30 – Relação entre a frequência reduzida e a distância horizontal entre as estruturas de vorticidade da esteira, para $Re = 1,5 \times 10^3$	48
Figura 31 – Relação entre a frequência reduzida e a distância horizontal entre as estruturas de vorticidade da esteira, para $Re = 3,1 \times 10^3$	48
Figura 32 – Esteira libertada pela placa de 5 mm com apenas o bordo de ataque afiado para as condições especificadas.	49
Figura 33 – Esteira resultante do movimento de translação da placa plana de 5 mm com apenas o bordo de ataque afiado, para as condições de voo especificadas.	53
Figura 34 – Exemplo de grande extração de energia pelo <i>LEV</i>	57
Figura 35 – Deflexão das placas de 5 mm, para $f = 3,0$ a $3,5 \text{ Hz}$ e $A = 14 \text{ mm}$	59
Figura 36 – Deflexão das placas de 5 mm, para $f = 3,0$ a $5,5 \text{ Hz}$ e $A = 7 \text{ mm}$	59
Figura 37 – Deflexão da placa de 3 mm, para $f = 3,0 \text{ Hz}$ e $A = 14 \text{ mm}$	59
Figura 38 – Deflexão da placa de 3 mm, para $f = 3,5 \text{ Hz}$ e $A = 14 \text{ mm}$	60
Figura 39 – Deflexão da placa de 3 mm, para $f = 3,0$ a $4,5 \text{ Hz}$ e $A = 7 \text{ mm}$	60
Figura 40 – Deflexão da placa de 3 mm, para $f = 5,0 \text{ Hz}$ e $A = 7 \text{ mm}$	60
Figura 41 – Deflexão da placa de 3 mm, para $f = 5,5 \text{ Hz}$ e $A = 7 \text{ mm}$	61
Figura 42 – Relação entre a flecha máxima e a frequência para a placa de 3 mm de espessura.	62
Figura 43 – Esteira resultante do movimento de translação da placa plana de 3 mm, para $Re = 6,3 \times 10^3$, $St = 0,077$, $k = 3,456$ e $h = 0,070$	64

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Resumo de trabalhos realizados na área de perfis rígidos oscilantes.	18
Tabela 2 – Resumo de trabalhos realizados na área de perfis flexíveis oscilantes.	22
Tabela 3 – Condições em estudo.	33
Tabela 4 – Erros dos instrumentos de medição.	34
Tabela 5 – Propagação de erro para a velocidade de 0,25 m/s.	35
Tabela 6 – Propagação de erro para a velocidade de 0,50 m/s.	36
Tabela 7 – Propagação de erro para a velocidade de 1,00 m/s.	37
Tabela 8 – Classificação das esteiras libertadas pelas três placas planas estudadas, para $Re = 1,5 \times 10^3$	41
Tabela 9 – Classificação das esteiras libertadas pela placa de 5 mm com apenas o bordo de ataque afiado, para $Re = 3,1 \times 10^3$	41
Tabela 10 – Classificação das esteiras libertadas pela placa de 5 mm com ambos os bordos afiados, para $Re = 3,1 \times 10^3$	41
Tabela 11 – Classificação das esteiras libertadas pela placa de 3 mm com apenas o bordo de ataque afiado, para $Re = 3,1 \times 10^3$	41
Tabela 12 – Classificação das esteiras libertadas pelas placas de 5 mm, para $Re = 6,3 \times 10^3$	42
Tabela 13 – Classificação das esteiras libertadas pela placa de 3 mm, para $Re = 6,3 \times 10^3$	42
Tabela 14 – Formação e comportamento do <i>LEV</i> na superfície das placas de 5 mm, para $Re = 1,5 \times 10^3$	50
Tabela 15 – Formação e comportamento do <i>LEV</i> na superfície da placa de 3 mm, para $Re = 1,5 \times 10^3$	50
Tabela 16 – Formação e comportamento do <i>LEV</i> na superfície das placas de 5 mm, para $Re = 3,1 \times 10^3$	50
Tabela 17 – Formação e comportamento do <i>LEV</i> na superfície da placa de 3 mm, para $Re = 3,1 \times 10^3$	51
Tabela 18 – Formação e comportamento do <i>LEV</i> na superfície das placas de 5 mm, para $Re = 6,3 \times 10^3$	51
Tabela 19 – Formação e comportamento do <i>LEV</i> na superfície da placa de 3 mm, para $Re = 6,3 \times 10^3$	51
Tabelas 20 – Extração de energia das placas de 5 mm, para $Re = 1,5 \times 10^3$	54
Tabela 21 – Extração de energia da placa de 3 mm, para $Re = 1,5 \times 10^3$	54

Tabela 22 – Extração de energia das placas de 5 mm, para $Re = 3,1 \times 10^3$	55
Tabela 23 – Extração de energia da placa de 3 mm, para $Re = 3,1 \times 10^3$	55
Tabela 24 – Extração de energia da placa de 3 mm, para $Re = 6,3 \times 10^3$	55
Tabela 25 – Ângulo efetivo para cada amplitude adimensional e frequência reduzida programadas.	58
Tabela 26 – Comparação das amplitudes adimensionais programadas com as reais.	61
Tabela 27 – Ajuste dos parâmetros k , h e St para as placas de 5 mm, devido à flexibilidade do perfil.	63
Tabela 28 – Ajuste dos parâmetros k , h e St para a placa de 3 mm, devido à flexibilidade do perfil.	63

Nomenclatura

A	Amplitude de translação	m
b	Envergadura da asa	m
c	Corda aerodinâmica	m
C_d	Coefficiente de resistência ao avanço	—
C_l	Coefficiente de sustentação	—
f	Frequência de oscilação	Hz
h	Amplitude adimensional	—
k	Frequência reduzida	—
P	Pressão ambiente	Pa
Re	Número de Reynolds	—
St	Número de Strouhal	—
t	Espessura do perfil, Tempo	m, s
T	Temperatura ambiente, Período	K, s
U_∞	Velocidade do escoamento	$m \cdot s^{-1}$
W	Dimensão da esteira	m
α	Ângulo de ataque	$^\circ$
α_{eff}	Ângulo de ataque efetivo	$^\circ$
$\alpha_{eff\,m\acute{a}x}$	Ângulo de ataque efetivo máximo	$^\circ$
θ	Ângulo do batimento dorsoventral	$^\circ$
λ	Comprimento de onda	m
μ	Viscosidade dinâmica	$Pa \cdot s$
ρ	Massa volúmica	$kg \cdot m^{-3}$

Lista de Acrónimos

<i>AEROG</i>	<i>Aeronautics and Astronautics Research Center</i> Centro de Investigação de Aeronáutica e Astronáutica
<i>AVS</i>	<i>Air Vehicle Systems</i> Sistemas de Veículos Aéreos
<i>DPIV</i>	<i>Digital Particle Image Velocimetry</i> Velocimetria de Imagem Digital de Partículas
<i>fps</i>	<i>frames per second</i> Imagens por segundo
<i>LEV</i>	<i>Leading-Edge Vortex</i> Vórtice do Bordo de Ataque
<i>MAV</i>	<i>Micro Air Vehicle</i> Micro Veículos Aéreos
<i>NACA</i>	<i>National Advisory Committee for Aeronautics</i> Comité Consultivo Nacional para a Aeronáutica
<i>NAV</i>	<i>Nano Air Vehicle</i> Nano Veículos Aéreos
<i>PIV</i>	<i>Particle Image Velocimetry</i> Velocimetria de Imagem de Partículas
<i>TEV</i>	<i>Trailing-Edge Vortex</i> Vórtice do Bordo de Fuga
<i>UAV</i>	<i>Unmanned Air Vehicle</i> Veículo Aéreo Não Tripulado

Capítulo 1: Introdução

A humanidade é fascinada pelo voo e, desde os tempos mais remotos, os pássaros e os insetos têm sido os modelos pelos quais o voo é estudado. Os projetistas renascentistas de aeronaves nocionais, como Leonardo da Vinci, inspiraram-se na predominância de aves, como refletido na morfologia das suas criações. Os problemas de escala dos projetos de inspiração biológica até às proporções de transporte humano não foram apreciados e praticamente todos falharam, principalmente devido à falta de um sistema de propulsão adequado, como exemplificado pela máquina de asa batidora movida pelo homem de Da Vinci.

Mais recentemente, as tentativas de se mover na direção das pequenas máquinas voadoras, que correspondem à escala dos pássaros e mesmo dos insetos mais pequenos, entraram em voga e surgiram os Micro e Nano Veículos Aéreos (*MAV* e *NAV*). Devido às características comuns destes Sistemas de Veículos Aéreos (*AVS*) com os voadores naturais, tem-se tentado aproximar a sua morfologia à do seu homólogo biológico. Têm sido propostos vários conceitos de veículos, incluindo asa fixa, asa rotacional e asa batidora. À medida que o tamanho do veículo se torna menor que uns meros centímetros, os projetos de asa fixa encontram desafios fundamentais na geração de sustentação e controlo de voo. Assim, iniciou-se uma busca pela solução deste problema na Natureza.

As asas batedoras surgiram como a melhor resposta. Estas, que não são eficientes para o número de Reynolds a que as aeronaves de transporte de passageiros operam, tornam-se na tipologia de asa mais eficaz para veículos aéreos que operam a baixos números de Reynolds.

A expressão “baixo número de Reynolds” é bastante relativa, não existindo um limite exato a partir do qual o Reynolds se torna baixo. Como na literatura revista esta expressão é empregue, normalmente, para números de Reynolds menores do que 10^5 (baseado em perfis estáticos), será este o limite utilizado ao longo de toda a dissertação. Poderá de facto existir um limite, simplesmente ainda não foi estudado. O número de Reynolds pode até ter de ser alterado para ter em atenção as cargas inerciais do próprio movimento.

Assim, este trabalho foca-se no estudo do movimento vertical de três placas planas de diferentes espessuras e formas do bordo de fuga, tentando-se aproximar ao máximo às asas de uma animal voador pequeno. Com isto, pretende-se verificar os fenómenos aerodinâmicos adjacentes a cada asa e criar uma base que permita ao projetista escolher a morfologia que melhor responde às suas necessidades.

Neste primeiro capítulo será descrito com mais detalhe a motivação que levou à realização desta dissertação, assim como os objetivos propostos para a elaboração da mesma. De seguida é apresentada a revisão bibliográfica necessária para uma melhor compreensão do presente trabalho.

1.1 Motivação e Objetivos

As aves, os insetos e os morcegos evoluíram e usam sistemas de asas batedoras para produção de sustentação e tração por milhares de anos [1]. Um melhor entendimento da sua aerodinâmica subjacente é, portanto, de interesse fundamental. Recentemente, o desenvolvimento de *AVS* estimulou interesse adicional neste assunto, uma vez que estes veículos podem ser tão pequenos como qualquer inseto comum [1].

Os recentes avanços tecnológicos na eletrônica compacta e no armazenamento de energia, combinados com a crescente necessidade de sensibilização para a situação em cenários de combate militar urbano, deram o impulso para a produção de *MAV* [2]. Tais veículos são capazes de realizar missões no interior e no exterior de ambientes onde o acesso é restrito devido a vários perigos e, assim, evitar colocar vidas humanas em perigo. Uma vez que os *AVS* diminuem o tempo necessário para explorar uma determinada área, podem também ser utilizados em casos de catástrofe, tais como sismos, após furacões ou em minas colapsadas. Nestes casos, a localização mais rápida dos sobreviventes aumenta a probabilidade de salvar vidas. No entanto, os *AVS* não estão apenas relacionados com aplicações de alto risco, podendo também ser utilizados como apoio em operações policiais regulares, tais como controlo do tráfico, gestão de multidões ou levantamentos topográficos urbanos. Podem ainda fazer uso de diversos sensores de modo a localizar ameaças biológicas, nucleares e/ou químicas [3].

Um recente interesse de aplicações destes veículos aéreos, foi a de um veículo aéreo não tripulado (*UAV*) na exploração de Marte como uma alternativa rápida e móvel aos veículos terrestres [4]. A baixa densidade atmosférica e temperatura em Marte resultam numa aerodinâmica de baixo número de Reynolds.

A criação de *MAV* do mesmo tamanho e peso dos voadores naturais despertou um novo interesse no voo de asas batedoras. Com uma envergadura de, aproximadamente, 15 cm e uma velocidade de voo de alguns metros por segundo, os *MAV* experimentam as mesmas condições de voo a baixos Reynolds que os seus equivalentes biológicos. Neste regime de escoamento, asas fixas e rígidas apresentam uma queda dramática no desempenho aerodinâmico, enquanto que asas batedoras ganham eficiência e são o método propulsivo preferencial de vários animais, incluindo os pequenos voadores naturais, as baleias, os golfinhos, etc. [5].

Como se observa na Figura 1, embora os perfis convencionais, numa condição de asa fixa, apresentem um melhor desempenho a um número elevado de Reynolds ($>10^6$), onde o escoamento é permanente, o seu desempenho deteriora-se rapidamente a um número inferior e uma placa plana geometricamente simples supera o desempenho do perfil convencional. É importante notar que para este regime de Reynolds baixos o escoamento é transiente.

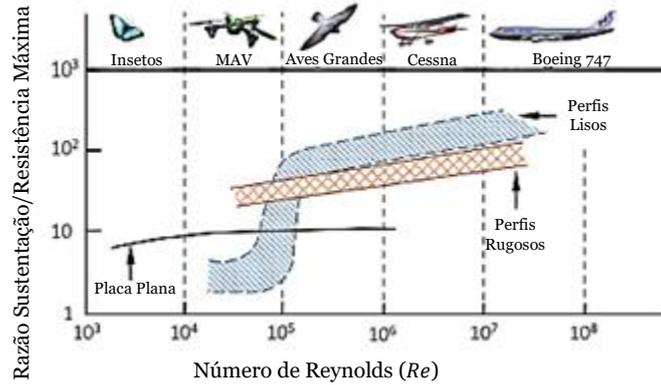


Figura 1 - Efeito do número de Reynolds na razão sustentação/resistência do perfil alar [2].

Assim, a motivação desta dissertação provém do recente interesse em veículos voadores de transporte de pequenas cargas e na melhoria da eficiência propulsiva das suas asas. Existe uma necessidade crescente de compreender o mecanismo da asa batidora usada na natureza e adotá-la ou modificá-la para o projeto de veículos com esta tipologia de asa. Para este fim, é necessário fornecer ao projetista do veículo todo o conhecimento aerodinâmico requerido para selecionar o perfil da asa batidora mais adequado para os objetivos de cada missão.

Para tal, nesta dissertação são estudadas as esteiras resultantes do movimento puramente translacional de três placas planas diferentes. Serão utilizadas duas placas de 5 mm de espessura e uma de 3 mm. Todas apresentam um bordo de ataque afiado, variando apenas o bordo de fuga, sendo que uma das placas de 5mm terá também o bordo de fuga afiado. As restantes apresentarão um bordo de fuga reto. Com isto, pretende-se alcançar os seguintes objetivos:

- Observar a influência da espessura da placa plana no tipo de esteira libertada, assim como na formação de *LEV*;
- Verificar se a tipologia do bordo de fuga interfere no tipo e/ou número de vórtices libertados;
- Analisar a influência de Re , k , h e St nas estruturas que compõem a esteira;
- Estudar a existência de extração de energia pelo *LEV*;
- Calcular o ângulo de ataque efetivo para cada condição de teste e verificar a sua influência na formação de *LEV*;
- Identificar os casos em que foi detetada flexão do perfil e analisar a sua influência no tipo de esteira resultante.

1.2 Biomimética

Nos seus 3,8 bilhões de anos, a Natureza conseguiu desenvolver-se, adaptar-se e evoluir, sobrevivendo assim ao longo dos tempos. Faz parte dela um conjunto diversificado de formas, estruturas, sistemas, padrões e até cores, que funcionam e coexistem em harmonia, podendo-se transformar em ferramentas úteis para o ser humano. A isso dá-se o nome de biomimética.

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 as suas soluções, e utilizar esse conhecimento em diferentes domínios da ciência. A designação desta recente e promissora área de estudo científico provém da combinação das palavras gregas *bios*, que significa vida, e *mimesis*, que significa imitação. Dito de modo simples, a biomimética é a imitação da vida.

Estudos biomiméticos pertencem a uma área altamente multidisciplinar, encapsulando diversos ramos da ciência, incluindo a engenharia aeronáutica. Na Natureza existem milhões de espécies das quais menos de dois milhões estão catalogadas. Isto representa uma gigantesca base de dados de soluções inspiradas em sistemas biológicos para a resolução de problemas de engenharia e de outros campos da tecnologia.

O voo com asas batedoras destaca-se como um dos mais complexos modos de transporte encontrados na Natureza. Mais de um milhão de diferentes espécies de insetos e dez mil tipos de pássaros e morcegos batem as suas asas para locomoção.

Biólogos e naturalistas têm produzido descrições cinemáticas do movimento da asa batidora e correlações empíricas entre frequência de batimento, peso, envergadura e requisitos de potência baseados em estudos de diferentes famílias de pássaros e morcegos. Com base no conceito de semelhança dinâmica, as leis de escala (redimensionamento) derivadas da análise estatística de várias espécies e famílias de aves, morcegos e insetos ajudam a determinar que variedade de tamanhos, pesos, velocidades de voo e frequências de batimento das asas podem ser esperadas dos MAV. Usando estas correlações, pode-se prever o efeito de diferentes parâmetros como área das asas, velocidade de voo, razão de aspeto e massa no desempenho aerodinâmico.

Tennekes [6] une tudo isto no seu "Diagrama de Voo", o qual apresenta gráficos de peso e carga alar em função da velocidade de cruzeiro para todos os voadores, desde moscas comuns até aos Boeing 747 de passageiros. Notavelmente, apesar de haver alguma dispersão da média, todos os voadores parecem cair aproximadamente na linha de regressão dada pela simples análise dimensional, como observado na Figura 2.

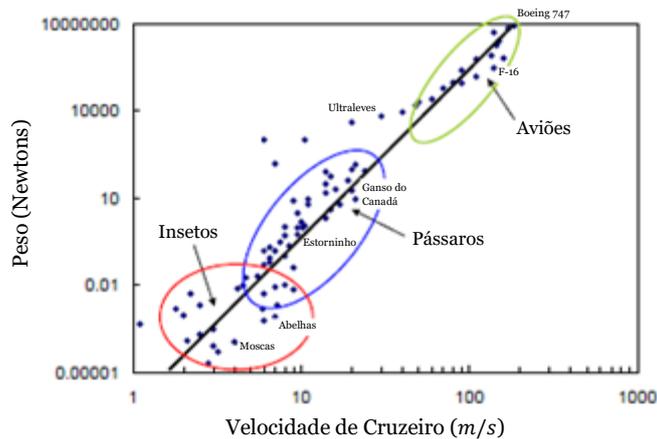


Figura 2 - Diagrama de voo [6].

A comunidade científica identificou dois regimes de escoamento nos quais as aves e os insetos voam e tentaram explicar os fenômenos físicos subjacentes, tanto no limite quase permanente como no regime totalmente transiente. O limite quase permanente corresponde, maioritariamente, a grandes aves, como águias, que se elevam e planeiam (do inglês: "*soar and glide*"). Quando se elevam, as asas estão fixas e rígidas e atuam como as das aeronaves convencionais. Para estes voadores, bater as asas é extremamente limitado a operações como descolagem, aterragem e estabilização. As aves e os insetos menores que continuamente batem as suas asas ocupam a outra extremidade do espectro aerodinâmico, correspondente ao voo completamente transiente [7].

Correlações empíricas preveem o intervalo entre o voo quase permanente e o voo transiente a aproximadamente 15 cm de envergadura de asa. Esta medida de envergadura é, também, o limite de projeto arbitrário definido para *MAV*. De facto, os requisitos de desempenho desejados para um *MAV* derivam dos atributos vistos em aves e insetos pequenos, nomeadamente, alta manobrabilidade, capacidade de voo com velocidades muito baixas e altas eficiências aerodinâmicas e propulsivas. Torna-se assim claro de que qualquer projeto de *MAV* deve ter em conta o mesmo ambiente dos voadores biológicos do mesmo tamanho: um ambiente onde o campo de escoamento é transiente, incompressível e que ocorre a baixos números de Reynolds [7].

1.3 Revisão Bibliográfica

1.3.1 Cinemática

Os animais voadores, ao baterem as asas, obtêm uma excelente estabilidade e manobrabilidade, e são capazes de variar rápida e continuamente a cinemática e as características geométricas das suas asas.

A literatura identificou o “*clap-and-fling*” de *Weis-Fogh*, os vórtices do bordo de ataque, a rotação *pitching-up*, o atraso da perda e as capturas da esteira, como mecanismos perceptíveis que contribuem para o aumento da sustentação [7-10]. Estas descobertas indicam que a fim de desenvolver uma base de conhecimentos e orientações de projeto adequadas para a criação de MAV de asa batidora, é essencial uma compreensão aprofundada da cinemática, das estruturas de vórtice de grande dimensão e do número de Reynolds, uma vez que estes processos influenciam diretamente a geração de sustentação e de tração.

Knoller e Betz foram os primeiros a observar que uma asa batidora cria um ângulo de ataque efetivo para que uma força aerodinâmica, N , seja gerada e decomposta em sustentação e tração [11]. Isto é ilustrado na Figura 3, na qual a asa é representada durante um movimento para baixo e um movimento para cima. É gerado uma componente de tração positiva nos dois movimentos, como resultado da asa batidora. Este efeito foi verificado experimentalmente por Katzmayr [12] em 1922, quando ele colocou uma asa estacionária num escoamento sinusoidalmente oscilante e mediu a tração média. A experiência de Katzmayr [12] baseou-se do movimento de *soaring* das aves.

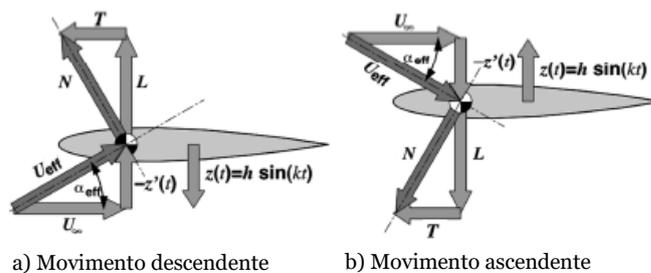


Figura 3 - Primeira teoria de descrição da propulsão de asas batedoras [11].

Taylor *et al.* [13] analisaram a frequência e amplitude dos batimentos das asas de 42 espécies de pássaros, morcegos e insetos no voo de cruzeiro e descobriu que estes animais voadores operam numa gama restrita do número de Strouhal entre 0,2 e 0,4. Em 2004, Young e Lai [14] simularam o escoamento adjacente ao movimento de translação de um perfil NACA 0012, escolhendo casos testados por Anderson *et al.* [15] para fins comparativos. Tanto os testes experimentais como as simulações de Navier-Stokes mostraram um pico de eficiência propulsiva para um intervalo de número de Strouhal de 0,1 a 0,2. Para o caso de movimento puramente translacional a maior eficiência para o intervalo de número de Strouhal encontra-se entre 0,1 e 0,2.

Camacho [16] simulou o movimento de um perfil NACA 0012 em pura translação e os resultados foram idênticos aos de Young e Lai [14]. Recorrendo a dois modelos de turbulência (*Realizable* $k - \epsilon$ e $k - \omega$ SST), Camacho [16] verifica que a eficiência máxima efetivamente ocorre no intervalo anteriormente mencionado, como se pode ver na Figura 4.

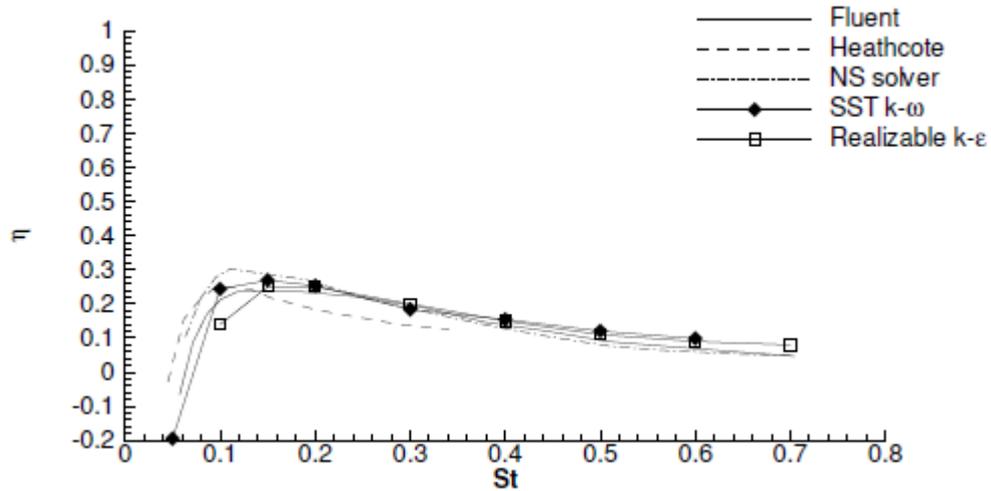


Figura 4 - Eficiência propulsiva em função do número de Strouhal [16].

O número de Strouhal descreve a influência relativa do bater das asas em função da velocidade de voo [17] e é definido por:

$$St = \frac{fW}{U_\infty} \quad (1.1)$$

em que, f é a frequência dos batimentos, W é a dimensão da esteira e U_∞ é a velocidade do voo. Para asas batedoras, W é, geralmente, tomado como o comprimento varrido pela ponta da asa. Taylor *et al.* [13] definiram:

$$W = b \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1.2)$$

onde θ é ângulo do batimento dorsoventral e b é a envergadura da asa.

A sua análise mostra que o número adimensional de Strouhal é um parâmetro de similaridade útil, que possibilita caracterizar o desempenho em voo de muitos animais voadores, desde pequenos insetos a grandes aves. A sua importância já foi reconhecida por Birnbaum [18] que realizou a primeira análise do escoamento incompressível através de perfis alares oscilantes utilizando a teoria do escoamento potencial linearizado.

Por volta da mesma altura, Birnbaum [18] percebeu que o modelo de Knoller-Betz omitiu uma parte importante da física do escoamento inerente ao perfil alar da asa batidora, nomeadamente, a propagação de vórtices iniciais no bordo de fuga do perfil alar. Ele mostrou que este problema era dependente da razão de duas velocidades características ou por comprimentos característicos, o que o levou a introduzir um parâmetro de similaridade, k , que é, usualmente, referido como a frequência reduzida:

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

onde c é a corda do perfil. O produto fc é uma medida da velocidade do movimento da asa e, conseqüentemente, k é uma medida da velocidade de movimento da asa relativamente à velocidade de voo. Outra interpretação da frequência reduzida diz respeito à razão de dois comprimentos característicos, nomeadamente, a corda do perfil alar e o comprimento de onda da libertação de vórtices dada por $U_\infty/2\pi f$.

Outro comprimento característico é a amplitude do batimento A . Ao usar uma amplitude de batimento adimensional, $h = \frac{A}{c}$, a relação entre o produto kh e o número de Strouhal St pode ser escrita da seguinte forma:

$$kh = 2\pi \left(\frac{A}{W} \right) St \quad (1.4)$$

De notar que a equação 1.4 relaciona um movimento translacional puro com o de um movimento de bater das asas normal. Para um movimento translacional puro uniforme ao longo de toda a envergadura, a razão $\frac{A}{W}$ é $\frac{1}{2}$, uma vez que a largura da esteira é $2A$. Assim, a equação anterior é simplificada para:

$$kh = \pi St \quad (1.5)$$

Conseqüentemente, o intervalo de número de Strouhal de 0,1-0,2, correspondente à máxima eficiência propulsiva, é equivalente a um intervalo de kh de 0,31-0,63, para um movimento puramente translacional.

Ainda outra interpretação do valor de kh ou do número de Strouhal mostra que estes números indicam o ângulo de ataque efetivo máximo, $\alpha_{eff\,m\acute{a}x}$, induzido pelo movimento sinusoidal de bater das asas. Contudo, para o movimento em estudo nesta dissertação, o ângulo de ataque efetivo máximo é obtido pela equação (1.6).

$$\alpha_{eff\,m\acute{a}x} = \arctan \left(\frac{-\dot{y}(t)}{U_\infty} \right) \quad (1.6)$$

onde $\dot{y}(t)$ corresponde à velocidade da asa, que depende da amplitude e da frequência programadas.

Por fim, o número de Reynolds será também um importante parâmetro utilizado. Este fornece a razão entre as forças inerciais e as forças viscosas e é definido por:

$$Re = \frac{\rho U_\infty c}{\mu} \quad (1.7)$$

onde ρ é a massa volúmica, U_∞ corresponde à velocidade de escoamento, c é a corda do perfil alar e μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

1.3.2 Aerodinâmica a Baixos Reynolds

Dado que as asas dos insetos são essencialmente superfícies finas de sustentação com arestas afiadas e baixas razões de aspecto que operam a grandes ângulos de ataque, o escoamento que passa nas suas asas batedoras é intrinsecamente transiente e altamente tridimensional. Neste ambiente transiente, o escoamento pode experimentar perturbações formando, assim, as estruturas do escoamento amplamente responsáveis pelo bom desempenho das asas dos insetos: os vórtices do bordo de ataque (*LEV*, do inglês: “*leading-edge vortice*”). O vórtice aumenta a circulação à volta da asa e cria uma quantidade de sustentação maior do que no caso de escoamento quase permanente. Em relação ao voo para a frente, o *LEV* é o único mecanismo presente que produz as forças necessárias. Este mecanismo envolve separação do escoamento no bordo de ataque que volta a “colar-se” à asa e forma uma bolha de separação.

A bolha de separação do bordo de ataque, mostrada na Figura 5, é formada quando a camada limite laminar se separa da superfície como resultado do forte gradiente de pressão adverso a jusante do ponto de pressão mínima. Esta camada de corte separada é muito instável e a transição inicia-se geralmente a uma curta distância a jusante da separação, como resultado da amplificação das perturbações da velocidade presentes imediatamente após a separação. Após a transição do escoamento de laminar para turbulento, tensões de corte turbulentas energizam a camada de corte ao arrastar o fluido do escoamento externo de modo que ele cresça rapidamente, fazendo com que a pressão aumente. O recolamento acontece quando a pressão é quase igual a um valor que existiria se houvesse uma camada limite turbulenta sobre o perfil sem bolha de separação presente. A região entre a separação e a recolamento é referida como bolha de separação.

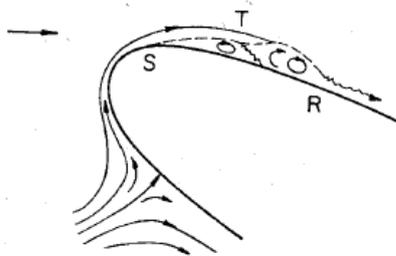


Figura 5 - Separação laminar e recolamento turbulento, onde S significa ponto de separação, T significa transição e R significa ponto de recolamento [19].

As bolhas de separação têm sido classificadas como curtas e longas. Para uma bolha curta, o comprimento da camada de corte de separação turbulenta é aproximadamente o mesmo da camada de corte laminar e a bolha estende-se, usualmente, por apenas uma pequena percentagem da corda do perfil alar. A bolha longa tem uma camada de corte turbulenta que se estende sobre a maioria da corda do perfil com uma grande interação com o escoamento externo.

A um certo valor crítico do número de Reynolds, os processos turbulentos de mistura e arrastamento, que se seguem à separação laminar, não podem mais aumentar a pressão para um valor alto o suficiente para que o recolamento ocorra e se forme uma bolha curta. Neste caso, o

pico da velocidade diminui, resultando num gradiente de pressão baixo sobre a bolha. O termo associado a esta ocorrência é explosão da bolha (do inglês: “*bursting bubble*”), uma vez que a camada de corte turbulenta se junta novamente muito a jusante formando uma bolha longa. Bolhas de separação longas exibem uma distribuição de pressão na superfície com uma recuperação mais suave que o valor da camada limite turbulenta não separada. Este aumento gradual da pressão, junto com a redução do pico da pressão mínima na superfície superior do perfil, é característica de bolhas longas.

Para uma primeira compreensão da física de geração de tração é instrutivo observar as mudanças na libertação dos vórtices a partir de um perfil alar que oscila no modo de translação pura, antes de entrar em mais detalhe sobre a relevância do *LEV*.

Em 1935 von Kármán e Burgers [20] ofereceram a primeira explicação teórica da produção de tração ou resistência ao avanço baseada na localização e orientação dos vórtices de esteira, como ilustrado nas Figuras 6 e 7 para as esteiras indicativas de resistência ao avanço e de tração, respetivamente.

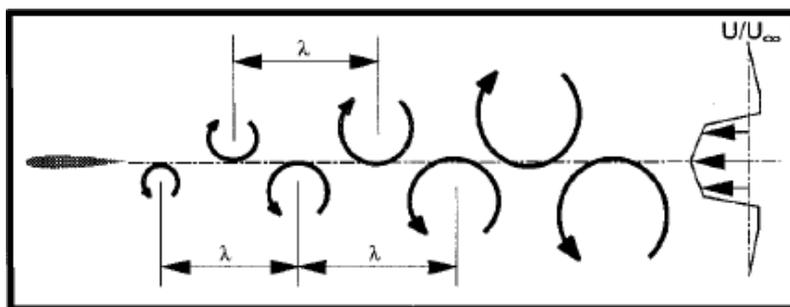


Figura 6 - Padrão de esteira indicativa de resistência ao avanço [21].

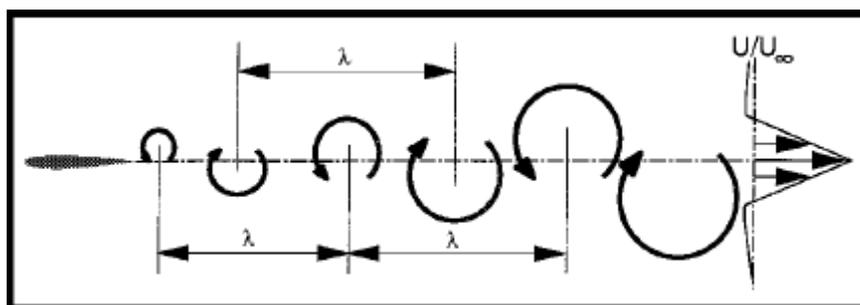


Figura 7 - Padrão de esteira indicativa de produção de tração [21].

Mais tarde, Jones *et al.* [21] realizaram uma experiência num túnel de água com o objetivo de observar as esteiras formadas por um perfil NACA 0012 a oscilar num movimento de translação sinusoidal. Verificaram que em fluidos viscosos, os perfis estacionários e os perfis em movimento de translação sinusoidal com um kh baixo geram resistência ao avanço. À medida que o kh aumenta, a resistência é reduzida, e eventualmente é produzida tração. Para além das estradas de vórtices de produção de tração e de resistência ao avanço descobertas por von Kármán e Burgers, foram observadas esteiras entre estes dois estágios, esteiras neutras. Como mostra a Figura 8, este tipo de esteira apresenta os vórtices alinhados.

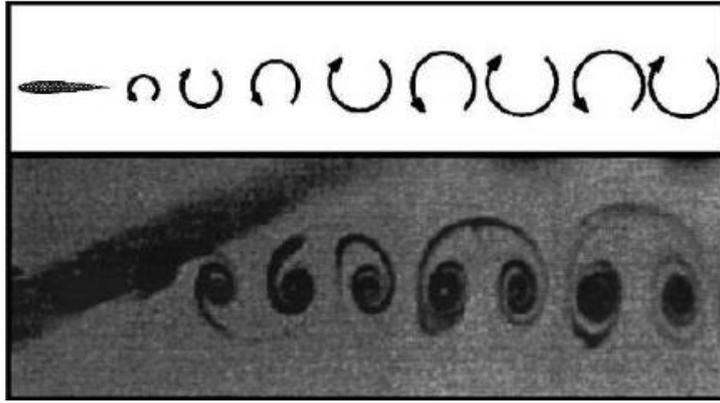


Figura 8 - Padrão de esteira indicativo de zero resistência [21].

Para kh grandes ($k = 12,3$ e $h = 0,12$, resultando em $kh = 1,5$), foi gerada uma estrada de vórtices deflectida ou de modo duplo (*dual-mode*), como mostra a Figura 9. Neste caso, para além de tração, observa-se sustentação de acordo com a deflexão da estrada de vórtices.

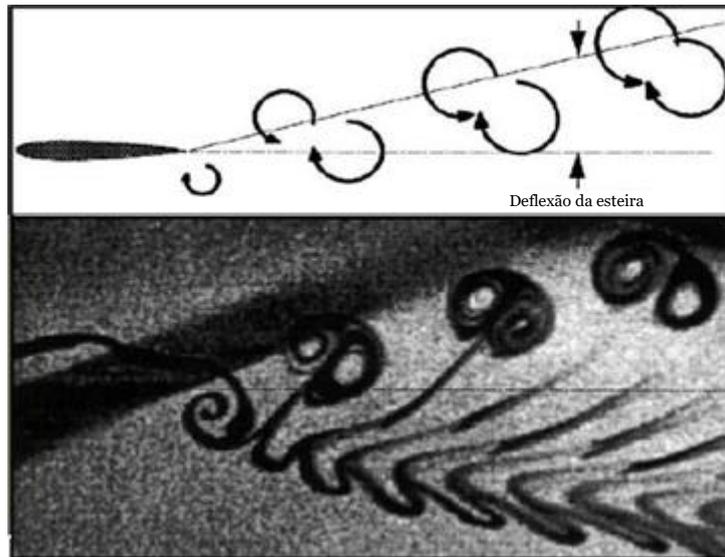


Figura 9 – Padrão de esteira indicativa de produção de tração e de sustentação [21].

Lai e Platzer [22] foram mais além no estudo da influência dos diversos parâmetros na esteira resultante. Realizaram um estudo num túnel de água com um perfil alar NACA 0012, onde os padrões de crescimento e libertação de vórtices se repetem, dando origem a uma trilha de vórtices contra-rotativos, conhecida como estrada de von Kármán. As visualizações do corante mostram que os padrões de vórtice gerados pelo perfil em translação mudam de escoamentos de esteira de produção de resistência para escoamentos de jato de produção de tração assim que kh excede aproximadamente 0,4.

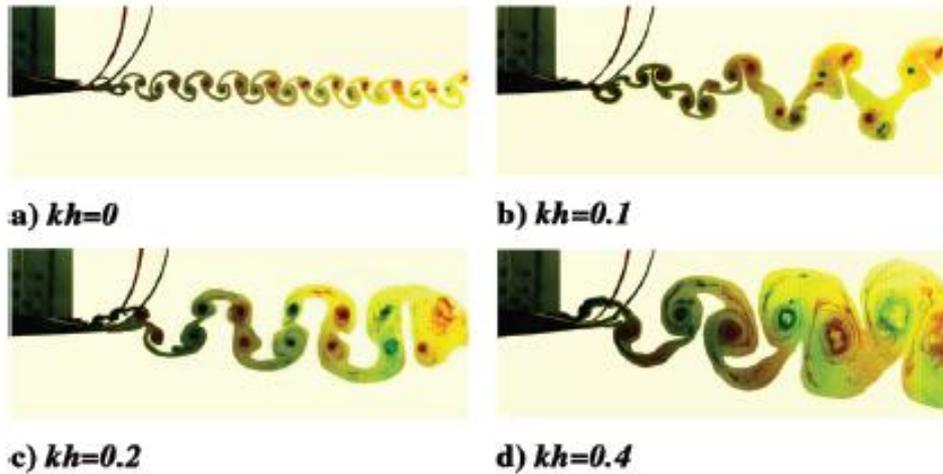


Figura 10 - Transição da estrada de von Kármán com o aumento de kh [22].

Em 10 a) podemos ver os vórtices da estrada de von Kármán a soltarem-se do perfil estacionário NACA 0012 num escoamento de água a 0,2 m/s, correspondendo a um número de Reynolds de $1,7 \times 10^4$, na qual os vórtices rotativos no sentido dos ponteiros do relógio (vermelho) são vertidos do extradorso e os vórtices rotativos no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio (verde) são vertidos do intradorso. Assim que o perfil começa a oscilar translacionalmente, com o aumento de kh , em 10 b) e 10 c), observa-se a transição da esteira até, em 10 d), a estrada de von Kármán inverter. Esta transição parece ocorrer através da libertação do par de vórtices, em 10 b) e 10 c). Os vórtices da fila superior da estrada de von Kármán invertida estão no sentido anti-horário, enquanto que a fila inferior possui vórtices no sentido horário. A oscilação translacional cria um jato e, como reação, uma tração sobre o perfil alar.

Jones *et al.* [23] fizeram uso de um código de fluido potencial para a previsão da tração do perfil alar, de modo a determinar a sua dependência da frequência e amplitude do movimento translacional. Os resultados mostraram que a tração aumenta com o aumento da frequência e da amplitude de oscilação. Olhando novamente para a figura 10, torna-se claro que a produção de tração ocorre depois de um certo valor de kh (e, conseqüentemente, de St) ser excedido.

De acordo com Lai e Platzer [22] a estrutura da esteira pode ser classificada de acordo com o número Strouhal, com os movimentos abaixo de um limiar de $St \sim 0,06$ (convertido para a definição actual de St) produzindo a resistência e os acima produzindo a tração. Além disso, em $St > 0,6$, observaram que a esteira se torna assimétrica, com a estrada de vórtices desviada da posição média. Miao e Ho [24] verificaram que as condições de escoamento que produzem a maior eficiência propulsiva correspondem ao número Strouhal de 0,255.

Young e Lai [25] verificaram que para o mesmo kh (e, conseqüentemente, St) a esteira pode apresentar estruturas significativamente distintas. Chegaram à conclusão de que a estrutura de esteira está fortemente dependente tanto de k como de h , para a gama de números de Reynolds baixos. Observaram ainda que à medida que o k foi reduzido de 8 para 4 e para 2, viu-se uma

mudança de um único, para dois, e depois vários vórtices libertados por meio ciclo de movimento do perfil. Assim, pensa-se que a frequência reduzida tem influência no número de vórtices libertados por ciclo de movimento. Segundo Ohmi *et al.* [26], no que diz respeito ao dinamismo fundamental dos vórtices e aos aspetos gerais das esteiras, o efeito do número de Reynolds é muito menos importante do que o dos outros parâmetros.

Um problema desafiante na descoberta de mecanismos aerodinâmicos no voo com asas batedoras é responder a uma questão central sobre a dinâmica de vórtices em grande escala e da complicada topologia de esteira, bem como das suas correlações com a produção de força.

Em tais regimes de baixo número de Reynolds, uma das principais limitações prende-se com a natureza de separação da camada limite laminar quando confrontada com um gradiente de pressão adverso. Vários estudos recentes examinaram a transição de laminar para turbulento e a posição de uma bolha de separação laminar a baixos ângulos de incidência e a $Re = 6 \times 10^4$ [27]. Descobriu-se que o desempenho diminuía drasticamente para $Re < 6 \times 10^4$, onde a transição e, portanto, o recolamento ocorre mais tarde, se de todo. A tais números de Reynolds associados com o voo de cruzeiro, é esperado que a sustentação seja gerada através de mecanismos aerodinâmicos transientes, como perda dinâmica [28], onde a formação e a convecção retardada de um *LEV* sobre o movimento descendente da asa podem ser muito vantajosa para a produção de sustentação [29].

Para primeiro investigar qualitativamente a natureza do fenómeno da perda dinâmica e da sua esteira associada, Rival e Tropea [30] realizaram estudos de visualização do fumo para vários casos de translação pura e para uma gama de frequências reduzidas ($0.05 < k < 0,3$) a $\alpha = 8^\circ$, onde era evidente uma forte perda dinâmica. Estes estudos elucidaram a importância da frequência reduzida no carácter da esteira quando a amplitude adimensional e o ângulo de ataque se mantiveram constantes. Em frequências reduzidas mais baixas ($k < 0,15$) verificou-se que o processo de perda dinâmica e o seu desprendimento associado correspondiam a uma típica estrada de von Kármán do tipo *bluff-body*, com múltiplos vórtices alternados que se desprendiam dos bordos de ataque e de fuga. Até quatro conjuntos de vórtices deste tipo foram libertados sobre o movimento descendente da asa. Para frequências reduzidas mais elevadas ($k > 0,2$), um único par de vórtices do bordo de ataque e de fuga foi derramado na esteira, formando uma estrutura denominada por cogumelo, como descrito por Panda e Zaman [31].

As conclusões de Rival e Tropea [30] foram as seguintes: a transição gradual de um *bluff-body-type* (múltiplos pares de vórtices) para uma esteira do tipo cogumelo (estrada de von Kármán invertida) é aparente a uma frequência reduzida de aproximadamente $k = 0,2$.

A Figura 11 mostra a libertação de vórtices do bordo de ataque no valor kh correspondente a óptima eficiência [1], tanto para baixa amplitude como para alta amplitude de oscilação translacional. Embora os *LEV* sejam prejudiciais (para as configurações de asa usadas em [1]) para a produção de tração a números de Reynolds elevados, o seu efeito a escoamentos com números de Reynolds

baixos é compensado pela interação positiva com os vórtices do bordo de fuga (*TEV* do inglês: “*trailing-edge vortices*”), para que a tração aumente com kh .

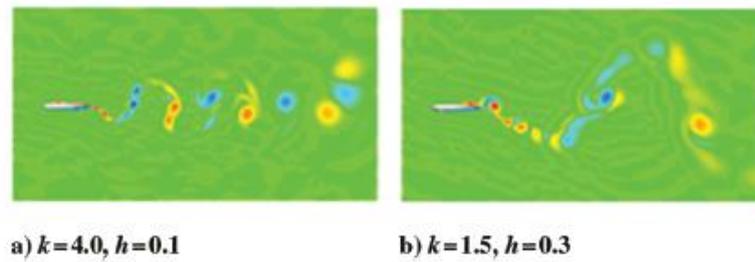


Figura 11 - Contornos dos vórtices no movimento puramente translacional [1].

No entanto, quando os *LEV* apresentam maiores dimensões, provocam a redução da tração (Figura 12).

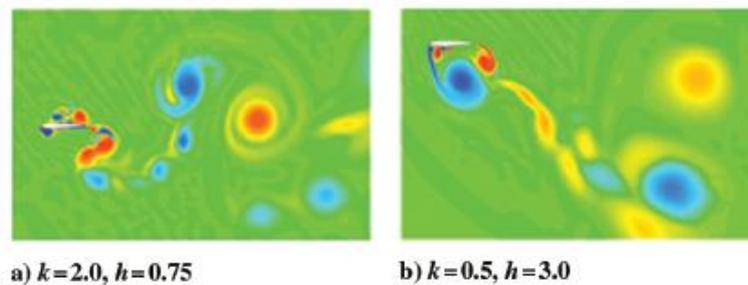


Figura 12 - Contornos da vorticidade observada num movimento puramente translacional [1].

Platzer *et al.* [1] concluíram que estes resultados indicam que a física da geração de tração por um perfil em movimento de translação é bastante dependente de diversos parâmetros. A números de Reynolds elevados, a geração eficiente de tração é alcançada pela libertação de *TEV* na forma de estrada de von Kármán invertida, que se forma assim que se atinge um número de Strouhal suficientemente grande. Consequentemente, o número de Strouhal é o principal parâmetro que governa o comportamento do escoamento neste regime. No entanto, a números de Reynolds baixos, típicos para o voo de *MAV*, o comportamento do escoamento é mais complexo, porque a geração eficiente de tração é alcançada pela libertação por ambos os bordos de fuga e de ataque. Embora as condições de voo mais eficientes pareçam ocorrer, novamente, para um número de Strouhal específico, a eficiência de tração e propulsão são sensíveis à frequência do movimento de translação independentemente do número de Strouhal, devido ao tempo de formação de *LEV*, separação e convecção sobre a superfície do perfil alar. Os resultados de Young e Lai [32] indicam que para um dado kh (consequentemente, número de Strouhal), é mais benéfico operar a valores de k altos e baixos h , do que a baixos k e altos h , de modo a minimizar o efeito dos vórtices do bordo de ataque. Estas descobertas foram principalmente baseadas em experiências e simulações do perfil NACA 0012.

Em 2019, Camacho [16] verificou que a combinação dos valores de k e de h necessários para atingir a eficiência ótima dependem do número de Reynolds. Na Figura 13 observa-se que, para $Re = 1,7 \times 10^4$ é benéfico utilizar valores de k altos e h baixos, mas para $Re = 3,4 \times 10^4$ torna-se preferível, valores de k baixos e h altos. Para além disso, a eficiência propulsiva aumenta com o número de Reynolds.

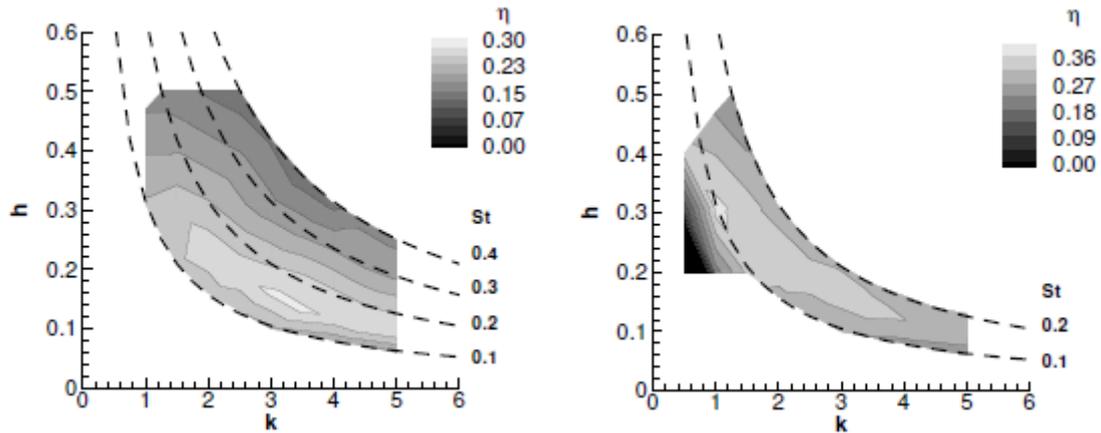


Figura 13 - Eficiência propulsiva em função de k e h para (esquerda) $Re = 1,7 \times 10^4$ e (direita) $Re = 3,4 \times 10^4$ [16].

Isto leva a crer que os valores ótimos de k e de h tenham de ser adaptados a cada situação. Na Tabela 1 encontram-se resumidos alguns estudos realizados no sentido de entender melhor a influência destes parâmetros.

Todas estas simulações e estudos experimentais mostram que a geração e a libertação de vórtices dominam a carga aerodinâmica na asa. Estes vórtices e as suas interações com a asa durante o ciclo de batimento levam à produção de sustentação e tração. Assim sendo, verificou-se que o *LEV* é uma característica comum associada com a aerodinâmica das asas batedoras a baixos Reynolds. Como demonstrado numericamente por Liu *et al.* [33], estes vórtices criam grandes regiões de baixa pressão que levam aos elevados coeficientes de sustentação observados no voo dos insetos. Tem sido teorizado que muitos insetos voam no limite de perda dinâmica, onde altos coeficientes de sustentação são gerados temporariamente após uma súbita mudança no ângulo de ataque efetivo.

Rodrigues *et al.* [34] identificaram a formação e convecção do *LEV* sobre o extradorso do perfil, como um possível mecanismo de redução de potência. A presença de uma zona de baixa pressão durante a fase ascendente ajuda a produção de sustentação e reduz a demanda de energia. Este fenómeno pode ser uma forma de melhorar a eficiência propulsiva ou de extração de energia. Porém, Rodrigues *et al.* [34] não recomendam que o *LEV* passe a posição de espessura máxima, uma vez que irá afetar negativamente o processo de produção de tração.

Segundo Young e Lai [14] a separação do bordo de ataque parece dominar a geração de forças aerodinâmicas para frequências reduzidas abaixo de aproximadamente $k = 4$, mas torna-se

secundária para frequências mais elevadas. Os efeitos de bordo de fuga têm uma forte influência nas estruturas de esteira observadas, mas apenas um efeito secundário na sustentação e na tração.

Os padrões da esteira dependem principalmente do destino do *LEV*: se é ou não libertado, e como interage com o *TEV*. Como demonstrado teoricamente por Streitlien *et al.* [35] e experimentalmente por Anderson *et al.* [15], o escalonamento das interações entre os *LEV* e os *TEV* pode afetar grandemente a eficiência da tração e da propulsão de um perfil de asas batedoras. A eficiência ótima ocorre quando os *LEV* interagem construtivamente com os *TEV*, conduzindo a dois vórtices depositados por batimento. A tração e a eficiência são grandemente reduzidas quando há um reforço negativo entre o *LEV* e o *TEV*.

Hu *et al.* [36] nas suas simulações, observaram que quando a amplitude de translação aumenta, o *LEV* e o *TEV* tornam-se mais fortes, o que provocará um aumento simultâneo da sustentação e da tração. O aumento da amplitude de translação melhora muito as forças de sustentação e pode também aumentar as forças de tração. De notar que as simulações de Hu *et al.* [36] foram realizadas tendo em conta o movimento combinado de translação e rotação.

Ao tentar otimizar a forma de um perfil alar de uma asa batidora, Lee *et al.* [37] verificaram que o efeito dos *LEV* e dos *TEV* pode ser favoravelmente combinado através de modificações geométricas. O perfil mais espesso ajuda a evitar a formação de vórtices em grande escala no bordo de ataque e o perfil mais fino excita uma diferença de pressão mais forte no bordo de fuga. Ao combinar o perfil mais grosso e mais fino, é possível obter melhores características aerodinâmicas, incluindo maior coeficiente de tração e maior eficiência propulsiva.

Tuncer e Kaya [38] tentaram otimizar um perfil alar de modo a atingir a máxima tração e eficiência propulsiva. Os dados de otimização mostram que valores de tração elevados podem ser obtidos à custa da eficiência propulsiva. Para uma elevada eficiência propulsiva, o ângulo de ataque efetivo do perfil é reduzido, e são evitadas formações de *LEV* em grande escala. A geração de tração de uma asa batidora é maximizada para grandes amplitudes de translação à medida que grandes *LEV* se formam e se libertam na esteira. Por outro lado, a sua eficiência propulsiva pode ser aumentada reduzindo a amplitude de translação e o ângulo de ataque efetivo e, conseqüentemente, impedindo a formação de *LEV*.

Ho *et al.* [39] realizaram um estudo de visualização do escoamento através de fumo e capturaram a formação de uma bolha de separação no bordo de ataque durante o movimento descendente de uma asa de papel de 7 cm de envergadura e 3 cm de corda. No início do movimento, o escoamento estagna no bordo de ataque da asa. A linha de estagnação move-se progressivamente para a superfície superior da asa, formando um *LEV*. Este vórtice cresce e atinge o seu tamanho máximo perto de metade do movimento descendente da asa e, finalmente, separa-se no início do movimento ascendente. Este *LEV* é acompanhado de um escoamento longitudinal. Este fenómeno ajuda à estabilização do vórtice na secção média da asa através de estiramento do vórtice. O escoamento longitudinal desacelera em direção à ponta da asa e o núcleo do vórtice aumenta de tamanho.

Na literatura encontram-se muitos artigos sobre o papel do escoamento longitudinal na estabilização do *LEV* [17,40]. Em essência, todos estão em concordância de que a estabilidade dos vórtices nas asas batedoras é mantida por escoamento axial no sentido da envergadura ao longo do núcleo do vórtice, criando “atraso na perda”, para aumentar a sustentação durante a fase translacional.

Tabela 1 - Resumo de trabalhos realizados na área de perfis rígidos oscilantes.

Autores	Experiência	Métodos	Resultados	Notas
G. C. Lewing e H. Haj-Hariri [41]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil simétrico • Oscilação translacional • $Re = 5,0 \times 10^2$ • Escoamento viscoso 	<p><u>Numérico</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Equações bidimensionais de Navier-Stokes 	<ul style="list-style-type: none"> • Padrões da esteira • Libertação de vórtices • Eficiência propulsiva 	<ul style="list-style-type: none"> • Para elevados valores de h, os vórtices são libertados, em primeiro lugar, pelo bordo de fuga. • À medida que a k aumenta, o comprimento de onda dos vórtices de esteira é diminuído.
Medjroubi <i>et al.</i> [42]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil NACA 0012 • Oscilação translacional • $Re = 1 \times 10^4$ • $k = 0; 4,52$ e $7,85$ • $\alpha = 0^\circ$ 	<p><u>Numérico</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Simulação bidimensional com método numérico de ordem elevada 	<ul style="list-style-type: none"> • Classificação de esteiras • Influência de k no número de vórtices libertados por ciclo 	<ul style="list-style-type: none"> • A estrada de von Kármán é invertida assim que um determinado valor de k é excedido.
Lua <i>et al.</i> [43]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil elíptico • Oscilação translacional • $Re = 1,0 \times 10^3$ • $k = 0,1-2,0$ • $c = 20$ mm • $t = 2,5$ mm 	<p><u>Experimental</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Visualização em túnel de água através de <i>DPIV</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Libertação de vórtices • Estruturas da esteira 	<ul style="list-style-type: none"> • O tipo de estrutura da esteira depende tanto de k como de h. • As estruturas da esteira são o resultado da interação do <i>LEV</i> com o <i>TEV</i>.

Tabela 1 - Resumo de trabalhos realizados na área de perfis rígidos oscilantes (continuação).

Autores	Experiência	Métodos	Resultados	Notas
M. V. Ol [44]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil SD7003 • Oscilação translacional • Oscilação rotacional • $Re = 6 \times 10^4$ • $h = 0,05$ • $\alpha = 4^\circ$ • $c = 200 \text{ mm}$ 	<p><u>Experimental</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Visualizações em túnel de água através de <i>PIV</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Separação na camada limite • Liberação de vórtices 	<ul style="list-style-type: none"> • Maiores valores de k resultam num maior tempo de residência do vórtice libertado perto do bordo de fuga.
Baik <i>et al.</i> [45]	<ul style="list-style-type: none"> • Placa plana • Oscilação combinada de translação e rotação • Oscilação sinusoidal • $Re = 1,0 \times 10^4$ 	<p><u>Experimental</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Visualização em túnel de água através de <i>PIV</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Influência de St, k e h nas estruturas da esteira • Liberação de vórtices 	<ul style="list-style-type: none"> • A formação do <i>LEV</i> é atrasada para valores elevados de k. • A circulação do <i>LEV</i> é dependente de St, k e h.
Baik <i>et al.</i> [46]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil NACA 0012 • Oscilação translacional • Oscilação rotacional • Oscilação sinusoidal • $Re = 4 \times 10^3$ • $h = 0,75$ • $k = 0 - 0,6$ 	<p><u>Experimental</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Visualizações em túnel de água através de <i>DPIV</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Separação na camada limite • Liberação de vórtices • Dinâmica do <i>LEV</i> • Medição de forças 	<ul style="list-style-type: none"> • O aumento de k provoca um crescimento mais lento do <i>LEV</i> e do <i>TEV</i>. • A trajetória de <i>LEV</i> é uma função do ângulo de ataque efetivo. • O efeito de St prevalece sobre a influência de k.

1.3.3 Asas Flexíveis

As asas dos insetos são flexíveis e esta flexibilidade é a chave para compreender como os insetos atingem elevados níveis de sustentação ao baterem as asas. À medida que a asa se move na direção da batida, deformações das asas tais como flexão, torção e arqueamento são influenciadas por forças inerciais e aerodinâmicas, bem como pela rigidez da asa [47]. Para além disso, os animais também utilizam a hemolinfa para ativamente controlar a curvatura das suas asas.

Este é um tema muito complexo. Existem já vários artigos sobre o estudo da flexibilidade das asas batedoras, contudo, as conclusões não são tão simples, sendo que nem sempre a flexibilidade da asa é favorável à missão.

Ryu *et al.* [48] realizaram um estudo comparativo de 3 asas flexíveis (0,8, 0,5 e 0,35 mm de espessura) com uma asa rígida (0,3 mm de espessura), a fim de interpretar os efeitos da flexibilidade das asas nas estruturas do escoamento e a correspondente geração de força aerodinâmica. As asas foram produzidas baseadas nas asas de uma mariposa e sujeitas a um movimento sinusoidal. O estudo foi realizado num tanque de água. Os resultados mostram que os casos com maiores vorticidades e, conseqüentemente, que geraram maiores forças aerodinâmicas, foram aqueles com espessuras de 0,3 e 0,35 mm e não aqueles com maior flexibilidade, correspondentes às espessuras de 0,5 e 0,8 mm. Ryu *et al.* [48] concluíram, assim, que é importante estabelecer uma gama específica de flexibilidade para permitir uma maior força aerodinâmica.

Unger *et al.* [49], pelo contrário, concluíram que os perfis alares mais flexíveis reduzem a eficiência propulsiva. O estudo baseou-se na aplicação da metodologia de simulação de interação fluido-estrutura para investigar o escoamento em torno de um perfil alar leve e flexível baseado na asa de uma gaivota. O campo de escoamento é caracterizado por uma transição laminar-turbulenta a um número de Reynolds de 10^4 , que tem lugar ao longo de uma bolha de separação laminar. Acrescentou ainda que uma melhor eficiência de voo com asas batedoras pode ser encontrada quando a amplitude adimensional é aumentada, mas apenas até um certo valor, quando não ocorre uma separação no bordo de ataque.

Nguyen e Han [50] exploraram os efeitos da flexibilidade das asas em várias características do voo, neste caso, as condições de *trim*, os requisitos de potência e a estabilidade dinâmica de um MAV com asas batedoras em forma de inseto, baseado na mariposa *Manduca sexta*. A estrutura da asa é analisada pelo método dos elementos finitos. Os resultados deste estudo mostram que as condições de *trim* dos MAV flexíveis e rígidos podem diferir significativamente umas das outras. Quando a velocidade de voo é inferior a 3,0 m/s, a utilização de asas flexíveis é favorável, uma vez que ajudam os MAV a reduzir os requisitos de potência e a estabilizar a dinâmica lateral. Contudo, a 3,0 m/s, estas vantagens são quase imperceptíveis, enquanto que a 4,0 m/s, o MAV flexível requer ainda mais potência mecânica do que o seu homólogo rígido.

A flexibilidade nas asas dos insetos pode ocorrer de duas formas, ao longo da envergadura ou ao longo da corda da asa.

Heathcote *et al.* [51] realizaram um estudo num túnel de água, sobre o efeito da flexibilidade ao longo da envergadura na tração, na sustentação e na eficiência propulsiva de uma asa batidora retangular. As forças de tração e sustentação foram medidas com uma balança de forças e o campo de escoamento foi medido com sistema de velocimetria por imagem de partículas (*PIV*). As asas estudadas foram 3 NACA 0012 com 100 mm de corda e 300 mm de envergadura. A introdução de um grau de flexibilidade longitudinal verificou-se benéfica. Para números de Strouhal maiores do que 0,2, esse mesmo grau de flexibilidade longitudinal produziu um pequeno aumento no coeficiente de tração e uma pequena redução dos requisitos de potência, resultando numa maior eficiência. Neste caso, observou-se um sistema de *TEV* moderadamente mais forte. No entanto, a introdução de um grau muito maior de flexibilidade longitudinal verificou-se prejudicial. Heathcote *et al.* [43] verificaram que o intervalo de números de Strouhal para os quais a flexibilidade foi classificada como benéfica, coincide com o intervalo encontrado na natureza ($0,2 < St < 0,4$). Concluiu, assim, que a flexibilidade pode beneficiar os *MAV* com asa batidora, tanto aerodinamicamente como na leveza inerente às estruturas flexíveis.

Heathcote e Gursul [52] realizaram experiências em canais de água recorrendo a perfis alares com flexibilidade ao longo da corda em movimento oscilatório vertical com amplitude constante para números de Reynolds entre 9×10^3 e $2,7 \times 10^4$. Verificou-se que um grau de flexibilidade aumenta tanto o coeficiente de tração como a eficiência propulsiva. As medições do campo de escoamento revelaram *TEV* mais fortes correspondentes a coeficientes de tração mais elevados, e *TEV* mais fracos correspondentes a eficiências mais elevadas. Foram também observados benefícios de eficiência numa vasta gama de flexibilidade ao longo da corda, com a eficiência ótima a exceder a eficiência do perfil inflexível em aproximadamente 15%. A visualização do escoamento e as experiências com dados *PIV* revelaram vórtices de ponta mais fracos nos casos de eficiência ótima. Os resultados sugerem que o efeito da flexibilidade ao longo da corda é benéfico para perfis em movimento puramente translacional a baixos números de Reynolds.

Relativamente ao movimento de translação, Pederzani e Haj-Hariri [53] sugerem que perfis flexíveis mais leves são capazes de gerar mais tração e são mais eficientes do que os perfis flexíveis mais pesados.

É possível afirmar que o uso de asas flexíveis nem sempre é a melhor solução. A escolha desta tipologia depende de vários fatores, sejam eles os requisitos aquando da construção do veículo aéreo, o regime de escoamento a que ele se destina, o tipo de missão, etc. Na Tabela 2 encontra-se um pequeno resumo de alguns trabalhos realizados na área das asas flexíveis, que mostra precisamente a complexidade do estudo desta área.

Tabela 2 - Resumo de trabalhos realizados na área de perfis flexíveis oscilantes.

Autores	Experiência	Métodos	Resultados	Notas
Q. Zu [54]	<ul style="list-style-type: none"> • Placa plana • Oscilação puramente translacional • $Re = 2,025 \times 10^4$ • $h = 0,192c$ 	<p><u>Numérico</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Equações bidimensionais de Navier-Stokes 	<ul style="list-style-type: none"> • Efeito da deformação estrutural sobre o desempenho do perfil quando este é imersa em dois fluidos diferentes 	<ul style="list-style-type: none"> • Quando a asa se encontra no ar, a flexibilidade ao longo da corda reduz tanto a tração como a eficiência propulsiva. Quando imergida em água, a eficiência é aumentada. • No ar, a flexibilidade ao longo da envergadura aumenta a tração sem redução da eficiência. Na água, tanto a tração como a eficiência propulsiva são diminuídas.
P. Gopalakrishnan [55]	<ul style="list-style-type: none"> • Membrana retangular • Oscilação translacional • Oscilação rotacional • $Re = 1,0 \times 10^4$ 	<p><u>Numérico</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Simulação no <i>software</i> GenIDLEST 	<ul style="list-style-type: none"> • Comparação do desempenho entre uma asa flexível e uma asa rígida • Coeficiente de tração e de sustentação • Eficiência propulsiva 	<ul style="list-style-type: none"> • A curvatura introduzida pela flexibilidade da asa aumentou consideravelmente a produção de tração e de sustentação. • O <i>LEV</i> mantém-se ligado mais tempo no caso da asa flexível.
Zhao <i>et al.</i> [56]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil semelhante à asa de uma mosca da fruta • Oscilação rotacional • $Re = 2,0 \times 10^3$ 	<p><u>Experimental</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Visualização do efeito da flexibilidade ao longo da corda sobre a geração de força aerodinâmica 	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente de tração • Coeficiente de sustentação 	<ul style="list-style-type: none"> • O desempenho aerodinâmico global (geração de sustentação) das asas batedoras deteriora-se à medida que se tornaram mais flexíveis.

Tabela 2 - Resumo de trabalhos realizados na área de perfis flexíveis oscilantes (continuação).

Autores	Experiência	Métodos	Resultados	Notas
Hui <i>et al.</i> [57]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil semelhante ao de um pássaro • $Re = (2,0 - 8,0) \times 10^4$ 	<p><u>Experimental</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Medição de forças aerodinâmicas num túnel de vento 	<ul style="list-style-type: none"> • Comparação entre 3 asas com diferentes flexibilidades • Coeficiente de resistência ao avanço • Coeficiente de sustentação • Coeficiente de tração 	<ul style="list-style-type: none"> • A asa rígida é a que tem o melhor desempenho de produção de sustentação. • A asa mais flexível é a que tem o melhor desempenho de produção de tração. • A asa menos flexível é a pior para aplicações em voo de asa batidora.
Kim <i>et al.</i> [58]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil semelhante ao de um pássaro • $Re = (2,0 - 3,0) \times 10^4$ 	<p><u>Experimental</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Teste de um modelo de asa batidora com curvatura variável num túnel de vento 	<ul style="list-style-type: none"> • Efeito da curvatura • Efeito da flexibilidade 	<ul style="list-style-type: none"> • A curvatura devido à flexibilidade das asas produz efeitos positivos na aerodinâmica das asas na região quase permanente e na transiente.
Wu <i>et al.</i> [59]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil Zimmerman • $Re = (1,0 - 3,0) \times 10^4$ 	<p>Experimental</p> <ul style="list-style-type: none"> • Teste de 6 modelos de asas de MAV através de <i>DPIV</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Força de tração • Deformação da asa • Estruturas da esteira 	<ul style="list-style-type: none"> • As asas mais flexíveis são mais eficazes em frequências mais baixas, enquanto as asas mais rígidas são mais eficazes em frequências mais altas.

1.4 Organização da Dissertação

A presente dissertação está organizada em quatro capítulos: Introdução, Método Experimental, Resultados e Discussão e, por fim, Conclusões.

No primeiro capítulo foi feita uma breve introdução sobre a biomimética, focando-se na sua importância no ramo da engenharia aeronáutica, seguida pela revisão bibliográfica necessária para o desenvolvimento e compreensão desta dissertação. Foram ainda assinaladas as razões que levaram ao desenvolvimento deste trabalho e os objetivos propostos.

Após a introdução, segue-se uma descrição da metodologia experimental no capítulo 2. Para além de uma visão geral da instalação experimental utilizada, os equipamentos utilizados e as suas funções são descritos detalhadamente, assim como as condições em que as experiências foram realizadas e respetivos erros associados.

O capítulo 3 diz respeito aos resultados e respetiva discussão. Neste capítulo são apresentadas as esteiras resultantes em forma de tabelas, seguida de uma análise detalhada sobre a influência de cada parâmetro nos vórtices libertados. São também mencionadas as diferenças das esteiras produzidas pelas três placas planas devido à diferente espessura e morfologia do bordo de fuga.

Por fim, no capítulo 4 são referidas de forma sucinta todas as conclusões retiradas ao longo da elaboração desta dissertação e são sugeridos alguns trabalhos futuros que podem ajudar a uma melhoria na compreensão dos temas em estudo.

Capítulo 2: Método Experimental

Neste capítulo será apresentado com detalhe toda a instalação experimental utilizada, assim como todos os procedimentos realizados para a captura dos fenómenos aerodinâmicos. A primeira secção diz respeito à instalação experimental, com uma primeira introdução sobre a visão geral e apresentação de todos os equipamentos com mais pormenor. Na segunda secção, é descrito todo o procedimento detalhado, bem como as condições em que a experiência foi realizada e respetivos erros associados.

2.1 Instalação Experimental

A instalação experimental constitui-se, fundamentalmente, por um túnel de vento, uma câmara de alta velocidade, um motor que permite o movimento oscilatório das placas planas em estudo, uma estrutura que serve de suporte às mesmas, um sistema de fumo e um laser, como se mostra na Figura 14. Esta instalação foi adaptada da desenvolvida por Lopes [60] e é em muito semelhante à de Rodrigues [61].

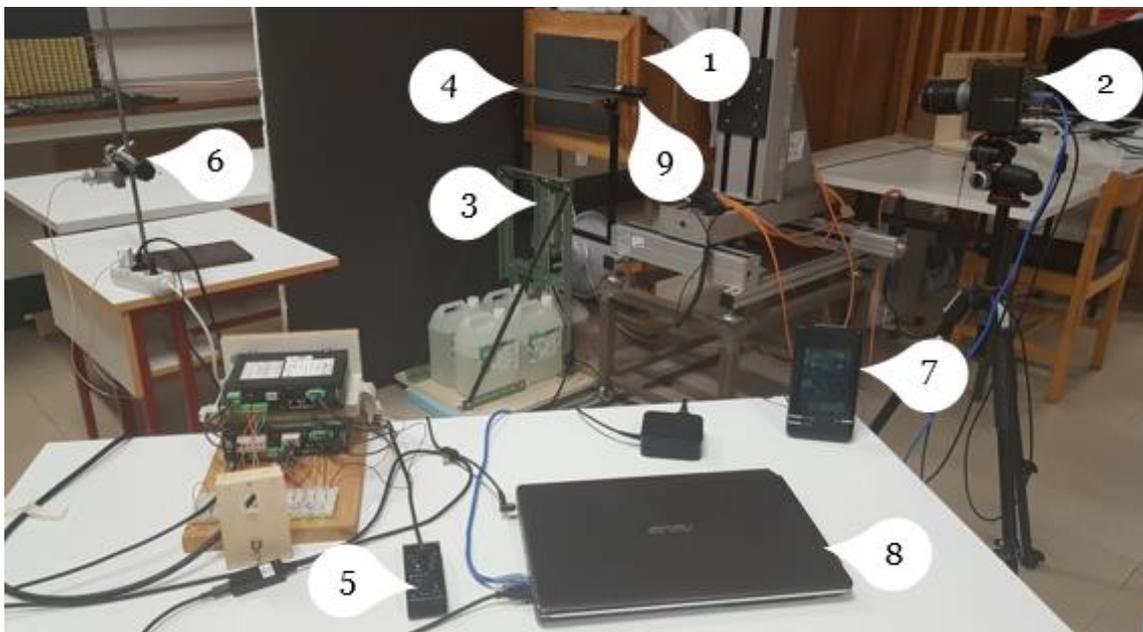


Figura 14 - Esquema da instalação: 1) túnel de vento, 2) câmara de alta velocidade, 3) controlador, 4) perfil colocado no suporte, 5) controlador de fumo, 6) laser, 7) sensor de pressão e temperatura, 8) computador, 9) anemómetro.

2.1.1 Túnel de Vento

O túnel de vento utilizado foi projetado por Castro [62] na Universidade da Beira Interior, no *Aeronautics and Astronautics Research Center* (AEROG). Trata-se de um túnel de vento do tipo sopro de secção aberta. As placas planas foram colocadas a 4,5 cm da secção de saída cujas dimensões são 300 mm x 400 mm, altura e largura, respetivamente (Figura 15).



Figura 15 - Túnel de vento [60].

2.1.2 Sistema de Fumo

O sistema de fumo utilizado é constituído pela máquina de fumo *Techno-Fog Jem* (Figura 16(a)), por um controlador (Figura 16(b)) e por um mecanismo inserido no interior do túnel de vento que permite a libertação do fumo (Figura 17(a)). A grade de ventilação com o formato de pequenos favos de abelha da Figura 17(b), permite um escoamento laminarizado. O mecanismo de inserção de fumo está centrado com a secção de saída, na vertical e apresenta um formato fuselado de modo a minimizar as perturbações. O controlador, mostrado na Figura 16(b), permite regular a intensidade e a frequência de libertação do fumo. O interruptor relativo à frequência de libertação de fumo (TIMER) foi mantido no “Off”, preferindo-se premir o botão “FOG”, que permitia uma emissão de fumo contínuo durante o período de tempo desejado. A intensidade do fumo (LEVEL) foi mantida entre os níveis 5 e 7. O líquido utilizado foi o *Regular DJ Fluid*, indicado na Figura 16(c).

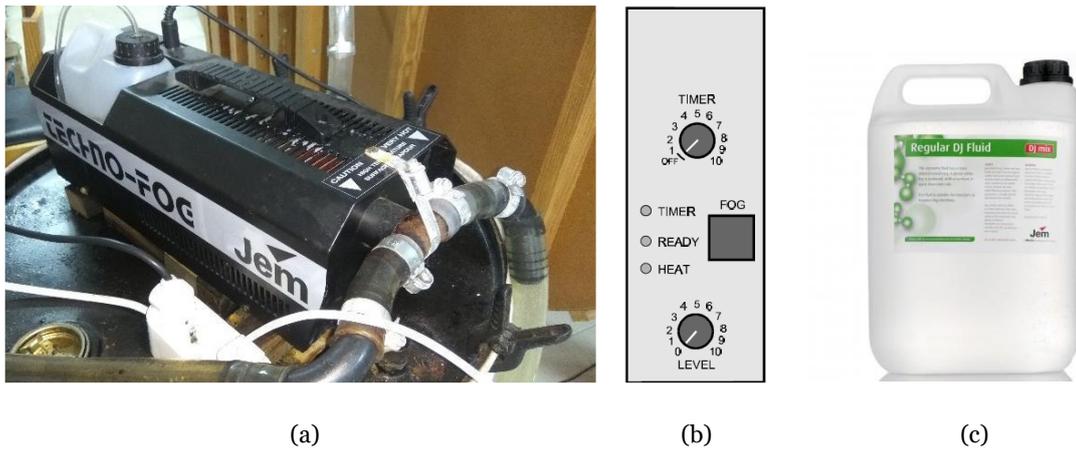


Figura 16 - (a) Máquina de fumo *Techo-Fog Jem*; (b) Controlador da máquina de fumo; (c) Líquido utilizado na máquina [60].

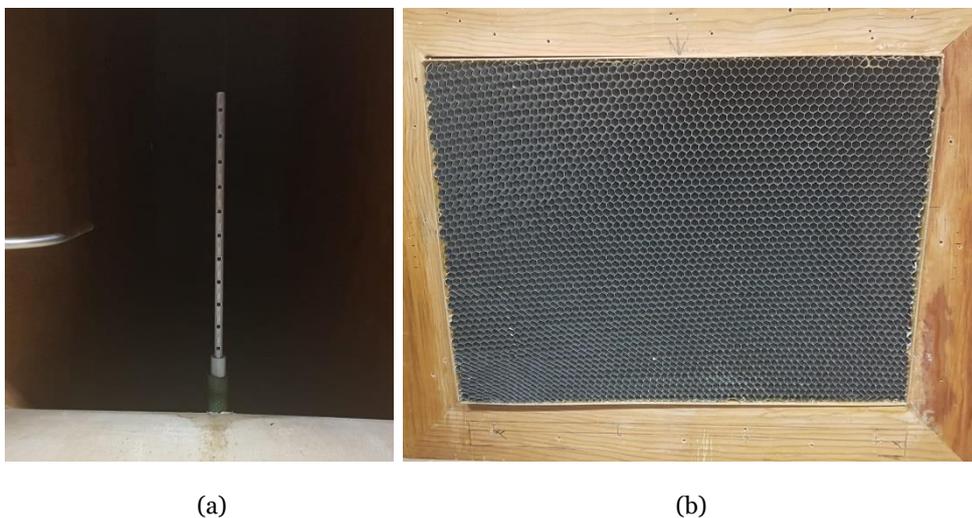


Figura 17 – Sistema de libertação de fumo no túnel de vento: (a) pente desenvolvido por Camacho – *AeroG* e (b) favos de abelha com 6 mm.

2.1.3 Laser

Para iluminação das partículas de fumo libertado do túnel de vento foi utilizado o laser da Figura 18, com um provete de vidro acoplado, de modo a criar um plano de luz vertical. Este laser tem uma potência de 3000 mW e um comprimento de onda de 445 nm. O laser foi colocado num suporte a, aproximadamente, 4 m do túnel de vento, para que não interferisse no escoamento, mas de modo a que o plano de luz iluminasse o escoamento que atravessava o centro da placa.



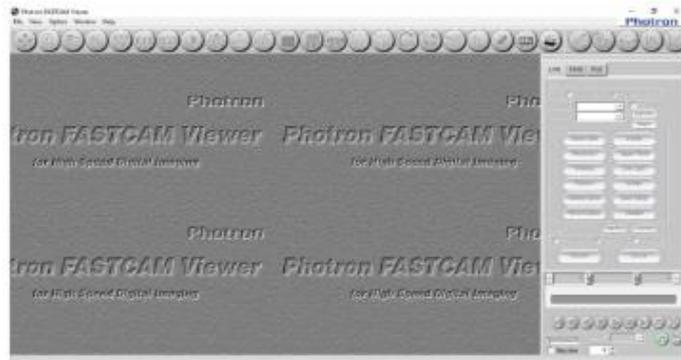
Figura 18 - Laser [60].

2.1.4 Câmara de Alta Velocidade

A captação de imagens de qualidade é, talvez, o mais importante para a análise da esteira das placas planas. Para tal, utilizou-se a câmara de alta velocidade *Photron FASTCAM mini UX50* e a lente *Canon EF-S 18-55 mm* acoplada com um adaptador *C-mount* impresso em 3D no *Aeronautics and Astronautics Research Center*, Universidade da Beira Interior (Figura 19(a)). A câmara foi colocada a, aproximadamente, um metro de distância da placa em estudo e com um ângulo que permitia capturar tanto os fenómenos no extradorso da placa plana como a sua esteira. As imagens foram capturadas a 500 fps , com uma resolução de 1280×1024 e com o diafragma da lente totalmente aberto, na posição 2,8, de modo a permitir a entrada do máximo de luz possível. Depois de capturadas, as imagens foram processadas no programa *Photron FASTCAM Viewer* (Figura 19(b)).



(a)



(b)

Figura 19 - (a) Câmara de alta velocidade; (b) *Software Photron FASTCAM Viewer* [61].

2.1.5 Placas Planas

Foram utilizadas 3 placas planas de acrílico cristal, com uma envergadura de $0,44 \text{ m}$ e uma corda de $0,10 \text{ m}$, duas de 5 mm e uma de 3 mm de espessura. Foram todas afiadas de um dos lados, correspondente ao bordo de ataque. Uma das placas de 5 mm foi também afiado do lado oposto, ficando assim, com o bordo de ataque e com o bordo de fuga afiados, como mostra a Figura 20(a).

Como já foi referido, as placas planas foram colocadas a 4,5 cm da secção de saída do túnel de vento, seguras por uma estrutura metálica (Figura 20(b)).

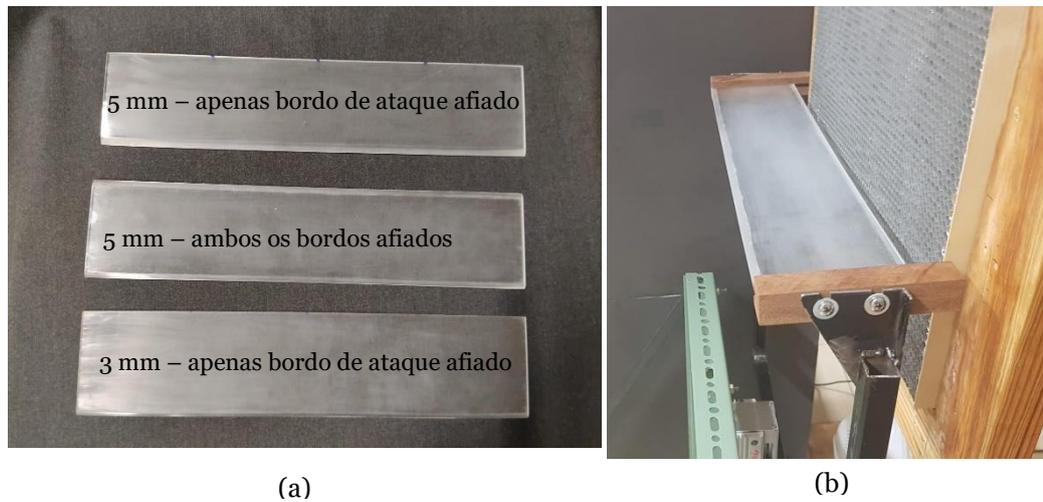


Figura 20 – (a) Placas planas estudadas e (b) suporte.

2.1.6 Motor

À estrutura metálica, referida acima, está acoplado um atuador linear que converte o movimento rotacional do motor num movimento puramente vertical e/ou horizontal (Figura 21(a)). O motor elétrico utilizado é um *AR series FLEX AC power input built-in controller type*, modelo *ARM46AC* e o atuador é um modelo *EASM4XE005 ARAC*, ambos da *Oriental Motors*. Através do programa *MEXE02* versão 3.57.0.0 (Figura 21(b)), define-se os parâmetros para a execução do movimento desejado e, através do cabo *CC051IF-USB*, essa informação é comunicada ao controlador do motor.



Figura 21 - (a) Motor e atuador linear; (b) *Software MEXE02*.

2.1.7 Anemómetro

Para medir a velocidade do escoamento à saída do túnel de vento (numa zona onde o perfil de velocidades não tem variações) utilizou-se um anemómetro igual ao mostrado na Figura 22(a). A velocidade era medida sempre que se rodava a guilhotina do túnel de vento para que o escoamento saísse com a velocidade desejada e de 30 em 30 minutos para confirmar que a velocidade ainda se mantinha a mesma. Para tal, esticava-se a vareta do anemómetro e colocava-se junto à secção de saída do túnel de vento, como se mostra na Figura 22(b).



(a)

(b)

Figura 22 – (a) Anemómetro e (b) exemplo de medição de velocidade.

2.2 Validação da Montagem Experimental

De modo a garantir que o motor estava a executar o movimento programado (o mesmo utilizado em Rodrigues [61]), foram elaborados os gráficos das Figuras 23 e 24. Para tal, recorreu-se ao programa *Photron FASTCAM Viewer* (Figura 19(b)) e mediu-se a posição do perfil a cada 5 *frames*. Assim, a posição do vértice do perfil é medida em pixéis. A velocidade foi calculada através de derivada numérica (diferenças finitas centradas) dos valores retirados do *software* da câmara fotográfica.

Os casos seleccionados correspondem a extremos. O gráfico da Figura 23 corresponde a uma frequência alta e uma amplitude baixa. Pelo contrário, o da Figura 24 diz respeito a um caso programado com alta amplitude e baixa frequência.

Como se pode observar em ambas as figuras, os pontos retirados concentram-se sobretudo na linha correspondente ao movimento teórico. Nos gráficos de velocidade, vê-se que a dispersão dos pontos em relação à linha teórica se torna maior. Isto deve-se ao erro propagado desde a medição da posição, uma vez que os valores da velocidade foram calculados através dessas medições. Contudo, mesmo assim a concordância com a linha teórica é elevada.

Assim, é possível concluir que o movimento executado pelo motor é uma boa aproximação do movimento programado.

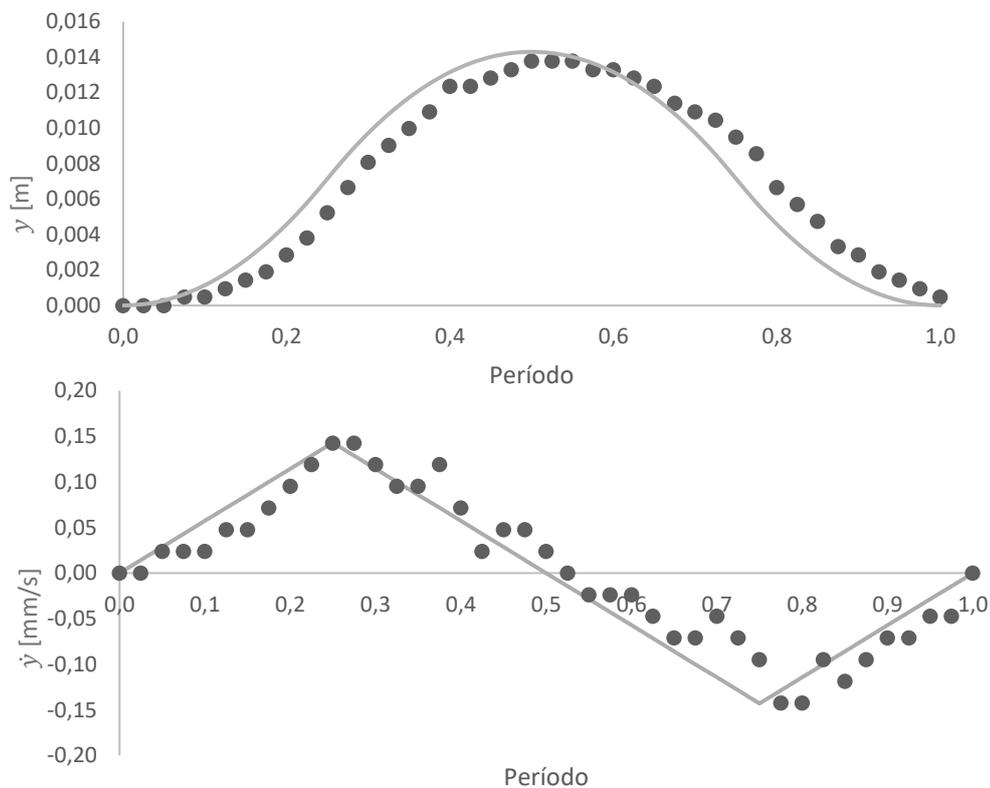


Figura 23 – Evolução da posição e da velocidade do movimento programado para $A = 7 \text{ mm}$ e $f = 2,5 \text{ Hz}$.

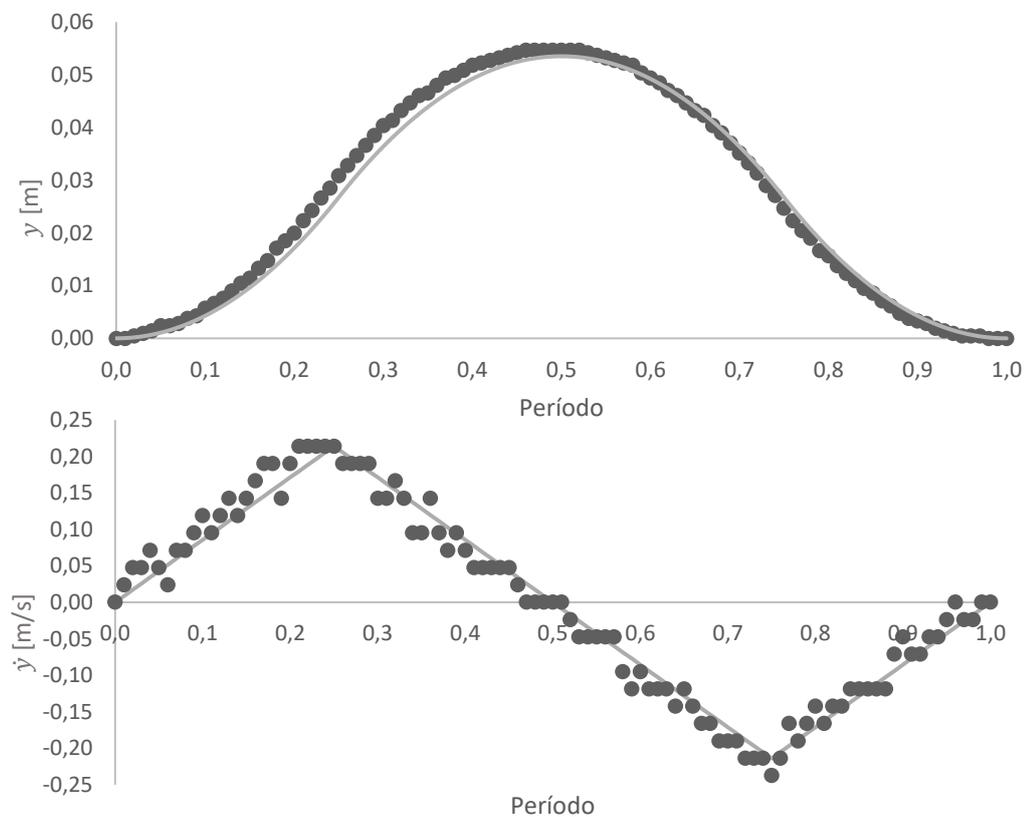


Figura 24 – Evolução da posição e da velocidade do movimento programado para $A = 28 \text{ mm}$ e $f = 1,0 \text{ Hz}$.

2.3 Procedimento

De modo a evitar erros de origem humana, sempre que se realizava as filmagens dos casos estudados (descritos na Tabela 3 da próxima secção) seguiam-se os passos descritos de seguida. Estes dividem-se em duas fases. A primeira, correspondente à preparação do laboratório e só é feita uma vez por conjunto de testes realizados no mesmo período de tempo. A segunda fase é repetida sempre que se realiza um novo teste, com exceção do ajuste da velocidade do escoamento do túnel de vento, que é realizada apenas quando se pretende modificar a velocidade do escoamento, e do registo da temperatura e da pressão, que é realizado periodicamente de 30 em 30 minutos, assim como o cálculo das propriedades μ e ρ .

➤ Preparação do laboratório

1. Ligar o túnel de vento e abrir a guilhotina, para homogeneizar a temperatura da sala com o exterior;
2. Ligar a máquina de fumo;
3. Ligar o motor e a máquina fotográfica e abrir os respetivos programas;
4. Ajustar a iluminação da sala e as definições da câmara fotográfica.

➤ Obtenção dos dados

1. Ajustar a velocidade do escoamento do túnel de vento;
2. Verificar a temperatura e a pressão da sala e calcular a massa volúmica (ρ) e a viscosidade dinâmica (μ);
3. Programar o motor para o movimento desejado;
4. Registar o número do teste e todos os seus dados;
5. Ligar o laser, iniciar o movimento do motor, libertar o fumo e iniciar a gravação.

2.4 Condições em Estudo

Como já referido, as condições estudadas foram as mesmas de Rodrigues [61]. Estas condições estão indicadas na Tabela 3. As temperaturas registadas ao longo dos testes apresentam uma diferença de menos de 1°C entre elas. Assim, para calcular o número de Reynolds através da equação 1.7, utilizou-se um valor médio de μ e ρ .

Tabela 3 - Condições em estudo.

<i>A</i> [mm]	<i>f</i> [Hz]	$U_{\infty} = 0,25 \text{ m/s}$			$U_{\infty} = 0,50 \text{ m/s}$			$U_{\infty} = 1,00 \text{ m/s}$		
		$Re = 1,5 \times 10^3$			$Re = 3,1 \times 10^3$			$Re = 6,3 \times 10^3$		
		<i>h</i>	<i>k</i>	<i>St</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>St</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>St</i>
28	1,0	0,280	2,513	0,224	0,280	1,257	0,112	0,280	0,628	0,056
	1,5		3,770	0,336		1,885	0,168		0,942	0,084
21	1,0	0,210	2,513	0,168	0,210	1,257	0,084	0,210	0,628	0,042
	1,5		3,770	0,252		1,885	0,126		0,942	0,063
	2,0		5,027	0,336		2,513	0,168		1,257	0,084
14	1,0	0,140	2,513	0,112	0,140	1,257	0,056	0,140	0,628	0,028
	1,5		3,770	0,168		1,885	0,084		0,942	0,042
	2,0		5,027	0,224		2,513	0,112		1,257	0,056
	2,5		6,283	0,280		3,142	0,140		1,571	0,070
	3,0		7,540	0,336		3,770	0,168		1,885	0,084
	3,5		8,796	0,392		4,398	0,96		2,199	0,098
7	1,0	0,070	2,513	0,056	0,070	1,257	0,028	0,070	0,628	0,014
	1,5		3,770	0,084		1,885	0,042		0,942	0,021
	2,0		5,027	0,112		2,513	0,056		1,257	0,028
	2,5		6,283	0,140		3,142	0,070		1,571	0,035
	3,0		7,540	0,168		3,770	0,084		1,885	0,042
	3,5		8,796	0,196		4,398	0,098		2,199	0,049
	4,0		10,053	0,224		5,027	0,112		2,513	0,056
	4,5		11,310	0,252		5,655	0,126		2,827	0,063
	5,0		12,566	0,280		6,283	0,140		3,142	0,070
	5,5		13,823	0,308		6,912	0,154		3,456	0,077

2.5 Análise e Cálculo de Erros

De modo a determinar a influência da propagação de erros, realizou-se um estudo dos erros efetuados em todas as medidas e cálculos efetuados ao longo de toda a dissertação. Assim sendo, no próximo subcapítulo são apresentados os erros associados aos instrumentos de medição, sejam eles, o anemómetro, o sensor de pressão e de temperatura e uma régua utilizada para medir a corda do perfil. De seguida, é feita uma análise da propagação de erros ao longo de todos os cálculos efetuados.

2.5.1 Erros dos Instrumentos de Medição

Na Tabela 4 estão listados os erros associados às unidades obtidas com os instrumentos de medição.

Tabela 4 - Erros dos instrumentos de medição.

Variável	Erro
Velocidade (U_∞)	$\pm 0,025$ m/s
Temperatura (T)	$\pm 0,1$ K
Pressão (P)	± 100 Pa
Corda (c)	$\pm 0,0005$ m

2.5.2 Análise da Propagação de Erro

Recorrendo à fórmula geral $\delta F = \sum_{i=1}^N \left| \frac{\partial F}{\partial x_i} (x_1, x_2, \dots, x_N) \right| |\delta x_i|$, onde x_1, x_2, \dots, x_N são variáveis da função F , descobriu-se as equações de propagação de erro para a massa volúmica, a viscosidade dinâmica, o número de Reynolds, a frequência reduzida, a amplitude adimensional e o número de Strouhal.

$$\delta \rho = \left| \frac{1}{RT} \right| |\delta P| + \left| -\frac{P}{RT^2} \right| |\delta T| \quad (2.1)$$

$$\delta \mu = \left| \mu_0 \left[\frac{\sqrt{T}}{T_0^{3/2}} \left(\frac{T_0 + S}{T + S} \right) - \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \left(\frac{T_0 + S}{(T + S)^2} \right) \right] \right| |\delta T| \quad (2.2)$$

$$\delta Re = \left| \frac{U_\infty c}{\mu} \right| |\delta \rho| + \left| \frac{\rho c}{\mu} \right| |\delta U_\infty| + \left| \frac{\rho U_\infty}{\mu} \right| |\delta c| + \left| -\frac{\rho U_\infty c}{\mu^2} \right| |\delta \mu| \quad (2.3)$$

$$\delta k = \left| \frac{2\pi f}{U_\infty} \right| |\delta c| + \left| -\frac{2\pi f c}{U_\infty^2} \right| |\delta U_\infty| \quad (2.4)$$

$$\delta h = \left| -\frac{A}{c^2} \right| |\delta c| \quad (2.5)$$

$$\delta St = \left| -\frac{2fA}{U_\infty^2} \right| |\delta U_\infty| \quad (2.6)$$

Resolvendo as equações 2.1 e 2.2, o resultado obtido para os valores de propagação de erro da massa volúmica e da viscosidade dinâmica foram $1,5 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ e $2,0 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, respetivamente.

A propagação de erro do número de Reynolds, da frequência reduzida, da amplitude adimensional e do número de Strouhal dependem de outros fatores, como a velocidade de escoamento e a amplitude e a frequência programadas. Assim sendo, as Tabelas 5, 6 e 7 apresentam as condições

em estudo juntamente com a propagação de erro associada a cada parâmetro, para a velocidade de 0,25, 0,50 e 1,00 m/s, respetivamente.

É possível observar que à medida que a amplitude programada diminui, o erro associado à amplitude adimensional é reduzido. Da mesma forma, o erro da frequência reduzida aumenta com o aumento da frequência introduzida no motor. Pelo contrário, para a mesma frequência programada, o aumento da velocidade de escoamento faz com que o erro associado à frequência reduzida diminua. Quanto ao erro propagado para o número de Strouhal, este tende a aumentar com a frequência e a amplitude programada e a diminuir com o aumento da velocidade de escoamento. Por fim, para o número de Reynolds, o erro é tanto maior quanto maior a velocidade de escoamento.

Tabela 5 - Propagação de erro para a velocidade de 0,25 m/s.

		$U_{\infty} = 0,25 \pm 0,025 \text{ m/s}$		
		$Re = 1,5 \times 10^3 \pm 167,2270$		
$A \text{ [mm]}$	$f \text{ [Hz]}$	h	k	St
28	1,0	0,280±0,0014	2,513±0,2639	0,224±0,0224
	1,5		3,770±0,3958	0,336±0,0336
21	1,0	0,210±0,0011	2,513±0,2639	0,168±0,0168
	1,5		3,770±0,3958	0,252±0,0252
	2,0		5,027±0,5278	0,336±0,0336
14	1,0	0,140±0,0007	2,513±0,2639	0,112±0,0112
	1,5		3,770±0,3958	0,168±0,0168
	2,0		5,027±0,5278	0,224±0,0224
	2,5		6,283±0,6597	0,280±0,0280
	3,0		7,540±0,7917	0,336±0,0336
	3,5		8,796±0,9236	0,392±0,0392
7	1,0	0,070±0,0004	2,513±0,2639	0,056±0,0056
	1,5		3,770±0,3958	0,084±0,0084
	2,0		5,027±0,5278	0,112±0,0112
	2,5		6,283±0,6597	0,140±0,014
	3,0		7,540±0,7917	0,168±0,0168
	3,5		8,796±0,9236	0,196±0,0196
	4,0		10,053±1,0556	0,224±0,0224
	4,5		11,310±1,1875	0,252±0,0252
	5,0		12,566±1,3295	0,280±0,0280
	5,5		13,823±1,4514	0,308±0,0308

Tabela 6 - Propagação de erro para a velocidade de 0,50 m/s.

		$U_{\infty} = 0,50 \pm 0,025 \text{ m/s}$		
		$Re = 3,1 \times 10^3 \pm 177,2971$		
$A \text{ [mm]}$	$f \text{ [Hz]}$	h	k	St
28	1,0	0,280±0,0014	1,257±0,0691	0,112±0,0056
	1,5		1,885±0,1037	0,168±0,0084
21	1,0	0,210±0,0011	1,257±0,0691	0,084±0,0042
	1,5		1,885±0,1037	0,126±0,0063
	2,0		2,513±0,1382	0,168±0,0084
14	1,0	0,140±0,0007	1,257±0,0691	0,056±0,0028
	1,5		1,885±0,1037	0,084±0,0042
	2,0		2,513±0,1382	0,112±0,0056
	2,5		3,142±0,1758	0,140±0,0070
	3,0		3,770±0,2073	0,168±0,0084
	3,5		4,398±0,2419	0,196±0,0098
7	1,0	0,070±0,0004	1,257±0,0691	0,028±0,0014
	1,5		1,885±0,1037	0,042±0,0021
	2,0		2,513±0,1382	0,056±0,0028
	2,5		3,142±0,1758	0,070±0,0035
	3,0		3,770±0,2073	0,084±0,0042
	3,5		4,398±0,2419	0,098±0,0049
	4,0		5,027±0,2765	0,112±0,0056
	4,5		5,655±0,3110	0,126±0,0063
	5,0		6,283±0,3456	0,140±0,0070
	5,5		6,912±0,3801	0,154±0,0077

Tabela 7 - Propagação de erro para a velocidade de 1,00 m/s.

		$U_{\infty} = 1,00 \pm 0,025 \text{ m/s}$		
		$Re = 6,3 \times 10^3 \pm 197,4373$		
$A \text{ [mm]}$	$f \text{ [Hz]}$	h	k	St
28	1,0	0,280±0,0014	0,628±0,0188	0,056±0,0014
	1,5		0,942±0,0283	0,084±0,0021
21	1,0	0,210±0,0011	0,628±0,0188	0,042±0,0011
	1,5		0,942±0,0283	0,063±0,0016
	2,0		1,257±0,0377	0,084±0,0021
14	1,0	0,140±0,0007	0,628±0,0188	0,028±0,0007
	1,5		0,942±0,0283	0,042±0,0011
	2,0		1,257±0,0377	0,056±0,0014
	2,5		1,571±0,0471	0,070±0,0018
	3,0		1,885±0,0565	0,084±0,0021
	3,5		2,199±0,0660	0,098±0,0025
7	1,0	0,070±0,0004	0,628±0,0188	0,014±0,0004
	1,5		0,942±0,0283	0,021±0,0005
	2,0		1,257±0,0377	0,028±0,0007
	2,5		1,571±0,0471	0,035±0,0009
	3,0		1,885±0,0565	0,042±0,0011
	3,5		2,199±0,0660	0,049±0,0012
	4,0		2,513±0,0754	0,056±0,0014
	4,5		2,827±0,0848	0,063±0,0016
	5,0		3,142±0,0942	0,070±0,0018
	5,5		3,456±0,1037	0,077±0,0019

Capítulo 3: Resultados e Discussão

No presente capítulo são apresentados todos os resultados, juntamente com uma análise detalhada relativa aos fenómenos observados.

Primeiramente, na secção 3.1, são apresentados os casos estáticos ($St = 0$), para que se possa observar o que acontece quando o escoamento atravessa os perfis, sem que estes estejam sujeitos a qualquer movimento.

Na secção 3.2 encontram-se as tabelas com a classificação de todas as esteiras libertadas pelas três placas planas estudadas, para os Reynolds de $1,5 \times 10^3$, $3,1 \times 10^3$ e $6,3 \times 10^3$. De notar que, quando é referido um caso de produção de tração, significa que a esteira apresenta os pares de vórtices inclinados para jusante da placa plana, o que poderá indicar que se trata de uma esteira de tração. No entanto, não é possível afirmar com certeza, uma vez que não há qualquer medição de forças associadas ao movimento do perfil oscilante. O mesmo acontece para o caso em que é referido resistência, o que significa que a esteira apresenta os pares de vórtices inclinados para montante da asa, o que poderá indicar uma esteira de resistência ao avanço.

De seguida, na secção 3.3, é estudado a influência dos parâmetros k e h nas dimensões das estruturas de vorticidade da esteira.

Na secção 3.4 são discutidos os resultados obtidos relativamente à presença de *LEV*. Como complemento, na secção 3.5, analisa-se a possibilidade de existência de extração de energia devido à presença do *LEV* na superfície do perfil durante o movimento ascendente e descendente.

A secção 3.6 diz respeito ao cálculo do ângulo de ataque efetivo máximo para cada condição de voo estudada e a análise da sua influência na formação de *LEV*.

Por último, na secção 3.7 são discutidos os casos em que foi detetada deflexão da placa plana e a respetiva análise. É importante ter em mente que a flexibilidade aconteceu para todas as placas planas estudadas assim que a frequência implementada atingia o valor de 3 Hz.

Relativamente às tabelas apresentadas nas secções 3.2, 3.4 e 3.5, o eixo h e k representam a amplitude adimensional e a frequência reduzida programada para cada caso, respetivamente. Os números em cada célula dizem respeito ao número de Strouhal correspondente a cada combinação de h e k .

As figuras mencionadas neste capítulo têm o propósito de facilitar a visualização do caso mencionado. Estas representam um ciclo do movimento da asa e a primeira imagem corresponde à posição mais acima.

3.1 Caso Estático ($St = 0$)

Em primeiro lugar, são apresentados os casos em que as placas estão em repouso em relação ao escoamento proveniente do túnel de vento, para as três velocidades estudadas. Deste modo podemos observar que a forma do bordo de fuga e a espessura da asa já exercem alguma influência na esteira resultante.

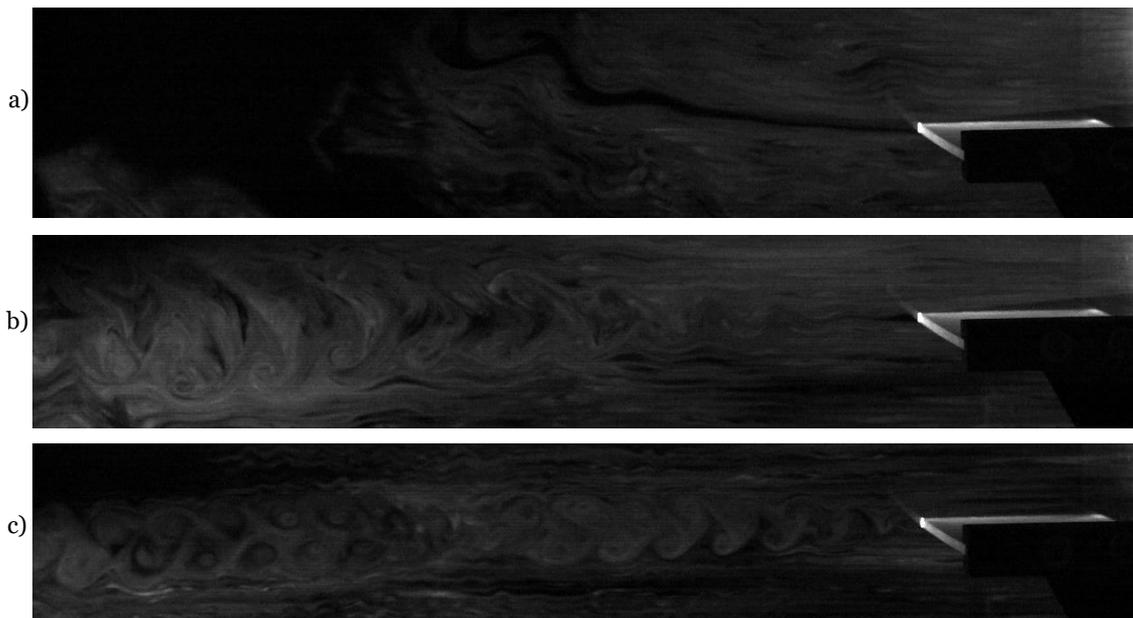


Figura 25 - Caso estático ($kh = 0$) para a placa de 5 mm com o bordo de ataque afiado, com o escoamento a 0,25 m/s, 0,50 m/s e 1,00 m/s (de cima para baixo).

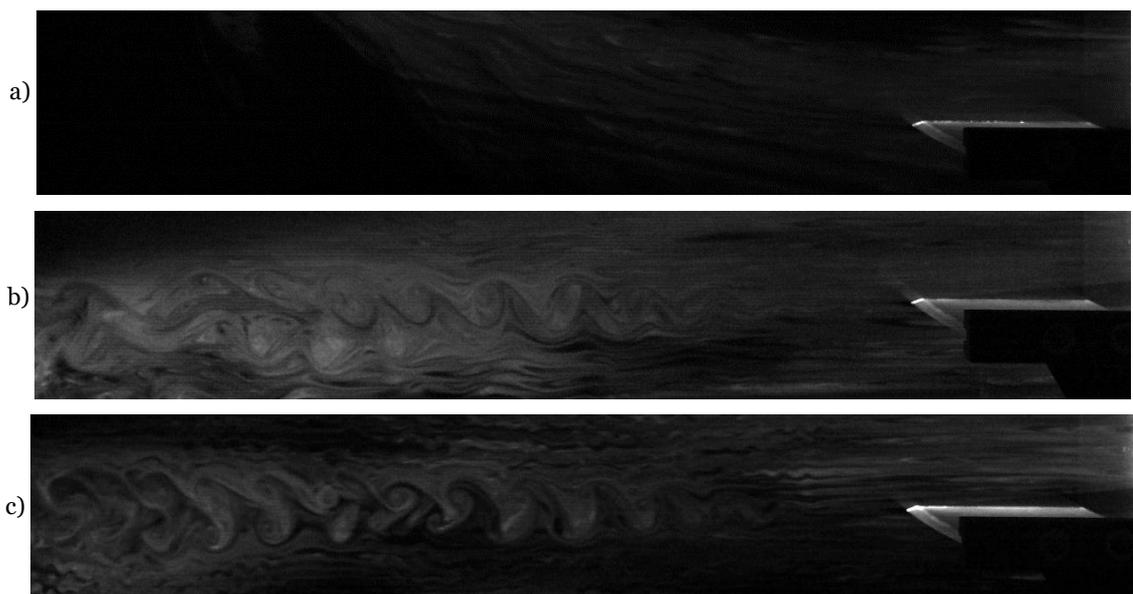


Figura 26 - Caso estático ($kh = 0$) para a placa de 5 mm com ambos os bordos afiados, com o escoamento a a) 0,25 m/s, b) 0,50 m/s e c) 1,00 m/s.

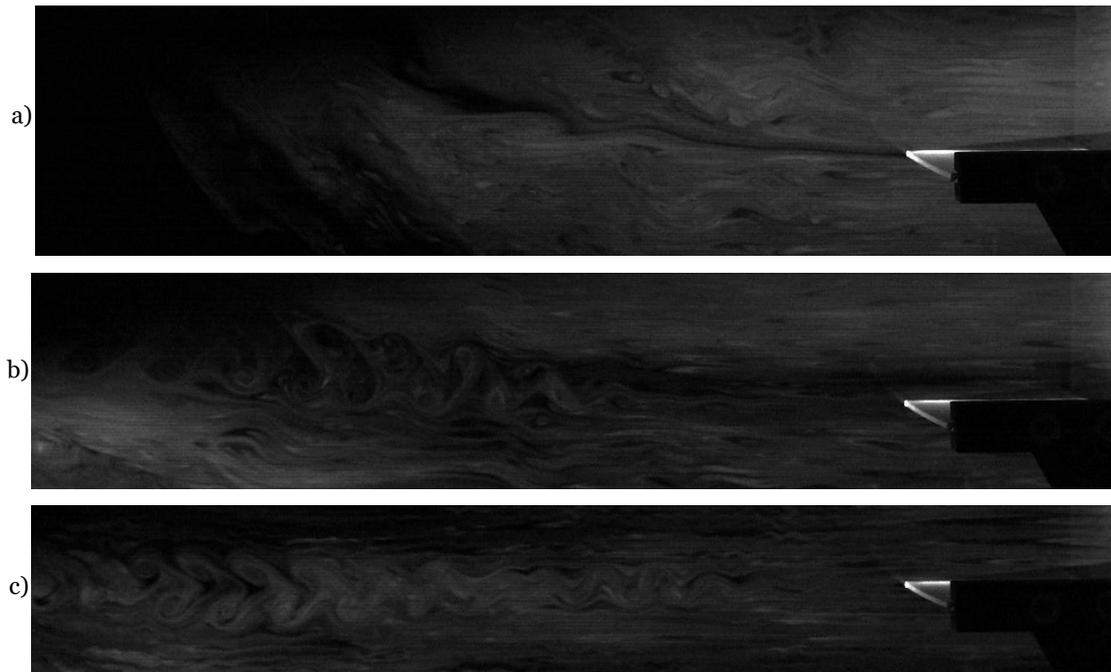


Figura 27 - Caso estático ($kh = 0$) para a placa de 3 mm com o bordo de ataque afiado, com o escoamento a a) 0,25 m/s, b) 0,50 m/s e c) 1,00 m/s.

Nas imagens correspondentes à velocidade de 0,25 m/s é visível uma curvatura ascendente. Isto deve-se à diferença de temperaturas entre o interior e o exterior do laboratório, donde provinha o ar do túnel de vento. De salientar, também, que para a velocidade de 1,00 m/s é possível ver pequenas estradas de von Kármán devido aos favos de abelha.

Como se pode observar, o aumento da velocidade do escoamento é o fator que provoca a influência mais óbvia na esteira da asa. À medida que a velocidade aumenta, de 0,25 para 1,00 m/s, a estrada de von Kármán fica mais definida.

Independentemente da espessura ou da forma do bordo de fuga, os pares de vórtices mostram-se inclinados para montante, indicando uma esteira de resistência ao avanço. No entanto, para a velocidade de 0,50 m/s, nota-se que esses mesmos pares de vórtices são de menores dimensões para a placa plana de 5mm com o bordo de fuga afiado do que para a placa de 5mm com o bordo de fuga reto. Estes vórtices de maiores dimensões são sinal de um aumento da resistência devido à distribuição de pressão.

3.2 Classificação das Esteiras Libertadas

As Tabelas 8 a 13 apresentam a classificação das esteiras libertadas por cada placa plana testada, para os três regimes de escoamento estudados.

Tabela 8 – Classificação das esteiras libertadas pelas três placas planas estudadas, para $Re = 1,5 \times 10^3$.

		<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #FFD700; border: 1px solid black;"></div> Resistência ao avanço <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #A9A9A9; border: 1px solid black;"></div> Inconclusivo / Transição <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #ADD8E6; border: 1px solid black;"></div> Tração </div>									
0,280		0,224	0,336								
0,210		0,168	0,252	0,336							
0,140		0,112	0,168	0,224	0,280	0,336	0,392				
0,070		0,056	0,084	0,112	0,140	0,168	0,196	0,224	0,252	0,280	0,308
h	k	2,513	3,770	5,027	6,283	7,540	8,796	10,053	11,310	12,566	13,823

Tabela 9 - Classificação das esteiras libertadas pela placa de 5 mm com apenas o bordo de ataque afiado, para $Re = 3,1 \times 10^3$.

0,280		0,112	0,168								
0,210		0,084	0,126	0,168							
0,140		0,056	0,084	0,112	0,140	0,168	0,196				
0,070		0,028	0,042	0,056	0,070	0,084	0,098	0,112	0,126	0,140	0,154
h	k	1,257	1,885	2,513	3,142	3,770	4,398	5,027	5,655	6,283	6,912

Tabela 10 - Classificação das esteiras libertadas pela placa de 5 mm com ambos os bordos afiados, para $Re = 3,1 \times 10^3$.

0,280		0,112	0,168								
0,210		0,084	0,126	0,168							
0,140		0,056	0,084	0,112	0,140	0,168	0,196				
0,070		0,028	0,042	0,056	0,070	0,084	0,098	0,112	0,126	0,140	0,154
h	k	1,257	1,885	2,513	3,142	3,770	4,398	5,027	5,655	6,283	6,912

Tabela 11 - Classificação das esteiras libertadas pela placa de 3 mm com apenas o bordo de ataque afiado, para $Re = 3,1 \times 10^3$.

0,280		0,112	0,168								
0,210		0,084	0,126	0,168							
0,140		0,056	0,084	0,112	0,140	0,168	0,196				
0,070		0,028	0,042	0,056	0,070	0,084	0,098	0,112	0,126	0,140	0,154
h	k	1,257	1,885	2,513	3,142	3,770	4,398	5,027	5,655	6,283	6,912

Tabela 12 – Classificação das esteiras libertadas pelas placas de 5 mm, para $Re = 6,3 \times 10^3$.

0,280	0,056	0,084								
0,210	0,042	0,063	0,084							
0,140	0,028	0,042	0,056	0,070	0,084	0,098				
0,070	0,014	0,021	0,028	0,035	0,042	0,049	0,056	0,063	0,070	0,077
$\frac{h}{k}$	0,628	0,942	1,257	1,571	1,885	2,199	2,513	2,827	3,142	3,456

Tabela 13 - Classificação das esteiras libertadas pela placa de 3 mm, para $Re = 6,3 \times 10^3$.

0,280	0,056	0,084								
0,210	0,042	0,063	0,084							
0,140	0,028	0,042	0,056	0,070	0,084	0,098				
0,070	0,014	0,021	0,028	0,035	0,042	0,049	0,056	0,063	0,070	0,077
$\frac{h}{k}$	0,628	0,942	1,257	1,571	1,885	2,199	2,513	2,827	3,142	3,456

Para o número de Reynolds de $1,5 \times 10^3$, todas as placas planas estudadas exibiram as mesmas estruturas de esteira para as mesmas condições programadas. No total, o movimento de translação aquando da velocidade de escoamento igual a 0,25 m/s resultou numa esteira de resistência ao avanço, 3 esteiras nomeadas como inconclusivas e 17 esteiras produtoras de tração.

Como se observa na Tabela 8, as esteiras de resistência ao avanço encontram-se a $St \leq 0,056$ e as esteiras de produção de tração estão presentes para $St \geq 0,140$. Os casos nomeados como inconclusivos foram detetados no intervalo $0,084 \leq St \leq 0,112$; intervalo que deverá corresponder à zona de transição.

As 3 esteiras nomeadas como inconclusivas foram classificadas como tal, devido a não apresentarem uma estrada de von Kármán clara de resistência ao avanço ou de tração. Estas esteiras caracterizam-se por um jato muito pequeno direcionado para jusante do perfil, seguido por pequenas estruturas de vorticidade direcionadas para montante, semelhantes às visíveis numa esteira de resistência ao avanço. A coluna 3 da Figura 28 é um bom exemplo desse fenómeno. Assim, pensa-se que estas situações correspondam a esteiras de transição. Esta afirmação é reforçada pela localização destes casos nas tabelas, entre esteiras de resistência ao avanço e esteiras de produção de tração.

Para $Re = 1,5 \times 10^3$, a diferença de espessuras e de bordos de fuga não resultou em qualquer influência nas esteiras resultantes do movimento de translação.

O aumento do número de Reynolds para $3,1 \times 10^3$, resultou numa diminuição das esteiras de produção de tração e num aumento das esteiras de resistência ao avanço e de transição. Para este

regime de escoamento, as placas planas estudadas apresentaram esteiras muito semelhantes com ligeiras diferenças.

A placa de 5 mm com o bordo de ataque afiado libertou 4 esteiras de resistência ao avanço e 11 esteiras de produção de tração. Os restantes 6 casos foram nomeados como inconclusivos. Já a placa de 5 mm com o bordo de ataque e o bordo de fuga afiados apresentou 4 esteiras de resistência ao avanço, 5 esteiras nomeadas como inconclusivas e 12 esteiras de produção de tração. Por fim, a placa de 3 mm com apenas o bordo de ataque afiado exibiu 3 esteiras de resistência ao avanço, 7 esteiras inconclusivas e 11 esteiras de produção de tração. Mais uma vez, acredita-se que as esteiras nomeadas como inconclusivas correspondam a esteiras de transição.

Todas as três placas planas estudadas apresentaram esteiras de resistência para $St \leq 0,042$. As placas planas com apenas o bordo de ataque afiado, apresentaram tração para $St \geq 0,140$, enquanto que a placa com ambos os bordos afiados apresentou tração para $St \geq 0,126$. A mesma diferença aconteceu para o intervalo de transição, que ocorre para $0,056 < St < 0,126$ para as placas com apenas o bordo de ataque afiado e para $0,056 < St < 0,112$ para a placa com ambos os bordos afiados. Nestes intervalos estão ainda incluídas algumas esteiras de produção de tração e de resistência, como se pode verificar nas Tabelas 9, 10 e 11.

As diferenças entre estas três tabelas encontram-se nos casos específicos de $St = 0,084$, $k = 1,257$ e $h = 0,210$ e $St = 0,126$, $k = 1,885$ e $h = 0,210$ e podem ser visualizadas nas Figuras 29 e 30. Nestas figuras é visível, ainda que mínima, a influência das diferentes espessuras e das diferentes formas do bordo de fuga. Como se pode ver na Figura 28, para as condições de voo especificadas, as esteiras das placas de 5 mm foram classificadas como esteiras de resistência ao avanço e a esteira da placa de 3 mm foi classificada como inconclusiva ou de transição. Isto porque, para a placa de 3 mm foi possível identificar um pequeno jato direcionado para jusante seguido por pequenos vórtices inclinados para montante. Para as placas de 5 mm, este jato não é perceptível, pelo menos a olho nu; o que se visualiza é apenas uma estrada de von Kármán que oscila consoante o movimento do perfil. Esta pequena oscilação poderá indicar que a esteira se encontra no limiar da transição. Na Figura 29 a diferença é mais perceptível. A placa com o bordo de fuga afiado apresenta uma esteira clara de produção de tração, enquanto que nas esteiras das placas com o bordo de fuga reto, apesar de ser visível o jato direcionado para jusante do perfil, este é seguido por pequenos vórtices inclinados para montante.

Assim, apesar da influência da espessura ainda não ser clara para $Re = 3,1 \times 10^3$, neste regime é possível observar que, mesmo que mínima, a forma do bordo de fuga exerce efeito sobre a esteira resultante. O bordo de fuga afiado permitiu a produção de tração num caso em que o bordo de fuga reto resultou numa esteira inconclusiva ou de transição.

Finalmente, o aumento do número de Reynolds para $6,3 \times 10^3$ resultou num aumento das esteiras de resistência ao avanço. As esteiras nomeadas como inconclusivas mantiveram-se mais ou menos iguais ao regime anterior.

As placas com uma espessura de 5 mm não foram capazes de produzir tração, apresentando 14 esteiras de resistência ao avanço e 7 nomeadas como inconclusivas. Pelo contrário, a placa de 3 mm produziu 3 esteiras de tração, 13 de resistência ao avanço e apenas 5 inconclusivas. Mais uma vez, acredita-se que as esteiras nomeadas como inconclusivas correspondam a esteiras de transição.

De uma forma geral, as três placas planas estudadas libertaram esteira de resistência ao avanço para $St \leq 0,042$. Para as placas de 5 mm o intervalo de transição encontra-se, aproximadamente, em $0,049 < St \leq 0,098$, contudo, ainda são visíveis algumas esteiras de resistência ao avanço dentro deste intervalo, como se pode ver na Tabela 12. Já a placa de 3 mm de espessura, é capaz de produzir tração para $St \geq 0,098$ e o seu intervalo de transição é $0,049 < St < 0,084$. Contudo não existem apenas esteiras de transição nesse intervalo, mas também esteiras claras de resistência e, inclusive esteiras de produção de tração. As esteiras de tração dentro deste intervalo foram produzidas para a amplitude adimensional programada mais baixa e para os valores de frequência reduzida mais elevados, como se pode ver na Tabela 13.

Torna-se importante salientar que os três casos de produção de tração, para este regime de escoamento, acontecem quando o perfil se comporta como uma asa flexível. Assim, estas situações serão discutidas com maior detalhe na secção 3.7 correspondente ao estudo da flexibilidade.

Nesta secção torna-se claro que o aumento do número de Reynolds, pelo aumento da velocidade de escoamento, provoca uma diminuição do número de Strouhal, daí o aumento das esteiras de resistência ao avanço e conseqüente diminuição das esteiras de produção de tração.

Observa-se que o intervalo de transição se manteve, aproximadamente, em $0,049 < St < 0,112$ para todos os números de Reynolds estudados, salvo raras exceções. Verifica-se, ainda, que a produção de tração é independente do número de Reynolds, uma vez que este fenómeno ocorre para, aproximadamente, $St > 0,1$, independentemente do regime de escoamento. Este valor vai de encontro ao limite inferior do intervalo de maior eficiência encontrado por Young e Lai [14] e Camacho [16]. Para $St \leq 0,042$ observa-se sempre esteiras de resistência ao avanço.

Como já foi referido, a produção de tração ocorre assim que um determinado valor de St é excedido (0,1). Porém, este limite, por si só, não garante produção de tração. Esta depende, em segundo lugar, da combinação de k e de h . Para o mesmo número de Strouhal, um h alto deve ser associado a um k baixo, enquanto que um h baixo deve ser associado a um k alto, de modo a beneficiar a produção de tração.

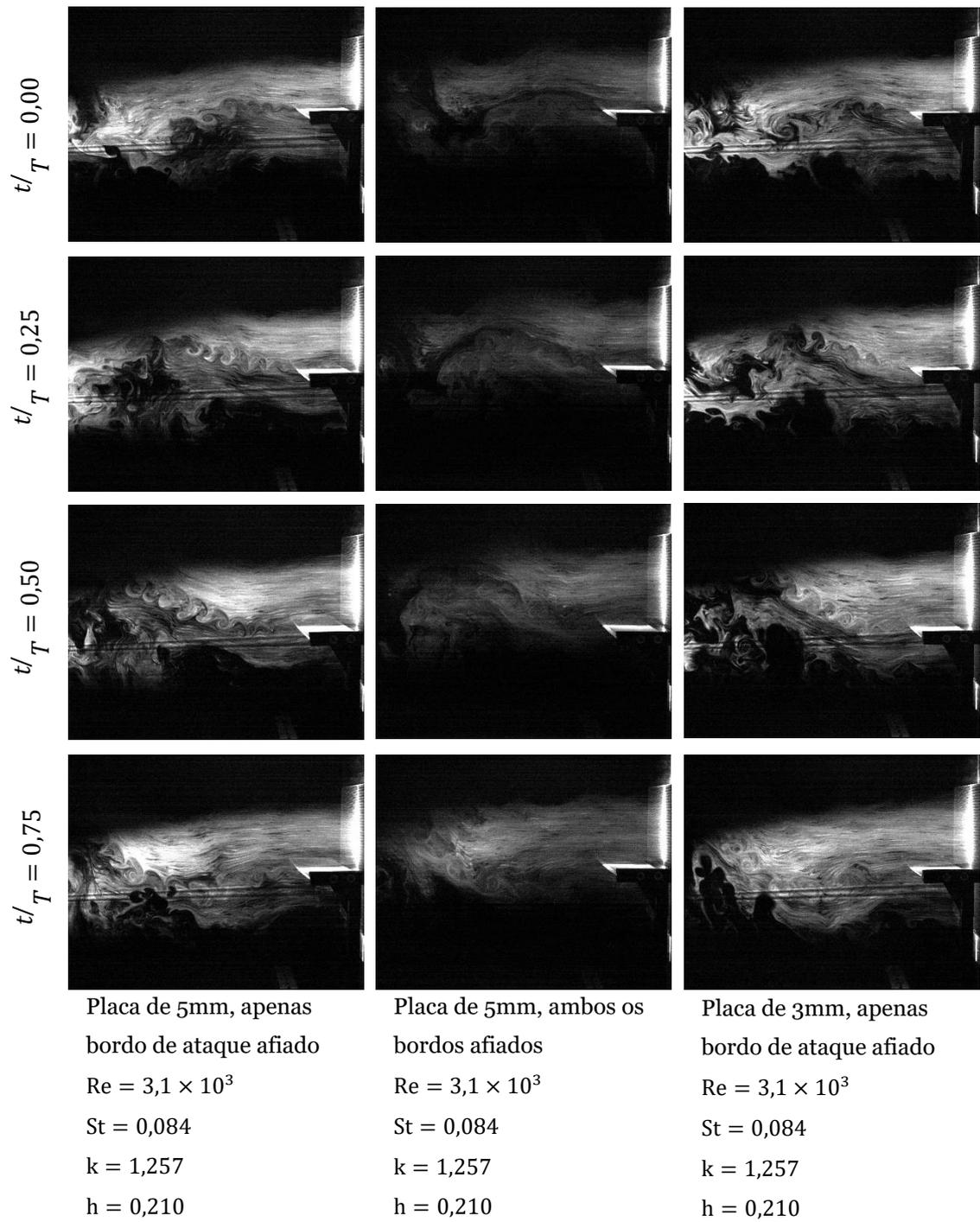


Figura 28 – Esteira libertada para o caso de $St = 0,084$, $h = 0,210$ e $k = 1,257$ para cada placa plana estudada.

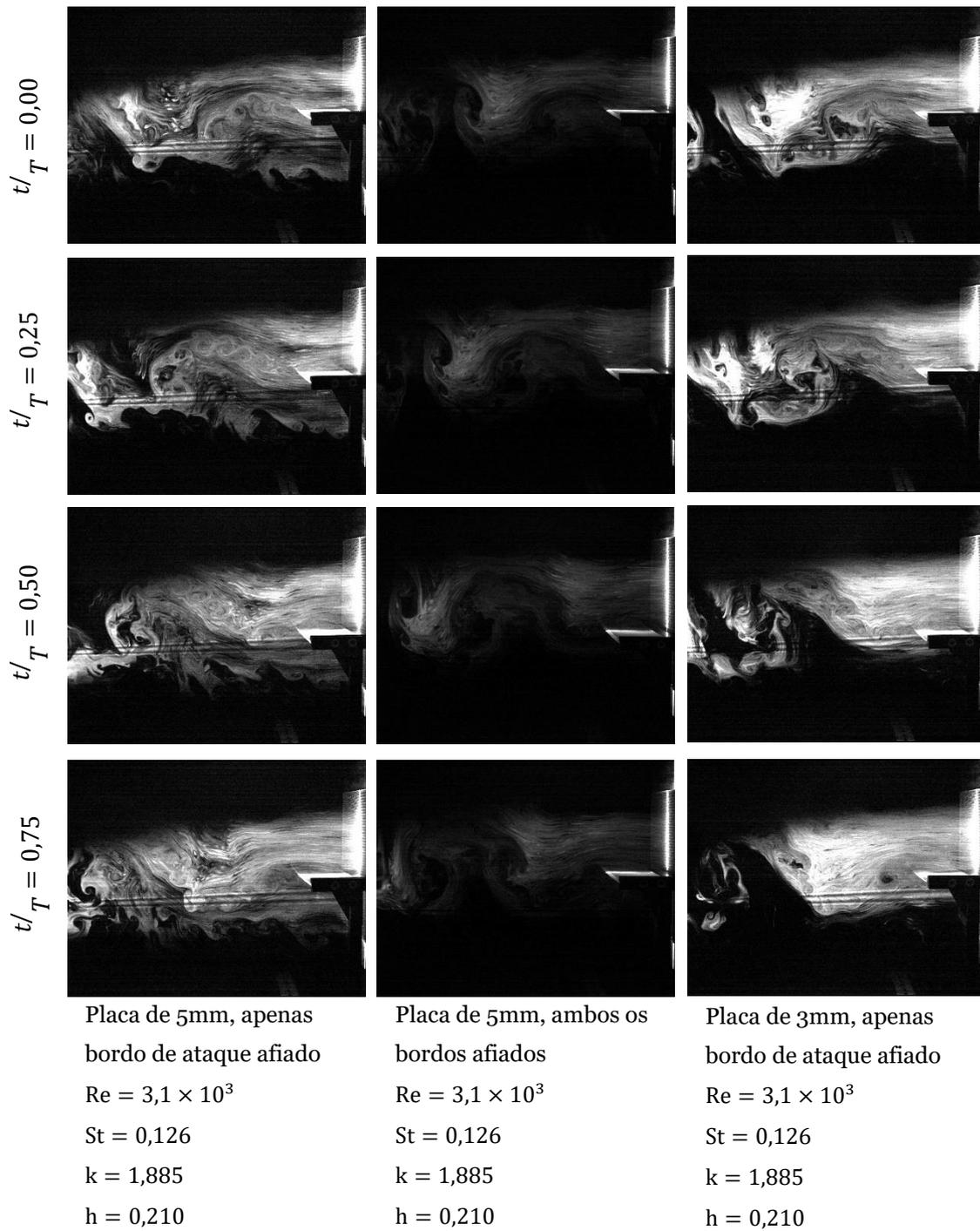


Figura 29 – Esteira libertada para o caso de $St = 0,126$, $h = 0,210$ e $k = 1,885$ para cada placa plana estudada.

3.3 Influência de k e h na Dimensão das Estruturas de Vorticidade da Esteira

Ao analisar as esteiras resultantes do movimento de translação das diferentes placas planas testadas, observou-se que a dimensão das estruturas de vorticidade poderá estar a ser influenciada pela frequência reduzida e pela amplitude adimensional. Este aspeto já tinha sido mencionado por Rodrigues [61] que sugeriu a influência do parâmetro k na proximidade horizontal entre os vórtices que constituem a esteira libertada.

Logo, procedeu-se às medições das distâncias verticais e horizontais entre as estruturas de vorticidade, para os casos em que houve produção de tração. Como para $Re = 6,3 \times 10^3$ só houve 3 casos de produção de tração e apenas para a placa de 3 mm, não existem dados suficientes que permitam a comprovação deste fenómeno e comparação com as outras placas planas. Assim sendo, foram elaborados gráficos apenas para $Re = 1,5 \times 10^3$ e $Re = 3,1 \times 10^3$. As distâncias horizontais estão adimensionalizadas pela corda aerodinâmica.

Mesmo com bastantes casos de produção de tração para o número de Reynolds de $1,5 \times 10^3$, o défice ou excesso de fumo introduzido durante os testes ou a subida do ar devido à diferença de temperaturas entre o interior e o exterior, dificultou a recolha de dados. Os vórtices das esteiras libertadas pela placa de 5 mm com apenas o bordo de ataque afiado foram as mais difíceis de medir. Neste regime só foi possível medir 3 casos desta placa plana, pelo que ela não foi contabilizada para o gráfico da Figura 30. Para a placa de 5 mm com ambos os bordos afiados, só foi possível medir os vórtices para uma amplitude adimensional de 0,070 e uma frequência reduzida maior que 7,540. A placa de 3 mm proporcionou o maior número de dados, contudo só são exibidos os correspondentes a $h = 0,070$ e $6,283 \leq k \leq 11,310$, pois foram os que se considerou pertinente para comparação.

Como se pode observar na Figura 30, parece realmente existir uma relação entre a frequência reduzida e a distância horizontal das estruturas de vorticidade da esteira. O que se verifica no gráfico relativo a $Re = 1,5 \times 10^3$, é que o aumento do parâmetro k provoca uma diminuição da distância horizontal entre os vórtices. Isto está em concordância com Lewing e Haj-Hariri [41]. A linha de tendência polinomial de 2º grau sugere que possa haver uma diminuição desta influência para valores de k mais elevados, onde a diferença de distâncias horizontais tende a estabilizar. Porém, no gráfico que diz respeito a $Re = 3,1 \times 10^3$ já não se observa esse efeito.

O gráfico da Figura 31 apresenta as distâncias verticais correspondentes a $h = 0,070$ e a $4,398 \leq k \leq 6,912$. A placa de 3 mm apresenta as mesmas características do gráfico da Figura 30. Contudo, as placas de 5 mm mostram um comportamento linear, sugerindo que a distância horizontal entre as estruturas de vorticidade diminui proporcionalmente com o aumento da frequência reduzida.

Apesar de toda esta análise, não é possível tirar alguma conclusão sobre a relação matemática entre a frequência reduzida e a distância horizontal entre as estruturas de vorticidade da esteira devido à falta de dados. Fica apenas a sugestão de que, de facto, a frequência reduzida tem

influência na distância horizontal entre os vórtices constituintes de uma esteira de produção de tração.

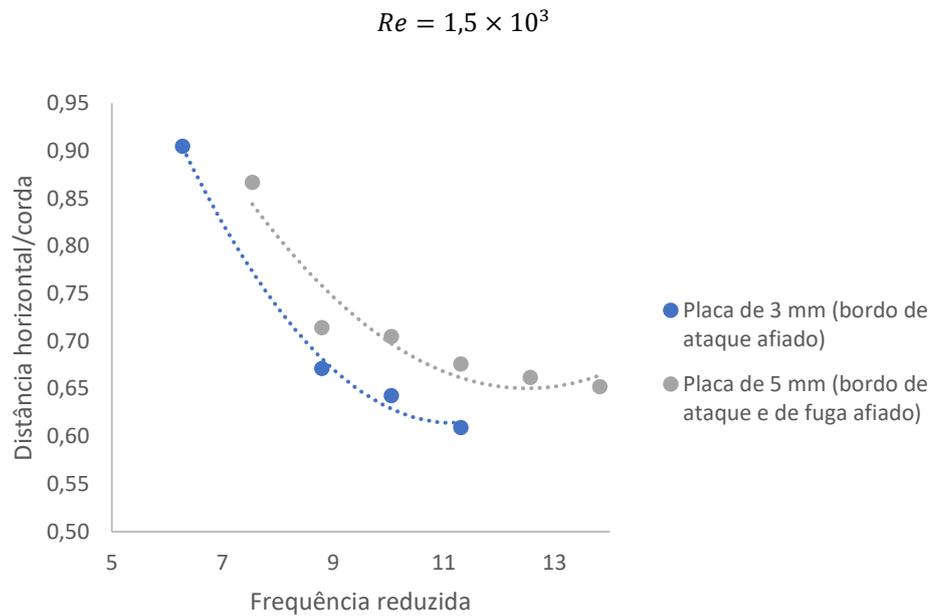


Figura 30 - Relação entre a frequência reduzida e a distância horizontal entre as estruturas de vorticidade da esteira, para $Re = 1,5 \times 10^3$.

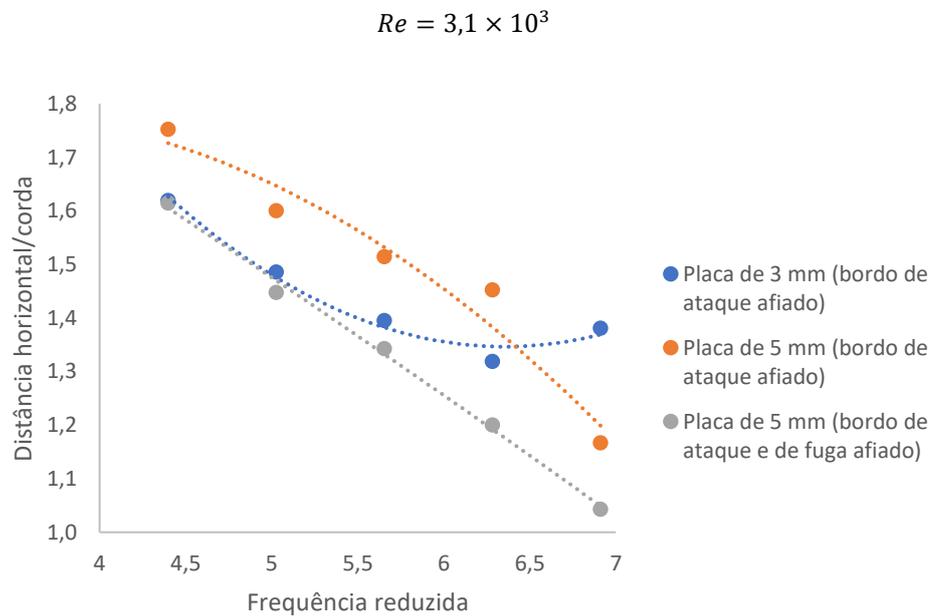


Figura 31 - Relação entre a frequência reduzida e a distância horizontal entre as estruturas de vorticidade da esteira, para $Re = 3,1 \times 10^3$.

Os resultados obtidos não permitiram relacionar a amplitude adimensional com a distância vertical dos vórtices, também devido à falta de dados. No entanto, suspeita-se que a diminuição

de h provoque uma diminuição na altura dos vórtices constituintes da esteira, como se pode observar na Figura 32.

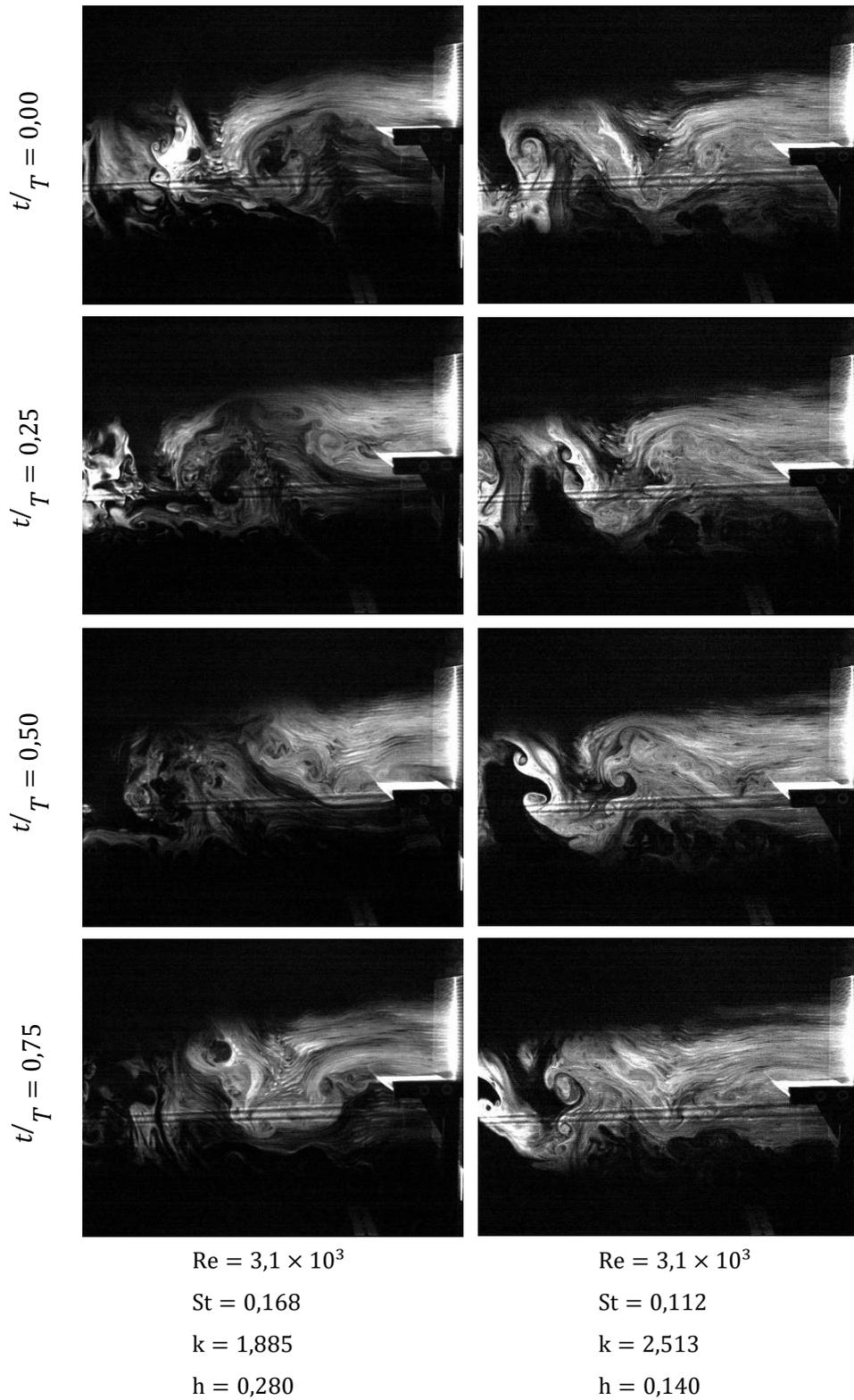


Figura 32 - Esteira libertada pela placa de 5 mm com apenas o bordo de ataque afiado para as condições especificadas.

3.4 Formação e Comportamento de LEV

Nas Tabelas 14 a 19 estão assinalados os casos em que foi possível observar a formação de *LEV* e o seu comportamento na superfície das placas planas estudadas, para $Re = 1,5 \times 10^3$, $Re = 3,1 \times 10^3$ e $Re = 6,3 \times 10^3$.

De salientar que, relativamente ao *LEV*, não se registou qualquer diferença entre as placas de 5 mm.

Tabela 14 – Formação e comportamento do *LEV* na superfície das placas de 5 mm, para $Re = 1,5 \times 10^3$.

		<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #cccccc; border: 1px solid black;"></div> Sem formação de <i>LEV</i> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #92d050; border: 1px solid black;"></div> <i>LEV</i> transportado <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #c8e6c9; border: 1px solid black;"></div> <i>LEV</i> dissipado </div>									
0,280	0,224	0,336									
0,210	0,168	0,252	0,336								
0,140	0,112	0,168	0,224	0,280	0,336	0,392					
0,070	0,056	0,084	0,112	0,140	0,168	0,196	0,224	0,252	0,280	0,308	
$\frac{h}{k}$	2,513	3,770	5,027	6,283	7,540	8,796	10,053	11,310	12,566	13,823	

Tabela 15 - Formação e comportamento do *LEV* na superfície da placa de 3 mm, para $Re = 1,5 \times 10^3$.

0,280	0,224	0,336								
0,210	0,168	0,252	0,336							
0,140	0,112	0,168	0,224	0,280	0,336	0,392				
0,070	0,056	0,084	0,112	0,140	0,168	0,196	0,224	0,252	0,280	0,308
$\frac{h}{k}$	2,513	3,770	5,027	6,283	7,540	8,796	10,053	11,310	12,566	13,823

Tabela 16 - Formação e comportamento do *LEV* na superfície das placas de 5 mm, para $Re = 3,1 \times 10^3$.

0,280	0,112	0,168								
0,210	0,084	0,126	0,168							
0,140	0,056	0,084	0,112	0,140	0,168	0,196				
0,070	0,028	0,042	0,056	0,070	0,084	0,098	0,112	0,126	0,140	0,154
$\frac{h}{k}$	1,257	1,885	2,513	3,142	3,770	4,398	5,027	5,655	6,283	6,912

Tabela 17 - Formação e comportamento do *LEV* na superfície da placa de 3 mm, para $Re = 3,1 \times 10^3$.

0,280	0,112	0,168								
0,210	0,084	0,126	0,168							
0,140	0,056	0,084	0,112	0,140	0,168	0,196				
0,070	0,028	0,042	0,056	0,070	0,084	0,098	0,112	0,126	0,140	0,154
$\frac{h}{k}$	1,257	1,885	2,513	3,142	3,770	4,398	5,027	5,655	6,283	6,912

Tabela 18 - Formação e comportamento do *LEV* na superfície das placas de 5 mm, para $Re = 6,3 \times 10^3$.

0,280	0,056	0,084								
0,210	0,042	0,063	0,084							
0,140	0,028	0,042	0,056	0,070	0,084	0,098				
0,070	0,014	0,021	0,028	0,035	0,042	0,049	0,056	0,063	0,070	0,077
$\frac{h}{k}$	0,628	0,942	1,257	1,571	1,885	2,199	2,513	2,827	3,142	3,456

Tabela 19 - Formação e comportamento do *LEV* na superfície da placa de 3 mm, para $Re = 6,3 \times 10^3$.

0,280	0,056	0,084								
0,210	0,042	0,063	0,084							
0,140	0,028	0,042	0,056	0,070	0,084	0,098				
0,070	0,014	0,021	0,028	0,035	0,042	0,049	0,056	0,063	0,070	0,077
$\frac{h}{k}$	0,628	0,942	1,257	1,571	1,885	2,199	2,513	2,827	3,142	3,456

Para $Re = 1,5 \times 10^3$, contabilizou-se um total de 19 casos em que foi detetada a presença de *LEV* nas três placas planas. Desses 19, 10 foram transportados ao longo de toda a corda das placas de 5 mm, e 9 foram dissipados antes de alcançar o bordo de fuga. Na placa de 3 mm de espessura, 9 foram transportados e 10 foram dissipados antes de serem libertados para a esteira.

Observa-se nas Tabelas 14 e 15, que tanto nas placas de 5 mm como na placa de 3 mm, existe formação de *LEV* para um número de Strouhal igual ou superior a 0,112. Para as placas de 5 mm, no intervalo $0,112 \leq St \leq 0,224$, o *LEV* foi capaz de percorrer toda a corda da asa e ser libertado para a esteira. Os casos em que o *LEV* foi dissipado antes de alcançar o bordo de fuga ocorreram para $St \geq 0,252$. A placa de 3 mm apresentou um comportamento bastante semelhante com exceção do caso correspondente a $St = 0,224$, $k = 10,053$ e $h = 0,070$. Ao contrário do que aconteceu nas placas de 5 mm, neste caso específico o *LEV* foi dissipado antes de ser libertado para a esteira. Assim, para a placa de 3 mm, o intervalo de números de Strouhal onde existe

transporte do *LEV* fica $0,112 \leq St < 0,224$. Os restantes casos em que houve dissipação do *LEV* ocorreram a $St \geq 0,252$, tal como para as placas de 5 mm.

Ao aumentar o número de Reynolds para $3,1 \times 10^3$, o número de casos em que o *LEV* foi dissipado diminuiu. As placas de 5 mm registaram o mesmo número de *LEV* transportados do regime de escoamento anterior (10), não se verificando qualquer situação em que o *LEV* foi dissipado. Já a placa de 3 mm apresentou um aumento do número de *LEV* transportado para 12, havendo apenas 1 caso em que existiu dissipação de *LEV*.

Como se pode observar pelas Tabelas 16 e 17, para $Re = 3,1 \times 10^3$, a influência da diferença de espessura foi mais óbvia. Enquanto que a placa de 3 mm garante a formação de *LEV* para $St \geq 0,098$, isto só acontece para $St \geq 0,126$, para as placas de 5 mm, existindo ainda um caso de $St = 0,112$ onde se detetou a presença de um pequeno *LEV*. A situação em que, para a placa de 3 mm, o *LEV* foi dissipado antes de alcançar o bordo de fuga, deu-se para a amplitude adimensional mais baixa e frequência reduzida mais alta programadas. O número de Strouhal deste caso é de 0,154, que diz respeito ao meio do intervalo de maior eficiência para o movimento de translação reportado por Young e Lai [14] e Camacho [16]. Mais uma vez, verifica-se que o número de Strouhal, por si só, não garante a ocorrência de determinado fenómeno aerodinâmico. Este depende, também, da combinação de k e h .

Finalmente, o aumento do número de Reynolds para $6,3 \times 10^3$ resultou num total desaparecimento de *LEV* para as placas de 5 mm. A placa de 3 mm registou 3 situações em que houve formação e transporte do *LEV* ao longo de toda a corda até ser libertado para a esteira.

Tal como aconteceu para $Re = 3,1 \times 10^3$, na placa de 3 mm de espessura, detetou-se formação de *LEV* para $St \geq 0,098$. Os restantes dois casos de formação de *LEV* aconteceram para $St = 0,070$ e $St = 0,077$, para a amplitude adimensional mais baixa e frequência reduzidas mais altas programadas, como se pode observar na Tabela 19. Estes três casos correspondem às únicas três situações em que houve produção de tração para este regime de escoamento. Isto pode dever-se à flexibilidade detetada nestes casos.

Após toda a análise relativamente ao *LEV*, é possível afirmar que a espessura do perfil influencia a existência ou não de *LEV* e o seu comportamento na superfície da asa sujeito ao movimento de translação. A menor espessura da asa diminui o número de Strouhal necessário para formação de *LEV*. Enquanto que, para as placas de 5 mm, o aparecimento do *LEV* ocorre para $St \geq 0,126$, para a placa de 3 mm, foi detetada formação de *LEV* sempre que $St \geq 0,098$. Contudo, para frequência reduzidas mais elevadas, os *LEV* da placa com menor espessura tende a dissipar mais cedo.

Como esperado, não se verificou qualquer influência do bordo de fuga nesta secção.

De uma forma geral, é possível afirmar que a formação de *LEV* ocorre quando Strouhal atinge o valor de 0,1, aproximadamente, e que os números de Strouhal em que o *LEV* é transportado ao longo de toda a corda encontram-se dentro do intervalo de maior eficiência para o movimento de translação encontrado por Young e Lai [14] e Camacho [16], para o perfil NACA 0012.

Comparando as tabelas desta secção com as tabelas da secção 3.2, observa-se que houve casos em que as esteiras foram classificadas como inconclusivas, onde se detetou a presença de *LEV*. Pensa-se que, nessas situações, já existirá alguma produção de tração, contudo só seria possível verificar tal afirmação com sensores de força. Verifica-se também que não há nenhuma formação de *LEV* quando a esteira resulta em resistência ao avanço. Para $Re = 3,1 \times 10^3$ existem dois casos em que o movimento de translação das placas de 5 mm resultou numa esteira de produção de tração, mas não se detetou qualquer presença de *LEV*. Isto pode ter sido influenciado pela flexibilidade que as placas manifestaram nessas situações ou pela dimensão tão reduzida do *LEV* que não foi possível observá-lo a olho nu.

Ao analisar as filmagens realizadas, apercebeu-se de que o k e h poderão exercer influência no comportamento e dimensão do *LEV*. A mais óbvia foi a influência do parâmetro h . Como se pode ver na Figura 33, quando maior a amplitude adimensional, maior são os *LEV* formados. Quanto ao parâmetro k , supeita-se que este exerça algum efeito na distância que o *LEV* percorre antes de se dissipar, porém não é possível afirmar com certeza. Reparemos ainda que, na tabela 17, o único caso de dissipação ocorreu para a frequência mais elevada.

Como já foi referido no capítulo 1, a estrada de von Kármán é constituída por um jato que atravessa um par de vórtices com sentidos opostos (um no sentido horário e outro no sentido anti-horário). Para os casos em que o *LEV* é transportado, verificou-se que o *LEV* do extradorso se junta ao vórtice horário (acima do jato) e o *LEV* proveniente do intradorso se junta ao vórtice anti-horário (abaixo do jato).

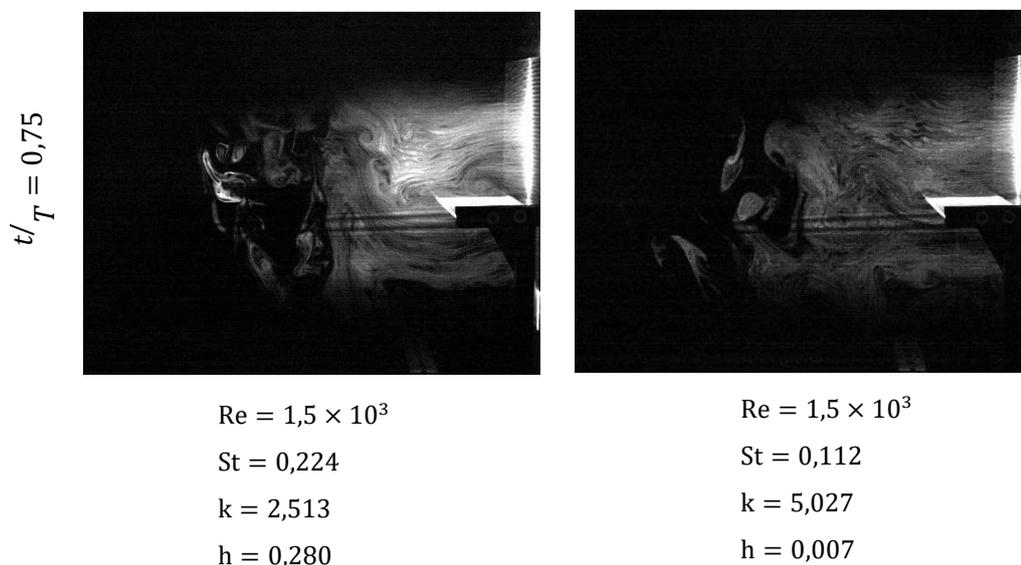


Figura 33 – Esteira resultante do movimento de translação da placa plana de 5 mm com apenas o bordo de ataque afiado, para as condições de voo especificadas.

3.5 Extração de energia

Nas tabelas 20 a 24 estão assinalados os casos em que o *LEV* formado no extradorso se manteve colado ao perfil durante o movimento ascendente, resultando em extração de energia, para os três números de Reynolds estudados. A legenda encontra-se na Figura 36. O mecanismo de extração de energia é baseado no faseamento entre a produção de sustentação e o movimento imposto.

Este fenómeno de extração de energia pelo *LEV* também ocorre no intradorso das placas planas durante o movimento descendente. Contudo, nesta dissertação, apenas se visualizou os fenómenos aerodinâmicos a ocorrer na esteira e no extradorso dos perfis.

Rodrigues *et al.* [34] recomendaram que o *LEV* não ultrapasse a espessura máxima da asa para que não haja um efeito negativo no processo de produção de tração. Porém, como as placas planas utilizadas nesta dissertação possuem a mesma espessura ao longo de toda a corda, não é necessário ter preocupação com este detalhe. Assim, nestes casos, o *LEV* é sempre benéfico quando se trata de extração de energia, uma vez que a zona de baixa pressão contribui para a sustentação. A sua movimentação na corda não afeta, portanto, a produção de resistência aerodinâmica.

Tabela 20 – Extração de energia das placas de 5 mm, para $Re = 1,5 \times 10^3$.

		<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #cccccc; margin-right: 5px;"></div> Sem extração de energia <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #f4a460; margin-right: 5px;"></div> Pequena extração de energia <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #e67e22; margin-right: 5px;"></div> Grande extração de energia </div>									
0,280		0,224	0,336								
0,210		0,168	0,252	0,336							
0,140		0,112	0,168	0,224	0,280	0,336	0,392				
0,070		0,056	0,084	0,112	0,140	0,168	0,196	0,224	0,252	0,280	0,308
$\frac{h}{k}$		2,513	3,770	5,027	6,283	7,540	8,796	10,053	11,310	12,566	13,823

Tabela 21 - Extração de energia da placa de 3 mm, para $Re = 1,5 \times 10^3$.

0,280		0,224	0,336								
0,210		0,168	0,252	0,336							
0,140		0,112	0,168	0,224	0,280	0,336	0,392				
0,070		0,056	0,084	0,112	0,140	0,168	0,196	0,224	0,252	0,280	0,308
$\frac{h}{k}$		2,513	3,770	5,027	6,283	7,540	8,796	10,053	11,310	12,566	13,823

Tabela 22 - Extração de energia das placas de 5 mm, para $Re = 3,1 \times 10^3$.

0,280	0,112	0,168								
0,210	0,084	0,126	0,168							
0,140	0,056	0,084	0,112	0,140	0,168	0,196				
0,070	0,028	0,042	0,056	0,070	0,084	0,098	0,112	0,126	0,140	0,154
$\frac{h}{k}$	1,257	1,885	2,513	3,142	3,770	4,398	5,027	5,655	6,283	6,912

Tabela 23 - Extração de energia da placa de 3 mm, para $Re = 3,1 \times 10^3$.

0,280	0,112	0,168								
0,210	0,084	0,126	0,168							
0,140	0,056	0,084	0,112	0,140	0,168	0,196				
0,070	0,028	0,042	0,056	0,070	0,084	0,098	0,112	0,126	0,140	0,154
$\frac{h}{k}$	1,257	1,885	2,513	3,142	3,770	4,398	5,027	5,655	6,283	6,912

Tabela 24 - Extração de energia da placa de 3 mm, para $Re = 6,3 \times 10^3$.

0,280	0,056	0,084								
0,210	0,042	0,063	0,084							
0,140	0,028	0,042	0,056	0,070	0,084	0,098				
0,070	0,014	0,021	0,028	0,035	0,042	0,049	0,056	0,063	0,070	0,077
$\frac{h}{k}$	0,628	0,942	1,257	1,571	1,885	2,199	2,513	2,827	3,142	3,456

Para o número de Reynolds de $1,5 \times 10^3$, registou-se um total de 11 casos em que se observa extração de energia para as placas de 5 mm. Como se vê na Tabela 20, para 4 desses casos a extração de energia foi muito pequena, uma vez que o *LEV* observado é, também, bastante pequeno. Para os 7 restantes, a extração foi maior. Nestes casos o *LEV* suga o perfil durante o movimento ascendente de tal forma que se forma como que um vácuo no centro do vórtice. Este fenómeno pode ser observado na Figura 34. Pela observação da Tabela 21, vê-se que a placa de 3 mm apresenta um comportamento semelhante, com apenas uma exceção. No total, para a placa de 3 mm houve 10 casos de extração de energia, onde 4 correspondem a pequenas extrações e 6 a grandes extrações de energia.

De uma forma geral, para $Re = 1,5 \times 10^3$, as situações em que o *LEV* permanece colado ao perfil durante o movimento ascendente encontram-se em $0,112 \leq St < 0,280$, com algumas exceções. O número de Strouhal não parece ser o parâmetro que rege o fenómeno de extração de energia, mas sim a amplitude adimensional e a frequência reduzida em conjunto.

O aumento do número de Reynolds para $3,1 \times 10^3$ resultou numa diminuição das situações em que se observou extração de energia. A influência das diferentes espessuras torna-se mais óbvia

para este regime de escoamento. Para as placas de 5 mm contabilizaram-se 6 casos em que houve extração de energia, onde apenas 1 foi possível observar o crescimento do centro de vorticidade do *LEV*. Para a placa de 3 mm estes números aumentaram, observando-se 4 situações de grande extração de energia pelo *LEV* e 4 de pequena extração.

Mais uma vez, não se verifica uma ligação direta da extração de energia com o número de Strouhal. Como observado nas Tabelas 22 e 23, para $h = 0,210$ não houve qualquer diferença relativamente à extração de energia entre as placas de 5 mm e a placa de 3 mm. A diminuição da amplitude adimensional para 0,140 faz com que os casos de grande extração de energia aumentem para a placa de 3 mm comparativamente com as placas de 5 mm. Para $h = 0,140$ uma frequência reduzida entre 3,142 e 4,398 é mais benéfica para a extração de energia, para as placas de 5 mm. Para a placa de 3 mm este intervalo da frequência reduzida torna-se $2,513 < k \leq 3,770$. Diminuindo ainda mais h para 0,070, torna-se necessário aumentar k para que o *LEV* permaneça colado ao perfil durante o movimento ascendente. Para as placas de 5 mm, $k \geq 6,283$ não foi suficiente para se observar uma grande extração de energia. Pelo contrário, para a placa de 3 mm, $5,655 \leq k \leq 6,283$ gerou uma grande extração de energia. A partir desta frequência reduzida, o *LEV* é dissipado antes de se iniciar o movimento ascendente da placa de 3 mm.

A extração de energia do perfil só ocorre quando à presença do *LEV*. Assim sendo, como não se detetou qualquer *LEV* para as placas de 5 mm de espessura para $Re = 6,3 \times 10^3$, estas não foram tidas em conta para esta secção. A placa de 3 mm registou 3 casos em que houve formação de transporte do *LEV*. Porém, como se pode ver na Tabela 24, nestes casos não houve qualquer extração de energia.

Repare-se que alguns casos marcados com extração de energia, correspondem a casos em que o *LEV* foi dissipado antes de alcançar o bordo de fuga. O que se observa é que até, aproximadamente, metade do movimento ascendente, o *LEV* mantém-se ligado ao perfil, dissipando-se antes da asa alcançar a posição mais alta, pelo que estes casos também foram contabilizados como extração de energia.

Tal como aconteceu na formação e comportamento de *LEV*, os resultados relativos à extração de energia foram iguais para as duas placas planas estudadas de 5 mm de espessura. As diferenças ocorreram entre as placas de 5 mm e a placa de 3mm. Logo, verifica-se que a espessura influencia a extração de energia pelo *LEV*. Contudo não é possível afirmar para que valores de St , k ou h seja mais benéfico utilizar determinada espessura na asa.

Aliás, parece claro que o número de Strouhal não é um parâmetro decisivo quanto à extração de energia pelo *LEV*. Os parâmetros k e h parecem exercer mais influência quanto a este ponto, principalmente h . Uma amplitude adimensional baixa parece favorável à extração de energia. Quando h alto, o *LEV* tem tempo de alcançar o bordo de fuga antes de se iniciar o movimento ascendente. Assim, quando maior h , menor a chance de ocorrer extração de energia.

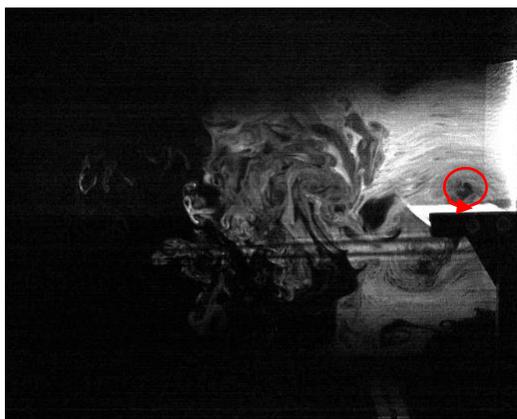


Figura 34 – Exemplo de grande extração de energia pelo *LEV*.

3.6 Ângulo de ataque efetivo

De modo a perceber se o ângulo de ataque efetivo criado pelo movimento de translação tem alguma influência na formação de *LEV*, recorreu-se à equação (1.6) para calcular esses valores.

Os resultados podem ser vistos na Tabela 25, para cada combinação de amplitude e frequência programadas. Os casos em que foi detetada a presença de *LEV* estão assinalados a verde, para as três placas planas estudadas. Os casos assinalados a azul, corresponde àqueles em que houve formação de *LEV* apenas para a placa de 3 mm.

Em primeiro lugar, é possível ver que o ângulo de ataque efetivo aumenta com a velocidade do movimento de translação e diminui com a velocidade do escoamento, como era esperado.

Para $Re = 1,5 \times 10^3$, a formação de *LEV* ocorre sempre que $\alpha_{eff} \geq 24,1^\circ$. No regime de $Re = 3,1 \times 10^3$, a placa de 3 mm garante a presença de *LEV* para $\alpha_{eff} \geq 21,4^\circ$, mas o mesmo não acontece para as placas de 5 mm. Para as placas de maior espessura, o *LEV* é formado sempre que $\alpha_{eff} \geq 26,2^\circ$, porém existe um caso em que se deteta a presença de *LEV* para $\alpha_{eff} = 24,1^\circ$, como se pode ver na Tabela 25. Para $Re = 6,3 \times 10^3$ não é possível estabelecer qualquer relação entre o ângulo de ataque efetivo e a formação de *LEV*.

Comparando as Tabelas 3 e 25, observa-se que o mesmo número de Strouhal corresponde ao mesmo ângulo de ataque efetivo. A análise foi de facto muito semelhante à realizada na secção 3.4, pelo que o ângulo de ataque efetivo será um parâmetro com pouco influência direta na formação de *LEV*.

Tabela 25 - Ângulo efetivo máximo para cada amplitude adimensional e frequência reduzida programadas.

A [mm]	f [Hz]	$\dot{y}(t)$	$U_\infty = 0,25 \text{ m/s}$		$U_\infty = 0,50 \text{ m/s}$		$U_\infty = 1,00 \text{ m/s}$	
			$Re = 1,5 \times 10^3$		$Re = 3,1 \times 10^3$		$Re = 6,3 \times 10^3$	
			$\alpha_{eff\max} [rad]$	$\alpha_{eff\max} [^\circ]$	$\alpha_{eff\max} [rad]$	$\alpha_{eff\max} [^\circ]$	$\alpha_{eff\max} [rad]$	$\alpha_{eff\max} [^\circ]$
28	1	0,224	0,731	41,9	0,421	24,1	0,220	12,6
	1,5	0,336	0,931	53,3	0,592	33,9	0,324	18,6
21	1	0,168	0,592	33,9	0,324	18,6	0,166	9,5
	1,5	0,252	0,789	45,2	0,467	26,7	0,247	14,1
	2	0,336	0,931	53,3	0,592	33,9	0,324	18,6
14	1	0,112	0,421	24,1	0,220	12,6	0,112	6,4
	1,5	0,168	0,592	33,9	0,324	18,6	0,166	9,5
	2	0,224	0,731	41,9	0,421	24,1	0,220	12,6
	2,5	0,280	0,842	48,2	0,510	29,2	0,273	15,6
	3	0,336	0,931	53,3	0,592	33,9	0,324	18,6
	3,5	0,392	1,003	57,5	0,665	38,1	0,374	21,4
7	1	0,056	0,220	12,6	0,112	6,4	0,056	3,2
	1,5	0,084	0,324	18,6	0,166	9,5	0,084	4,8
	2	0,112	0,421	24,1	0,220	12,6	0,112	6,4
	2,5	0,140	0,510	29,2	0,273	15,6	0,139	8,0
	3	0,168	0,592	33,9	0,324	18,6	0,166	9,5
	3,5	0,196	0,665	38,1	0,374	21,4	0,194	11,1
	4	0,224	0,731	41,9	0,421	24,1	0,220	12,6
	4,5	0,252	0,789	45,2	0,467	26,7	0,247	14,1
	5	0,280	0,842	48,2	0,510	29,2	0,273	15,6
	5,5	0,308	0,889	50,9	0,552	31,6	0,299	17,1

3.7 Flexibilidade

Devido à natureza fina das placas planas, principalmente a de 3 mm, foi detetada deflexão em todos os casos testados para frequências iguais ou superiores a 3 Hz, independentemente do número de Reynolds. Isto sugere que, para os casos estudados, a deflexão da asa depende apenas da frequência com que ela oscila.

Os gráficos das Figuras 35 a 41 mostram as medições realizadas a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$ da envergadura das placas planas. Os extremos (correspondentes a 0 e 440 mm) estavam acoplados ao suporte de metal e, portanto, não sofreram deflexão.

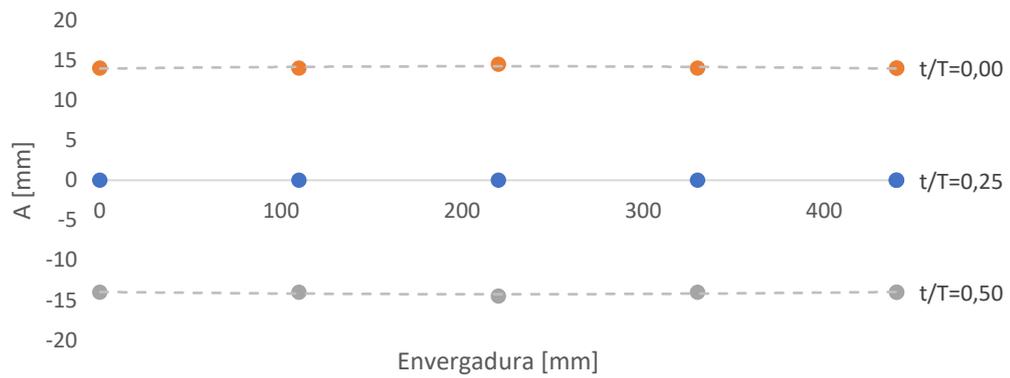


Figura 35 - Deflexão das placas de 5 mm, para $f = 3,0$ a $3,5$ Hz e $A = 14$ mm.

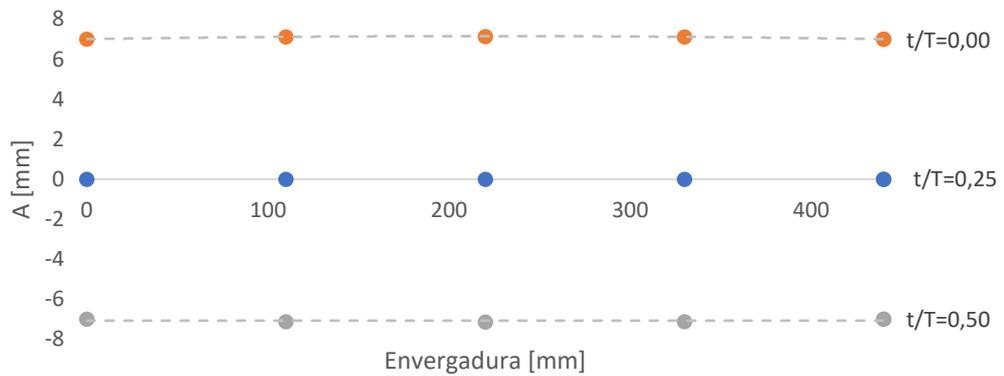


Figura 36 - Deflexão das placas de 5 mm, para $f = 3,0$ a $5,5$ Hz e $A = 7$ mm.

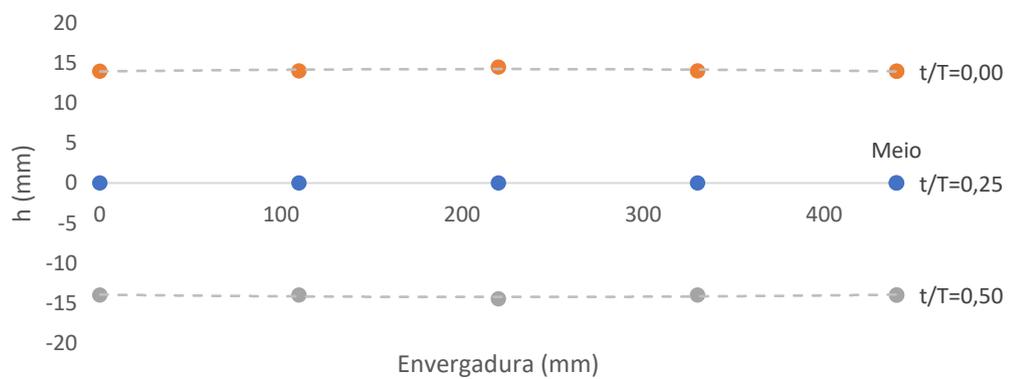


Figura 37 - Deflexão da placa de 3 mm, para $f = 3,0$ Hz e $A = 14$ mm.

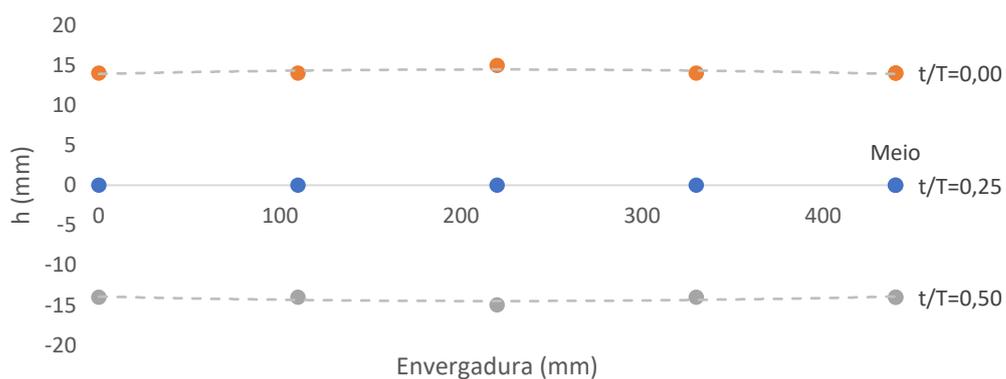


Figura 38 - Deflexão da placa de 3 mm, para $f = 3,5 \text{ Hz}$ e $A = 14 \text{ mm}$.

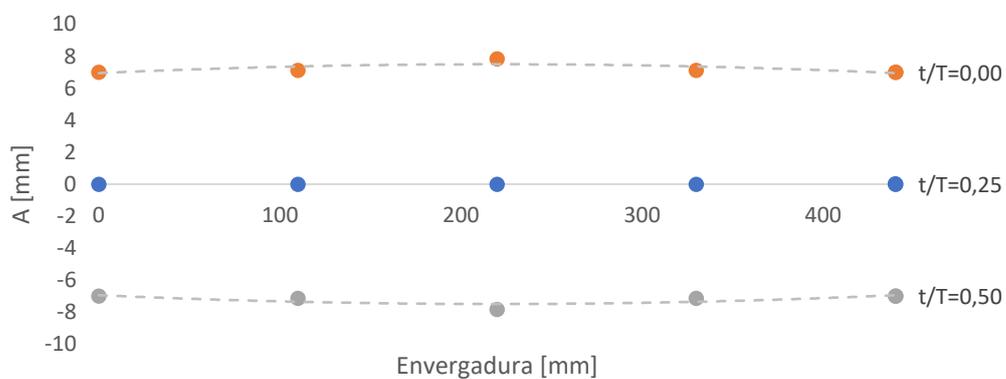


Figura 39 - Deflexão da placa de 3 mm, para $f = 3,0 \text{ a } 4,5 \text{ Hz}$ e $A = 7 \text{ mm}$.

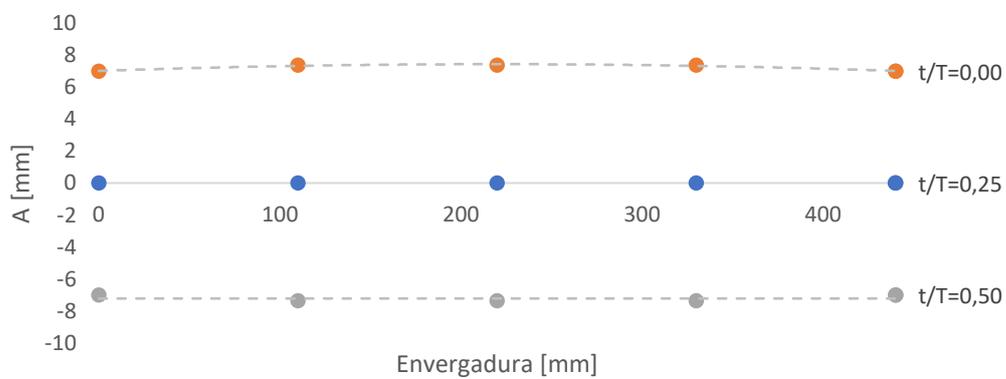


Figura 40 - Deflexão da placa de 3 mm, para $f = 5,0 \text{ Hz}$ e $A = 7 \text{ mm}$.

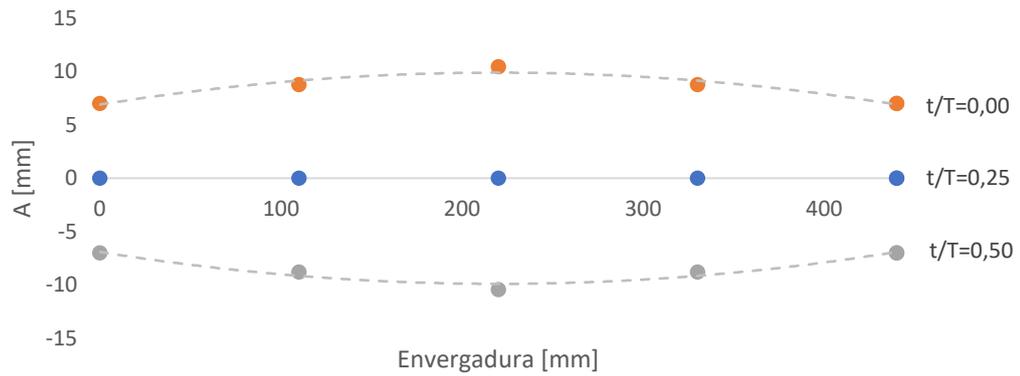


Figura 41 - Deflexão da placa de 3 mm, para $f = 5,5 \text{ Hz}$ e $A = 7 \text{ mm}$.

A Tabela 26 mostra as amplitudes programadas no motor e as que foram realmente obtidas, para os casos em que as placas se comportaram como asas flexíveis. A flecha máxima corresponde a $\frac{b}{2}$ da asa.

Tabela 26 - Comparação das amplitudes adimensionais programadas com as reais.

Espessura da asa [mm]	A [mm]	f [Hz]	h programado	h real	Flecha máxima [mm]
5	14	3	0,140	0,145	0,490
		3,5	0,140	0,145	0,490
	7	3	0,070	0,071	0,140
		3,5	0,070	0,071	0,140
		4	0,070	0,071	0,140
		4,5	0,070	0,071	0,140
		5	0,070	0,071	0,140
3	14	3	0,140	0,145	0,495
		3,5	0,140	0,150	0,965
	7	3	0,070	0,074	0,365
		3,5	0,070	0,074	0,365
		4	0,070	0,074	0,365
		4,5	0,070	0,074	0,365
		5	0,070	0,078	0,840
		5,5	0,070	0,105	3,450

Mais uma vez, não existe diferenças de amplitude provocadas pela flexibilidade entre as placas planas de 5 mm.

Como é possível ver no parâmetro da flecha máxima, o aumento da amplitude registada para as placas de 5 mm foi muito pequeno. Para $h = 0,140$ houve um aumento de 0,490 mm e para $h = 0,070$ o aumento foi de 0,140 mm. Não se verificou variação destes valores com a mudança da frequência implementada.

A placa de 3 mm foi a que registou as maiores distâncias entre a amplitude programada e a amplitude máxima atingida. Para $h = 0,140$ a flecha máxima foi de 0,495 mm para $k = 3 \text{ Hz}$ e de 0,965 mm para $f = 3,5 \text{ Hz}$. Para $h = 0,070$ registou-se uma flecha máxima de 0,365 mm para $3 \text{ Hz} \leq f \leq 4,5 \text{ Hz}$, de 0,840 mm para $f = 5 \text{ Hz}$ e, finalmente, de 3,450 mm para $f = 5,5 \text{ Hz}$.

Assim, é possível observar uma clara influência da espessura na amplitude máxima atingida pelas placas planas, quando existe deflexão. Para as mesmas condições de voo, a placa de 3 mm foi a que registou a maior flecha máxima para todos os casos. Embora não haja registo de alguma influência da frequência na flecha máxima para as placas de 5 mm de espessura, para a placa de 3 mm, verifica-se que o aumento da frequência aumenta a amplitude máxima atingida.

O gráfico da Figura 42 sugere que possa haver uma relação matemática entre a flecha máxima e a frequência a que a asa oscila. Porém, não existem dados suficientes que possam comprovar esta afirmação.

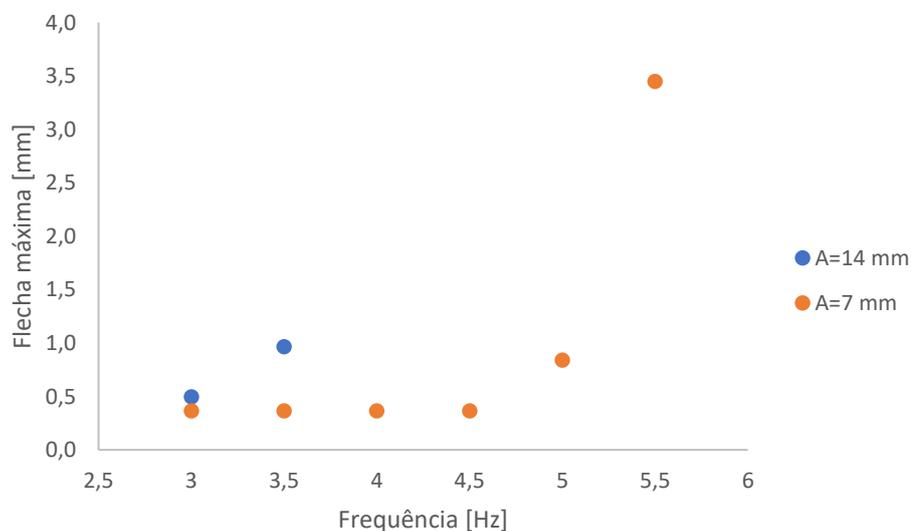


Figura 42 - Relação entre a flecha máxima e a frequência para a placa de 3 mm de espessura.

É importante referir que num ciclo do motor, as asas, para os casos analisados nesta secção, completam 4 ciclos, 2 durante o movimento ascendente e 2 durante o movimento descendente do atuador linear. Assim sendo, a frequência reduzida real acabou por ser o dobro do valor da programada. Como o número de Strouhal depende tanto da amplitude adimensional como da frequência reduzida, este também foi ajustado aos casos que apresentaram deflexão.

Estas mudanças encontram-se nas Tabelas 27 e 28, para as placas de 5 mm e para a placa de 3 mm, respectivamente. Nestas tabelas estão também marcadas a laranja as situações em que se observou uma dupla estrada de von Kármán invertida. A Figura 43 é um bom exemplo deste fenómeno aerodinâmico que será discutido de seguida.

Tabela 27 - Ajuste dos parâmetros k , h e St para as placas de 5 mm, devido à flexibilidade do perfil.

		$U_\infty = 0,25 \text{ m/s}$			$U_\infty = 0,50 \text{ m/s}$			$U_\infty = 1,00 \text{ m/s}$		
		$Re = 1,5 \times 10^3$			$Re = 3,1 \times 10^3$			$Re = 6,3 \times 10^3$		
$A \text{ [mm]}$	$f \text{ [Hz]}$	h	k	St	h	k	St	h	k	St
14	3	0,145	15,080	0,696	0,145	7,540	0,348	0,145	3,770	0,174
	3,5		17,593	0,811		8,796	0,406		4,398	0,203
7	3	0,071	15,080	0,343	0,071	7,540	0,171	0,071	3,770	0,086
	3,5		17,593	0,400		8,796	0,200		4,398	0,100
	4		20,106	0,457		10,053	0,228		5,027	0,114
	4,5		22,619	0,514		11,310	0,257		5,655	0,129
	5		25,133	0,571		12,566	0,286		6,283	0,143
	5,5		27,646	0,628		13,823	0,314		6,912	0,157

Tabela 28 - Ajuste dos parâmetros k , h e St para a placa de 3 mm, devido à flexibilidade do perfil.

		$U_\infty = 0,25 \text{ m/s}$			$U_\infty = 0,50 \text{ m/s}$			$U_\infty = 1,00 \text{ m/s}$		
		$Re = 1,5 \times 10^3$			$Re = 3,1 \times 10^3$			$Re = 6,3 \times 10^3$		
$A \text{ [mm]}$	$f \text{ [Hz]}$	h	k	St	h	k	St	h	k	St
14	3	0,145	15,080	0,696	0,145	7,540	0,348	0,145	3,770	0,174
	3,5	0,150	17,593	0,838	0,150	8,796	0,419	0,150	4,398	0,210
7	3	0,074	15,080	0,354	0,074	7,540	0,177	0,074	3,770	0,088
	3,5		17,593	0,412		8,796	0,206		4,398	0,103
	4		20,106	0,471		10,053	0,236		5,027	0,118
	4,5		22,619	0,530		11,310	0,265		5,655	0,133
	5	0,078	25,133	0,627	0,078	12,566	0,314	0,078	6,283	0,157
	5,5	0,105	27,646	0,920	0,105	13,823	0,460	0,105	6,912	0,230

Estas mudanças nos parâmetros St , k e h podem justificar alguns fenómenos aerodinâmicos ocorridos devido à presença de deflexão. Os casos mais óbvios de uma possível influência da flexibilidade são aqueles em que o movimento da placa de 3 mm resultou numa estrada de von Kármán invertida para $Re = 6,3 \times 10^3$. Mesmo a números de Strouhal muito baixos, 0,070 e 0,077, a esteira da placa plana de 3 mm resultou em produção de tração e ainda existe formação e transporte de LEV . Agora percebe-se que isto se deve ao aumento do número de Strouhal para 0,157 e 0,230, respectivamente, devido à deflexão do perfil.

Tanto para as placas de 5 mm como para a placa de 3 mm, observou-se a formação de uma dupla estrada de von Kármán invertida para $f \geq 4$ Hz. Isto aconteceu para os números de Reynolds de $1,5 \times 10^3$ e de $3,1 \times 10^3$. Para $Re = 6,3 \times 10^3$ este fenómeno ocorreu apenas para $f = 5,5$ Hz para as placas de 5 mm e para $f \geq 5$ Hz para a placa de 3 mm. Como é possível observar nas Tabelas 27 e 28, o novo número de Strouhal é igual nas placas de 5 mm para $f = 5,5$ Hz e na placa de 3 mm para $f = 5$ Hz, pelo que esta diferença se possa dever a isso. Para além disso, todos os casos em que ocorre esta estrada dupla correspondem a esteiras de produção de tração, exceto para a situação das placas de 5 mm para $Re = 6,3 \times 10^3$. Para essa situação específica, a esteira foi nomeada como inconclusiva, mas poderá já existir produção de tração. Talvez seja por isso que, para $Re = 6,3 \times 10^3$, não exista dupla estrada de von Kármán invertida para todas as frequências maiores do que 4 Hz, pois não há produção de tração.

Posto isto, é possível afirmar que o comportamento das placas planas como uma asa flexível dependem da frequência a que oscilam e ocorreu sempre para $f \geq 3$ Hz. Relativamente à influência da espessura, observou-se que uma menor espessura da placa plana permite atingir amplitudes mais elevadas. Verificou-se ainda que, quando existe produção de tração, uma frequência maior ou igual a 4 Hz resulta numa dupla estrada de von Kármán invertida.

Relativamente aos *LEV*, observou-se que o *LEV* do extradorso se junta ao vórtice anti-horário (acima do jato), enquanto que o *LEV* do intradorso se junta ao vórtice anti-horário, mas da estrada de von Kármán invertida direcionada para baixo. Isto acontece devido ao aumento de ciclos realizados pela asa.

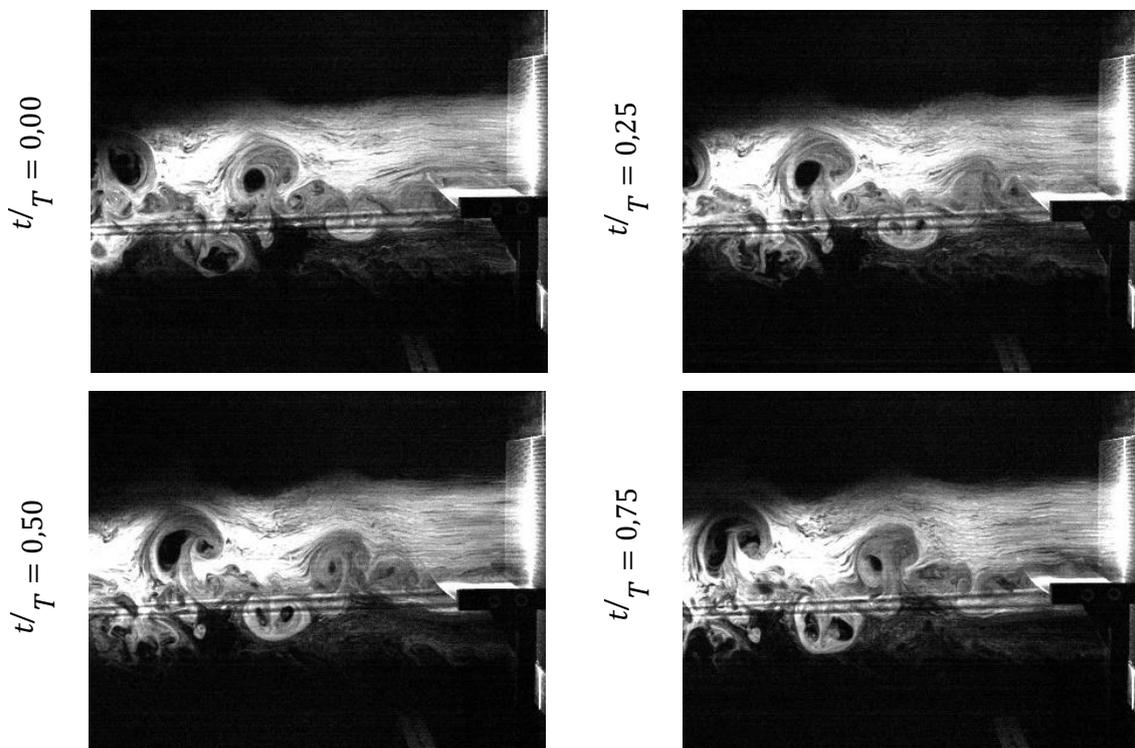


Figura 43 – Esteira resultante do movimento de translação da placa plana de 3 mm, para $Re = 6,3 \times 10^3$, $St = 0,077$, $k = 3,456$ e $h = 0,070$.

Capítulo 4: Conclusões e Trabalhos Futuros

A Natureza é a maior fonte de inspiração do ser humano desde o início dos tempos. Foi pela mera observação dos pássaros no seu *habitat* natural que se desenvolveram os primeiros projetos de aeronaves. Com a diminuição da escala dos veículos aéreos, tem surgido um especial interesse no estudo dos animais que batem as asas para se moverem. O seu modo de locomoção é o resultado de milhões de anos de evolução que convergiram numa solução ótima para o ambiente complexo e instável em que estão inseridos. Contudo ainda existem poucos estudos na área dos perfis oscilantes e muitos deles são realizados na água e não no ar.

Assim sendo, nesta dissertação procedeu-se à visualização da esteira libertada por três placas planas com diferentes espessuras e formas do bordo de fuga, sujeitas a um movimento vertical. Como resultado, foi possível compreender de melhor forma o papel do número de Strouhal, da frequência reduzida e da amplitude adimensional, individualmente e em conjunto, na produção de tração e na formação de *LEV*.

Em primeiro lugar, verificou-se que o aumento do número de Reynolds, pelo aumento da velocidade do escoamento, provoca uma conseqüente diminuição do número de Strouhal. Assim, Reynolds mais elevados resultaram num maior número de esteiras de resistência ao avanço e num menor número de esteiras de produção de tração.

Pode-se concluir que a espessura provoca influências na esteira resultante do movimento de translação. Para as mesmas condições de voo, uma menor espessura provoca uma maior perturbação no escoamento e uma esteira mais definida. Enquanto que as placas de 5 mm apresentavam claras esteiras de resistência ao avanço, a placa de 3mm já apresentava indícios de tração. As diferentes espessuras também resultaram em diferentes comportamentos dos *LEV*. A diminuição da espessura da asa favoreceu o seu aparecimento e diminuiu o número de Strouhal necessário para a sua formação. Contudo, para frequências reduzidas mais elevadas, a menor espessura resultou numa dissipação de *LEV* mais cedo. Verificou-se ainda que a espessura influenciou a extração de energia pelo *LEV*, mas não de uma forma tão linear.

Como já era esperado, o formato do bordo de fuga não manifestou qualquer diferença na formação ou dissipação de *LEV*, nem na extração de energia. O seu formato tem influência apenas na esteira resultante. Porém as diferenças, para a espessura estudada (5 mm), foram mínimas. A maior distinção ocorreu para $Re = 3,1 \times 10^3$, quando, para as condições de $St = 0,126$, $k = 1,885$ e $h = 0,210$, a placa com o bordo de fuga afiado foi a única capaz de produzir tração clara. As esteiras das restantes placas planas foram classificadas como inconclusivas. Esta situação pode, contudo, dever-se à dificuldade de visualização e às diferentes quantidades de fumo inseridas nos diversos testes.

Tal como mencionado na literatura [22, 23], a produção de tração aconteceu assim que um determinado valor de St foi excedido (0,1). Contudo, tal como Young e Lai [25] verificaram, a

esteira libertada dependeu não apenas do número de Strouhal, mas também da combinação de k e de h . Para o mesmo St , a esteira pode apresentar estruturas diferentes consoante o k e o h que lhe foram atribuídos. O mesmo aconteceu relativamente à formação de *LEV* e ao seu comportamento na superfície do perfil.

Estudou-se o intervalo do número de Strouhal de maior eficiência verificado numericamente por Young e Lai [14] e por Camacho [16]. Foi, aproximadamente, entre 0,1 e 0,2 que se observou o maior número de esteiras de produção de tração. Isto foi comum a todas as placas planas, em todos os regimes de escoamento estudados. Para além disso, neste intervalo o *LEV* é capaz de percorrer toda a corda do perfil e ser libertado para a esteira. A partir de 0,2, as esteiras ainda eram de produção de tração, contudo os vórtices não eram tão nítidos e os *LEV* formados eram dissipados antes de alcançar o bordo de fuga.

De facto, notou-se que a distância que o *LEV* percorre antes de se dissipar poderá estar relacionada com a frequência a que o perfil oscila. O que se observou foi que, para o mesmo h , à medida que k aumentou, o *LEV* dissipou-se mais cedo. Já a amplitude tem influência no tamanho dos *LEV*. Estes são tanto maiores quanto maior o h a que o perfil está sujeito.

Ainda sobre a influência de k e de h nas estruturas de vorticidade, verificou-se que o aumento da frequência reduzida provocou uma diminuição da distância horizontal entre os vórtices constituintes da esteira; suspeita-se que a diminuição da amplitude adimensional provoca uma diminuição na altura destas mesmas estruturas.

A extração de energia não se mostrou dependente do número de Strouhal, mas sim da frequência reduzida e, principalmente da amplitude adimensional. Amplitudes baixas favoreceram a extração de energia, pois para h elevados o *LEV* tem tempo de alcançar o bordo de fuga antes de se iniciar o movimento ascendente da asa. Para os perfis estudados nesta dissertação, a ligação do *LEV* às placas planas durante o movimento ascendente foi sempre benéfica, uma vez que não existe o problema de este passar a zona de espessura máxima.

O ângulo de ataque efetivo máximo foi sempre o mesmo para o mesmo número de Strouhal. Pela análise já mencionada acerca do *LEV*, pode-se concluir que o ângulo de ataque efetivo teve pouca ou nenhuma influência neste fenómeno aerodinâmico.

Quanto à flexibilidade dos perfis, verificou-se que esta depende apenas da frequência a que estes são sujeitos. Para as três placas, qualquer que fosse a sua espessura, velocidade do escoamento ou amplitude programada, o perfil demonstrou deflexão sempre para frequências maiores ou iguais a 3 Hz. Contudo, a placa de 3 mm foi a que atingiu maiores valores de flecha máxima, pelo que se pode concluir que, para uma asa flexível, quanto menor a espessura, maior será a amplitude alcançada para as mesmas condições de voo.

A existência de flexibilidade fez ainda com que o perfil executa-se o dobro dos ciclos do que nos casos em que as placas se comportavam como asas rígidas, resultando num total de 4 ciclos de oscilação por período, 2 durante o movimento descendente e 2 durante o movimento ascendente.

Este movimento resultou, para $f \geq 4 \text{ Hz}$ e onde há formação de esteiras de produção de tração, na criação de duas estradas de von Kármán invertidas simétricas, uma direcionada para cima e outra para baixo.

Para os casos em que houve transporte do *LEV* ao longo de toda a corda até este ser libertado para esteira, verificou-se que, para os casos rígidos, o *LEV* do extradorso se junta ao vórtice horário da estrada de von Kármán invertida e o *LEV* do intradorso se junta ao vórtice anti-horário. O mesmo acontece para os casos flexíveis quanto ao *LEV* do extradorso, enquanto que o *LEV* do intradorso se junta ao vórtice anti-horário, mas da estrada de von Kármán invertida direcionada para baixo. Esta diferença pode também dever-se à disparidade de ciclos que os casos rígidos e flexíveis apresentaram.

Posto isto, sugere-se a reprodução do trabalho realizado nesta dissertação em formato numérico, de modo a desviar as incertezas e inconclusões e comprovar os resultados obtidos. Como os casos de transição não ficaram bem definidos, seria interessante investir numa pesquisa focada na definição deste intervalo, tanto numérico como experimental. Propõe-se, também, a combinação dos movimentos de translação e rotação e a investigação desse efeito nas esteiras resultantes.

Tal como foi referido no capítulo 3, não é possível afirmar com segurança que as esteiras com jato direcionado para jusante produzam tração. Para tal, sugere-se a integração de sensores de forças na instalação experimental, de forma a confirmar a produção de tração e verificar se existe produção de sustentação. Seria também interessante relacionar a extração de energia com a produção de sustentação.

A existência de flexibilidade nesta dissertação foi uma surpresa, contudo, os resultados obtidos revelaram-se bastante interessantes. Assim sendo, sugere-se a exploração mais aprofundada neste campo e ainda a comparação do desempenho de perfis rígidos com flexíveis.

Referências

- [1] M. F. Platzer, K. D. Jones, J. Young, and J. C. S. Lai, “Flapping-Wing Aerodynamics: Progress and Challenges,” *AIAA J.*, vol. 46, no. 9, pp. 2136–2149, 2008.
- [2] J. Winslow, H. Otsuka, B. Govindarajan, and I. Chopra, “Basic understanding of airfoil characteristics at low Reynolds numbers” (104–105), *Journal of Aircraft*, 55(3), 1050–1061, 2018.
- [3] L. Petricca, P. Ohlckers, and C. Grinde, “Micro- and Nano-Air Vehicles: State of the Art,” *Int. J. Aerosp. Eng.*, vol. 2011, pp. 1–17, 2011.
- [4] R. Shrestha, M. Benedict, V. Hrishikeshavan, and I. Chopra, “Hover Performance of a Small-Scale Helicopter Rotor for Flying on Mars,” *Journal of Aircraft*, vol. 53, no. 4, pp. 1160–1167, 2016.
- [5] S. Ho, H. Nassef, N. Pornsinsirirak, 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.
- [6] H. Tennekes, “The simple science of flight (from insects to jumbo jets),” Boston, MA: MIT Press, 1996.
- [7] M. H. Dickinson, K. G. Göz, “Unsteady aerodynamic performance of model wings at low Reynolds numbers”, *J. Exp. Biol.* 174, 5–64, 1993.
- [8] C. P. Ellington, C. van den Berg, A. P. Willmott and A. L. R. Thomas, “Leading-edge vortices in insect flight”, *Nature* 384, 626–630, 1996.
- [9] F. O. Lehmann, “The mechanisms of lift enhancement in insect flight”, *Naturwissenschaften* 91, 101–122, 2004.
- [10] D. Viieru, J. Tang, Y. Lian, H. Liu and W. Shyy, “Flapping and flexible wing aerodynamics of low reynolds number flight vehicles”, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. AIAA Paper 2006-0503, 2006.
- [11] T. A. Ward, M. Rezadad, C. J. Fearday, and R. Viyapuri, “A review of biomimetic air vehicle”, *International Journal of Micro Air Vehicles*, 7(3), 375–394, 2015
- [12] R. Katzmayr, “Effect of Periodic Changes of Angle of Attack on Behavior of Airfoils,” *NACA TM* 147, 1922.
- [13] G. K. Taylor, R. L. Nudds, and A. L. R. Thomas, “Flying and Swimming Animals Cruise at a Strouhal Number Tuned for High Power Efficiency,” *Nature (London)*, vol. 425, pp. 707–711, 2003.
- [14] J. Young and J. C. S. Lai, “Oscillation frequency and amplitude effects on the wake of a plunging airfoil”, *AIAA Journal*, 42(10), 2042–2052, 2004.
- [15] D. S. B. J. M. Anderson, K. Streitlien and M. S. Triantafyllou, “Oscillating foils of high propulsive efficiency,” *Journal of Fluids Mechanics*, vol. 360, pp. 41–72, 1998.

- [16] E. A. R. Camacho, “Numerical Analysis of a Plunging NACA 0012 Airfoil,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Aeronáutica, Universidade da Beira Interior, 2019.
- [17] H. Liu, S. Ravi, D. Kolomenskiy, and H. Tanaka, “Biomechanics and biomimetics in insect-inspired flight systems”, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1704), 2016.
- [18] W. Birnbaum, “Das ebene Problem des Schlagenden Fluegels,” *Zeitschrift fuer Angewandte Mathematik und Mechanik*, vol. 4, no. 4, pp. 277–292, 1924.
- [19] T. J. Mueller and S. M. Batill, “Experimental Studies of Separation on a Two-Dimensional Airfoil at Low Reynolds Numbers,” *AIAA J.*, vol. 20, no. 4, pp. 457–463, 1982.
- [20] T. von Kármán and J. Burgers, *Aerodynamic Theory: General aerodynamic theory: Perfect fluids*. J. Springer, 1935, no. vo. 2. 5.
- [21] K. D. Jones, C. M. Dohring, and M. F. Platzer, “Experimental and Computational Investigation of the Knoller-Betz Effect,” *AIAA J.*, vol. 36, no. 7, pp. 1240–1246, 1998.
- [22] J. C. S. Lai and M. F. Platzer, “Jet Characteristics of a Plunging Airfoil,” *AIAA J.*, vol. 37, no. 12, pp. 1529–1537, 1999.
- [23] L. T. C. Jones K. D. Lund and M. F. Platzer, “Experimental and computational investigation of flapping wing propulsion for micro air vehicles,” *Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicles*, vol. 195, p. 307–339, 2001.
- [24] J. M. Miao and M. H. Ho, “Effect of flexure on aerodynamic propulsive efficiency of flapping flexible airfoil,” *J. Fluids Struct.*, vol. 22, pp. 401–419, 2006.
- [25] 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.
- [26] K. Ohmi, M. Coutanceau, T. P. Loc and A. Dulieu “Vortex formation around an oscillating and translating airfoil at large incidences,” *J. Fluid Mech*, vol. 211, pp. 37-60, 1990.
- [27] M. V. Ol, B. R. McAuliffe, E. S. Hanff, U. Scholz, and C. Kaehler, “Comparison of Laminar Separation Bubble Measurements on a Low Reynolds Number Airfoil in Three Facilities,” 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, AIAA Paper 2005-5149, Toronto, Canada, 2005.
- [28] W. J. McCroskey, “Unsteady Airfoils,” *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 14, pp. 285–311, 1982.
- [29] C. P. Ellington, “The Novel Aerodynamics of Insect Flight: Applications to Micro-Air Vehicles,” *Journal of Experimental Biology*, vol. 202, no. 23, pp. 3439–3448, 1999.
- [30] D. Rival and C. Tropea, “Characteristics of Pitching and Plunging Airfoils Under Dynamic-Stall Conditions,” *J. Aircr.*, vol. 47, no. 1, pp. 80–86, 2010.

- [31] J. Panda, and K. B. M. Q. Zaman, “Experimental Investigation of the Flowfield on an Oscillating Airfoil and Estimation of Lift from Wake Surveys,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 265, pp. 65–95, 1994.
- [32] 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.
- [33] H. Liu, C. P. Ellington, K. Kawachi, C. van den Berg and A. P. Willmott, “A computational fluid dynamics study of hawkmoth hovering,” *J. Expl Biol.* 201, 461–477, 1998.
- [34] D. Rodrigues, E. Camacho, F. Neves, J. Barata, A. Silva, “Plunging airfoil motion: effects of unequal ascending and descending velocities,” *AIAA*, 2020.
- [35] K. Streitlien, G. S. Triantafyllou and M. S. Triantafyllou, “Efficient foil propulsion through vortex control,” *AIAA J.* 34, 2315–2319, 1996.
- [36] J. Hu, H. Xuan, Y. Yu, and J. Zhang, “Effects of continuously increasing pitching and plunging amplitudes on the aerodynamic forces of flapping airfoils,” *AIP Advances*, 9(8), 2019.
- [37] J. S. Lee, C. Kim, and K. H. Kim, “Design of flapping airfoil for optimal aerodynamic performance in low-reynolds number flows,” *AIAA Journal*, vol. 44, no. 9, pp. 1960–1972, 2006.
- [38] 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.
- [39] S. Ho, H. Nassef, T. N. Pornsin-Sirirak, Y. C. Tai and C. M. Ho, “Flight dynamics of small vehicles”, *Proceedings of the 23rd International Congress on Aerospace Sciences*, Toronto, Canada, September 9–12, 2002.
- [40] Shyy *et al.*, “Computational aerodynamics of low Reynolds number plunging, pitching and flexible wings for MAV applications,” *Acta Mech. Sin.*, vol. 24, pp. 351–373, 2008.
- [41] G. C. Lewing and H. Haj-Hariri, “Modeling thrust generation of a two-dimensional heaving airfoil in a viscous flow,” *J Fluid Mech* , 492:339-62, 2003.
- [42] W. Medjroubi, B. Stoevesandt and J. Peinke, “Wake classification of heaving airfoils using the spectral/hp element method”, *J. Comput. Appl. Math.* 236 (15), 3774–3782, 2012.
- [43] K. B. Lua, T. T. Lim, K. S. Yeo e G. Y. Oo, “Wake-structure formation of a heaving two-dimensional elliptic airfoil”, *AIAA J.* 45 (7), 1571–1583, 2007.
- [44] M. V. Ol, “Vortical structures in high frequency pitch and plunge at low Reynolds number,” *AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, 2007.
- [45] Y. S. Baik, J. Raush, L. Bernal e W. Shyy, “Experimental Study of Governing Parameters in Pitching and Plunging Airfoil at Low Reynolds Number,” *AIAA* 2010-388, 2010.
- [46] Y. S. Baik, I. P. Bernal, K. Grandlund e M. V. Ol, “Unsteady force generation and vortex dynamics of pitching and plunging aerofoils”, *J. Fluid Mech.* 709, 37–68, 2012.

- [47] K. B. Lua, K. C. Lai, T.T. Lim, K. S. Yeo, "On the aerodynamic characteristics of hovering rigid and flexible hawkmoth-like wings," *Experiments in Fluids*, 49, 1263-1291, 2010.
- [48] Y. G. Ryu, J. W. Chang, and J. Chung, "Aerodynamic force and vortex structures of flapping flexible hawkmoth-like wings," *Aerospace Science and Technology*, 56(July), 183-196, 2016.
- [49] R. Unger, M. C. Haupt, P. Horst, and R. Radespiel, "Fluid-structure analysis of a flexible flapping airfoil at low Reynolds number flow," *Journal of Fluids and Structures*, 28, 72-88, 2012.
- [50] A. T. Nguyen, and J. H. Han, "Wing flexibility effects on the flight performance of an insect-like flapping-wing micro-air vehicle," *Aerospace Science and Technology*, 79(June), 468-481, 2018.
- [51] S. Heathcote, Z. Wang, and I. Gursul, "Effect of spanwise flexibility on flapping wing propulsion," *J. Fluids Struct.*, vol. 24, pp. 183-199, 2008.
- [52] S. Heathcote, and I. Gursul, "Flexible flapping airfoil propulsion at low reynolds numbers," *AIAA Journal*, 45(5), 2007.
- [53] J. Pederzani, H. Haj-Hariri, "Numerical analysis of heaving flexible airfoils in a viscous flow," *AIAA J* 2006;44(11):2773-9.
- [54] Q. Zhu, "Numerical simulation of a flapping foil with chordwise or spanwise flexibility," *AIAA J* 2007;45(10):2448-57.
- [55] P. Gopalakrishnan, "Unsteady aerodynamic and aeroelastic analysis of flapping flight", Ph.D. Dissertation, Blacksburg, VA: Department of Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University; 2008.
- [56] L. Zhao, Q. Huang, X. Deng and S. Sane, "The effect of chord-wise flexibility on the aerodynamic force generation of flapping wings: experimental studies," *Proceedings of IEEE international conference on robotics and automation*, p. 4207-12, 2009.
- [57] H. Hui, A. G. Kumar, G. Abate and R. Albertani, "An experimental study of flexible membrane wings in flapping flight", 47th AIAA aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition, AIAA 2009-876, 2009.
- [58] D. K. Kim, J. H. Han and K. J. Kwon, "Wind tunnel tests for a flapping wing model with a changeable camber using macro-fiber composite actuators," *Smart Mater Struct*, 18:024008-1-8, 2009.
- [59] P. Wu, P. Ifju, B. K. Standford, E. Sällström, L. Ukeiley, R. Love, *et al.*, "A multidisplinary experimental study of flapping wing aeroelasticity in thrust production," 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics, and materials conference, AIAA 2009-2413, 2009.

[60] R. B. de S. Lopes, “Estudo dos Padrões de Vorticidade na Esteira de uma Asa em Movimento de Translação: Idealização e Projeção de uma Instalação Experimental,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Aeronáutica, Universidade da Beira Interior, 2018.

[61] D. C. Rodrigues, “Visualização e análise das estruturas presentes na esteira de um perfil NACA0012 em movimento oscilatório vertical,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Aeronáutica, Universidade da Beira Interior, 2020.

[62] P. A. Castro, “Projecto e Instalação de um Túnel de Vento para a Realização do Estudo Experimental da Interação de um Jacto de Parede e uma Camada Limite,” Projeto Final de Engenharia Aeronáutica, Universidade da Beira Interior, 2004.