

**Visualização e análise das estruturas na
esteira de um perfil NACA0012 em
movimento oscilatório vertical**
(Versão final após defesa)

Diana Carvalho Rodrigues

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

Orientador: Professor Doutor André Resende Rodrigues da Silva

agosto de 2020

Dedicatória

“Vamos ser iguais aos Agapórnis, os pássaros do amor, (...) sendo extremamente fiéis (...); vamos esquecer que somos humanos, rivais, (...); e sermos parceiros, livres iguais aos pássaros” – Aimara Schindler

à Piki, a minha agapórnis

Talvez a dedicatória mais “estranha” que já viram.

Agradecimentos

“A águia gosta de pairar nas alturas, acima do mundo, não para ver as pessoas de cima, mas para estimulá-las a olhar para cima.” – Elizabeth Küber Ross

O ser humano é um ser sociável que depende da companhia dos outros para conseguir sobreviver. Cada ser humano é capaz de ser autossuficiente, no entanto, desde o início da espécie que o Homem prefere viver em grupo, pois garante uma maior probabilidade de sucesso na caça, transmite uma maior sensação de segurança e proporciona conforto emocional. Assim, todos nós, enquanto seres sociáveis, estamos em constante evolução interna, sendo que cada experiência e cada amigo nos molda um pouco, ajudando a crescer.

Agradeço a todas as pessoas que contribuíram para este crescimento contínuo ao longo da minha vida. Contudo, existem alguns seres a quem sinto a necessidade de deixar um agradecimento em especial.

À minha família, de sangue e aos que escolhi para pertencerem a ela, pois sem eles não poderia estar aqui. Por todo o “dar nas orelhas”, pelas horas a fazerem de ouvintes dos desabafos nos momentos mais stressantes, por toda a compreensão, motivação, força, apoio, preocupação e também distração: à minha mãe, ao meu pai, à Sof, aos meus avós, Emília e Manel, João e Júlia e Luísa e Pinto (vou sentir falta do olhar de quem pergunta “Mas afinal para quando é isso!?”), aos “meus” padrinhos, Gracinda e Rafa, e, claro à minha irmã, Maf, que para além de me aturar ao longo de todo o curso, também teve a paciência de ser a *designer* das figuras apresentadas na dissertação. Por todas as risadas e por estarem sempre lá, nos melhores e piores momentos, a todos os meus amigos, em especial aos que me acompanharam ao longo destes anos de curso, pois uma caminhada torna-se menos penosa quando temos alguém para partilhar, tanto as horas de desespero como as de alegria. Obrigada por dividirem tantas recordações comigo e “Um brinde à Covilhã que brindou a nós!” e que me apresentou tantas pessoas fantásticas que vou levar para a vida!

Ao Sr. Rui, do Departamento de Ciências Aeroespaciais, que nunca me “deixou na mão”, estando sempre pronto e disponível a me “desenrascar” e ajudar. Ao Sr. João do

Departamento de Eletromecânica e ao Sr. Nuno do FabLab|UBI que também me ajudaram quando precisei.

A todos os membros do AEROG por todo o companheirismo, integração no grupo e por todos os momentos que me proporcionaram, quer de aprendizagem como de descontração; ao Doutor Fernando Neves pelas conversas interessantíssimas sobre o tema e sempre se ter demonstrado disponível para colaborar com a minha investigação, e, em especial ao Camacho. Ao Camacho tenho muito a agradecer, tanto profissionalmente como pessoalmente, uma vez que, desde o início confiou em mim e mostrou-me que eu era capaz; deu-me força para não desmotivar nem nunca desistir, mesmo nos momentos mais complicados; transmitiu-me uma inúmera quantidade de conhecimento e, além disso, instigou em mim a curiosidade de querer saber ainda mais. Ele, com a sua energia positiva, a sua vontade sempre de querer saber mais, tornou-se para mim em um exemplo a seguir, uma âncora, uma verdadeira águia, e ensinou-me o real significado de companheirismo, estando sempre ali para me ajudar ou apoiar.

E, por último, mas não menos importante, pois sem a sua participação esta etapa não seria possível, ao meu orientador Professor Doutor André Silva. Obrigada por, mesmo antes de ser meu orientador, alimentar o meu desejo por estudar esta área, de que tanto gosto, a biomimética, e ter tornado possível que realizasse a dissertação neste âmbito. Agradeço também por todo o conhecimento transmitido, pela confiança, paciência e compreensão, assim como pelo incentivo a ultrapassar dificuldades e de fazer sempre mais e melhor. Obrigada por me ter acompanhado nesta jornada.

Obrigada a todos!

Diana Carvalho Rodrigues

Resumo

A biomimética é uma área da ciência que se dedica ao estudo da natureza, tendo por base a sua imitação. Os perfis oscilantes, na natureza, apresentam um alto desempenho propulsivo e, por isso, o ser humano tem desenvolvido um grande interesse nos estudos sobre estas temáticas. Desta forma, este trabalho, no âmbito dos perfis oscilantes, teve por base a visualização, bidimensional, das esteiras libertadas por um perfil NACA0012 sujeito a um movimento puramente vertical, periódico, não sinusoidal, simétrico e assimétrico, a diferentes combinações de velocidade, amplitude e frequência. Os resultados permitiram concluir que o surgimento de VBAs, assim como o tipo de esteira libertada por um perfil oscilante, dependem essencialmente dos parâmetros h e k . Contudo, a influência de cada parâmetro nunca é independente, sendo que os parâmetros apenas ditam a tendência do tipo de estruturas libertadas pelo perfil, mas, de forma isolada, não são capazes de afirmar essa mesma tendência.

Palavras-chave

Biomimética; Perfis oscilantes; Esteira; VBF; VBA.

Abstract

Biomimetics is an area of science dedicated to the study of nature, based on its imitation. The flapping airfoils, in nature, show high propulsive performance and, therefore, the human being has developed a great interest in studying these themes. Thus, this work, within the scope of flapping airfoils, was based on the two-dimensional visualization of the wakes created by a NACA0012 airfoil, subjected to a periodic, non-sinusoidal, symmetric and asymmetric plunging motion, at different combinations of wind speed, amplitude and frequency. The results show that the appearance of LEVs, as well as the type of wake release by a flapping airfoil, depends essentially on the parameters h and k . However, the influence of each parameter is not independent, since the parameters only dictate the tendency of the type of structure released by the airfoil, but they cannot state that same tendency in an isolated way.

Keywords

Biomimetics; Flapping airfoils; Wake; LEV; TEV.

Índice

Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Biomimética: passado, presente e futuro.....	2
1.2 Perfis oscilantes	4
1.2.1 Tridimensionalidade simplificada para bidimensionalidade	5
1.2.2 Parâmetros Relevantes	8
1.2.3 Aplicabilidades.....	12
1.3 Pergunta de investigação	29
1.4 Estrutura da dissertação.....	30
Capítulo 2 Metodologia	31
2.1 Instalação experimental	31
2.1.1 Túnel de vento	32
2.1.2 Micromanómetro	32
2.1.3 Câmara de alta velocidade	34
2.1.4 Sistema de fumo	34
2.1.5 Laser.....	35
2.1.6 Asa e motor	35
2.2 Movimento da asa	37
Capítulo 3 Resultados e Discussão	41
3.1 Visualização	42
3.1.1 $U_{\infty} = 0,25 \text{ m/s}$	42
3.1.2 $U_{\infty} = 0,50 \text{ m/s}$	43
3.1.3 $U_{\infty} = 1,00 \text{ m/s}$	43
3.2 Influência dos diversos parâmetros (Re , k , h e St)	45
3.2.1 $Re = 1,5 \times 10^3$	48
3.2.2 $Re = 3,1 \times 10^3$	53
3.2.3 $Re = 6,3 \times 10^3$	58
3.2.4 Comparação entre os Re estudados	62
3.3 Assimetria do Movimento	69
3.4 Sumário	79
Capítulo 4 Conclusão	81
Referências.....	85

Lista de Figuras

Figura 1 a) Movimento de <i>flapping</i> ; b) Movimento vertical (ângulo de ataque do perfil é constante ao longo de todo o movimento); c) Movimento rotacional (variação do ângulo de ataque do perfil); d) Movimento horizontal (semelhante ao movimento vertical, alterando apenas o eixo de atuação).	1
Figura 2 Exemplos bio-inspirados: a) <i>Eastgate Center</i> ; b) Comboio de alta velocidade; c) <i>Winglet</i>	3
Figura 3 Efeito de Knoller-Betz.	6
Figura 4 Esteiras: a) Estrada de vórtices de von Kármán (produtora de resistência ao avanço); b) Estrada de vórtices de von Kármán invertida (produtora de tração).	7
Figura 5 Estudos de perfis oscilantes em diferentes categorias. Adaptado de [25].	12
Figura 6 Esquema da instalação. Adaptado de [93].	31
Figura 7 Túnel de vento. Retirado de [2].	32
Figura 8 a) Micromanómetro: <i>FCO12 – Micromanometer</i> ; b) Anenómetro.	33
Figura 9 Relação entre a velocidade registada na zona de contração e a velocidade registada à saída do túnel de vento.	33
Figura 10 a) Câmara de alta velocidade: <i>Photron FASTCAM mini UX50</i> ; b) <i>Photron FASTCAM Viewer</i>	34
Figura 11 a) Máquina de fumo: <i>Techno-Fog Jem</i> ; b) Perfil de libertação de fumo; c) Líquido <i>Regular DJ Fluid</i>	35
Figura 12 Laser. Retirado de [2].	35
Figura 13 Asa utilizada no estudo – Perfil alar: NACA0012.	36
Figura 14 a) Motor e atuador linear; b) <i>Software MEXE02</i>	36
Figura 15 Perfis de movimento: movimento simétrico: a) Gráfico de posição (linha a cheio) sobreposto a uma função seno (linha a tracejado); b) Gráfico de velocidade (linha a cheio) sobreposto à derivada da função seno (linha a tracejado); movimento assimétrico: c) Gráfico de posição; d) Gráfico de velocidade.	39
Figura 16 Esteira libertada em função da velocidade e da fração de período de movimento.	44
Figura 17 Tipo de esteira em função de k e h para $Re = 1,5 \times 10^3$	47
Figura 18 Tipo de esteira em função de k e h para $Re = 3,1 \times 10^3$	47
Figura 19 Tipo de esteira em função de k e h para $Re = 6,3 \times 10^3$	48
Figura 20 Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de k e h , a St e Re constante ($Re = 1,5 \times 10^3$).	51
Figura 21 Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de h , a k constante para $Re = 1,5 \times 10^3$	52
Figura 22 Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de k , a h constante para $Re = 1,5 \times 10^3$	53
Figura 23 Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de k e h , a St e Re constante ($Re = 3,1 \times 10^3$).	56
Figura 24 Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de h , a k constante para $Re = 3,1 \times 10^3$	57
Figura 25 Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de k , a h constante para $Re = 3,1 \times 10^3$	58
Figura 26 Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de k e h , a St e Re constante ($Re = 6,3 \times 10^3$).	60

Figura 27 Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de h , a k constante para $Re = 6,3 \times 10^3$.	61
Figura 28 Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de k , a h constante para $Re = 6,3 \times 10^3$.	62
Figura 29 Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de Re para $St = 0,17$.	64
Figura 30 Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de Re para $St = 0,08$.	65
Figura 31 Esteira libertada a diferentes k , h e Re , mas a St constante.	67
Figura 32 Esteira libertada a diferentes h , St e Re , mas a k constante.	68
Figura 33 Tipo de esteira em função de k e h para $Re = 1,5 \times 10^3$ em movimento assimétrico.	70
Figura 34 Tipo de esteira em função de k e h para $Re = 1,5 \times 10^3$ em movimento simétrico e assimétrico.	71
Figura 35 Esteira libertada a diferentes k e St , mas a h constante, em movimento assimétrico.	73
Figura 36 Esteira libertada a diferentes k e h , mas a St constante, em movimento assimétrico.	74
Figura 37 Esteira libertada a diferentes h e St , mas a k constante, em movimento assimétrico.	75
Figura 38 Esteira libertada em função da fração de assimetria e da fração de período de movimento, para $St = 0,17$.	77
Figura 39 Esteira libertada em função da fração de assimetria e da fração de período de movimento, para $St = 0,06$.	78

Lista de Tabelas

Tabela 1 Referente ao artigo " <i>Experimental Studies of Separation on a Two-Dimensional Airfoil at Low Reynolds Number</i> ", 1982.	15
Tabela 2 Referente ao artigo " <i>Propulsive Vortical Signatures of Plunging and Pitching Airfoils</i> ", 1988.	16
Tabela 3 Referente ao artigo " <i>Vortex formation around an oscillating and translating airfoil at large incidences</i> ", 1990.	17
Tabela 4 Referente ao artigo " <i>A Computational Study on the Dynamic Stall of Flapping Airfoil</i> ", 1998.	18
Tabela 5 Referente ao artigo " <i>Oscillating foils of high propulsive efficiency</i> ", 1998.	19
Tabela 6 Referente ao artigo " <i>Modelling thrust generation of a two-dimensional heaving airfoil in a viscous flow</i> ", 2003.	20
Tabela 7 Referente ao artigo " <i>Oscillation Frequency and Amplitude Effects on the Wake of a Plunging Airfoil</i> ", 2004.	21
Tabela 8 Referente ao artigo " <i>Vortex Lock-In Phenomenon in the Wake of a Plunging Airfoil</i> ", 2007.	22
Tabela 9 Referente ao artigo " <i>Wake-Structure Formation of a Heaving Two-Dimensional Elliptic Airfoil</i> ", 2007.	23
Tabela 10 Referente ao artigo " <i>Numerical Study of Asymmetric Effect on a Pitching Foil</i> ", 2009.	24
Tabela 11 Referente ao artigo " <i>Characteristics of Pitching and Plunging Airfoils Under Dynamic-Stall Conditions</i> ", 2010.	25
Tabela 12 Referente ao artigo " <i>Asymmetric Sinusoidal Motion Effect on Aerodynamics of a Plunging Airfoil</i> ", 2013.	26
Tabela 13 Referente ao artigo " <i>Effects of continuously increasing pitching and plunging amplitudes on the aerodynamic forces of flapping airfoils</i> ", 2019.	27
Tabela 14 Referente ao artigo " <i>Swimmers' wale structures are not reliable indicators of swimming performance</i> ", 2020.	28
Tabela 15 Condições de teste.	42
Tabela 16 Condições de teste no estudo da influência dos parâmetros Re , k , h e St	46
Tabela 17 Condições de teste do movimento assimétrico.	69

Nomenclatura

a	Aceleração	$m \cdot s^{-2}$
a_{desc}	Tempo de aceleração na descida	s
a_{sub}	Tempo de aceleração na subida	s
A	Amplitude de oscilação vertical	m
c	Corde aerodinâmica	m
d_{desc}	Tempo de desaceleração na descida	s
d_{sub}	Tempo de desaceleração na subida	s
f	Frequência de oscilação	Hz
f_{lv}	Frequência de libertação de vórtices	Hz
F_N	Força normal	N
F_S	Força de sustentação	N
F_T	Força de tração	N
h	Amplitude adimensional	-
k	Frequência reduzida	-
l	Comprimento característico	m
Ma	Número de Mach	-
OS	<i>Operating Speed</i> (velocidade de operação)	$m \cdot s^{-1}$
Re	Número de Reynolds	-
St	Número de Strouhal característico do movimento	-
St_e	Número de Strouhal característico do escoamento	-
t	Tempo	s
t_a	Fração de assimetria	-
T	Período	s
U_{aprox}	Velocidade de aproximação	$m \cdot s^{-1}$
U_∞	Velocidade de escoamento não perturbado	$m \cdot s^{-1}$
v	Velocidade de oscilação puramente vertical	$m \cdot s^{-1}$
W	Dimensão da esteira característica	m
y	Posição vertical	m
α	Ângulo de ataque	$^\circ$
α_{ef}	Ângulo de ataque efetivo	$^\circ$
μ	Viscosidade dinâmica	$Pa \cdot s$
ρ	Massa volúmica	$kg \cdot m^{-3}$
ϕ	Ângulo de fase	$^\circ$
$_0$	Valores iniciais	-
$_{desc}$	Relativo à descida	-
$_{sub}$	Relativo à subida	-

Lista de Acrónimos

ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
AEROG	<i>Aeronautics and Astronautics Research Center</i>
AIAA	<i>American Institute of Aeronautics and Astronautics</i>
FabLab UBI	Laboratório de Fabricação da Universidade da Beira Interior
ICEUBI	<i>International Congress on Engineering - Engeneering for Evolution</i>
LEV	<i>Leading-Edge Vortex</i> (vórtice de bordo de ataque)
MVA	Micro Veículo Aéreo
NACA	<i>National Advisory Committee for Aeronautics</i>
TEV	<i>Trailing-Edge Vortex</i> (vórtice de bordo de fuga)
VBA	Vórtice de Bordo de Ataque
VBF	Vórtice de Bordo de Fuga
VIPD	Velocimetria por Imagem de Partículas Digital

Capítulo 1 | Introdução

“A genialidade do homem faz várias invenções, abrangendo com vários instrumentos o único e mesmo fim, mas nunca descobrirá uma invenção mais bela, mais econômica ou mais direta que a da natureza, pois nela nada falta e nada é supérfluo.” – Leonardo Da Vinci

Desde sempre que o ser humano observa a natureza de forma a aprender com ela, sempre com o intuito de a replicar. O sonho de voar não é diferente, proveio da observação de animais voadores, independentemente da sua escala de comprimento. No entanto, no decorrer da história, a solução encontrada por *Sir* George Cayley, para a realização deste sonho, passou por separar a força propulsiva da força sustentadora, ou seja, um sistema para fornecer a força propulsiva necessária para o voo (os motores), e uma estrutura para criar a força sustentadora (as asas). Contudo, na natureza não existe esta distinção, uma vez que ambas as forças têm origem, essencialmente, num único componente, nas asas, através do movimento de *flapping*. Este movimento realizado pelos animais é bastante complexo e simultaneamente ultranatural e, tal como o movimento de locomoção do ser humano, este movimento biológico é complicado de replicar de forma natural. Com o intuito de compreender melhor os fenómenos existentes no movimento de *flapping* (figura 1.a) por norma, divide-se este movimento em três tipos: movimento vertical (*plunging*) (figura 1.b), movimento de rotação (*pitching*) (figura 1.c) e movimento horizontal (*surging*) (figura 1.d).

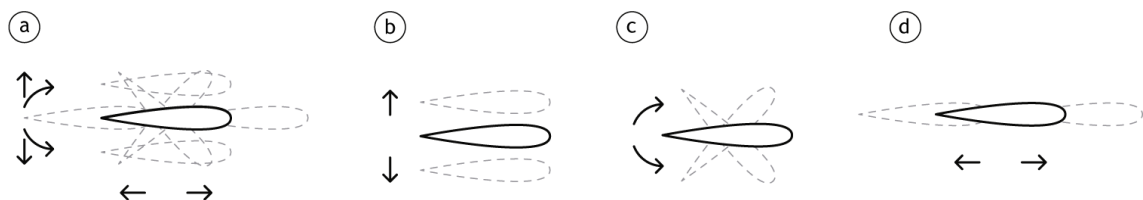


Figura 1 | a) Movimento de *flapping*; b) Movimento vertical (ângulo de ataque do perfil é constante ao longo de todo o movimento); c) Movimento rotacional (variação do ângulo de ataque do perfil); d) Movimento horizontal (semelhante ao movimento vertical, alterando apenas o eixo de atuação).

Este trabalho dedica-se ao estudo do movimento vertical, com o intuito de identificar os fenómenos a que uma asa batidora está sujeita quando oscila num movimento periódico, a diferentes amplitudes e frequências.

A natureza, ao longo de todos os anos, tem-se vindo a aperfeiçoar, permitindo apenas a sobrevivência dos mais fortes. Desta forma, apresenta-se como sendo deveras mais eficaz do que qualquer invenção que o Homem possa criar, pois ela apenas permite a continuidade das melhores soluções, de e para cada espécie. Assim, porque não aprender com ela?

1.1 | Biomimética: passado, presente e futuro

A biomimética é uma área da ciência que se dedica ao estudo da natureza, tendo por base a sua imitação. O termo provém do grego, *bios* de vida e *mimesis* de imitar [1], [2]. Esta área da ciência surge de um desejo profundo de o Homem criar réplicas perfeitas da natureza desenvolvendo novas tecnologias com base nos sistemas biológicos.

Acredita-se que o desejo de voar proveio da inspiração na natureza, sendo encontradas diversas referências na mitologia e na religião, através de mitos, lendas e ilustrações de homens voando com asas [3], [4]. No século XVI, Leonardo da Vinci dedicava-se a observar a natureza, de forma a aprender com ela, aplicando este conhecimento a todos os desafios com que se deparava no seu dia a dia [5]–[7]. Este interesse pela imitação do reino animal tem sido cada vez mais um alvo notório no ramo da engenharia. Juntamente com os avanços tecnológicos alcançados, tem-se tornado possível aproximar os protótipos a cópias quase perfeitas da natureza, permitindo assim uma melhor compreensão deste reino. Desta forma, é fundamental compreender como a própria natureza se comporta, como os animais controlam os seus corpos e como funcionam os seus sistemas sensoriais, com o objetivo de se conseguir criar protótipos inteligentes e controláveis. A interligação biologia-máquina é obrigatória, possibilitando não só a cópia visual, mas também a otimização dos sistemas como um todo [8].

No campo da Aeronáutica existem várias fontes de inspiração: diversas espécies de insetos, de pássaros e de morcegos, que foram aperfeiçoadas, ou melhor, que sofrem uma constante otimização, pela natureza, ao longo de toda a evolução. Estas fontes de inspiração atuam essencialmente em regimes de baixo número de Reynolds, carecendo de uma maior atenção no seu estudo, de forma a compreender melhor como se comportam as leis da física nestas condições [9]–[14]. Além disso, ter a natureza como base é possivelmente uma vantagem em todos os regimes de voo: desde o inseto voador mais pequeno até à maior baleia, todos se “auto-otimizam” independentemente da gama de número de Reynolds em que atuam. Este processo de otimização é algo contínuo ao longo do tempo, uma vez que a natureza está em constante alteração e evolução. Assim, uma das possíveis soluções para os diversos problemas de Engenharia passa por responder à pergunta “O que faria a natureza?”, tornando-a num mestre, num modelo e numa medida, que o Homem deve seguir [1], [15]. Por outras palavras, o Homem deve aproveitar a “sabedoria” e a experiência da natureza tentando replicar os modelos naturais para solucionar os seus problemas, uma vez que ao longo dos milhões de anos a evolução só permitiu a sobrevivência do que se demonstra mais eficaz.

Nos dias de hoje, inúmeros são os exemplos nos quais o Homem procurou uma solução na natureza. Na área da arquitetura, o foco tem-se desviado dos códigos estilísticos em busca de soluções mais sustentáveis. Um grande exemplo é o edifício *Eastgate Center* (figura 2.a) desenvolvido por Mick Pearce, em 1991, no Zimbabué. Mick Pearce deparou-se com o desafio de

construir o maior edifício do país com a capacidade de se refrescar sozinho. Para concretizar o seu objetivo, este arquiteto inspirou-se nos grandes ninhos de térmitas, que, apesar de parecerem sólidos, estão cheios de canais para que o ar circule livremente e, conseqüentemente, a temperatura se mantenha sempre constante. Desta forma, o *Eastgate Center* foi contruído com passagens internas de ar, com o intuito de permitir a circulação do ar e, através de mecanismos de convecção, a sua temperatura interna se permanece sempre agradável [16], [17]. Outro exemplo bastante conhecido é o melhoramento da frente dos comboios de alta velocidade (figura 2.b). Estes comboios tinham problemas na passagem por túneis devido à sua elevada velocidade, o que provocava uma compressão das ondas sonoras, causando demasiadas vibrações e poluição sonora. Para combater este problema, os engenheiros inspiraram-se no bico dos Guarda-Rios, pois a anatomia do seu bico permite-lhes entrar num meio diferente a altas velocidades, com baixa produção de som e vibração. A replicação do formato do bico destas aves piscatórias permitiu que os comboios de alta velocidade se tornassem, não só mais silenciosos, como também mais rápidos e económicos [1], [18]. As *winglets* (figura 2.c) são um exemplo de aplicabilidade da biomimética no campo da aeronáutica. Estas são inspiradas nas asas dos pássaros de maior envergadura, que com as suas penas reduzem os efeitos dos vórtices de ponta de asa, removendo energia deles. Estas diminuem o tamanho dos vórtices de ponta de asa e aumentam a eficiência aerodinâmica do voo.



Figura 2 | Exemplos bio-inspirados: a) *Eastgate Center*; b) Comboio de alta velocidade; c) *Winglet*.

A indústria aeronáutica tem-se deparado com o desafio de se tornar mais amiga do ambiente. Os novos projetos da *Airbus* têm tido como fonte de inspiração a natureza, desde o estudo do voo de diferentes tipos de pássaros até aos movimentos que os tubarões executam, de forma a procurar soluções mais sustentáveis, visando tornar as aeronaves mais leves, rápidas e eficientes em termos de consumo de combustível. Alguns exemplos destes projetos são: o *fello'fly*, inspirado no voo em V dos gansos que permite a poupança de energia, reduzindo o consumo de combustível e as emissões de CO₂ [19]; e o *Sharklet retrofit*, inspirado nas barbatanas dorsais dos tubarões e, que funcionando de forma semelhante à *winglet*, reduzem o tamanho do vórtice de ponta de asa e, conseqüentemente, a resistência induzida [4].

1.2 | Perfis oscilantes

Trabalhos no âmbito dos perfis oscilantes são de fulcral interesse para estudos sobre vibrações de asas de aeronaves, pás de rotores de helicópteros, turbinas eólicas, aeronaves de modelo livre, pás de turbomáquinas, e criação de tração e sustentação por parte de MVAs [20]–[22].

Em 1924, Birnbaum [23], [24] foi o primeiro a identificar os perfis oscilantes como novas hélices promissoras [25]. Desde essa altura, este tipo de problema tem sido alvo quer de estudos numéricos, quer experimentais, com o intuito de compreender: 1) a dinâmica das esteiras e os vórtices que nelas se formam; 2) o fenómeno da perda dinâmica; 3) os detalhes dos sistemas de propulsão dos animais que utilizam o mecanismo de *flapping* como meio de locomoção; 4) a forma como governam o escoamento que os rodeia, controlando a separação da camada limite [22].

Os perfis oscilantes são encontrados na natureza com bastante facilidade, uma vez que o mecanismo de *flapping* é utilizado pelos animais como meio de propulsão: os animais voadores utilizam este mecanismo para a produção de sustentação e de tração, enquanto que os nadadores o utilizam essencialmente para a produção de tração (e criação de forças para a execução de manobras) [14], [25], [26]. Devido ao alto desempenho propulsivo demonstrado pelas asas batedoras na natureza [26], o ser humano, cada vez mais, tem estudado estes perfis e a sua aplicabilidade nos desafios que surgem no mundo de hoje, tais como: 1) formas de locomoção mais económicas; 2) réplica da natureza com fins de espionagem (num aspeto futurista); 3) recolha de energia através do próprio movimento de oscilação [9], [10], [25]. No entanto, grande parte destas aplicabilidades, assim como a maior parte dos exemplos encontrados na natureza, atuam num regime de número de Reynolds muito mais baixo do que se encontra na aeronáutica tradicional e, devido à mecânica instável que dificulta a compreensão deste problema, as regras clássicas da aerodinâmica, da física e de controlo conhecidas devem ser analisadas de um ponto de vista adequado a estas condições [2], [14].

Os investigadores concluíram que é necessário dispensar tempo para o estudo dos fenómenos aerodinâmicos presentes nas esteiras de asas oscilantes, pois a teoria aplicada à aerodinâmica convencional, ou seja, dedicada a aeronaves de asa fixa e a condições de escoamento permanente, não é capaz de explicar a produção de grandes valores de sustentação em asas de pequenos insetos [27]. Desta forma, os investigadores têm dedicado o seu tempo na realização de estudos em condições de baixos números de Reynolds com o intuito de se conseguir melhorar, não só o desempenho das operações a baixas velocidades e o projeto dos veículos pilotados remotamente, mas também as pás dos motores de turbina e as hélices a altas velocidades [20].

Esta gama de número de Reynolds acarreta diversos problemas aerodinâmicos relacionados com o desenvolvimento da camada limite, uma vez que esta, quando sujeita a gradiente de pressão

adverso, tem a tendência de se separar e, se o gradiente de pressão for muito forte, a formar bolhas de separação [20], [28]. Tanto a camada limite, como a bolha de separação são influenciadas por diversos fatores como o ângulo de ataque do perfil, a sua rugosidade, a espessura da própria camada limite e o nível de turbulência do escoamento não perturbado [20].

Apesar de na aviação convencional a separação não representar algo positivo, e, por tal, os vórtices de bordo de ataque serem entendidos como desvantajosos, nos baixos números de Reynolds estes têm-se mostrado colaborantes com a criação de tração [29]. A formação desta separação e o atraso da sua convecção pode também contribuir para o aumento de sustentação [28], [30]. No entanto, existe alguma controvérsia sobre este aumento de sustentação, por parte de um vórtice de bordo de ataque, no caso tridimensional [30]. Este vórtice dá origem a uma zona de baixa pressão que, empiricamente, poderia resultar num aumento de sustentação e tração. Contudo, algumas condições têm que ser garantidas: o vórtice tem que manter uma alta velocidade de fluxo axial no seu núcleo; tem de se manter estável e agarrado à asa; e, ao separar-se, tem que se conectar a um vórtice de ponta de asa [30].

1.2.1 | Tridimensionalidade simplificada para bidimensionalidade

O problema dos perfis oscilantes tem se demonstrado deveras complexo, uma vez que envolve, simultaneamente, diversos parâmetros e efeitos, como, por exemplo, efeitos tridimensionais, flexibilidade, efeitos do número de Reynolds e parâmetros aerodinâmicos (sustentação, tração e eficiência propulsiva) [25]. Assim, os investigadores necessitaram de simplificar os seus trabalhos para estudos bidimensionais, desprezando, numa fase inicial, os efeitos tridimensionais intrínsecos ao problema. Desta forma, surgiram os primeiros trabalhos na área com foco apenas nos momentos, na geração de propulsão e nas forças de sustentação, tração e resistência [25].

Knoller [31] e Betz [32] foram os primeiros a explicar os mecanismos de geração de tração de uma asa que oscila verticalmente. Os autores supracitados desenvolveram *per si* os seus estudos, no entanto, ambos concluíram que o ângulo entre a linha da corda da asa e o escoamento de aproximação varia, periodicamente, consoante as fases do movimento, mesmo que o ângulo de ataque do perfil seja mantido constante, isto acontece devido à própria oscilação do perfil, dando origem a um novo parâmetro - o ângulo de ataque efetivo. Este novo parâmetro, que varia ao longo do tempo, dá origem a uma força aerodinâmica normal ao escoamento de aproximação, que pode ser decomposta numa força de tração e numa de sustentação [14], como mostrado na figura 3. Esta força aerodinâmica, tal como o ângulo de ataque efetivo, sofre oscilações ao longo do movimento, o que não facilita o estudo do problema dos perfis oscilantes [33]. Este mecanismo de produção de tração foi designado por efeito de Knoller-Betz, tendo sido verificado experimentalmente por Katzmayer em 1922 [34]. Ober [35] inspirou-se no trabalho experimental de Katzmayer e forneceu explicações teóricas, baseados em cálculos simples, a este estudo [14].

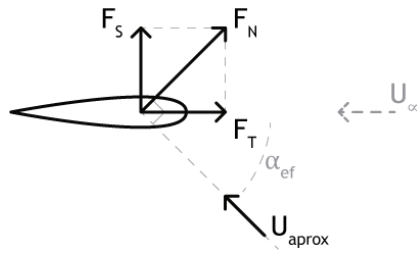


Figura 3 | Efeito de Knoller-Betz.

No entanto, este efeito de Knoller-Betz apenas teve por base o movimento vertical da asa, desprezando a vorticidade libertada no escoamento [36]. Pelo teorema de Kelvin e Helmholtz¹, o perfil deverá libertar na sua esteira uma circulação equivalente, mas de sinal oposto, à circulação em torno do perfil, que é alterada devido ao movimento contínuo do perfil e à criação de sustentação por parte do mesmo.

Em 1935, von Kármán e Burgers [37] foram os primeiros a explicar teoricamente a produção de resistência e de sustentação, através da observação das estruturas libertadas na esteira de um perfil e da respetiva orientação dos vórtices, para baixos números de Reynolds. Na figura 4.a observa-se uma típica estrada de vórtices de von Kármán, ou seja, uma estrada produtora de resistência ao avanço, que indica um défice de momento [14]. A partir de uma certa frequência, amplitude e/ou velocidade de batimento surge uma estrada de vórtices de von Kármán invertida (figura 4.b). Esta estrada é também designada por estrada produtora de tração, uma vez que os vórtices libertados pelo bordo de fuga induzem um excesso de quantidade de movimento na esteira, ou, por outras palavras, induzem velocidade, sendo que a média por período de oscilação corresponde a um fluxo semelhante ao de um jato, que, pela terceira lei de Newton, dá origem a uma força propulsora [14], [26], [36].

¹ O teorema de Kelvin, ou 4º teorema de Helmholtz, é um teorema de conservação que fala sobre a variação da circulação das partículas ao longo do tempo, afirmando que “em condições de fluido perfeito (...), a circulação em torno de um qualquer circuito material se conserva constante ao longo do escoamento”, por outras palavras, “o fluxo de vorticidade através de uma qualquer superfície material se mantém constante ao longo do tempo (...) a vorticidade é convectada com o fluido” [47].

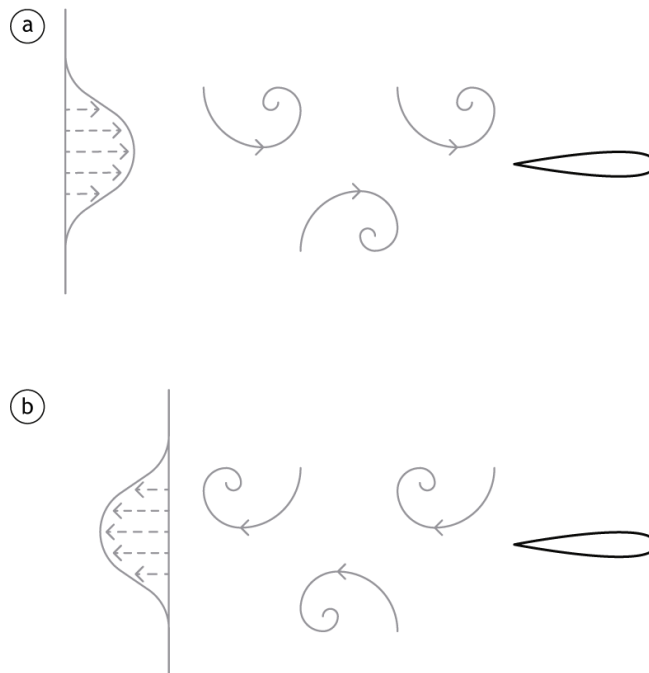


Figura 4 | Esteiras: a) Estrada de vórtices de von Kármán (produtora de resistência ao avanço); b) Estrada de vórtices de von Kármán invertida (produtora de tração).

Diversos autores, como Bratt [38], Wood e Kirmani [39], Freymuth [40], Koochesfahani [41], Jones *et al.* [42], [43], e Lai e Platzer [44] confirmaram, experimentalmente, as teorias de von Kármán e Burgers. Os trabalhos experimentais bidimensionais realizados por estes autores demonstram que, consoante a amplitude e a frequência de batimento de uma asa, esta é capaz de produzir tração, esteja sujeita a uma oscilação puramente vertical ou rotacional [14]. De uma forma resumida, pode-se dizer que a formação dos vórtices em torno e libertados na esteira de um perfil oscilante está relacionada com as condições do escoamento, dependendo essencialmente da amplitude e da frequência a que este oscila. Consequentemente, estes parâmetros também influenciam a criação de sustentação e tração por parte do perfil, uma vez que ditam o tipo de esteira libertada pelo perfil (produtora de resistência, neutra² ou produtora de tração) [21], [22].

Como referido anteriormente, a maior parte dos trabalhos dedica-se ao estudo meramente bidimensional, desprezando os efeitos tridimensionais. No entanto, os estudos bidimensionais não conseguem representar, na totalidade, os verdadeiros mecanismos físicos presentes na

² Entende-se por estrada neutra (ou de transição) aquela em que o derramamento da vorticidade acontece na linha central da oscilação. Os vórtices são libertados aos pares, um no sentido horário e outro no sentido anti-horário, sobre a mesma linha, o que resulta no anulamento um do outro. Desta forma, esta esteira é característica de uma força propulsiva nula, ou seja, não é produzida nem resistência nem tração [2], [21].

natureza, uma vez que nesta são os efeitos tridimensionais que predominam. Desta forma, apesar dos diversos esforços e estudos dedicados a esta área, os mecanismos físicos que comandam nos regimes destes problemas ainda não são suficientemente compreendidos [25]. Quando se entra na tridimensionalidade do problema, são adicionados outros parâmetros que influenciam o estudo, como por exemplo: a forma da ponta de asa, a dimensão da envergadura e a razão de aspecto. Com a tridimensionalidade aparecem os vórtices de ponta de asa e ao longo da envergadura que influenciam as estruturas gerais dos vórtices, tornando-as muito mais complexas [45], [46].

1.2.2 | Parâmetros Relevantes

Como já referido, os perfis oscilantes têm-se revelado complexos. Uma das grandes razões é a quantidade de parâmetros pelos quais são governados. Estes podem ser divididos em 4 categorias: 1) parâmetros do escoamento, todos os parâmetros que dizem respeito às propriedades do fluido, como a velocidade do escoamento não perturbado e o número de Reynolds; 2) parâmetros geométricos, os que indicam a forma do perfil, por exemplo a dimensão da corda, a forma do perfil em si e, no caso tridimensional, a envergadura; 3) parâmetros cinemáticos, os que descrevem o movimento do perfil, tal como o número de Strouhal e a frequência reduzida; 4) parâmetros de desempenho, que elucidam acerca da eficiência e do ganho de energia do perfil. Os parâmetros cinemáticos destacam-se por influenciarem as estruturas que surgem na esteira do perfil, assim como as forças que este produz [25].

O número de Reynolds é um número adimensional que caracteriza o escoamento, sendo dependente do problema. Corresponde à razão entre as forças de inércia e as forças de atrito viscoso, por outras palavras, é a razão entre os efeitos de transporte convectivo e o difusivo de quantidade de movimento, sendo definido como:

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} l}{\mu}$$

onde, U_{∞} diz respeito à velocidade do escoamento de aproximação ou escoamento não perturbado, l define-se como sendo o comprimento característico do problema e ρ e μ correspondem, respetivamente, à massa volúmica e à viscosidade dinâmica do fluido [47]. Entende-se por transporte convectivo a interação macroscópica do fluido, associada ao campo de velocidades nele imposto, ou seja, está diretamente relacionado com a inércia do fluido. Por outro lado, a difusão das propriedades relaciona-se com a viscosidade do meio, ou seja, a informação é transmitida através do choque das próprias moléculas, estando dependente da interação molecular das mesmas.

Como referido anteriormente, o número de Reynolds depende do problema em questão. Isto significa que para o mesmo valor de Re pode ocorrer uma situação em que este é considerado baixo e outra, totalmente distinta, em que o mesmo é considerado alto. No entanto, de uma forma geral, consegue-se distinguir estes dois conceitos. Baixos números de Reynolds são associados a

fenómenos laminares, tipicamente permanentes, organizados e previsíveis. Nestas condições, o termo da viscosidade comanda, sendo desprezáveis os efeitos convectivos e temporais [14]. Contrariamente, altos números de Reynolds são caracterizados por fenômenos turbulentos, caóticos, transientes, e, por isso, correspondem essencialmente à natureza. Desta forma, percebe-se facilmente que a definição de altos ou baixos números de Reynolds é subjetiva e depende dos fenômenos visualizados e das condições de cada problema, sendo também dependente do comprimento característico selecionado.

Nos diversos trabalhos realizados sobre perfis oscilantes, a gama de Re estudada é grande, variando entre 10^2 e 10^7 [25]. Na natureza, as estratégias utilizadas pelos pássaros, em altos números de Reynolds são bastante diferentes das dos insetos em baixos números de Reynolds e, conseqüentemente, noutras condições de voo [29]. Similarmente às diferenças encontradas na natureza, os investigadores também chegaram a várias conclusões, nas diversas condições testadas. Uns autores afirmam que o número de Reynolds em nada afeta o problema dos perfis oscilantes, outros defendem que afeta em parte, enquanto outros são da opinião de que este é um problema que realmente depende deste parâmetro. Alguns defendem que o Re não afeta a produção de tração, nem o coeficiente de potência [48]–[54], no entanto, existem autores que afirmam que o coeficiente de tração médio e/ou a eficiência aumentam com o aumento do número de Reynolds [48]–[50], [55]–[60]. Alguns autores chegaram à conclusão de que as estruturas presentes nas esteiras são praticamente independentes do número de Reynolds [33], [54], [55], [61]. Outros concluíram que a variação do número de Reynolds é responsável pela separação e pelo recolamento da camada limite, e, por tal, tanto os VBAs como os VBFs são sensíveis ao número de Reynolds [62]–[66].

No entanto, o número de Reynolds não é suficiente para caracterizar movimentos oscilatórios, sendo habitualmente utilizado para caracterizar escoamentos envolventes de um objeto estático. A frequência reduzida e a amplitude adimensional são parâmetros que se relacionam com a parte dinâmica dos problemas, sendo, por isso, essencial incorporá-los neste tipo de estudo.

A frequência reduzida é um número adimensional normalmente utilizado para definir graus de instabilidade em problemas de aeroelasticidade [36], sendo obtida através da razão entre a velocidade a que o perfil oscila e a velocidade de aproximação do escoamento,

$$k = \frac{2\pi f c}{U_\infty}$$

onde, f e c correspondem, respetivamente, à frequência de oscilação do perfil e à corda aerodinâmica do mesmo. Os investigadores têm identificado este número adimensional, utilizado como meio de expressão da frequência, como sendo o principal parâmetro a reger o desenvolvimento do escoamento, uma vez que as estruturas presentes nas esteiras parecem estar dependentes dele [25]. Diversos autores identificaram que o tipo de esteira libertada por um perfil oscilante altera com o aumento de k , independentemente do tipo de movimento que este executa.

Para valores de k mais baixos a esteira tende a apresentar uma estrada de vórtices de von Kármán, com o aumento da frequência reduzida esta tende a transitar para neutra e, posteriormente, para uma estrada de vórtices de von Kármán invertida [67]–[69]. Os vórtices em torno do perfil (VBAs e VBFs) também se mostram dependentes deste parâmetro. Para além de os vórtices apresentarem um aumento da taxa de crescimento com o aumento da frequência reduzida e, com este mesmo aumento, o VBA perder a sua força quando libertado, os estudos também permitiram identificar 4 padrões de esteira, associados aos VBAs e aos VBFs, dependentes essencialmente de k : 1) VBA funde-se com o VBF, do mesmo sinal; 2) VBA interage com o VBF seguinte, de sinal oposto; 3) VBA apenas chega ao bordo de fuga após um período completo, ou seja, depois do VBF de sinal oposto ser gerado; 4) VBA permanece agarrado à superfície do perfil por mais de 3 ciclos [61], [70], [71].

Contrariamente ao que acontece com o número de Reynolds, em que os investigadores não chegam a um consenso relativamente à influência do parâmetro no problema dos perfis oscilantes, a frequência reduzida não parece deixar dúvidas na forma como afeta este tipo problemas. Diversos autores estudaram a sua influência e concluíram que o coeficiente de tração médio e o de potência demonstram um comportamento semelhante em relação à evolução de k [25], independente de outros parâmetros, como por exemplo a flexibilidade do perfil, o modo de movimento e o perfil do movimento (ou seja, o tipo de onda que este descreve) [62], [63], [72]–[76]. O coeficiente de tração médio tende a aumentar com o aumento de k até que o seu valor máximo seja atingido; posteriormente, o coeficiente tende a reduzir lentamente com o aumento contínuo da frequência reduzida [41], [77], [78]. A frequência reduzida também demonstrou ser um parâmetro chave na análise de extração de energia por perfis oscilantes, sendo que permite determinar a magnitude de energia que o perfil pode extrair de um escoamento livre [62], [63], [72], [73], [75], [79].

A frequência reduzida, quando confrontada com a natureza, apresenta uma característica interessante: os animais de pequenas escalas de comprimento apresentam altos valores, no entanto, os de grandes escalas atuam num valor mais reduzido. Outro acontecimento curioso observado na natureza, é o facto de estes baixos valores de k estarem associados a grandes amplitudes e vice-versa, por exemplo: uma baleia apresenta baixas frequências reduzidas e grandes amplitudes de movimento; enquanto que um mosquito apresenta altas frequência reduzidas de batimento e baixas amplitudes de movimento.

A amplitude de batimento adimensional é um parâmetro que surge da adimensionalização da amplitude do movimento, sendo obtida através da razão

$$h = \frac{A}{c}$$

onde, A corresponde à amplitude de movimento.

A influência deste parâmetro nas estruturas do escoamento é bastante semelhante à da frequência reduzida [25]: ao se fixar todos os outros parâmetros, e variando apenas a amplitude de movimento, verifica-se que, com o aumento da amplitude, as esteiras tendem a transitar, inicialmente, de estradas de produção de resistência para estradas de produção de tração, e, posteriormente, para valores de amplitude ainda mais elevados, esta estrada de vórtices de von Kármán invertida tende a defletir, ocorrendo quebra de simetria [80], [81]. Face ao exposto, os investigadores concluíram que a estrutura global de um escoamento, num problema de asas batedoras, depende, essencialmente, da frequência reduzida e da amplitude de movimento [25]. Contudo, a amplitude, tal como k , não afeta apenas as estruturas libertadas na esteira do perfil, mas também o vórtice que se forma no bordo de ataque, bem como os coeficientes aerodinâmicos [25]. Com o aumento da amplitude: 1) a convexão do VBA, ao longo da corda do perfil, torna-se mais rápida e a sua força de vorticidade aumenta [25], [82]; 2) o coeficiente de potência, por norma, também aumenta; 3) o coeficiente de tração aumenta até um valor máximo e depois tende a diminuir, uma vez que o aumento de tração tende a ser negativo em elevadas amplitudes; 4) a eficiência propulsiva diminui, caso o coeficiente de tração, em amplitudes baixas, não seja superior ao coeficiente de potência, pois nesse caso a eficiência propulsiva apresenta um comportamento semelhante ao do coeficiente de tração [50], [62], [63], [65], [74], [83]. Porém, os coeficientes aerodinâmicos podem apresentar algumas diferenças comportamentais consoante o tipo de movimento: o coeficiente de potência, numa oscilação puramente rotacional, pode apresentar um comportamento semelhante ao do coeficiente de tração, descrito anteriormente no terceiro ponto; por outro lado, o caso do coeficiente de tração, numa situação de oscilação puramente vertical, pode apresentar um comportamento semelhante ao do coeficiente de potência, descrito no segundo ponto [72], [84].

Relativamente à deflexão da esteira abordada no parágrafo anterior, que ocorre a altos valores de amplitude (e/ou de frequência reduzida), alguns autores associam o ângulo desta deflexão ao número de Reynolds, defendendo que o ângulo aumenta com o aumento do número de Reynolds, para oscilação vertical rápida [25], [58].

O número de Strouhal é um parâmetro adimensional essencial para caracterizar escoamentos oscilatórios. Tradicionalmente este parâmetro é utilizado em problemas transientes onde existe libertação de vórtices, definido por

$$St_e = \frac{f_{lv}W}{U_\infty}$$

onde f_{lv} e W correspondem, respetivamente, à frequência de libertação de vórtices e à dimensão da esteira característica ($W = 2A$). No entanto, nos problemas de asa batidora, a maioria dos autores opta por utilizar a frequência de batimento do perfil, em vez de utilizar a frequência de libertação de vórtices. Assim, este “novo” número de Strouhal, baseado na frequência de batimento do próprio perfil, não caracteriza o escoamento em si, mas caracteriza o movimento do perfil:

$$St = \frac{fW}{U_\infty}$$

Taylor *et al.* [85] estudaram 42 espécies diferentes de animais (pássaros, morcegos e insetos) em condições de voo de cruzeiro e, ao terem registado a frequência e a amplitude de batimento de cada espécie, concluíram que na natureza opera-se essencialmente entre valores de Strouhal de 0,2 e 0,4, independentemente da escala de comprimento. Desta forma, o St parece ser um parâmetro útil para a caracterização do desempenho de voo de muitos animais, indicando as condições que proporcionam a melhor eficiência [29].

Lai e Platzer [44] também chegaram à conclusão de que através deste parâmetro se pode caracterizar o tipo de esteira libertada. Estes autores identificaram que para $St < 0,06$ a esteira libertada corresponde a uma esteira produtora de resistência e para $St > 0,06$ a esteira induzida corresponde a uma esteira produtora de tração [14].

O número de Strouhal foi identificado, por vários autores, como sendo um parâmetro relevante na produção de tração [14], [86]. É de salientar que, em situações de elevado número de Strouhal, os efeitos viscosos dominam o problema; enquanto que, em baixos valores deste parâmetro, a elevada velocidade e os efeitos de regime permanente adquirem um maior peso.

1.2.3 | Aplicabilidades

Os trabalhos dos perfis oscilantes tendem a dividir-se em diversas categorias, figura 5, cada uma com o seu foco de estudo, mas todas interligadas.

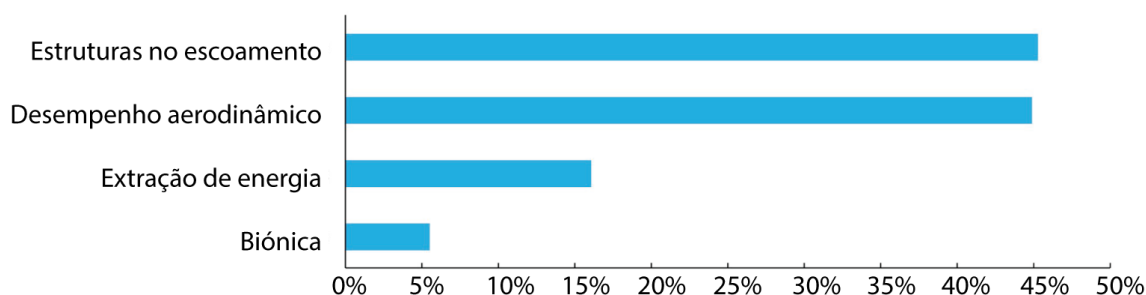


Figura 5 | Estudos de perfis oscilantes em diferentes categorias. Adaptado de [25].

A maior parte dos investigadores direcionam os seus estudos para as estruturas em torno das asas batedoras, esforçando-se para compreender o complexo mecanismo do escoamento, ou, o desempenho aerodinâmico do perfil. As estruturas permitem determinar, através da sua observação e compreensão, as forças aerodinâmicas a que o perfil está sujeito, contribuindo para a explicação da origem das mesmas. O estudo do desempenho aerodinâmico tem como objetivo desvendar qual o regime de voo (por exemplo, velocidade, tipo de movimento, amplitude e

frequência de batida) que permite obter um desempenho ótimo. Este tipo de investigação tem como foco principal o estudo das forças aerodinâmicas criadas pelo perfil, ou seja, na produção de sustentação, de tração, e na eficiência propulsiva. Contudo, a questão do desempenho das asas oscilantes continua a ser a chave de todos os problemas deste tipo [25].

Recentemente, com o desenvolvimento das energias renováveis e com o aumento da busca por alternativas às energias fósseis, os investigadores também têm demonstrado, cada vez mais, interesse pela capacidade de extração de energia do meio através da oscilação destes perfis [25].

Outra vertente destes trabalhos remete para um assunto mais complexo e ainda pouco desenvolvido - o estudo com aplicabilidade biônica. Os estudos nesta área pretendem imitar o tipo de locomoção de *flapping* encontrado na natureza, tanto a nível aéreo, como marítimo. Apesar da parca existência de trabalhos neste campo, os resultados têm-se demonstrado vantajosos na descoberta das condições de sustentação, tração e eficiência propulsiva ótimas. Mecanismos de propulsão biomiméticos têm tido sucesso em aplicabilidades marítimas graças à eficiência apresentada e a serem considerados mecanismos amigos do ambiente. Porém, para aperfeiçoar estes projetos, é fundamental compreender melhor os princípios do mecanismo de controlo da vorticidade entre o corpo de um animal (nadador ou voador) e o escoamento que o rodeia. Este conhecimento é o ponto fulcral na compreensão da locomoção e manobrabilidade dos animais [25].

É de conhecimento científico que, a evolução da biomimética pode trazer inúmeras vantagens, quer a nível económico, quer a nível ambiental [25]. Os perfis oscilantes têm sido estudados desde 1970, no entanto, só em 2000 é que os investigadores começaram a atribuir-lhes maior destaque [25]. Não obstante, apesar dos vastos trabalhos na área, ainda não se conseguiu compreender diversos fatores-chaves do problema.

Ainda existe um grande percurso a ser percorrido, com o intuito de compreender melhor os problemas sobre os perfis oscilantes, e, posteriormente, encaminhar à otimização de diversos parâmetros da área, como por exemplo a produção de tração e o ganho energético. Para tal, é necessário responder a algumas perguntas: Como compreender de forma sistemática e precisa os mecanismos presentes nos escoamentos em torno de um perfil oscilante tridimensional? Como obter o controlo eficiente de asas oscilantes, de forma a otimizar o respetivo desempenho propulsivo e ganho de energia? Só depois de se encontrarem respostas para estas questões é que será possível expandir as aplicabilidades destes trabalhos, destacando-se os mecanismos de produção de propulsão e, no campo das energias alternativas/renováveis, os dispositivos de captação de energia [25].

As seguintes tabelas (1-14) apresentam, de forma resumida, o trabalho de diversos autores na área de perfis oscilantes, consistindo nas condições, nos métodos, nos resultados analisados do estudo e em alguns comentários/conclusões pertinentes. É de salientar que diferentes condições de estudo, quer propriedades do perfil (por exemplo corda, espessura, curvatura), quer propriedades

do escoamento (número de Reynolds, entre outros) resultam em conclusões totalmente distintas. Além disso, o meio de marcação do escoamento e respetivo controlo também influenciam o tipo de conclusões retiradas, pois afetam a visualização das partículas do escoamento.

Tabela 1 | Referente ao artigo "*Experimental Studies of Separation on a Two-Dimensional Airfoil at Low Reynolds Number*", 1982.

Autores	Experiência	Métodos	Resultados	Notas
Thomas J. Mueller e Stephen M. Batill [20]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil: NACA 66₃-018 • Estático • $Re = 4 \times 10^4; 1,3 \times 10^4; 4 \times 10^5$ 	<p><u>Experimental</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Visualização em túnel de vento através de fumo • Medição de forças • Perturbação acústica da camada limite • Rugosidade no bordo de ataque 	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente de sustentação • Coeficiente de resistência • Formação de bolhas de separação 	<ul style="list-style-type: none"> • A existência de uma bolha de separação laminar provoca um crescimento abrupto do coeficiente de sustentação • O aumento da rugosidade na superfície resulta num aumento do coeficiente de resistência • O caso liso apresenta valores mais elevados de coeficiente de sustentação • A existência de bolha de separação no bordo de ataque permite atingir ângulos de ataque superiores

Tabela 2 | Referente ao artigo “*Propulsive Vortical Signatures of Plunging and Pitching Airfoils*”, 1988.

Autores	Experiência ³	Métodos	Resultados	Notas
Peter Freymuth [87]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil: NACA 0015 • Oscilação puramente vertical • Oscilação puramente rotacional 	<u>Experimental</u> <ul style="list-style-type: none"> • Visualização em túnel de vento através de partículas de tetracloreto de titânio líquido (TiCl₄) 	<ul style="list-style-type: none"> • Observação do escoamento: <ul style="list-style-type: none"> · separação da camada limite · desenvolvimento dos vórtices 	<ul style="list-style-type: none"> • A assinatura dos vórtices é mais fácil de identificar a altas frequências • É possível gerar tração através de oscilação puramente vertical ou puramente rotacional • Grandes ângulos de ataque levam a uma separação severa na superfície superior do perfil, o que aumenta muito a resistência
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%; text-align: left;"><u>Vertical</u></th> <th style="width: 50%; text-align: left;"><u>Rotacional</u></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> • $c = 0,051\text{ m}; 0,152\text{ m}$ • $\alpha = 0^\circ; 3^\circ; 5^\circ; 10^\circ; 90^\circ$ • $Re = 1,7 \times 10^3; 3,5 \times 10^3; 5,2 \times 10^3$ • $k = 0,07; 0,23; 0,47; 0,52; 2,7$ • $h = 0,2; 0,5; 1$ </td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> • $c = 0,356\text{ m}$ • $-20^\circ < \alpha < 20^\circ$ • $Re = 1,2 \times 10^4$ • $k = 2,9$ </td> </tr> </tbody> </table>			
<u>Vertical</u>	<u>Rotacional</u>			
<ul style="list-style-type: none"> • $c = 0,051\text{ m}; 0,152\text{ m}$ • $\alpha = 0^\circ; 3^\circ; 5^\circ; 10^\circ; 90^\circ$ • $Re = 1,7 \times 10^3; 3,5 \times 10^3; 5,2 \times 10^3$ • $k = 0,07; 0,23; 0,47; 0,52; 2,7$ • $h = 0,2; 0,5; 1$ 	<ul style="list-style-type: none"> • $c = 0,356\text{ m}$ • $-20^\circ < \alpha < 20^\circ$ • $Re = 1,2 \times 10^4$ • $k = 2,9$ 			

³ Freymuth definiu a frequência reduzida como $k = \frac{\pi f c}{U_\infty}$ [87].

Tabela 3 | Referente ao artigo "Vortex formation around an oscillating and translating airfoil at large incidences", 1990.

Autores	Experiência ⁴	Métodos	Resultados	Notas
Kazuo Ohmi, Madeleine Countanceau, Ta Phuoc Loc e Annie Dulieu [33]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil: elíptico • Oscilação puramente rotacional • Oscilação harmónica • Pivô de rotação a meio da corda • $c = 0,07\text{ m}; 0,14\text{ m}$ • $Re = 1,5 \times 10^3; 3 \times 10^3; 1 \times 10^4$ • $k = 0,1; 0,5; 1,0$ 	<p><u>Experimental</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Visualização em túnel de água com partículas brancas de <i>Rilsan</i> <p><u>Numérico</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Equações bidimensionais de Navier-Stokes 	<ul style="list-style-type: none"> • Estudo dos efeitos de diversos parâmetros no desenvolvimento da esteira do perfil 	<ul style="list-style-type: none"> • A frequência reduzida é o principal parâmetro que influencia o escoamento • Com o aumento da frequência de oscilação, os padrões que surgem nas esteiras passam a depender cada vez mais de kh, em vez de apenas k • O efeito do número de Reynolds nas esteiras, e respetivas estruturas, é pouco evidente quando comparado com os restantes parâmetros

⁴ Ohmi *et al.* [33] definiram frequência reduzida como $k = \frac{fc}{2u_\infty}$ [33].

Tabela 4 | Referente ao artigo "A Computational Study on the Dynamic Stall of Flapping Airfoil", 1998.

Autores	Experiência	Métodos	Resultados	Notas
Ismail H. Tuncer, Ralf Walz e Max F. Platzer [88]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil: NACA 0012 • Oscilação puramente vertical • Oscilação vertical e rotacional • Oscilação harmônica • $Re = 1 \times 10^6; 5 \times 10^6$ • $Ma = 0,3$ 	<u>Numérico</u> <ul style="list-style-type: none"> • Equações bidimensionais de Navier-Stokes 	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente de tração • Coeficiente de potência • Eficiência propulsiva • Estudo de separação 	<ul style="list-style-type: none"> • Não foram observadas diferenças significativas entre os dois números de Reynolds estudados • Em oscilação puramente vertical, a perda dinâmica em: <ul style="list-style-type: none"> · baixas frequências reduzidas → provoca uma rápida diminuição do coeficiente de tração · altas frequências reduzidas → tem uma influência benigna na tração máxima produzida • Baixa frequência e alta amplitude é benéfico para a otimização da eficiência propulsiva

Tabela 5 | Referente ao artigo "Oscillating foils of high propulsive efficiency", 1998.

Autores	Experiência	Métodos	Resultados	Notas	
J. M. Anderson, K. Streitlien, D. S. Barrett e M. S. Triantafyllou [26]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil: NACA 0012 • Oscilação vertical e rotacional • Oscilação harmónica 	<u>Experimental</u> <ul style="list-style-type: none"> • Visualização em túnel de água através de VIPD • Medição de forças 	<ul style="list-style-type: none"> • Mapeamento do fluxo em torno do perfil • Coeficiente de tração • Coeficiente de potência • Eficiência propulsiva 	<ul style="list-style-type: none"> • Reforço positivo do VBF, por parte do VBA, (no momento de libertação), provoca um aumento do coeficiente de tração e uma alta eficiência propulsiva • O ângulo de fase entre o movimento vertical e o rotacional é um parâmetro crítico que afeta a eficiência propulsiva e a interação entre o VBA e o VBF 	
	<u>Medição de forças</u>				<u>Visualização</u>
	<ul style="list-style-type: none"> • Pivô de rotação a um terço da corda • $c = 0,10 m$ • $75^\circ \leq \phi \leq 105^\circ$ • $Re = 4 \times 10^4$ 				<ul style="list-style-type: none"> • $c = 0,0381 m$ • $Re = 1,1 \times 10^3$

Tabela 6 | Referente ao artigo "Modelling thrust generation of a two-dimensional heaving airfoil in a viscous flow", 2003.

Autores	Experiência	Métodos	Resultados	Notas
G. C. Lewin e H. Haj-Hariri [14]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil: Joukowski • Oscilação puramente vertical • Oscilação sinusoidal • $Re = 5 \times 10^2$ • $2,0 \leq k \leq 10,0$ • $0,25 \leq St \leq 0,48$ • Escoamento viscoso 	<p><u>Numérico</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Equações de Navier-Stokes 	<ul style="list-style-type: none"> • Estudo das estruturas presentes na esteira • Coeficiente de potência e eficiência • Comportamento do VBA 	<ul style="list-style-type: none"> • k é o principal parâmetro que influencia o comportamento do VBA • A eficiência propulsiva não é influenciada pelo facto de a esteira ser ou não periódica • Os padrões das esteiras dependem do comportamento do VBA • Pequenas perturbações influenciam bastante os VBAs • A eficiência de sustentação e o comportamento dos VBAs estão ligadas

Tabela 7 | Referente ao artigo "Oscillation Frequency and Amplitude Effects on the Wake of a Plunging Airfoil", 2004.

Autores	Experiência ⁵	Métodos	Resultados	Notas
J. Young e J. C. S. Lai [22]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil: NACA 0012 • Oscilação puramente vertical • Oscilação sinusoidal • $Re = 2 \times 10^4$ • $k = 4,0; 8,0$ • $h = 0,00625; 0,0125; 0,02; 0,025; 0,05; 0,075$ • $Ma = 0,2; 0,05$ • Escoamento laminar e turbulento 	<p><u>Numérico</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Equações bidimensionais de Navier-Stokes • Método dos painéis 	<ul style="list-style-type: none"> • Estudo das estruturas presentes na esteira • Coeficiente de tração • Coeficiente de sustentação • Distribuição de pressão pela superfície do perfil 	<ul style="list-style-type: none"> • Os efeitos de bordo de ataque são fulcrais na determinação das forças desenvolvidas (para este Re) • Os efeitos de bordo de fuga influenciam as estruturas observadas nas esteiras, tendo menos impacto na sustentação e tração • O parâmetro kh não é suficiente para prever nem a tração nem as estruturas que surgem nas esteiras

⁵ Young e Lai definiram a frequência reduzida como $k = \frac{\pi f c}{U_\infty}$ [22].

Tabela 8 | Referente ao artigo "Vortex Lock-In Phenomenon in the Wake of a Plunging Airfoil", 2007.

Autores	Experiência ⁶	Métodos	Resultados	Notas
John Young e Joseph C. S. Lai [21]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil: NACA0012 • Oscilação puramente vertical • Oscilação sinusoidal • $Re = 2 \times 10^4$ • $1,0 \leq k \leq 10,0$ • $h < 0,1$ • $Ma = 0,05$ 	<p><u>Numérico</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Equações bidimensionais de Navier-Stokes 	<ul style="list-style-type: none"> • Libertação de vórtices 	<ul style="list-style-type: none"> • A esteia, para este Re, depende de k e de h, separadamente

⁶ Young e Lai definiram a frequência reduzida como $k = \frac{\pi f c}{U_\infty}$ [21].

Tabela 9 | Referente ao artigo "Wake-Structure Formation of a Heaving Two-Dimensional Elliptic Airfoil", 2007.

Autores	Experiência	Métodos	Resultados	Notas
K. B. Lua, T. T. Lim, K. S. Yeo e G. Y. Oo [89]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil: Elíptico • Oscilação puramente vertical • Oscilação harmónica e sinusoidal • $c = 0,020 m$ • $Re = 1 \times 10^4$ • Escoamento viscoso 	<p><u>Experimental</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Visualização em túnel de água através de partículas esféricas de vidro e VIPD 	<ul style="list-style-type: none"> • Formação de estruturas na esteira 	<ul style="list-style-type: none"> • Identificaram 5 tipos diferentes de esteira que dependem essencialmente de quando e como o VBA interage com o VBF: <ul style="list-style-type: none"> · <u>Fusão do VBA com o VBF</u> <ul style="list-style-type: none"> → esteira defletida → estrada de vórtices de von Kármán → estrada de vórtices de von Kármán invertida · <u>Sem fusão do VBA e VBF</u> <ul style="list-style-type: none"> → esteira dissipada⁷ → esteira neutra • O tipo de esteira libertado do perfil depende de St, k e h

⁷ Designa-se de esteira dissipada aquela que não apresenta as estruturas coerentes pois a turbulência do escoamento a homogeneizou. O VBA e o VBF são dissipados mais cedo, uma vez que ao serem libertados pelo perfil formam um dipolo que ao interagir com o escoamento não perturbado viscoso faz com que os vórtices se destruam mais rapidamente [89].

Tabela 10 | Referente ao artigo "*Numerical Study of Asymmetric Effect on a Pitching Foil*", 2009.

Autores	Experiência	Métodos	Resultados	Notas
Qing Xiao e Wei Liao [90]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil: NACA0012 • Oscilação puramente rotacional • Oscilação simétrica e assimétrica • Baixo número de Ma • Escoamento compressível 	<p><u>Numérico</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Equações de Navier-Stokes 	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente de tração • Coeficiente de sustentação • Coeficiente de potência • Eficiência propulsiva • Estudo das estruturas presentes na esteira 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior assimetria do movimento pode induzir, na esteira do perfil, uma estrada de vórtices de von Kármán invertida mais intensa, o que corresponde a um aumento de tração • A eficiência propulsiva diminui quanto maior for a assimetria do movimento

Tabela 11 | Referente ao artigo "*Characteristics of Pitching and Plunging Airfoils Under Dynamic-Stall Conditions*", 2010.

Autores	Experiência ⁸	Métodos	Resultados	Notas
D. Rival e C. Tropea [28]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil: SD7003 • Oscilação puramente vertical • Oscilação puramente rotacional • Oscilação vertical e rotacional • Pivot de rotação a um quarto da corda • $c = 0,120\text{ m}$ • $Re = 3 \times 10^4; 6 \times 10^4$ • $0,05 < k < 0,3$ 	<p><u>Experimental</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Visualização em túnel de vento através de fumo • Medição de forças 	<ul style="list-style-type: none"> • Estudo das estruturas presentes na esteira • Coeficiente de sustentação • Coeficiente de momento 	<ul style="list-style-type: none"> • A posição relativa da libertação dos vórtices na esteira em relação ao perfil é fundamental para a produção de sustentação e de momento, sendo que a libertação de cada vórtice influencia a força do vórtice acoplado

⁸ Rival e Tropea definiram a frequência reduzida como $k = \frac{\pi f c}{U_\infty}$, e, segundo os autores, o intervalo utilizado no estudo representa o voo da maior parte das aves, grandes insetos e morcegos [28].

Tabela 12 | Referente ao artigo "Asymmetric Sinusoidal Motion Effect on Aerodynamics of a Plunging Airfoil", 2013.

Autores	Experiência ⁹	Métodos	Resultados	Notas
Yi Zhang, Ruishan Yuan, Kun Lu e Yonghui Xie [91]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil: NACA0012 • Oscilação puramente vertical • Oscilação sinusoidal • Oscilação assimétrica • $Re = 1,35 \times 10^5$ • $kh = 0,2$ • $t_a = 0,6; 0,75; 0,5; 0,4$ • escoamento incompressível, viscoso e instável 	<u>Numérico</u> <ul style="list-style-type: none"> • Equações bidimensionais de Navier-Stokes 	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente de tração • Eficiência propulsiva • Tempos de libertação e de formação das estruturas presentes nas esteiras 	<ul style="list-style-type: none"> • O movimento assimétrico, quando comparado com o movimento simétrico, permite produzir mais tração, que aumenta com a assimetria • O coeficiente de tração máximo é atingido na posição média do movimento, sendo significativamente influenciado pela assimetria, quanto mais assimetria maior o seu valor máximo • O coeficiente de tração médio e a eficiência propulsiva assumem valores maiores em regimes de baixas frequências reduzidas e em movimentos com maior assimetria

⁹ Entende-se por movimento assimétrico aquele em que a subida é executada mais rapidamente que a descida ($t_a > 0,5$), ou vice-versa ($t_a < 0,5$). Por tal, para $t_a = 0,5$ o movimento é simétrico.

Tabela 13 | Referente ao artigo “*Effects of continuously increasing pitching and plunging amplitudes on the aerodynamic forces of flapping airfoils*”, 2019.

Autores	Experiência	Métodos	Resultados	Notas
Jun Hu, Haibin Xuan, Yong Yu e Jiaolong Zhang [27]	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil: NACA 0005 • Oscilação vertical e rotacional • Oscilação puramente rotacional • Oscilação puramente vertical • Pivô de rotação a 0 % da corda • $c = 0,064 \text{ m}$ • $1,05 \times 10^4 < Re < 1,42 \times 10^4$ • escoamento laminar 	<p><u>Numérico</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Software ANSYS Fluent</i> • Equações de Navier-Stokes compressíveis/incompressíveis 	<ul style="list-style-type: none"> • Efeitos de um aumento constante de amplitudes no desempenho aerodinâmico • Efeitos no desenvolvimento e tempo de separação dos VBAs • Coeficiente de sustentação • Coeficiente de tração e de resistência 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Oscilação vertical e rotacional</u>: aumentar a amplitude afeta o desenvolvimento e o tempo de separação dos VBAs; a sustentação e a tração melhoram • <u>Oscilação puramente rotacional</u>: alterar a amplitude tem pouco efeito nos coeficientes de sustentação e de tração, mas aumenta as forças de resistência • <u>Oscilação puramente vertical</u>: aumentar a amplitude torna os VBAs e os VBFs mais fortes; aumenta a força de sustentação, podendo também contribuir para as de tração

Tabela 14 | Referente ao artigo "*Swimmers' wale structures are not reliable indicators of swimming performance*", 2020.

Autores	Experiência	Métodos	Resultados	Notas
Daniel Floryan, Tyler Van Buren e Alexander J. Smits [92]	<ul style="list-style-type: none"> • Não aplicável 	<ul style="list-style-type: none"> • Comparação de trabalhos de outros autores 	<ul style="list-style-type: none"> • Estudo entre o desempenho do perfil e o tipo de esteira libertado 	<ul style="list-style-type: none"> • Mudanças significativas, como o espaçamento dos vórtices, na esteira podem não provocar alterações no desempenho do perfil, especialmente em termos de produção de tração • Mudanças insignificativas na esteira podem provocar grandes alterações no desempenho do perfil, especialmente na sua eficiência • O tipo de esteira libertado não é totalmente indicativo se o perfil produz tração ou se resistência ao avanço • O desempenho de um perfil oscilante depende mais da origem das vorticidades criadas que da interação entre estas.

1.3 | Pergunta de investigação

Nesta linha, este trabalho tem como foco principal a análise bidimensional das estruturas que surgem na esteira de um perfil oscilante e os efeitos criados por estas. Pretende-se que a asa em estudo seja sujeita a um movimento puramente vertical, periódico, mas não sinusoidal, com diferentes combinações de velocidade, amplitude e frequência.

O movimento de batida realizado será simétrico, ou seja, a velocidade de subida do perfil será igual à velocidade de descida do mesmo, para que, se ocorrer a deflexão da esteira, não seja provocada pela assimetria da batida e que os acontecimentos no intradorso e extradorso do perfil sejam semelhantes. Porém, para a velocidade de escoamento não perturbado mais baixa, também se testará o movimento assimétrico, com o objetivo de se detetar as diferenças nas estruturas criadas pela asa. A questão da assimetria surgiu do facto de na natureza ser possível observar este tipo de movimento, como relatado por Leonardo da Vinci. Ele observou atentamente o movimento de batida de diversas espécies de pássaros, concluindo que, de espécie para espécie, a forma de batida altera¹⁰ [5]. Da Vinci também observou que o batimento das aves é diferente em cada fase de voo e depende das condições atmosféricas [6].

Assim, com este trabalho experimental de visualização em ar, pretende-se, não só analisar os efeitos que surgem na esteira da asa, mas também identificar quais as combinações estudadas de amplitude e frequência que permitem a produção de tração e sustentação (através da observação do tipo de esteira libertada e do escoamento em torno do perfil). Além disso, deseja-se descobrir se é possível criar algum tipo de modelo que permita prever, empiricamente, o tipo de esteira libertada pelo perfil, quando este se encontra sujeito a diferentes condições de voo (velocidade, amplitude e frequência). O comportamento das estruturas criadas pelo perfil no escoamento é o foco desta dissertação, uma vez que estas podem ser tratadas como uma espécie de “impressão digital” para as forças que o perfil gera.

¹⁰ Leonardo da Vinci registou nos seus cadernos que “há pássaros que batem as asas mais depressa quando as baixam do que quando as levantam, como é o caso dos pombos e de pássaros afins”, “há outros que baixam as asas mais devagar do que quando as levantam, e isto pode ser visto nos corvos e em pássaros semelhantes.” [5].

1.4 | Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em quatro capítulos: Introdução, Metodologia, Resultados e Discussão e Conclusão.

No primeiro capítulo, Introdução, o foco centrou-se em torno do tema da biomimética, assim como as vantagens dos trabalhos desenvolvidos neste âmbito, especialmente, sobre os trabalhos de perfis oscilantes com aplicabilidade no campo da Engenharia Aeronáutica. Este capítulo incorpora, ainda, uma revisão bibliográfica sobre os trabalhos desenvolvidos na área dos perfis oscilatórios. O segundo capítulo, Metodologia, apresenta a instalação experimental e as condições de teste da investigação. No terceiro capítulo, Resultados e Discussão, são apresentadas e analisadas as imagens das esteiras e os gráficos referentes ao tipo de esteira obtida, para cada combinação de parâmetros adimensionais. Por fim, o quarto capítulo, Conclusão, apresenta de forma sucinta as principais reflexões retiradas nesta investigação e sugere-se algumas ideias de trabalhos futuros que foram surgindo e considerados oportunos, ao longo deste trabalho.

Capítulo 2 | Metodologia

“Através da biomimética, a natureza tem algumas das melhores lições que podemos aprender sobre *design*” – Martin Aston

Este capítulo foi elaborado com o intuito de explicar a instalação utilizada na experiência, bem como os procedimentos realizados para a execução da mesma.

2.1 | Instalação experimental

A instalação teve por base a desenvolvida por Lopes [2], sendo composta, essencialmente, por: um túnel de vento, um micromanómetro, uma câmara de alta velocidade, um laser, um foco luminoso, um sistema de fumo, um motor que permite um movimento linear e a asa em estudo, figura 6. Realizou-se a calibração dos aparelhos, sendo esta considerada essencial para garantir o adequado funcionamento da instalação, tal como a verificação das condições necessárias para uma correta execução da experiência.

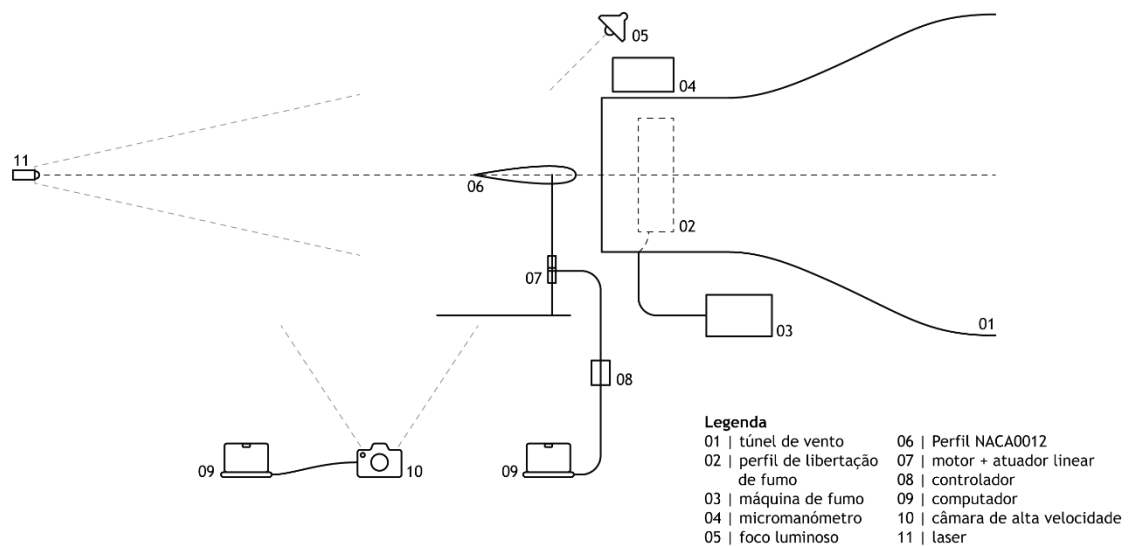


Figura 6 | Esquema da instalação. Adaptado de [93].

2.1.1 | Túnel de vento

O túnel de vento (figura 7) utilizado nesta experiência trata-se de um túnel subsónico, de sopro e de secção aberta, cuja secção da saída possui 0,300 m de altura e 0,402 m de largura, desenvolvido na Universidade da Beira Interior, no *Aeronautics and Astronautics Research Center* [94].



Figura 7 | Túnel de vento. Retirado de [2].

2.1.2 | Micromanómetro

A velocidade do escoamento foi ajustada pela abertura da guilhotina do túnel de vento, sendo medida através do micromanómetro instalado no mesmo (figura 8.a). No entanto, como o tubo de Pitot, ligado ao micromanómetro, não se encontra mesmo à saída do túnel de vento, (localizado ainda na zona de contração) e, de forma a garantir uma melhor aproximação do valor de velocidade do escoamento não perturbado, analisou-se a relação entre o valor de velocidade nesta zona de compressão e o valor de velocidade à saída do túnel de vento. Para o devido efeito, calibrou-se o micromanómetro através do regulador *zero* - com o túnel de vento desligado ajustou-se o regulador até que o visor indicasse o valor zero. O regulador *time constant* permite escolher o tempo de integração das velocidades recolhidas, ou seja, quanto maior, menos sensível é a deteção da velocidade, o que se traduz num tempo superior de espera face à apresentação do valor real. Por outro lado, quando o *time constant* é demasiado pequeno, o valor apresentado tem tendência a ser demasiado sensível a pequenas variações, estando em constante oscilação, tendo, por isso, sido ajustado para um tempo de integração considerado razoável. Após a calibração do micromanómetro, iniciou-se o estudo da relação entre as duas velocidades; para tal, abriu-se a guilhotina em diversas posições e anotou-se para cada uma delas a velocidade indicada nos visores do micromanómetro e do anemómetro (figura 8.b), sendo este último posicionado mesmo à saída do túnel de vento.

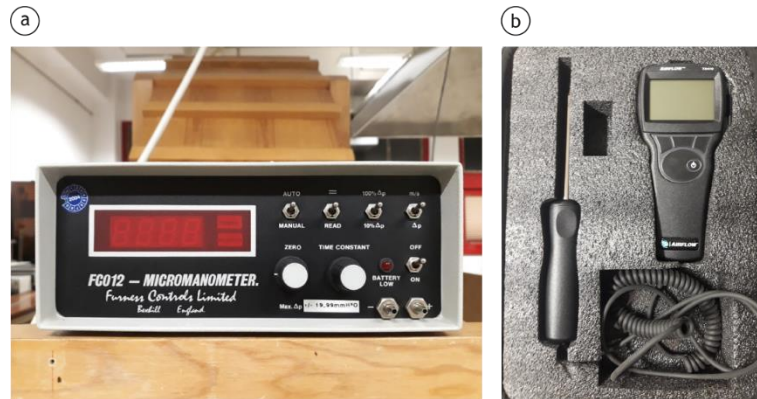


Figura 8 | a) Micromanómetro: FCO12 – Micromanometer; b) Anenómetro.

O micromanómetro tem a possibilidade de apresentar valores em m/s e em diferença de milímetros de coluna de água. No entanto, uma vez que o anemómetro apresenta apenas valores em m/s, optou-se por trabalhar com estas unidades. Com os valores obtidos foi possível encontrar uma relação linear entre as duas velocidades já referidas, permitindo que, no decorrer da experiência, se identificasse facilmente a velocidade à saída do túnel de vento através da indicada pelo micromanómetro. A relação encontrada é apresentada no gráfico seguinte (figura 9).

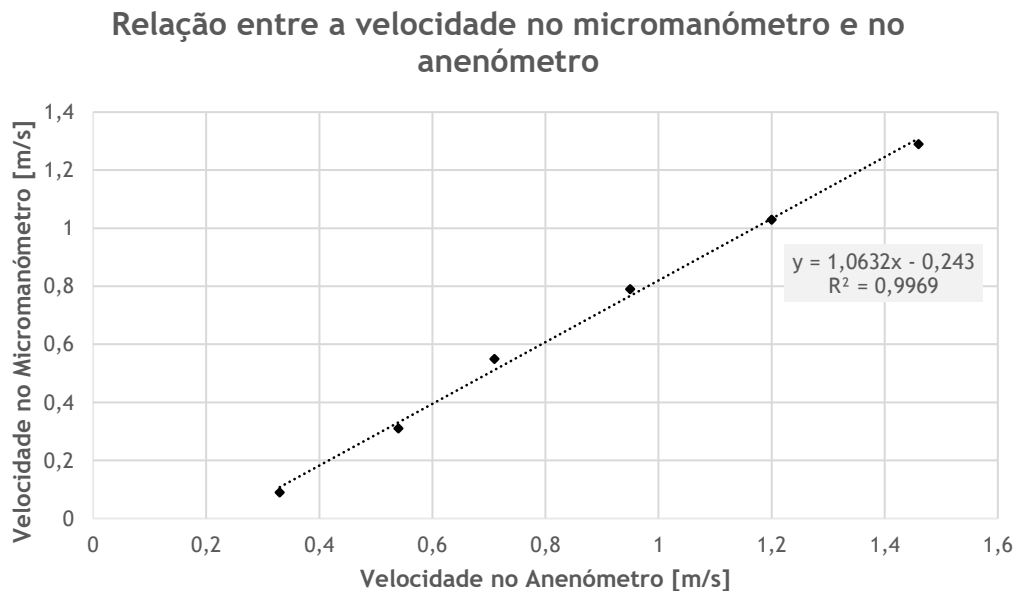


Figura 9 | Relação entre a velocidade registada na zona de contração e a velocidade registada à saída do túnel de vento.

2.1.3 | Câmara de alta velocidade

Para a obtenção das imagens da esteira do perfil utilizou-se uma câmara de alta velocidade. A câmara em questão é uma *Photron FASTCAM mini UX50* (figura 10.a) com o diafragma totalmente aberto. A câmara foi posicionada a 90° e, aproximadamente, a 3,5 m do plano de focagem, e com um ângulo picado, de forma a facilitar a visualização do extradorso do perfil. As especificações de captação das imagens foram selecionadas no programa *Photron FASTCAM Viewer* (figura 10.b). Todas as imagens foram retiradas com uma resolução de 1280×1024 pixel, um *frame rate* de 500 fps e um *shutter speed* de $1/500$ s, com a opção *Low Light* ativada.

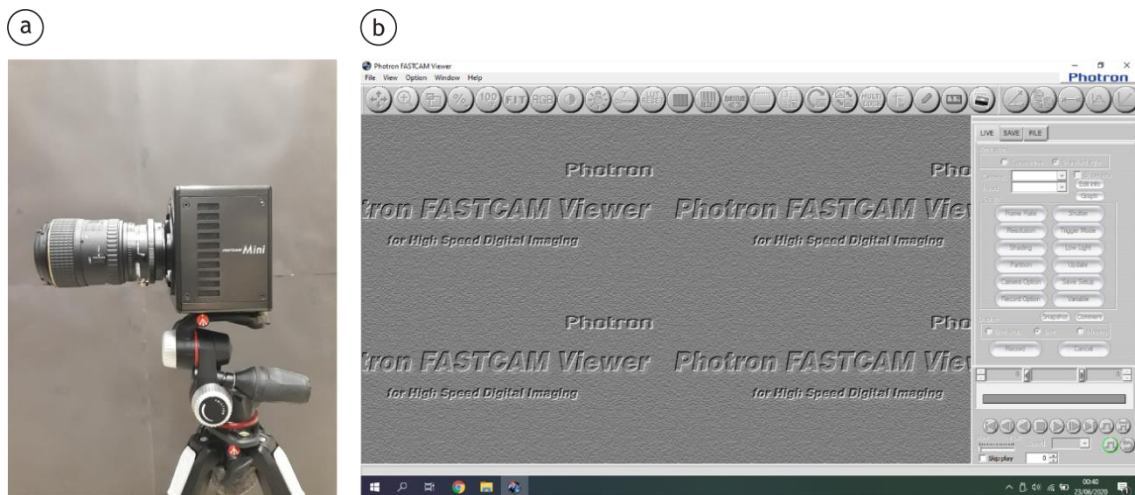


Figura 10 | a) Câmara de alta velocidade: *Photron FASTCAM mini UX50*; b) *Photron FASTCAM Viewer*.

2.1.4 | Sistema de fumo

O plano de focagem, como se pode observar na figura 6, coincide com o plano central da asa. Para a marcação do escoamento, recorreu-se a uma máquina de fumo *Techno-Fog Jem* (figura 11.a) conectada a um perfil simétrico (figura 11.b), inserido dentro do túnel de vento. Este perfil encontra-se centralizado com a secção de saída do túnel de vento e está posicionado na vertical, sendo que o fumo é libertado pelo seu bordo de fuga. Lopes [2] projetou este mecanismo de forma a minimizar as perturbações induzidas no escoamento. A máquina de fumo utiliza líquido *Regular DJ Fluid* (figura 11.c) para a produção do fumo e, de modo a auxiliar a libertação uniforme do mesmo, encontra-se também conectada a um mecanismo de ar comprimido, com o intuito de garantir um caudal constante nas tubagens.

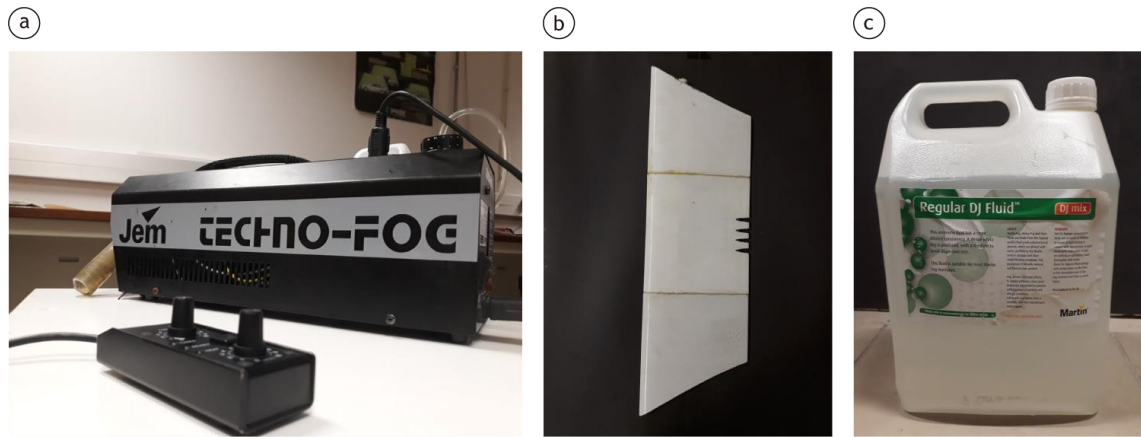


Figura 11 | a) Máquina de fumo: *Techno-Fog Jem*; b) Perfil de libertação de fumo; c) Líquido *Regular DJ Fluid*.

2.1.5 | Laser

Para a captação das esteiras do perfil foi necessário proceder-se à iluminação das partículas de fumo presentes no escoamento. Para este efeito, utilizou-se um laser de cor azul, com potência de 3000 mW e um comprimento de onda de 445 nm, acoplado a uma vareta (figura 12), de forma a se criar um plano luminoso coincidente com o plano de focagem. Além disso, adicionou-se um foco luminoso direcionado diretamente para a esteira do perfil com o objetivo de garantir uma melhor visualização, permitindo, simultaneamente, um valor mais elevado de *frames* por segundo.



Figura 12 | Laser. Retirado de [2].

2.1.6 | Asa e motor

A asa batedora (figura 13) foi fabricada no FabLab|UBI, na Universidade da Beira Interior. Esta foi produzida em impressão 3D com o perfil alar NACA0012¹¹, com uma envergadura de 0,44 m e uma corda de 0,10 m. O material de produção utilizado foi o *ABS P430 XL*, tendo sofrido,

¹¹ Este perfil foi escolhido por ser um dos mais estudados [25]

posteriormente, um tratamento de alisamento da superfície (lixa e betume branco em pasta). A asa (posicionada a, aproximadamente, 0,03 m da seção de saída do túnel de vento) encontra-se presa a uma estrutura metálica que, por sua vez, está acoplada a um atuador linear conectado a um motor rotativo, com o intuito de converter o movimento rotacional do parafuso num movimento puramente translacional (vertical). O motor e o atuador linear (figura 14.a) utilizados são ambos da *Oriental Motors* e foram, respetivamente, um *AR series FLEX AC power input built-in controller type, ARM46AC model* e um *EASM4XE005 ARAC model*, com um passo medido de 0,006 mm/step. O motor encontra-se ligado a um controlador que armazena os dados necessários. A informação necessária para a execução do movimento desejado é programada através do *software MEXE02 Versão 3.57.0.0* (figura 14.b) e posteriormente guardada no referido controlador, através de um cabo *CC051IF-USB*.

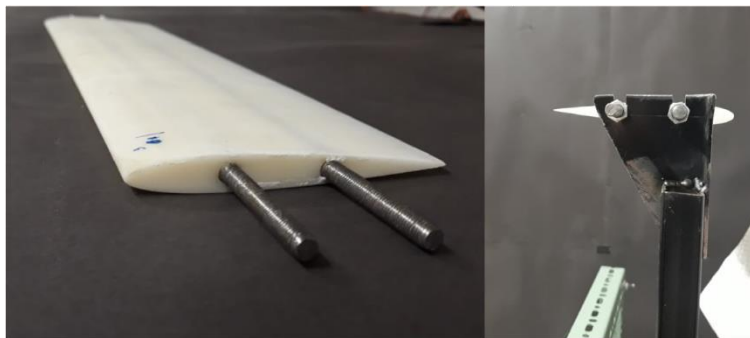


Figura 13 | Asa utilizada no estudo – Perfil alar: NACA0012.

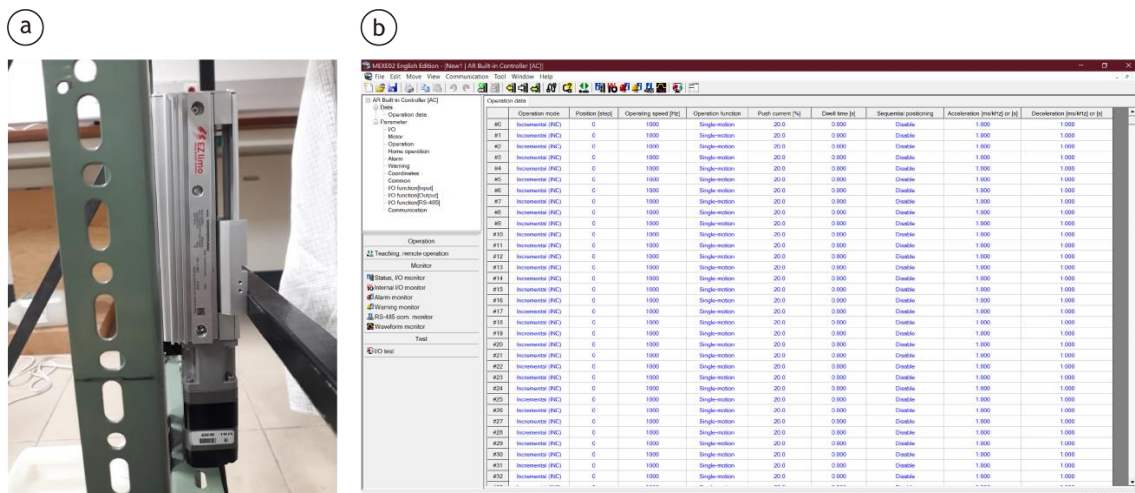


Figura 14 | a) Motor e atuador linear; b) *Software MEXE02*.

Relativamente à instalação utilizada, como se referiu anteriormente, baseou-se na projetada por Lopes [2], tendo sofrido apenas duas pequenas alterações: de forma a reduzir oscilações indesejáveis, foi possível substituir a estrutura que agrega a asa ao motor por uma mais resistente; e foi criada uma zona de acumulação de fumo com o intuito de tornar a sua libertação mais controlada e uniforme, minimizando os riscos de condensação do fumo ao longo das tubagens e reduzindo a sua velocidade de inserção no escoamento.

2.2 | Movimento da asa

Como referido no ponto 1.3, a asa em estudo foi sujeita a um movimento puramente vertical, periódico não sinusoidal, simétrico e assimétrico. Os gráficos de posição de ambos os movimentos são apresentados na figura 15. O movimento simétrico, apesar de não seguir uma função seno, possui um gráfico de posição que poderia sugerir ser uma boa aproximação, como se pode verificar na figura 15.a, no entanto, o seu perfil de velocidades demonstra que o seu comportamento é muito distinto do de um seno. O movimento assimétrico testado consistiu numa batida descendente mais rápida que a ascendente, com uma fração de assimetria de 0,25, o que significa que 25% de um período corresponde ao movimento descendente e 75% ao ascendente.

O movimento da asa pretendido segue um movimento uniformemente acelerado, cujas equações de movimento são do tipo

$$y(t) = y_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

$$v(t) = v_0 + a t$$

onde y corresponde à posição vertical, v à velocidade de oscilação puramente vertical, a à aceleração, t ao tempo e o subscrito zero, $_0$, representa os valores iniciais.

Para programar o movimento do motor, foi fulcral seleccionar os valores a colocar nos parâmetros “*Position [step]*”, “*Operating speed [Hz]*” e “*Acceleration/Deceleration [s]*” (figura 14.b). O primeiro corresponde ao dobro do valor da amplitude, ou seja, a distância entre a posição máxima e a posição mínima atingidas ao longo do movimento. Por questões de segurança nunca se assumiu a origem, zero *steps*, para a posição mínima, tal como nunca se operou no valor máximo absoluto que o atuador linear permite, tendo-se mantido sempre uma margem de segurança,

garantiu-se que, mesmo em movimentos mais violentos, a peça móvel nunca atingisse os batentes do atuador. Caso isto se verificasse, o sistema de alarme¹² seria ativado.

A velocidade a que a asa foi sujeita ao longo de todo o trabalho experimental assume o comportamento de uma onda triangular periódica (figura 15), onde o valor máximo de velocidade, OS , é obtido por

$$OS = \frac{4A}{t_a T}$$

onde, t_a corresponde à fração de período a que corresponde o tempo de subida, sendo que a porção do tempo de descida corresponde a $t_{a_{desc}} = 1 - t_{a_{sub}}$, e T ao período da oscilação. Apesar do parâmetro OS ser apresentado no *software* com a unidade Hz, esta frequência está diretamente relacionada com a velocidade de operação sendo que 1 Hz corresponde a 1 *step*/s. O motor opera em valores de OS superiores a 0,4 m/s sem que o alarme dispare. No entanto, no seu manual indica que esta deverá ser a sua velocidade máxima de operação, por isso, por motivos de segurança, optou-se por não se ultrapassar este valor.

Por último, o terceiro parâmetro definido no *software MEXEO2* não se trata de uma aceleração nem de uma desaceleração, como se pode ver pelas suas unidades, mas sim de um tempo, o tempo que o perfil tem para acelerar e desacelerar. Desta forma, cada período completo é segmentado em quatro partes: 1) aceleração na subida; 2) desaceleração na subida; 3) aceleração na descida; 4) desaceleração na descida; sendo definido através de quatro tempos de aceleração/desaceleração, respetivamente, a_{sub} , d_{sub} , a_{desc} , d_{desc} .

¹² Mecanismo de segurança do próprio motor, que se ativa automaticamente quando este excede algumas das condições de funcionamento, por exemplo, temperatura e/ou velocidade, fazendo com que este deixe de operar [2].

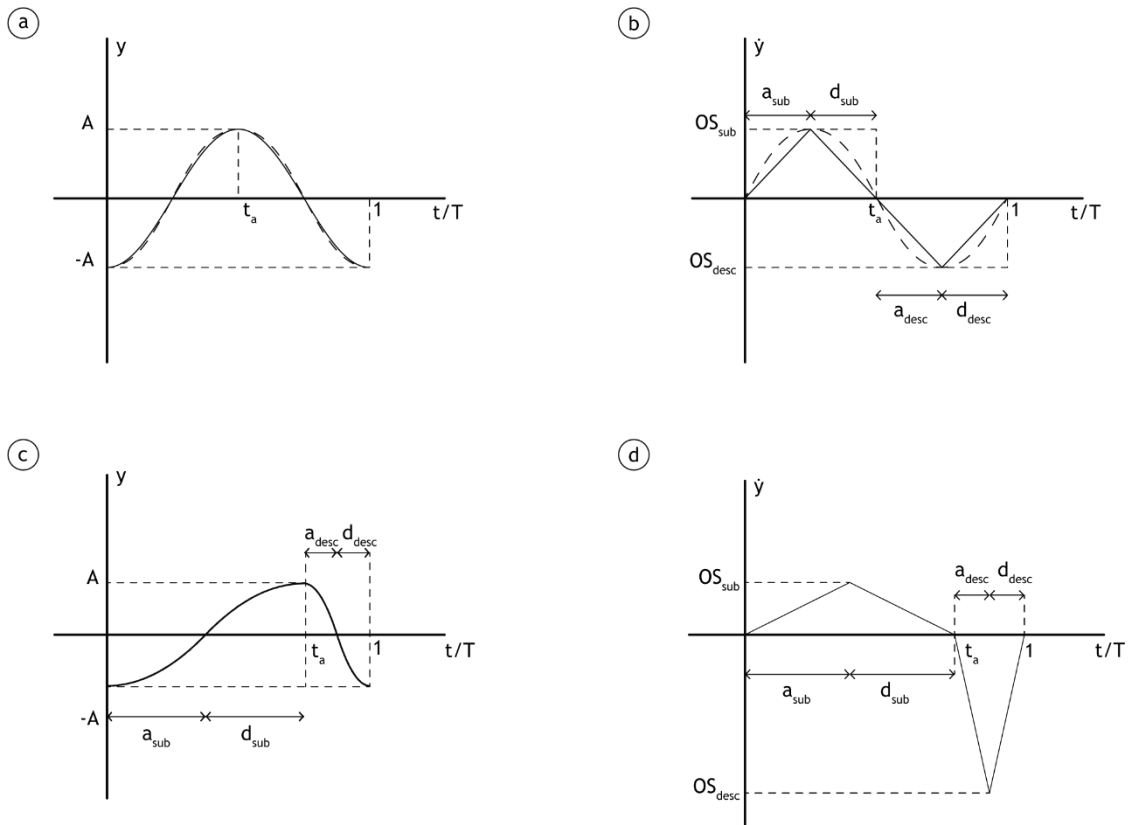


Figura 15 | Perfis de movimento: movimento simétrico: a) Gráfico de posição (linha a cheio) sobreposto a uma função seno (linha a tracejado); b) Gráfico de velocidade (linha a cheio) sobreposto à derivada da função seno (linha a tracejado); movimento assimétrico: c) Gráfico de posição; d) Gráfico de velocidade.

Criou-se uma folha cálculo em Excel, de forma a que, consoante a amplitude e a frequência desejadas, se obtivessem automaticamente os valores de amplitude em *steps*, o valor da “*Operating speed [Hz]*” e do tempo que o motor tem para acelerar e desacelerar. Este parâmetro de tempo também depende da fração de assimetria.

A referida folha de cálculo também incorpora um mapa dos casos, mediante a velocidade do escoamento, que o motor, dentro dos parâmetros de segurança, permite operar. Foi criada uma outra folha de cálculo com o objetivo de converter este mapa para parâmetros adimensionais relevantes ao problema, ou seja, frequência reduzida, amplitude adimensional e número de Strouhal. Esta segunda folha de cálculo permite, também, obter o valor do número de Reynolds através da velocidade de escoamento não perturbado. O número de Reynolds depende de ρ , que foi obtido através da lei dos gases perfeitos e de μ , que foi determinado através da lei de Sutherland. Para que tal fosse possível, os valores de pressão e temperatura ambientes foram constantemente monitorizados.

Obtiveram-se diversas imagens para cada caso, com quantidades de fumo distintas, tendo-se posteriormente optado pelas que permitiam uma melhor visualização das esteiras. De forma a

garantir a coerência e o rigor dos resultados, criou-se uma lista de procedimentos a seguir no laboratório no decorrer da experiência:

1. Ligar máquina de fumo.
2. Ligar o ar comprimido.
3. Posicionar a câmara.
4. Verificar se o diafragma da câmara se encontra totalmente aberto.
5. Ligar a câmara e respetivo computador.
6. Ligar o programa da câmara e selecionar as configurações desejadas (figura 10.b):
 - a. *Frame Rate* – 500 fps
 - b. *Trigger Mode* – *End*
 - c. Ativar o modo *Low Light*
 - d. *Shutter* – $1/500 \text{ sec}^{13}$
7. Focar o plano central da asa.
8. Alinhar o plano do laser.
9. Ligar o micromanómetro, verificando se este estabiliza em 0,00 m/s.
10. Ligar o túnel de vento.
11. Deixar o túnel de vento aberto, no máximo, durante algum tempo, de forma a garantir uma melhor homogeneização da temperatura do laboratório.
12. Ajustar a velocidade desejada (através da abertura da guilhotina e do valor apresentado no micromanómetro).
13. Registrar a temperatura e a pressão.
14. Programar o movimento desejado através do programa do motor (figura 14.b).
15. Recolher dados.

Ao longo do trabalho as variáveis em estudo intercorreram entre diversos valores, assim, variou-se a velocidade de escoamento não perturbado entre 0,25 m/s e 1,00 m/s, a amplitude de oscilação entre 0,007 m e 0,028 m e a frequência de oscilação entre 1,0 Hz e 5,5 Hz, respeitando sempre os limites operacionais do motor. Em termos de parâmetros adimensionais refletiu-se numa variação de número de Reynolds entre $1,5 \times 10^3$ e $6,3 \times 10^3$, de frequência reduzida entre 0,63 e 13,82, de amplitude adimensional entre 0,07 e 0,28 e de número de Strouhal entre 0,01 e 0,39.

¹³ Os casos da secção 3.1 foram retirados com um *Shutter* de $1/25 \text{ sec}$, sem a ativação do modo *Low Light*

Capítulo 3 | Resultados e Discussão

“O vencedor não será o mais forte, será aquele que melhor se adaptar.” – Charles Darwin

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos ao longo do trabalho experimental, que se pode dividir em três partes: 1) visualização; 2) estudo da influência de diversos parâmetros (Re , k , h e St); 3) estudo do efeito da assimetria no movimento.

O objetivo ao longo de todo o trabalho foi analisar a influência dos diversos parâmetros nas estruturas libertadas por um perfil NACA0012 sujeito a uma oscilação puramente vertical. O ângulo de ataque do perfil foi sempre mantido a 0° , a velocidade de escoamento não perturbado variou entre 0,25 m/s e 1,00 m/s e a frequência e a amplitude de batimento variaram, respetivamente, de 1,0 Hz a 5,5 Hz e de 0,007 m a 0,028 m. Apesar do ângulo de ataque do perfil ter sido sempre mantido constante, devido ao movimento do perfil, o escoamento de aproximação altera em cada fase do movimento, fazendo com que o ângulo de ataque efetivo não o seja, como explicado pelo efeito de Knoller-Betz.

Em todas as imagens apresentadas o escoamento é libertado da direita para esquerda, estando o perfil situado no lado direito e a dimensão da esteira captada corresponde a aproximadamente 3 cordas do perfil. Um período do movimento corresponde a uma batida completa, ou seja, subida e descida. Assim, $t/T = 0,00$ representa a posição mais baixa que o perfil atinge no seu movimento e $t/T = 0,50$ a posição máxima do perfil ao longo do seu movimento simétrico (para movimento assimétrico a posição máxima ocorre a $t/T = 0,75$).

É de salientar ainda que, ao longo do trabalho, o comprimento característico utilizado para calcular o número de Reynolds foi a corda aerodinâmica, sendo que $l = c$, logo:

$$Re = \frac{\rho U_\infty c}{\mu}$$

e utilizou-se o número de Strouhal característico do movimento, por ser o mais utilizado pelos diversos autores na área.

3.1 | Visualização

Nesta fase do trabalho, o objetivo inicial consistia em visualizar as estruturas da esteira do perfil em três velocidades de escoamento não perturbado diferentes. Assim, para uma frequência de batimento de 1,2 Hz e uma amplitude de 0,028 m, testaram-se as velocidades de 0,25 m/s, 0,5 m/s e 1,00 m/s. Na tabela 15 estão apresentadas as condições realizadas.

Tabela 15 | Condições de teste.

U_∞ [m/s]	f [Hz]	A [m]	Re	k	h	St
0,25	1,2	0,028	$1,5 \times 10^3$	3,02	0,28	0,27
0,50	1,2	0,028	$3,1 \times 10^3$	1,51	0,28	0,13
1,00	1,2	0,028	$6,3 \times 10^3$	0,75	0,28	0,07

Na figura 16 são apresentados os resultados em função da velocidade e da fração de período de movimento.

3.1.1 | $U_\infty = 0,25 \text{ m/s}$

No primeiro caso, de $U_\infty = 0,25 \text{ m/s}$, (primeira coluna da figura 16), o perfil apresenta uma esteira produtora de tração e apresenta um VBA que é transportado pelo escoamento ao longo da corda do perfil. Quando o perfil atinge a sua posição mais baixa, em $t/T = 0,00$, existe uma zona de vorticidade anti-horária a crescer no bordo de fuga do perfil, sendo totalmente libertada a aproximadamente um quarto do período. Similarmente, em $t/T = 0,50$, quando o perfil atinge a posição máxima do seu movimento vertical, uma zona de vorticidade horária surge no bordo de fuga, sendo libertada aproximadamente a meio da descida. O VBA aparece no extradorso do perfil durante o movimento descendente. Este surge uma vez que o ângulo de ataque efetivo excede o valor crítico, a partir do qual a camada limite não consegue resistir ao gradiente de pressão adverso local, acabando por se separar. Quando o perfil atinge a sua posição inferior, o VBA é conduzido na direção do bordo de fuga ao longo do extradorso do perfil, acabando por ser libertado pelo bordo de fuga em $t/T = 0,25$. Desta forma, o VBA e o VBF anti-horário são libertados simultaneamente, interagindo mutuamente. O VBA, também de vorticidade anti-horária, parece, assim, contribuir para a vorticidade libertada pelo bordo de fuga.

No intradorso do perfil, durante o movimento ascendente, também surge um VBA semelhante ao descrito por último. Porém, devido à estrutura acoplada ao perfil, não é possível visualizá-lo. Além disso, os fenómenos descritos repetem-se de período para período, com algumas diferenças de configuração devido aos efeitos turbulentos próprios do escoamento.

3.1.2 | $U_{\infty} = 0,50 \text{ m/s}$

O segundo caso, $U_{\infty} = 0,50 \text{ m/s}$, (encontra-se representado na coluna central da figura 16), apesar da frequência e da amplitude de movimento terem sido mantidas constantes, relativamente ao caso anterior, o número de Reynolds aumentou para $3,1 \times 10^3$ e o número de Strouhal e a frequência reduzida diminuíram para, respetivamente, 0,13 e 1,51, como se pode observar na tabela 15.

A esteira libertada pelo perfil parece ser indicadora de produção de tração e existe a formação de um pequeno VBA que se dissipa ao percorrer, aproximadamente, meia corda do perfil (antes do perfil atingir a posição inferior do movimento); no entanto, devido à turbulência própria da natureza do escoamento, as estruturas não são fáceis de detetar. A curvatura do escoamento presente na esteira do perfil torna-se menos evidente, uma vez que o parâmetro k reduziu, sugerindo que o ângulo de ataque efetivo também é afetado, pois, como explicado pelo efeito de Knoller-Betz, este depende de U_{∞} e está diretamente relacionado com a criação de sustentação instantânea e, conseqüentemente, com a curvatura presente na esteira de um perfil oscilante. Devido ao aumento de Re , e, conseqüentemente, diminuição de k , o momento de libertação das zonas de vorticidade anti-horária e horária pelo bordo de fuga ocorrem mais cedo, coincidindo, respetivamente, com a posição mínima e máxima do perfil. Isto acontece devido ao aumento do número de Reynolds, os efeitos convectivos ganham mais força relativamente aos efeitos difusivos, como explicado na secção 1.2.2 (o número de Reynolds corresponde à razão entre os efeitos de transporte convectivo e difusivo de quantidade de movimento).

3.1.3 | $U_{\infty} = 1,00 \text{ m/s}$

Neste caso a velocidade de escoamento foi aumentada para $U_{\infty} = 1,00 \text{ m/s}$, sendo apresentado na terceira coluna da figura 16. Tanto a frequência, como a amplitude de batimento foram mantidas iguais aos outros dois casos referidos; assim, os parâmetros Re , k e St alteraram apenas em função da variável em estudo, U_{∞} .

A esteira libertada pelo perfil, quando sujeito a estas condições, apresenta-se como indicadora de produção de resistência ao avanço. Apesar de a esteira, aparentemente, não mostrar indícios de criação de tração, apresenta uma pequena curvatura, o que demonstra que o perfil nestas condições ($Re = 6,3 \times 10^3$, $k = 0,75$, $h = 0,28$ e $St = 0,07$) é capaz de produzir alguma sustentação instantânea.

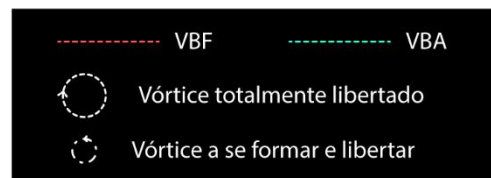
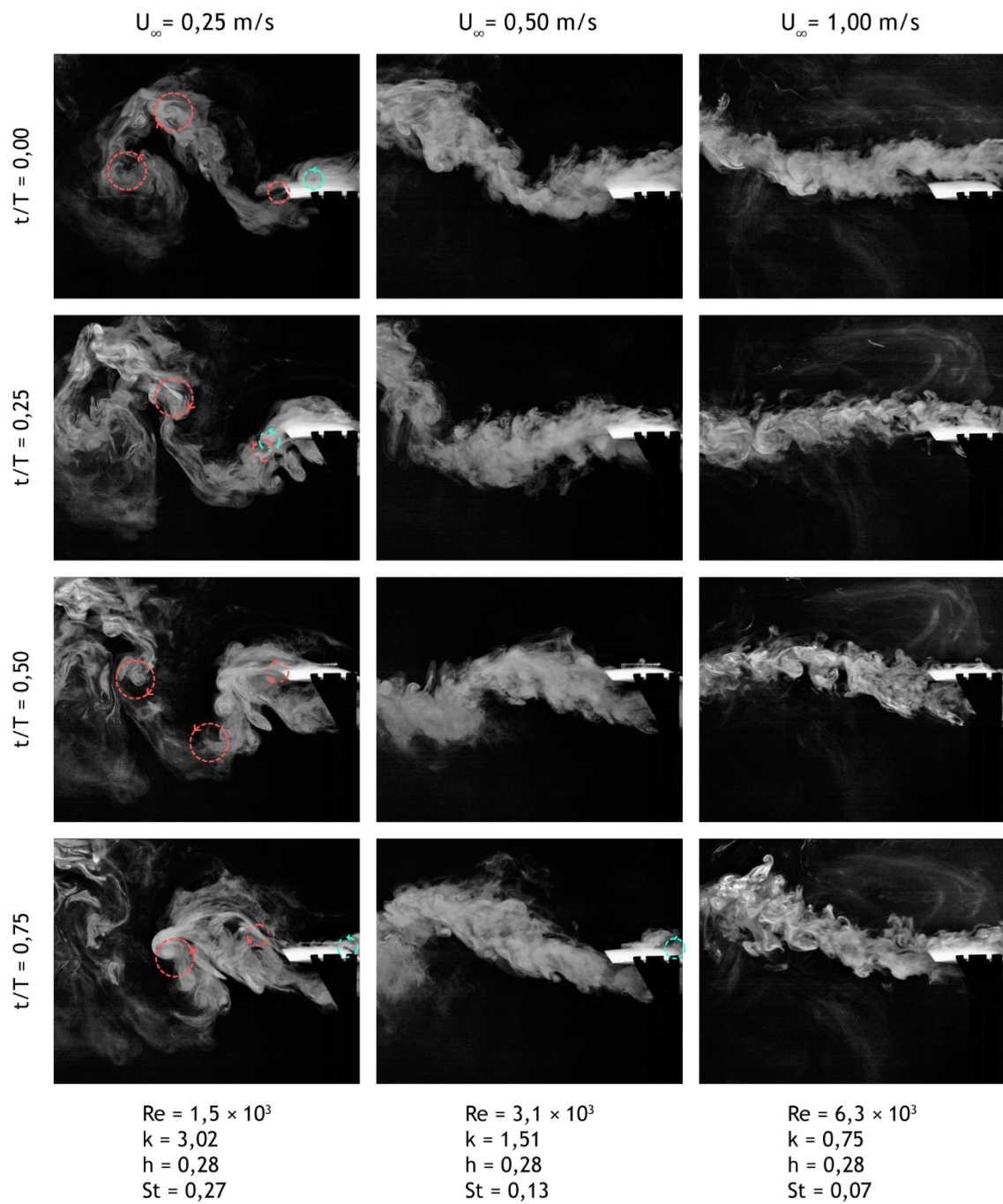


Figura 16 | Esteira libertada em função da velocidade e da fração de período de movimento.

Dos três casos analisados, somente um ($St = 0,27$) coincide com o intervalo de número de Strouhal em que os animais operam na natureza, segundo Taylor *et al.* [85]. Deste modo, empiricamente, é de esperar que este seja o resultado com melhor desempenho. Pela esteira libertada e, pelo que já se verificou anteriormente, o primeiro caso apresenta: 1) uma esteira indicadora de produção de tração, sendo facilmente detetáveis os jatos responsáveis pela criação desta força propulsiva; 2) uma maior deflexão da esteira, sugerindo valores mais elevados de sustentação instantânea. Assim, através da visualização das três esteiras obtidas, o caso que coincide com os valores de número de Strouhal vistos na natureza aparenta ser o mais vantajoso.

Observando a figura 16 e, lembrando que f e A foram mantidos constantes, deteta-se que em velocidade de escoamento não perturbado mais baixa, o perfil é capaz de criar tração e alguma sustentação. No entanto, com o aumento da variável em estudo, o escoamento passa a ser menos sensível ao movimento do perfil, sendo libertada uma esteira cada vez menos defletida e a capacidade de produção de tração por parte do perfil oscilante acaba por desaparecer, passando a ser libertada uma esteira de resistência ao avanço. Com o aumento de U_∞ : 1) o parâmetro Re aumenta, afetando diretamente o tempo de formação e libertação dos VBF e VBA, como já foi referido; 2) os parâmetros k e St diminuem, o que significa que há um impacto diferente entre a inércia do perfil e a do escoamento, refletindo-se numa menor curvatura apresentada pela esteira, demonstrando, também, uma clara influência no ângulo de ataque efetivo.

3.2 | Influência dos diversos parâmetros (Re , k , h e St)

Posteriormente, pretendeu-se estudar, de forma mais aprofundada, a influência dos diversos parâmetros nas estruturas criadas por um perfil oscilatório. Assim, para os três valores de U_∞ anteriormente testados, realizaram-se vinte e um casos de diferentes combinações de f e A (variando, respetivamente, de 1,0 Hz a 5,5 Hz e de 0,007 m a 0,028 m, dentro dos limites operacionais do motor), o que, em termos de parâmetros adimensionais, se traduz nas combinações apresentadas na tabela 16.

Tabela 16 | Condições de teste no estudo da influência dos parâmetros Re , k , h e St .

A [m]	f [Hz]	$U_\infty = 0,25 \text{ m/s}$			$U_\infty = 0,50 \text{ m/s}$			$U_\infty = 1,00 \text{ m/s}$		
		$Re = 1,5 \times 10^3$			$Re = 3,1 \times 10^3$			$Re = 6,3 \times 10^3$		
		h	k	St	h	k	St	h	k	St
0,028	1,0	0,28	2,51	0,22	0,28	1,26	0,11	0,28	0,63	0,06
	1,5		3,77	0,34		1,88	0,17		0,94	0,08
0,021	1,0	0,21	2,51	0,17	0,21	1,26	0,08	0,21	0,63	0,04
	1,5		3,77	0,25		1,88	0,13		0,94	0,06
	2,0		5,03	0,34		2,51	0,17		1,26	0,08
0,014	1,0	0,14	2,51	0,11	0,14	1,26	0,06	0,14	0,63	0,03
	1,5		3,77	0,17		1,88	0,08		0,94	0,04
	2,0		5,03	0,22		2,51	0,11		1,26	0,06
	2,5		6,28	0,28		3,14	0,14		1,57	0,07
	3,0		7,54	0,34		3,77	0,17		1,88	0,08
	3,5		8,80	0,39		4,40	0,20		2,20	0,10
0,007	1,0	0,07	2,51	0,06	0,07	1,26	0,03	0,07	0,63	0,01
	1,5		3,77	0,08		1,88	0,04		0,94	0,02
	2,0		5,03	0,11		2,51	0,06		1,26	0,03
	2,5		6,28	0,14		3,14	0,07		1,57	0,04
	3,0		7,54	0,17		3,77	0,08		1,88	0,04
	3,5		8,80	0,20		4,40	0,10		2,20	0,05
	4,0		10,05	0,22		5,03	0,11		2,51	0,06
	4,5		11,31	0,25		5,65	0,13		2,83	0,06
	5,0		12,57	0,28		6,28	0,14		3,14	0,07
	5,5		13,82	0,31		6,91	0,15		3,46	0,08

Todos os casos foram analisados através da visualização da esteira libertada pelo perfil; desta forma, criaram-se os três gráficos seguintes (figura 17, 18 e 19):

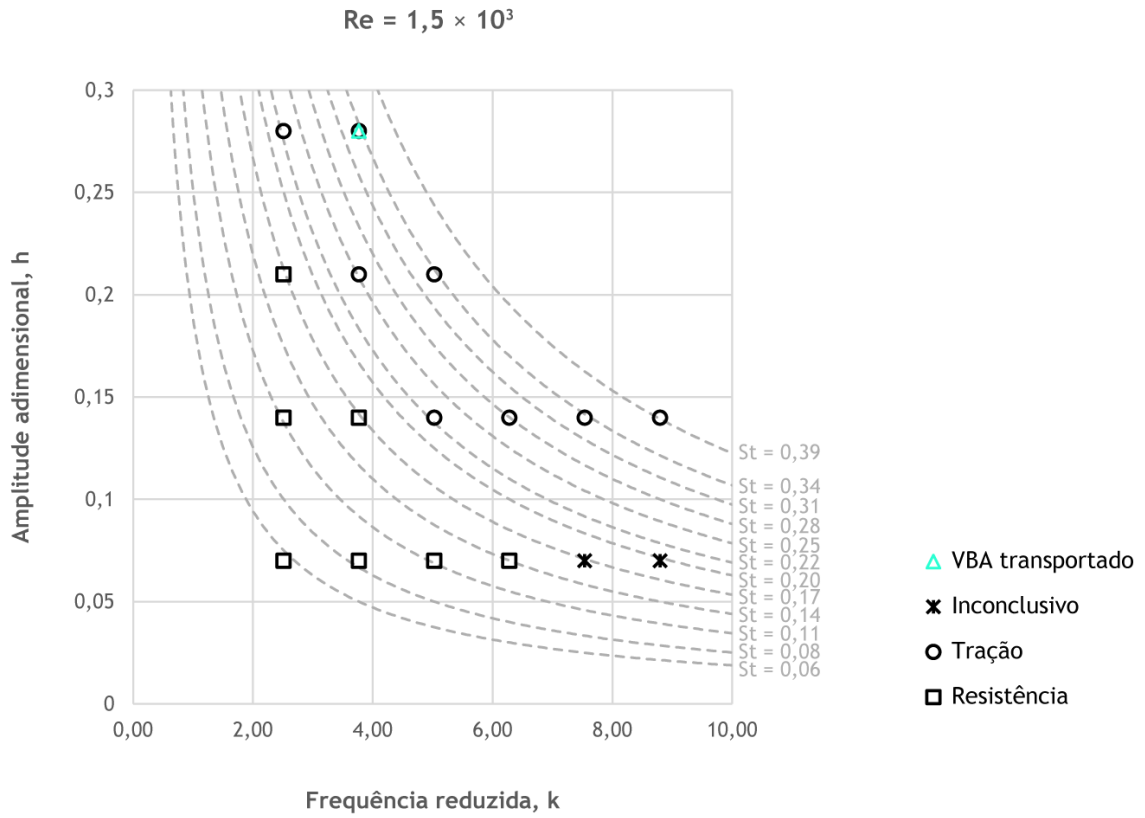


Figura 17 | Tipo de esteira em função de k e h para $Re = 1,5 \times 10^3$.

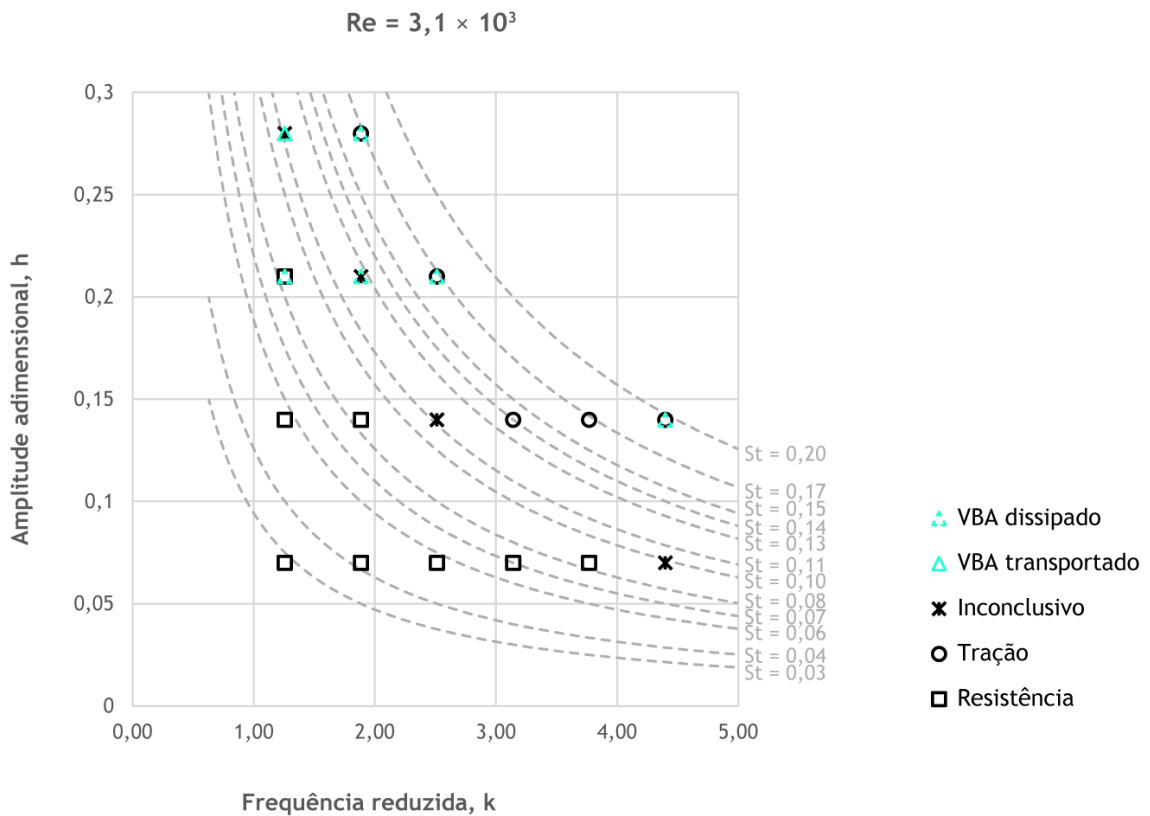


Figura 18 | Tipo de esteira em função de k e h para $Re = 3,1 \times 10^3$.

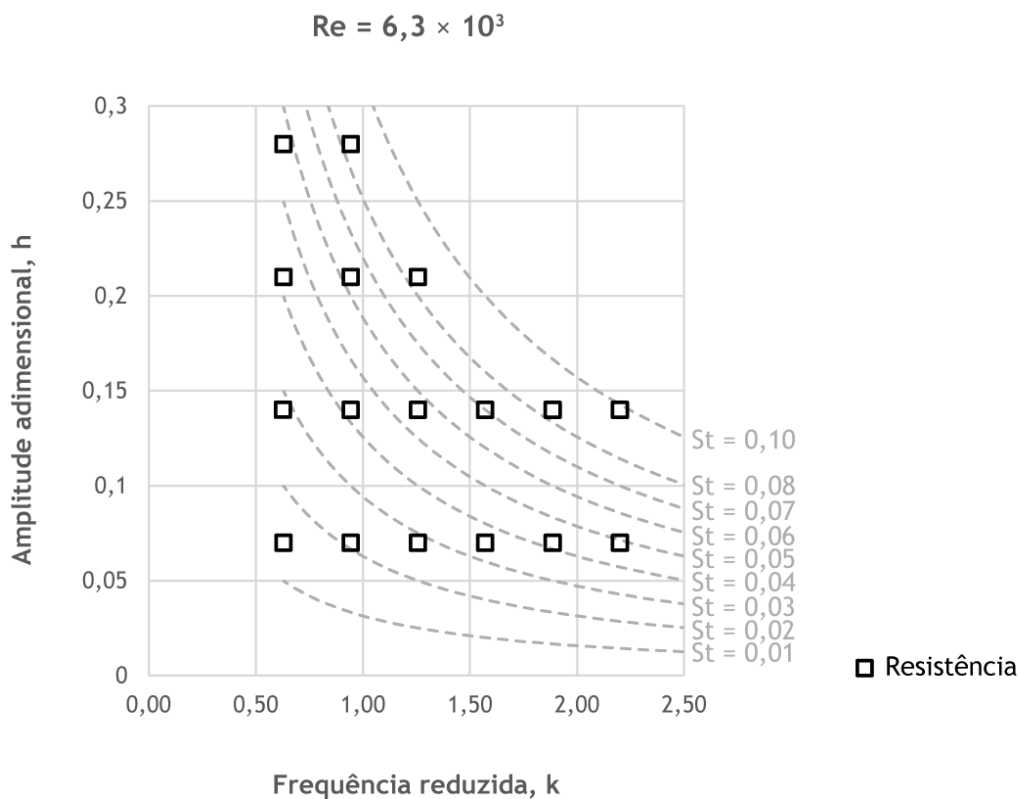


Figura 19 | Tipo de esteira em função de k e h para $Re = 6,3 \times 10^3$.

3.2.1 | $Re = 1,5 \times 10^3$

Como se pode observar na figura 17, neste regime ($Re = 1,5 \times 10^3$) obtiveram-se, tanto esteiras produtoras de tração (8 combinações de k e h), como de resistência (7 combinações de k e h). Nota-se também que um dos casos produtores de tração apresenta um VBA e que dois casos resultaram em inconclusivos. Quatro casos estão omissos do gráfico, pois foram considerados inválidos.

Os casos inválidos ($A = 0,007\text{ m}$ e $f \in [4,0; 5,5]\text{ Hz}$) devem-se ao facto de o material da asa não aguentar os esforços a que foi sujeito, acabando por fletir. Uma vez que a flexibilidade não é uma variável em estudo, optou-se por se desprezar tais casos, nos três regimes de Re diferente.

Nos dois casos inconclusivos ($h = 0,07$ e $k = 7,54; 8,80$) foi impossível de perceber o tipo de esteira libertada: 1) os casos encontram-se nas condições de transição, pela tendência do gráfico um dos casos deveria representar uma esteira de resistência e outro de tração; 2) os efeitos turbulentos próprios do escoamento predominam sobre os efeitos do movimento do perfil; 3) em frequências reduzidas mais altas, os VBFs são libertados muito próximos uns dos outros, como explicado mais à frente, o que, juntamente com os outros dois pontos referidos, dificulta a perceção do tipo de esteira libertada.

O caso com as condições $h = 0,28$, $k = 3,77$ e $St = 0,34$ é o único caso que apresenta um VBA. Este forma-se no extradorso do perfil, durante a descida e é transportado ao longo da corda até ser libertado pelo bordo de fuga. A libertação do VBA ocorre no instante em que o perfil inverte a direção do seu movimento, coincidindo com o momento em que o VBF anti-horário se está a formar, (ver coluna 1 da figura 20). Desta forma, o VBA e o VBF interagem positivamente, podendo contribuir para a produção de tração, pois o VBF encontra-se no seu momento de formação, podendo, assim, alimentar o VBA.

Pela observação do gráfico presente na figura 17 conclui-se que, para $Re = 1,5 \times 10^3$, um perfil que oscila puramente na vertical, em situações de $St \leq 0,17$ liberta uma esteira de resistência ao avanço, enquanto que em $St \geq 0,22$ a esteira é indicadora de produção de tração.

Com a análise das imagens recolhidas foi possível observar que o parâmetro k afeta: 1) a deflexão da esteira, traduzindo-se numa influência direta no ângulo de ataque efetivo e, conseqüentemente, na força de sustentação criada; 2) a proximidade com que os vórtices são libertados, sendo que em frequências reduzidas altas os VBFs surgem com maior distanciamento, do que em frequências reduzidas baixas. Reparou-se ainda que, para o mesmo h , com o aumento de k , e conseqüentemente St (ou seja, ao se ir entrando dentro do intervalo de número de Strouhal observado por Taylor *et al.* [85]), as estruturas presentes nas esteiras tornam-se cada vez mais claras. Por outras palavras, os efeitos turbulentos intrínsecos ao escoamento deixam de ser suficientemente fortes para desfazer as zonas de vorticidade criadas pela oscilação do perfil. De referir ainda que, para amplitudes adimensionais muito baixas, o movimento do perfil passa praticamente despercebido ao escoamento, sendo praticamente indetetáveis vestígios do mesmo na esteira do perfil. Com o aumento de k a esteira começa a defletir ligeiramente, indicando a produção de uma pequena sustentação instantânea, no entanto, dentro dos casos válidos, não se conseguiu nenhum caso que, em baixas amplitudes adimensionais, apresentasse uma esteira indicadora de produtora de tração.

Alguns casos selecionados são apresentados nas figuras 20, 21 e 22, com o intuito de se comparar visualmente os efeitos dos diversos parâmetros em estudo.

Na figura 20 são apresentados três casos de diferentes combinações de k e h , com a particularidade de todos se encontrarem no regime de $Re = 1,5 \times 10^3$ e $St = 0,34$. Os três casos apresentam uma esteira indicadora de produção de tração, tal como verificado acima, com comportamentos bastante semelhantes, observando-se que as estruturas que se formam e são libertadas pelo bordo fuga apresentam um desenvolvimento parecido. Contudo, o caso representado na primeira coluna apresenta um VBA transportado ao longo da corda do perfil, enquanto que nos outros dois casos, não foi detetada nenhuma separação no bordo de ataque, sugerindo que o aparecimento de VBA não está diretamente relacionado com o número de Strouhal, mas que depende de k e h . Além disso, comparando as três colunas entre si, observa-se que o aumento de k traduz-se numa aproximação das zonas de vorticidade libertadas pelo bordo

de fuga e, uma diminuição de h , provoca uma ligeira diminuição na altura da esteira, ou seja, a distância vertical entre os VBFs é reduzida.

Na figura 21 estão representados dois casos onde a frequência reduzida assume o mesmo valor ($k = 3,77$), variando a amplitude adimensional ($h = 0,28; 0,14$) e, conseqüentemente, o número de Strouhal (respectivamente, $St = 0,34; 0,17$). No caso representado na primeira coluna, onde a amplitude adimensional é maior, é libertada uma esteira indicadora de produção de tração. Todavia, o mesmo não acontece na segunda coluna, onde h diminuiu para metade. Pode-se verificar que a coluna 1 das figuras 20 e 21 apresentam o mesmo caso; desta forma, para a mesma frequência reduzida, o parâmetro h parece também ter influência no surgimento de separação no bordo de ataque.

A figura 22 permite a comparação visual de três casos distintos, sujeitos ao mesmo número de Reynolds ($Re = 1,5 \times 10^3$) e à mesma amplitude adimensional ($h = 0,14$), mas a diferentes frequências reduzidas ($k = 3,77; 5,03; 7,54$) e, naturalmente, diferentes números de Strouhal (respectivamente, $St = 0,17; 0,22; 0,34$). O primeiro caso apresenta uma esteira de resistência ao avanço, enquanto que os outros dois parecem ser capazes de produzir tração. Entre a segunda e a terceira coluna é facilmente visível que o aumento de k provocou um derrame das zonas de vorticidade muito mais próximas umas das outras, o que permite concluir que a proximidade (horizontal) dos VBFs está diretamente relacionada com o parâmetro k .

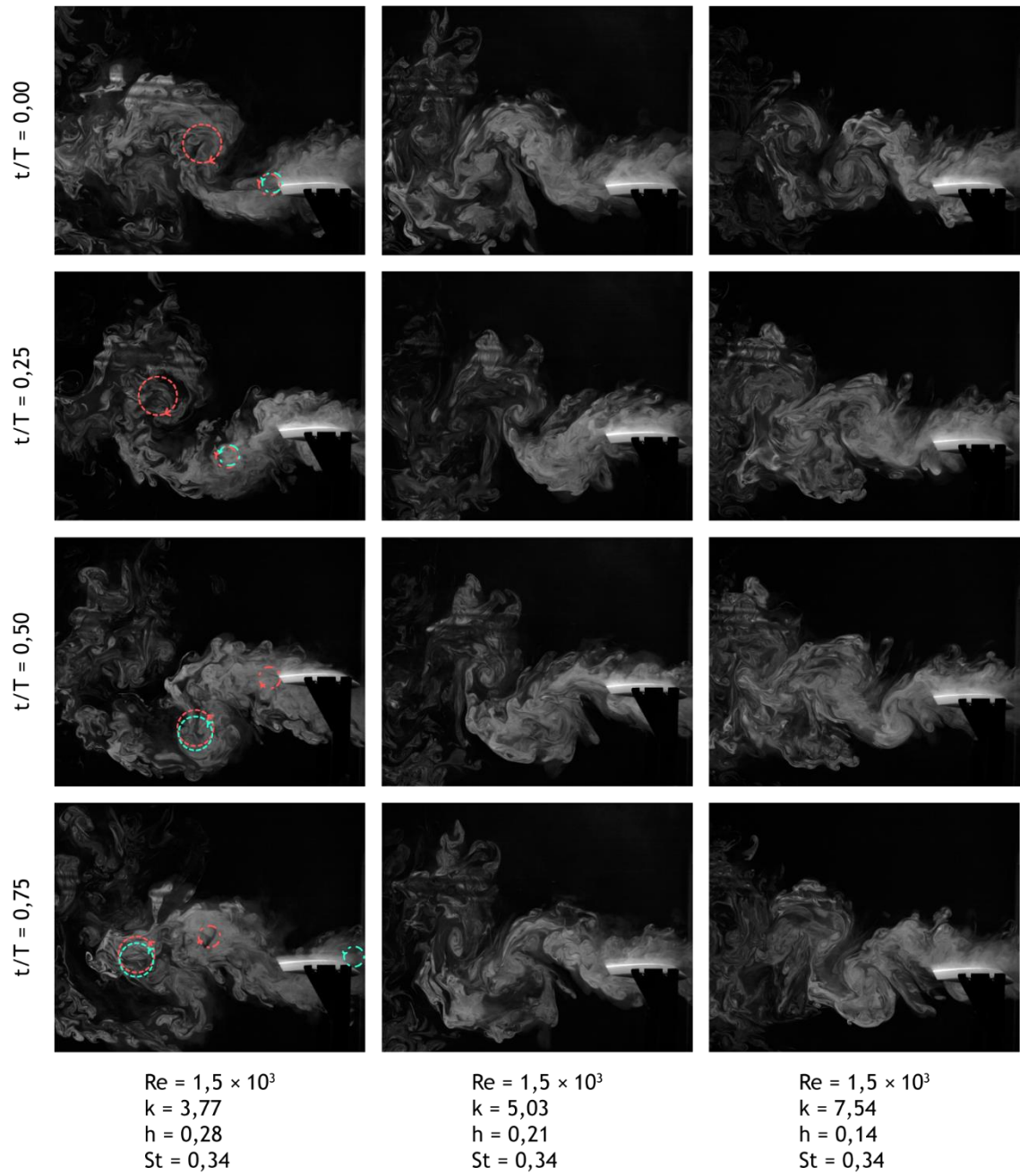


Figura 20 | Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de k e h , a St e Re constante ($Re = 1,5 \times 10^3$).

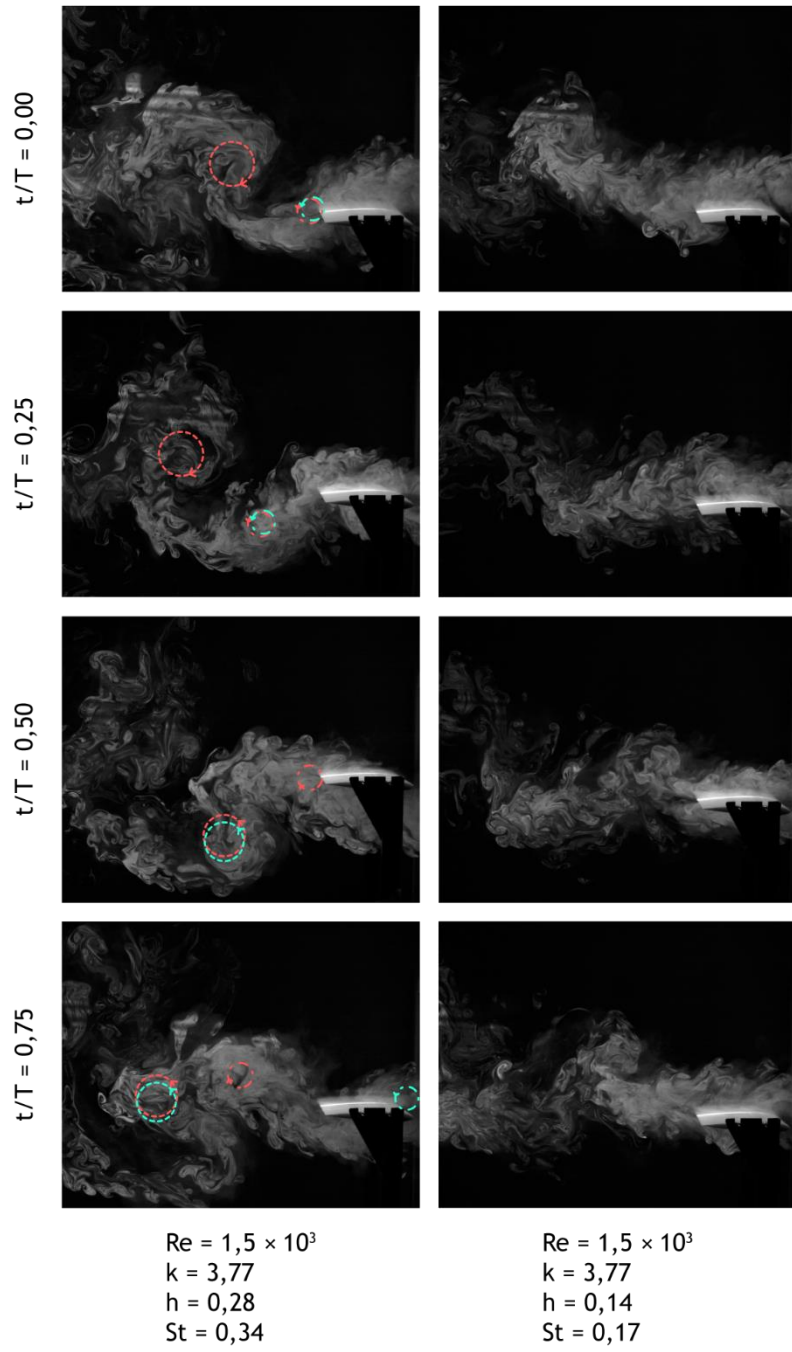


Figura 21 | Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de h , a k constante para $Re = 1,5 \times 10^3$.

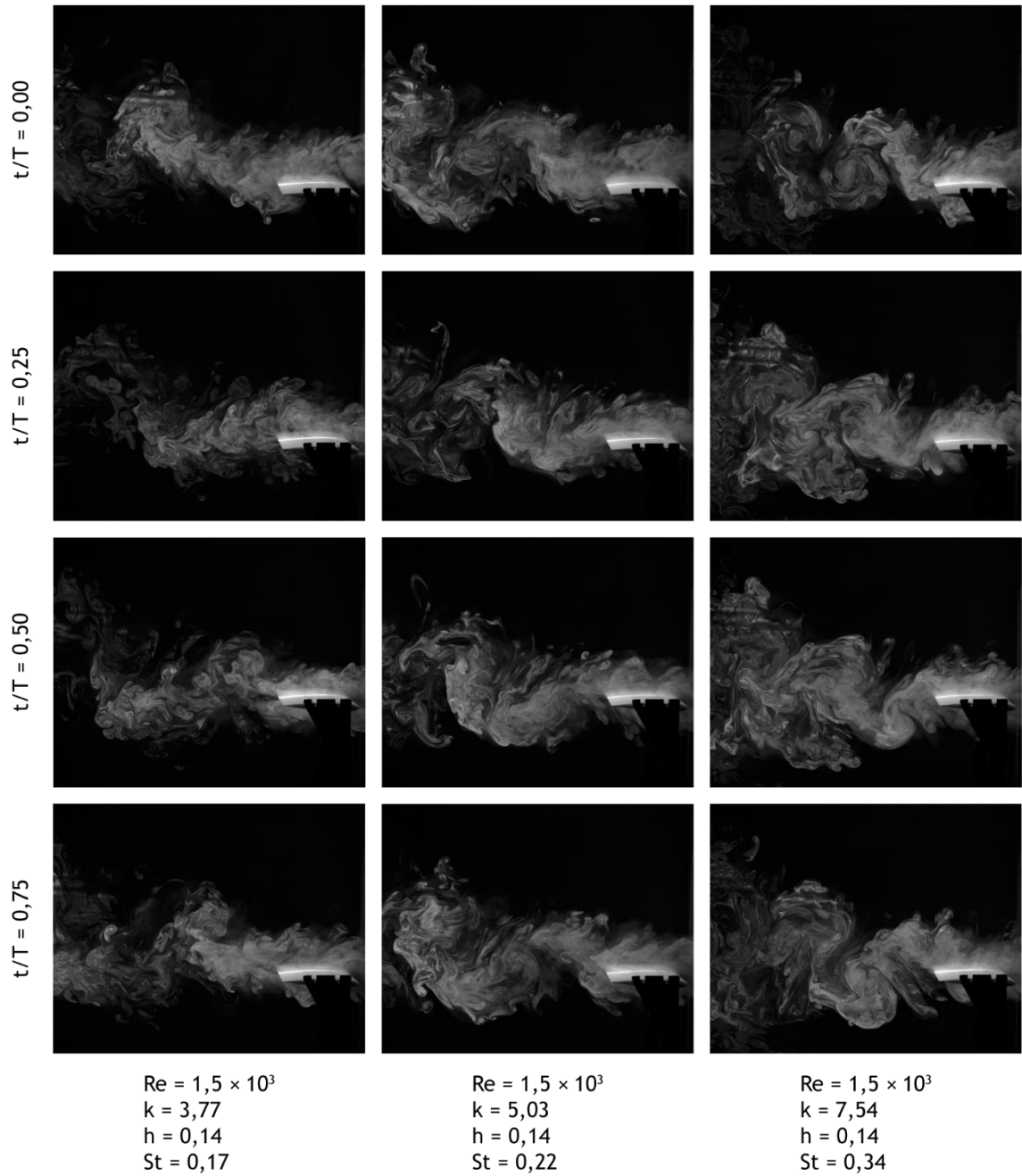


Figura 22 | Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de k , a h constante para $Re = 1,5 \times 10^3$.

3.2.2 | $Re = 3,1 \times 10^3$

Com o aumento do número de Reynolds e, para as mesmas combinações de A [m] e f [Hz], os casos que apresentam esteiras indicadoras de produção de tração reduzem para cinco, enquanto que as combinações que libertam uma esteira de resistência aumentam para oito, como se pode ver na figura 18. Além disso, os casos inconclusivos aumentaram para quatro, encontrando-se numa região de separação entre os casos produtores de resistência e de tração.

Apesar de se ter alterado apenas a velocidade de escoamento não perturbado, de forma a alterar o número de Reynolds, todos os restantes parâmetros dependentes de U_∞ também sofreram alterações. Assim, uma vez que a velocidade foi aumentada para o seu dobro, os valores de k e de St diminuíram para metade do seu valor absoluto, como se pode verificar na tabela 16.

Pela observação do gráfico apresentado na figura 18, é possível afirmar que, para este número de Reynolds, $St < 0,10$ corresponde a situações de produção de resistência e $St \geq 0,14$ representa libertação de esteiras produtoras de tração, o que leva a crer que a zona correspondente aos dados inconclusivos coincide com a zona de transição. Além disso, pelas imagens recolhidas, foi possível observar que em $St < 0,06$ o escoamento é praticamente indiferente à oscilação do perfil, não se verificando alterações na esteira consoante o movimento de subida e descida.

Relativamente aos VBAs, foi detetado um caso em que este é transportado ao longo da corda ($h = 0,28$ e $k = 1,26$) e cinco casos em que este se dissipa antes de ser libertado pelo bordo de fuga do perfil (para $h = 0,28$ e $k = 1,88$; para $h = 0,21$ e $k = 1,26; 1,88; 2,51$; e para $h = 0,14$ e $k = 4,40$). Como se pode verificar no gráfico da figura 18, o caso do VBA transportado corresponde a um dos casos inconclusivos, logo não se conseguiu estudar a interação deste com o VBF. Os VBAs dissipados surgiram essencialmente em combinações que forneciam esteiras produtoras de tração. Contudo, também foram observados em combinações correspondentes a casos inconclusivos e de esteiras de resistência. Assim, é possível afirmar que a pura existência de um VBA não se relaciona unicamente com o desempenho do perfil.

O aparecimento dos VBAs, para $Re = 3,1 \times 10^3$, não parece estar relacionado com o parâmetro St , mas essencialmente com h e, secundariamente, com k . Por outras palavras, nos maiores valores de h testados, surgiu sempre algum tipo de separação do escoamento no bordo de ataque; contudo, para amplitudes adimensionais mais pequenas, se k aumentar significativamente, também pode ocorrer separação.

A figura 23, semelhantemente à figura 20, apresenta três casos onde Re foi mantido a $3,1 \times 10^3$ e o St a $0,17$, tendo-se variado a amplitude e a frequência de batimento que, em termos adimensionais, corresponde a $k = 1,88; 2,51; 3,77$ e, respetivamente, $h = 0,28; 0,21; 0,14$. Todos os casos se comportam como produtores de tração e, apesar de, tal como na figura 20, todos seguirem um desenvolvimento parecido das respetivas esteiras, algumas diferenças destacam-se. Os casos apresentados na primeira e segunda coluna apresentam um VBA que se dissipa antes de ser libertados pelo bordo de fuga, como mostra o gráfico da figura 18. No entanto, o VBA do caso intermédio não foi possível de detetar nestas frações de período de movimento, sendo que se forma momentos após $t/T = 0,50$ e se dissipa antes do perfil chegar à posição mínima do movimento. Conclui-se assim que os parâmetros k e h não só influenciam a existência de separação no bordo de ataque, mas também os tempos de formação e comportamentos destas estruturas.

Estes três casos reforçam o que se concluiu com a figura 20, não só em relação à separação do escoamento no bordo de ataque, mas também relativamente à influência dos parâmetros k e h na proximidade com que as zonas de vorticidade são libertadas.

Na figura 24 são apresentados dois casos com a mesma frequência reduzida, $k = 1,88$, variando-se (semelhantemente à figura 21), a amplitude adimensional e o número de Strouhal, $h = 0,28; St = 0,17$ e $h = 0,14; St = 0,08$. Apesar da diferença do regime de operação entre os casos apresentados nesta figura e na figura 21, as conclusões são bastante semelhantes: com a diminuição do parâmetro h , o perfil deixa de ser capaz de produzir tração; e a formação de VBAs parece ser influenciada por h , sendo favorecida em valores mais elevados.

A figura 25 compara três casos distintos de $Re = 3,1 \times 10^3$ e $h = 0,14$, variando $k = 1,88; 3,14; 3,77$ e, respetivamente, $St = 0,08; 0,14; 0,17$. Analogamente à figura 22, o caso apresentado na primeira coluna apresenta uma esteira de resistência ao avanço e os outros dois casos uma esteira produtora de tração. Além disso, verifica-se novamente que o aumento de k junta as zonas de vorticidade libertadas.

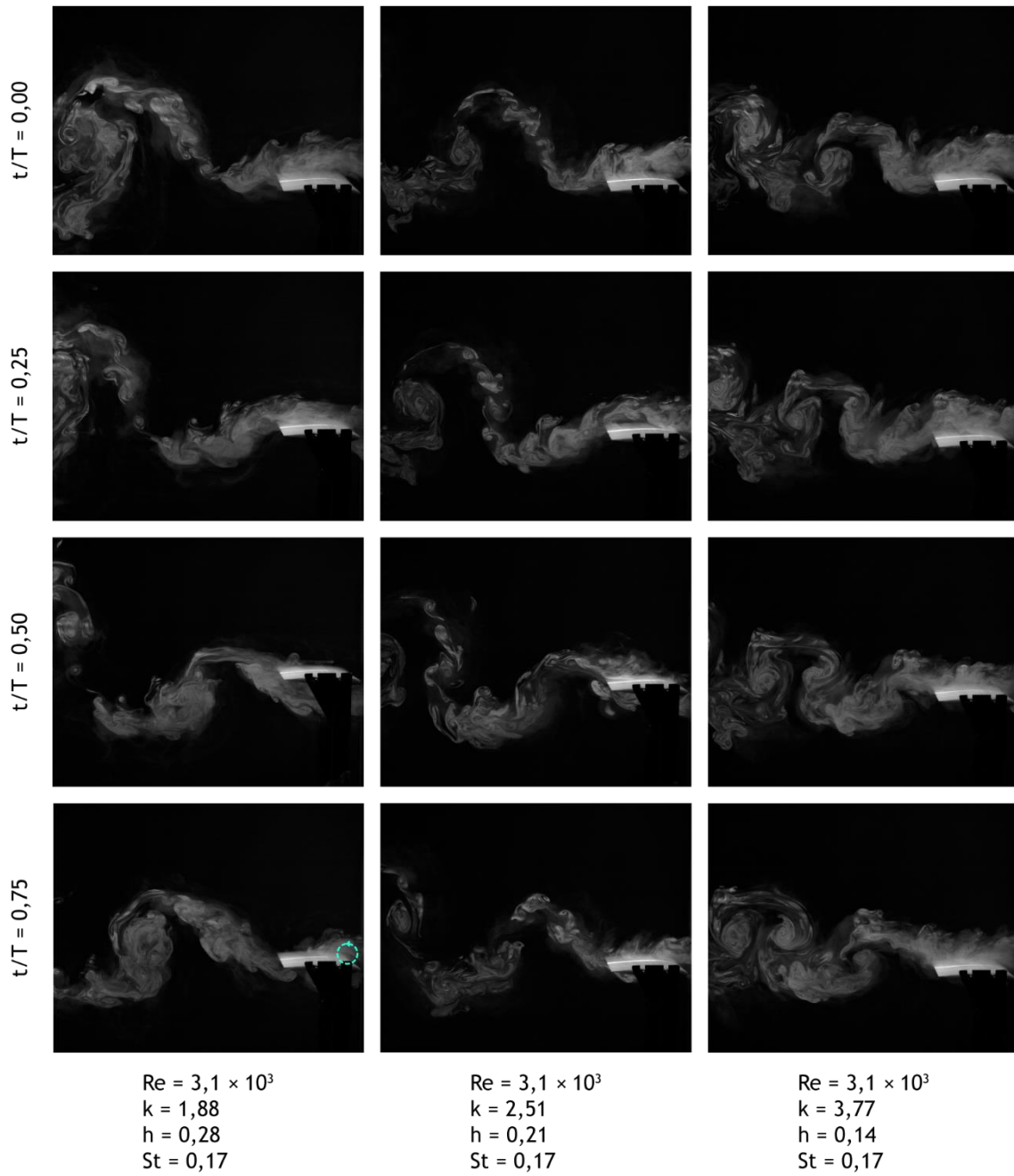


Figura 23 | Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de k e h , a St e Re constante ($Re = 3,1 \times 10^3$).

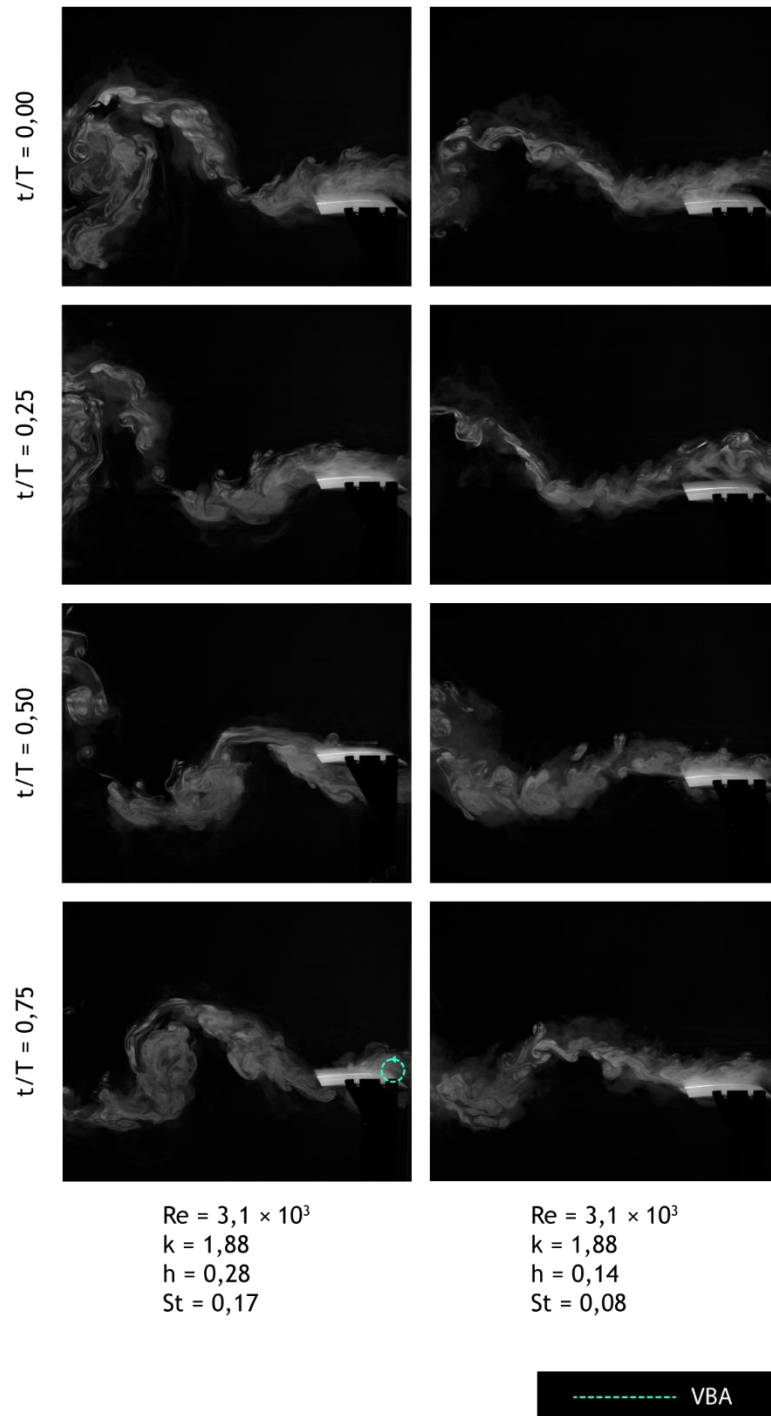


Figura 24 | Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de h , a k constante para $Re = 3,1 \times 10^3$.

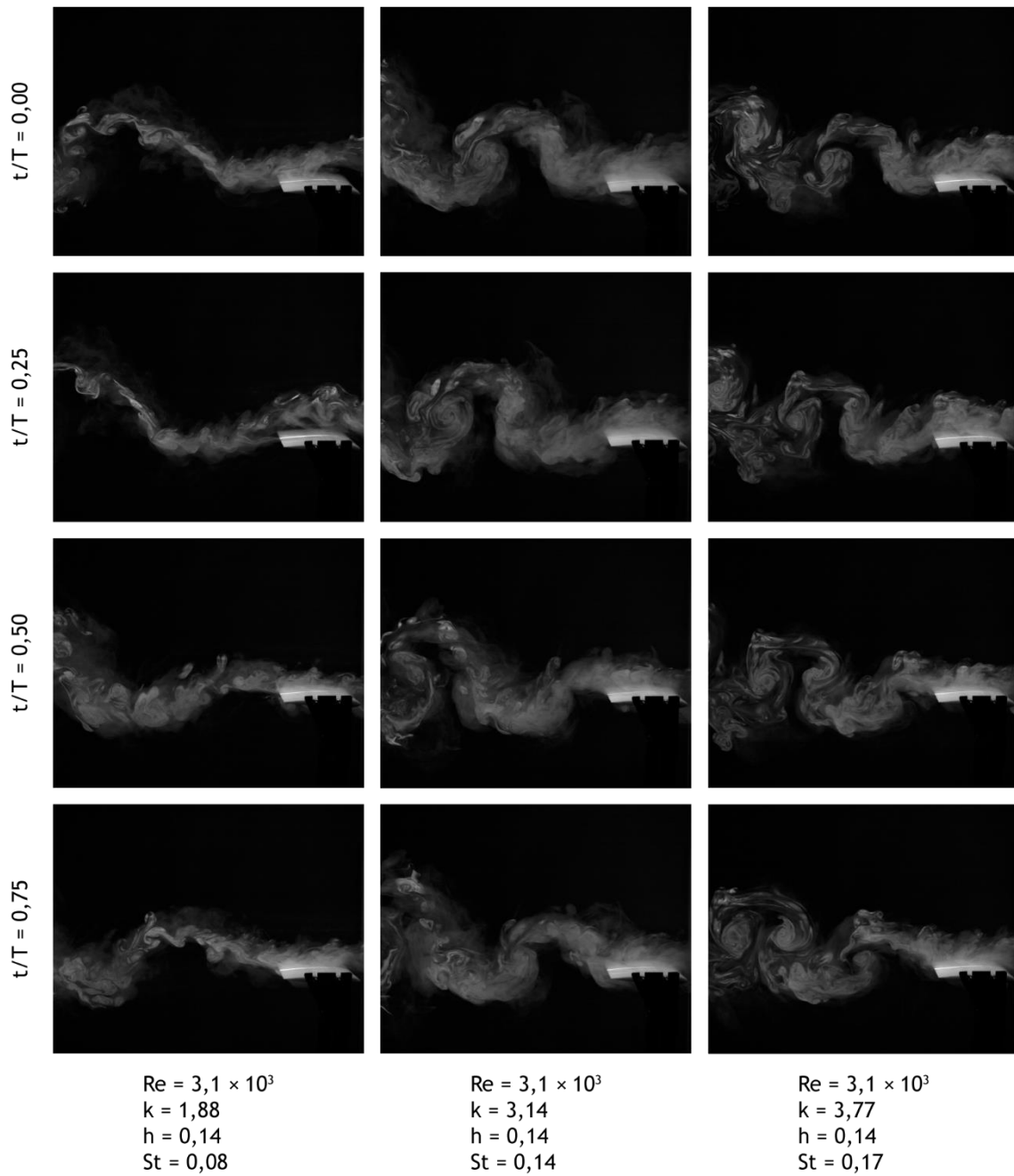


Figura 25 | Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de k , a h constante para $Re = 3,1 \times 10^3$.

3.2.3 | $Re = 6,3 \times 10^3$

É de lembrar que, em St muito baixos, a elevada velocidade e os efeitos de regime permanente adquirem um maior peso. Nos casos testados para este número de Reynolds ($Re = 6,3 \times 10^3$), o número de Strouhal encontra-se entre 0,01 e 0,10, que quando comparados com os valores em que a natureza opera, são bastante baixos. Além disso, dos três números de Reynolds testados, este é o mais elevado, o que significa que, comparativamente aos outros dois acima explorados, os efeitos convectivos têm um maior poder em relação aos difusivos. Em suma, as esteiras obtidas

neste regime não possuem estruturas bem definidas, uma vez que, devido à turbulência natural do escoamento, as regiões de vorticidade libertadas pelo perfil são perturbadas e o próprio fumo, marcador do escoamento, se dispersa rapidamente, em todas as direções, dificultando a focagem do plano desejado.

Como se pode ver na figura 19, os 17 casos válidos apresentaram esteiras de resistência ao avanço, sendo que, independentemente das combinações de k e h testadas, o perfil libertou sempre este tipo de esteira; e, mesmo em amplitudes e frequências mais elevadas, a curvatura da esteira foi pouca, sugerindo que o movimento do perfil não teve grande impacto sobre a inércia do escoamento.

Neste regime observou-se que em $St < 0,04$, (frequência reduzida e amplitude adimensionais muito pequenas), o escoamento é totalmente indiferente ao movimento do perfil, sendo que a sua esteira não se altera com a oscilação do mesmo, observado nos casos de $h = 0,07$ e $k = 0,63; 0,94; 1,26$. No caso de St mais elevado, $St = 0,10$, começa a ser visível alguma curvatura da esteira, mas não é tão pronunciada como nos regimes de número de Reynolds mais baixos.

Desta forma, pode concluir-se que o aumento do número de Reynolds afeta na criação de sustentação instantânea, uma vez que a curvatura apresentada pela esteira é menos acentuada, o ângulo de ataque efetivo é menor e, conseqüentemente, com base no efeito de Knoller-Betz, a força sustentadora também.

Na figura 26 são apresentados, por coluna, três casos distintos onde apenas variam os parâmetros k e h , sendo mantidos constantes Re e St . Todos os casos testados no regime de $Re = 6,3 \times 10^3$ apresentaram esteiras de resistência ao avanço. Todavia, através da observação desta figura pode-se constatar que, da esquerda para a direita, existiu um aumento visível na curvatura da esteira libertada, relacionado com os parâmetros k e h .

A figura 27 segue o mesmo modelo que a figura 21 e 24, sendo composta por dois casos de $Re = 6,3 \times 10^3$, $k = 0,94$, um com $h = 0,28; St = 0,08$ e outro com $h = 0,14; St = 0,04$. Porém, uma vez que nenhum dos casos nela representados demonstra a existência de VBA, não serve para confirmar a conclusão retirada anteriormente. Contudo, apesar de pouca, é possível observar uma pequena alteração na curvatura da esteira, relacionada com a alteração da amplitude de batimento, que ao diminuir aperta a esteira verticalmente.

A figura 28 segue o princípio da figura 22 e 25 e verifica a influência de k na curvatura da esteira, sendo constituída por três casos de $Re = 6,3 \times 10^3$ e $h = 0,14$, variando o número de Strouhal entre 0,04, 0,06 e 0,08 e a frequência reduzida entre, respetivamente, 0,94, 1,26 e 1,88.

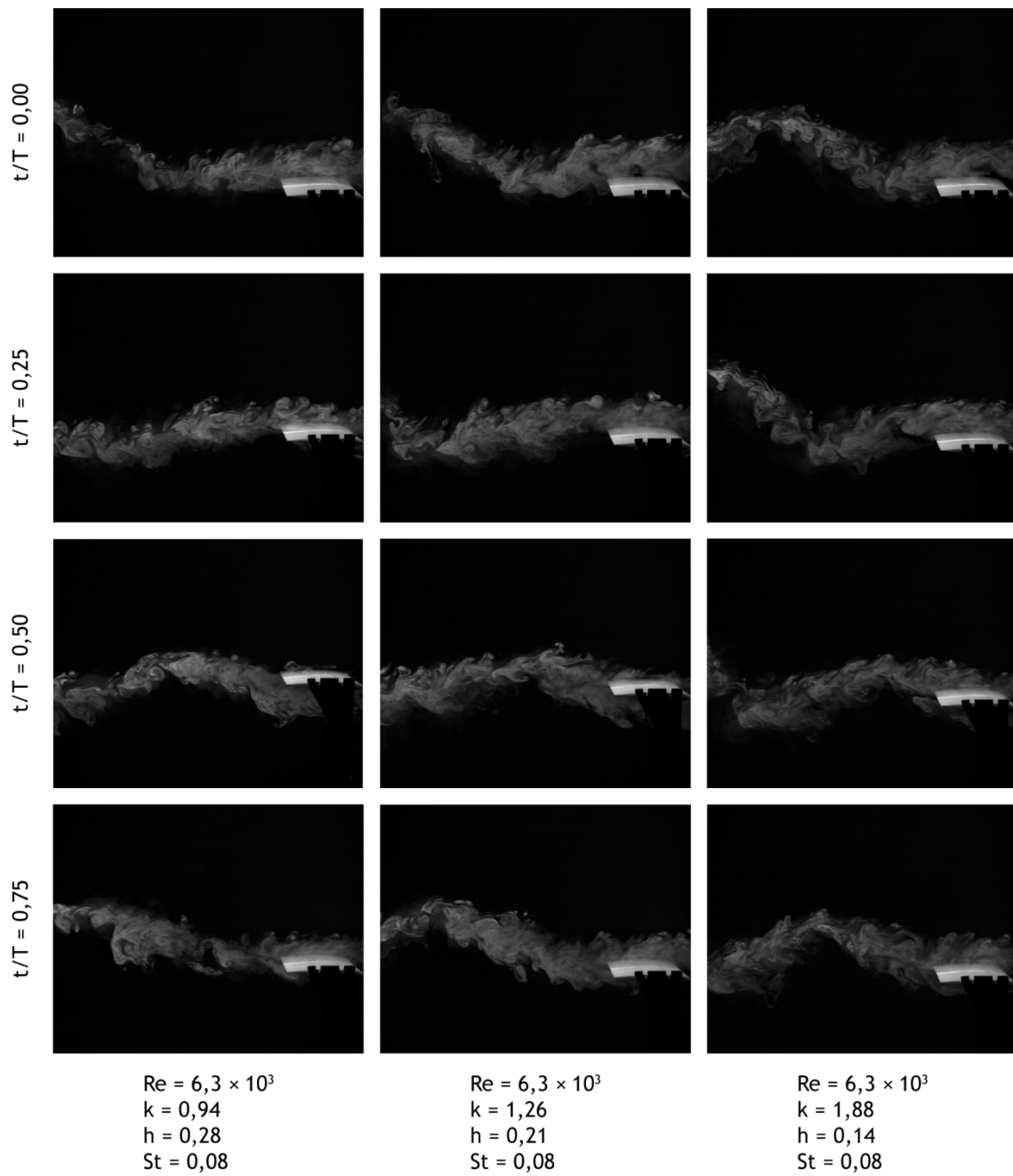


Figura 26 | Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de k e h , a St e Re constante ($Re = 6,3 \times 10^3$).

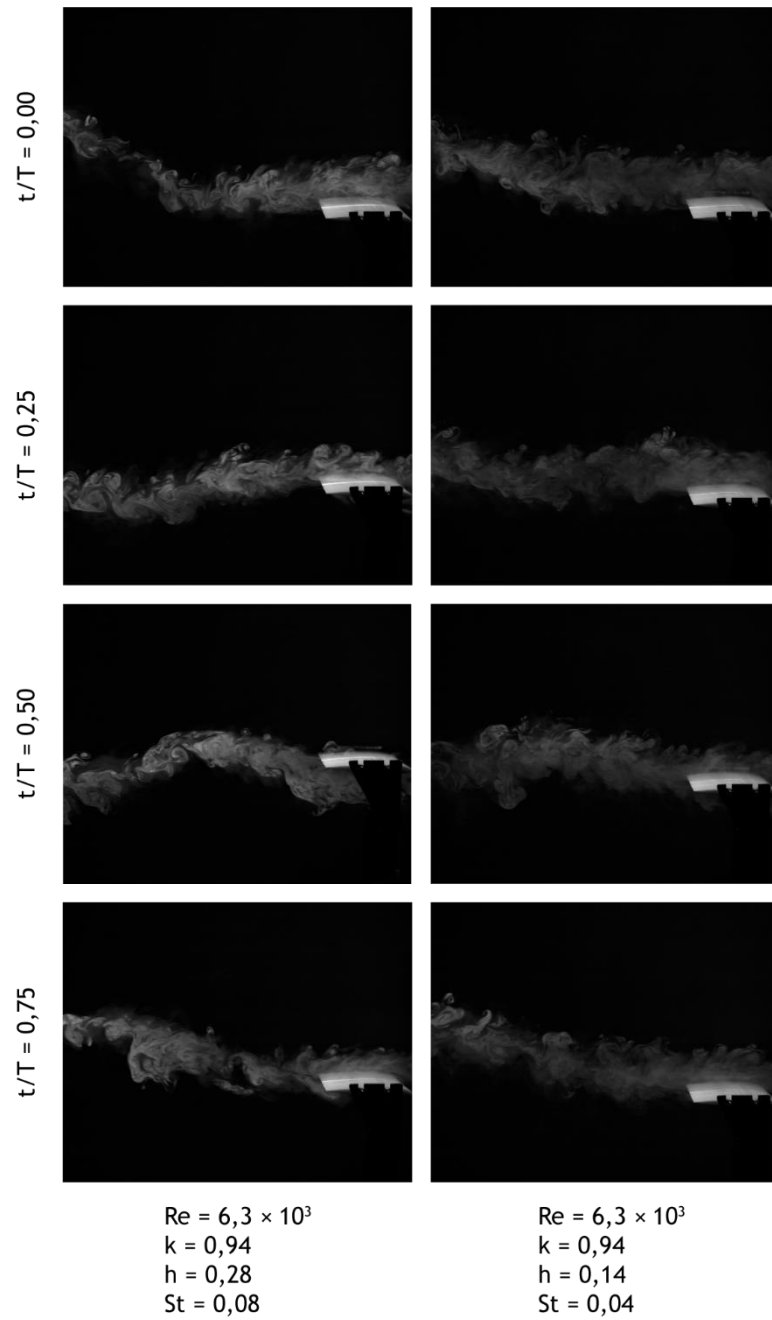


Figura 27 | Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de h , a k constante para $Re = 6,3 \times 10^3$.

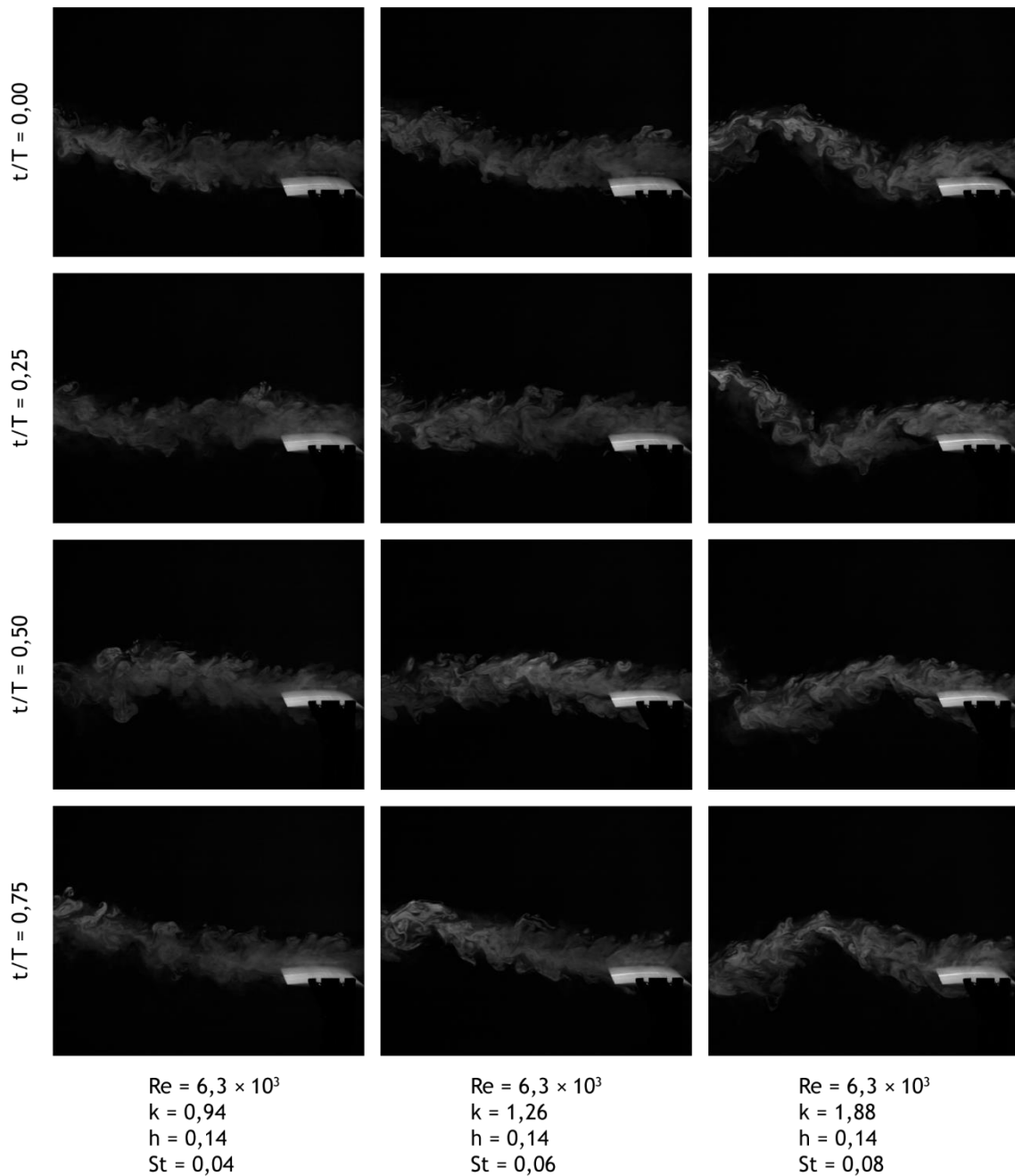


Figura 28 | Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de k , a h constante para $Re = 6,3 \times 10^3$.

3.2.4 | Comparação entre os Re estudados

Na figura 29 e 30 são apresentadas esteiras em função do número de Reynolds e da fração de período de movimento.

A figura 29 apresenta dois casos de $k = 2,51$, $h = 0,21$ e $St = 0,17$, sendo que o caso da esquerda corresponde a $Re = 1,5 \times 10^3$ e o da direita a $Re = 3,1 \times 10^3$. A visualização desta imagem sugere

que, para $St = 0,17$, o número de Reynolds influencia o tipo de esteira libertada, sendo que em Re mais baixos (primeira coluna) o perfil não parece ser capaz de produzir tração, enquanto que no caso de Re superior o perfil passa a libertar uma esteira indicadora de produção de tração. Esta conclusão pode estar influenciada pelo excesso de fumo visível nas imagens (caso da primeira coluna), uma vez que o controlo da marcação do escoamento é fulcral na leitura dos dados. Além disso, para $Re = 3,1 \times 10^3$ surge também um VBA, que se dissipa antes de ser libertado pelo bordo de fuga do perfil. Este não se encontra assinalado na imagem por não aparecer em nenhum dos *frames* apresentados, como explicado em cima.

É de relembrar que a $Re = 1,5 \times 10^3$ apenas foi observada produção de tração para $St \geq 0,22$, ou seja, dentro do intervalo reportado por Taylor *et al.* [85] como sendo aquele em que a maior parte da natureza opera. No entanto, a $Re = 3,1 \times 10^3$ foram observadas esteiras indicadoras de produção de tração fora desse intervalo, para $St \geq 0,14$. Assim, pensar-se-ia que o número de Reynolds influencia o intervalo de St em que o batimento do perfil é mais vantajoso. No entanto, com os dados recolhidos, não é possível retirar esta conclusão, sendo necessário incorporar a medição de forças aos testes executados e aumentar a gama de St para valores superiores a 0,4 (limite superior do intervalo reportado por Taylor *et al.* [85]).

A figura 29 permite concluir que o Re influencia a formação e a libertação das estruturas na esteira de perfis a oscilarem verticalmente, sendo que, para $St = 0,17$, um aumento de Re significa um aumento da curvatura da esteira e uma libertação de estruturas mais bem definidas. É necessário relembrar que o excesso de fumo pode ter afetado a análise dos casos.

Por sua vez, na figura 30 são apresentados dois casos de $k = 1,26$, $h = 0,21$ e $St = 0,08$, onde o caso da primeira coluna corresponde a $Re = 3,1 \times 10^3$ e o da segunda coluna a $Re = 6,3 \times 10^3$. Ambos os casos apresentam esteiras de resistência com aspetos bastante semelhantes, assim, para St baixos, o Re não parece ter grande impacto nos VBFs.

Como se pode verificar no gráfico apresentado na figura 18, o caso de $Re = 3,1 \times 10^3$ apresenta um VBA que se dissipa antes de ser libertado. Contudo, tal como acontece com o caso apresentado na segunda coluna da figura 29, o VBA não surge nos *frames* selecionados, uma vez que se forma durante a descida, após o perfil passar a posição central do movimento e se dissipa antes de ser atingida a posição mínima do movimento. O mesmo não acontece com o caso de $Re = 6,3 \times 10^3$, o que sugere que o parâmetro Re , de alguma forma, afeta a formação destas estruturas. Esta influência de Re não foi associada a nenhum acréscimo ou decréscimo do parâmetro, apenas se pôde constatar que este regime intermédio ($Re = 3,1 \times 10^3$) é favorável à ocorrência de separação do escoamento no bordo de ataque do perfil.

Com a análise da segunda coluna da figura 29 e da primeira coluna da figura 30, é possível realçar ainda que o parâmetro h parece ser um parâmetro chave nos tempos de formação e no comportamento dos VBAs, como mencionado na literatura [25], [82]. Nestes dois casos referentes

ao regime intermédio em estudo, onde apenas a amplitude adimensional coincide, foram observados VBAs com o mesmo tipo de comportamento, formando-se ambos após $t/T=0,75$ e dissipando-se antes do final do período.

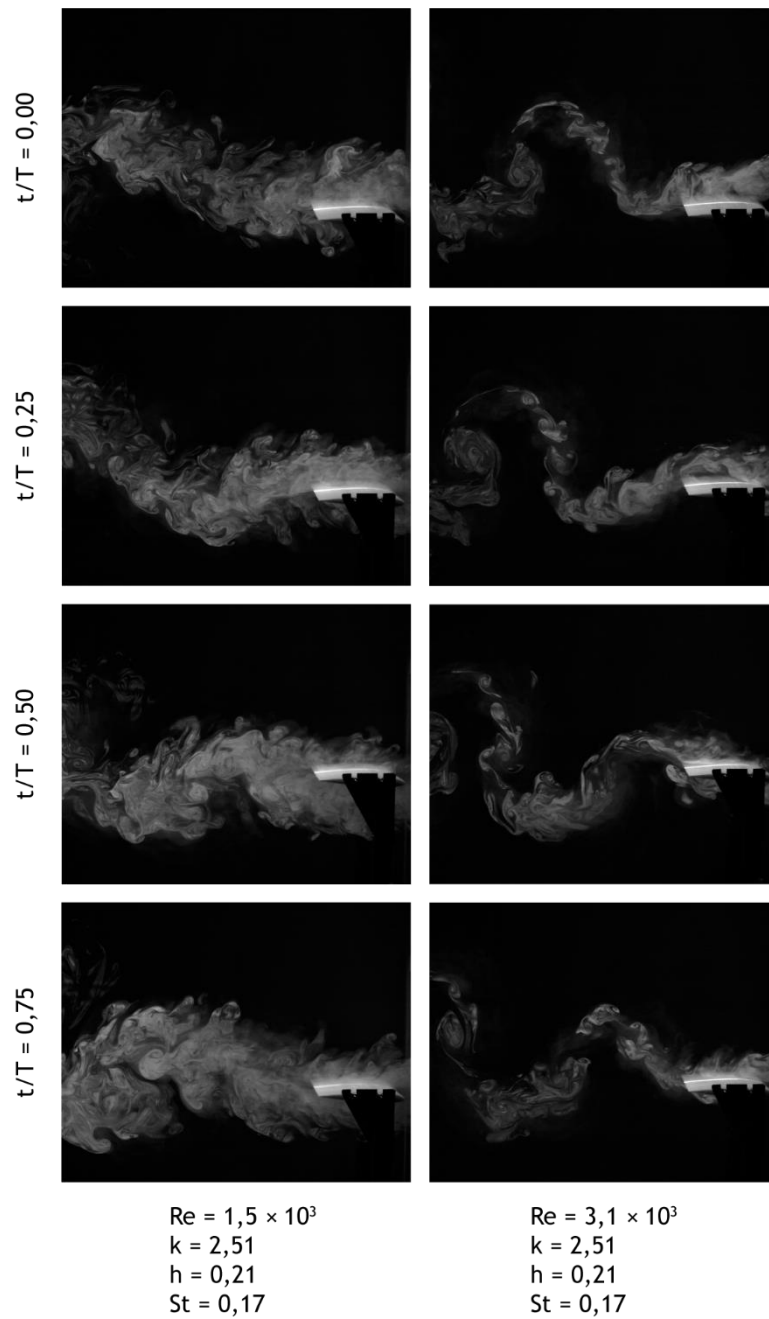


Figura 29 | Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de Re para $St = 0,17$.

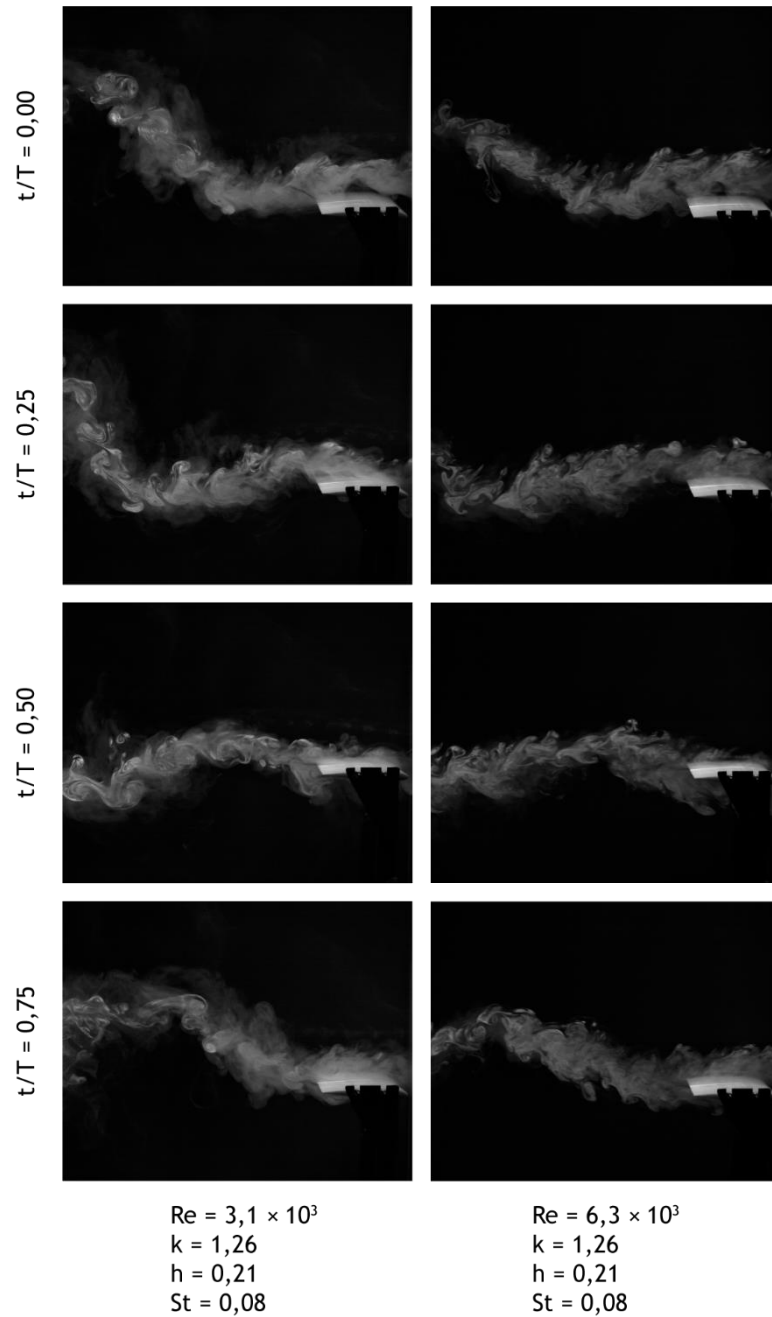


Figura 30 | Esteira libertada em função da fração de período de movimento e de Re para $St = 0,08$.

A figura 31 distingue-se da figura 29 e da 30 pelo facto de k e h não serem mantidos constantes, apesar de St assumir o valor de 0,17 para os dois casos apresentados. A coluna da esquerda apresenta um caso onde o perfil foi sujeito a $Re = 1,5 \times 10^3$, $k = 3,77$ e $h = 0,14$, resultando numa esteira de resistência ao avanço. O perfil, no caso representado na coluna da direita, foi sujeito a $Re = 3,1 \times 10^3$, $k = 2,51$ e $h = 0,21$ o que resultou numa esteira que indica que o perfil foi capaz de produzir tração e no aparecimento de um VBA, que se dissipou antes de ser libertado pelo

bordo de fuga do perfil (como referido acima, para este caso o VBA não aparece nos *frames* apresentados).

Através da figura 29 pôde-se observar que, para o mesmo valor de St , o número de Reynolds parece ter impacto sobre o tipo de esteira libertada por um perfil que oscila verticalmente. Segundo a literatura, k pequenos, assim como h pequenos, são, por norma, associados a esteiras de resistência ao avanço e k (ou h) maiores a esteiras produtoras de tração [67]–[69], [80], [81]. Porém, a figura 31 mostra que esta regra baseia-se num jogo entre os parâmetros k e h , mostrando que as estruturas presentes numa esteira libertada por um perfil oscilante dependem de ambos os parâmetros: no caso da direita, onde k é mais elevado e h menor, o perfil libertou uma esteira indicadora de produção de resistência ao avanço; no caso da esquerda, k mais baixo e h mais alto, o perfil mostrou-se capaz de produzir tração. Juntando esta informação à fornecida pelos gráficos das figuras 17 e 18, pode-se concluir que combinações de h maiores com k menores são mais vantajosas do que combinações de h pequenos e k maiores, sendo que para estes últimos também é possível obter força propulsiva; no entanto, k necessita de assumir valores bastante elevados.

A figura 32 apresenta dois casos em que apenas coincidem os valores de k , $k = 2,51$, sendo apresentados os casos em que o perfil foi sujeito a $h = 0,28$; $St = 0,22$; $Re = 1,5 \times 10^3$, na primeira coluna, e $h = 0,21$; $St = 0,17$; $Re = 3,1 \times 10^3$, na segunda coluna. Ambos os casos parecem ser capazes de produzir tração, sendo que o apresentado à direita possui, também, um VBA que se dissipa, como já foi referido anteriormente.

O facto de ambos os casos apresentarem esteiras produtoras de tração em condições tão distintas, com apenas k igual, sugere que este parâmetro tem realmente alguma influência no tipo de estruturas que surgem na esteira de um perfil oscilante. Além disso, apesar do excesso de fumo presente nas imagens da primeira coluna, é possível observar que a curvatura das esteiras libertadas, em ambos os casos, é semelhante, ou seja, a proximidade entre as zonas de vorticidade libertadas, na horizontal, é a mesma (uma vez que k assume o mesmo valor) e, apesar de h sofrer uma pequena redução, a dimensão vertical da esteira é pouco afetada.

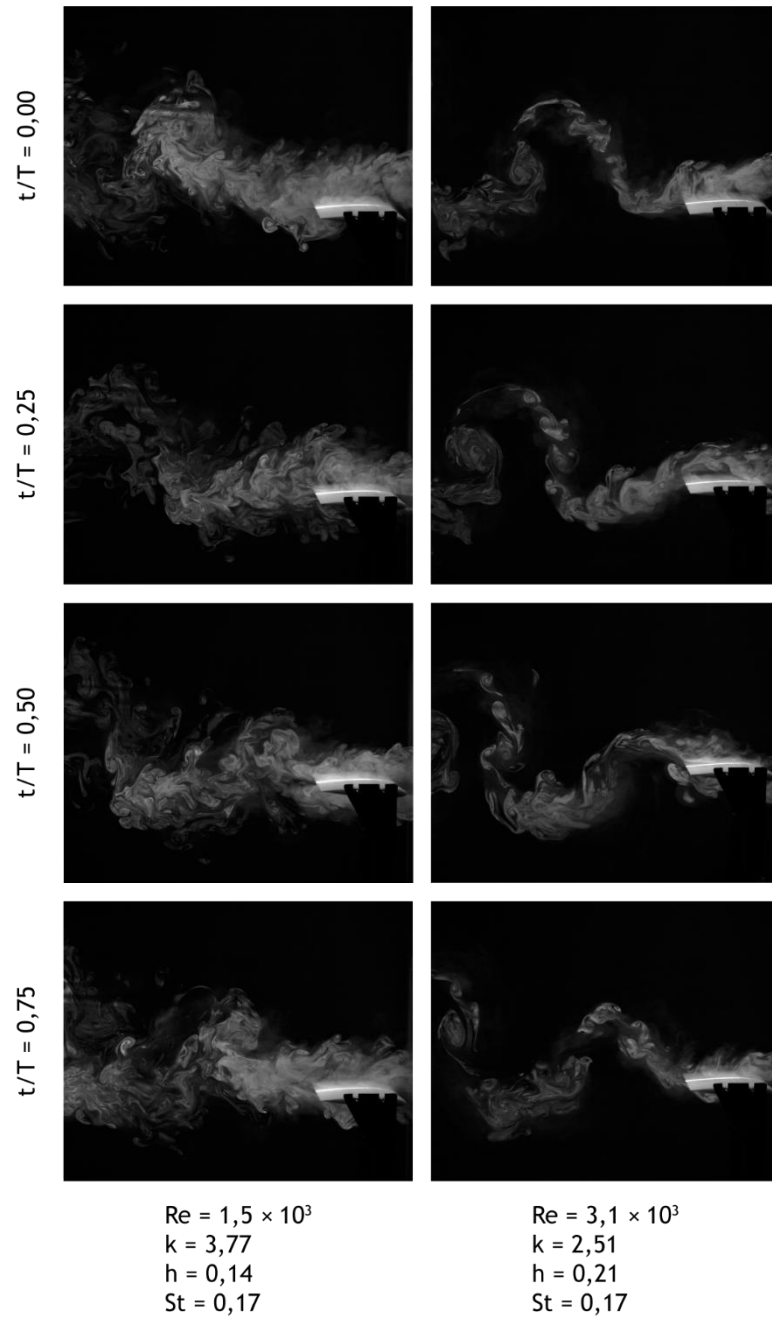


Figura 31 | Esteira libertada a diferentes k , h e Re , mas a St constante.

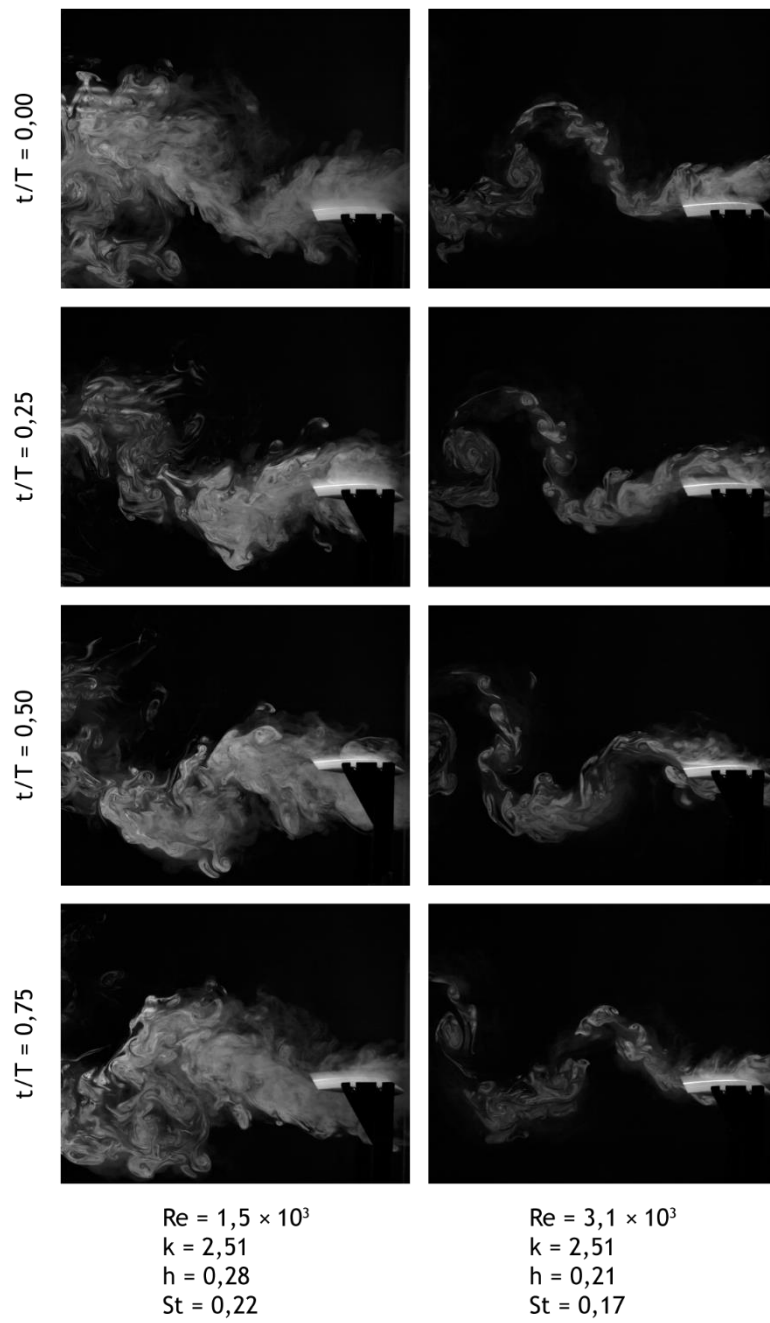


Figura 32 | Esteira libertada a diferentes h , St e Re , mas a k constante.

3.3 | Assimetria do Movimento

Por último, estudou-se o impacto do movimento assimétrico, com uma fração de assimetria de 0,25. Esta fase de estudo envolveu 9 casos¹⁴ distintos, coincidentes com os casos obtidos durante o movimento simétrico. O movimento assimétrico foi testado para $U_{\infty} = 0,25 \text{ m/s}$, sendo que A variou entre os 0,021 m e 0,007 m e f entre 1 Hz e 3,5 Hz. Na tabela 17 são apresentadas as condições testadas em termos de parâmetros adimensionais.

Tabela 17 | Condições de teste do movimento assimétrico.

$U \text{ [m/s]}$	Re	$A \text{ [m]}$	h	$f \text{ [Hz]}$	k	St
0,025	$1,5 \times 10^3$	0,021	0,21	1,0	2,51	0,17
		0,014	0,14	1,0	2,51	0,11
				1,5	3,77	0,17
		0,007	0,07	1,0	2,51	0,06
				1,5	3,77	0,08
				2,0	5,03	0,11
				2,5	6,28	0,14
				3,0	7,54	0,17
		3,5	8,80	0,20		

É fundamental mencionar que os parâmetros, quer dimensionais (f), quer adimensionais (St e k) têm em conta o período completo do movimento (subida e descida). Por isso, estes parâmetros não dependem da fração de assimetria, apesar de a velocidade de descida depender, como abordado no capítulo 2.

Os resultados obtidos através da visualização do tipo de esteira libertada pelo perfil são apresentados no gráfico da figura 33.

¹⁴ Devido aos limites operacionais do motor utilizado, apenas foi possível retirar 9 casos com as mesmas combinações de amplitude e frequência que no estudo do movimento simétrico.

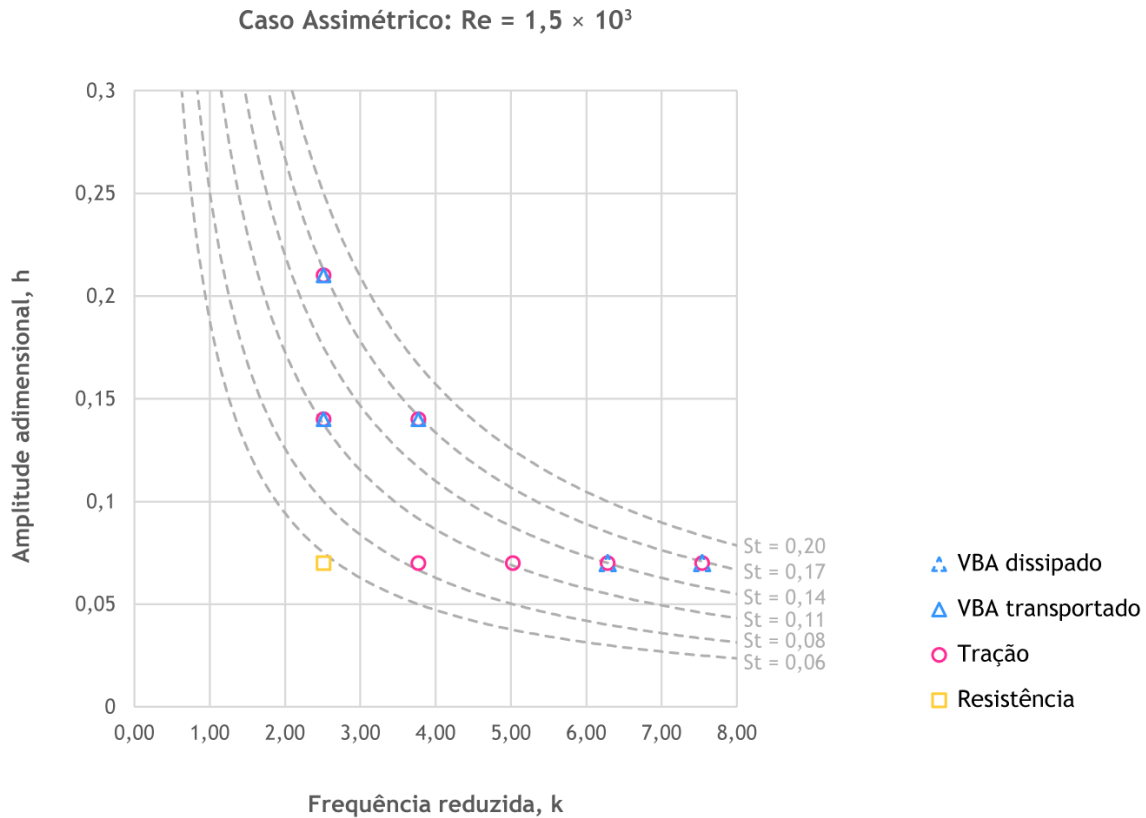


Figura 33 | Tipo de esteira em função de k e h para $Re = 1,5 \times 10^3$ em movimento assimétrico.

Na figura 33 é possível observar que, para o movimento assimétrico, obteve-se, essencialmente, esteiras produtoras de tração (7 combinações de k e h). Contudo, também se obteve um caso cuja esteira libertada corresponde a uma produtora de resistência ao avanço e um caso inválido ($h = 0,07$; $k = 8,80$, omissos no gráfico). Relativamente à separação do escoamento no bordo de ataque, cinco das condições a que o perfil foi sujeito, que resultaram em esteiras produtoras de tração, apresentaram VBA, sendo que em duas delas o vórtice se dissipou antes de ser libertado pelo bordo de fuga do perfil ($h = 0,07$ e $k = 6,28$; $7,54$).

Na figura 34, o gráfico do movimento assimétrico e o do movimento simétrico (apresentado em cima em 3.2) são apresentados sobrepostos, com o intuito de se compreender melhor o efeito do movimento assimétrico. Através dela é possível observar que, comparativamente, o movimento assimétrico aparenta ser vantajoso relativamente à libertação de esteiras indicadoras de produção de tração.

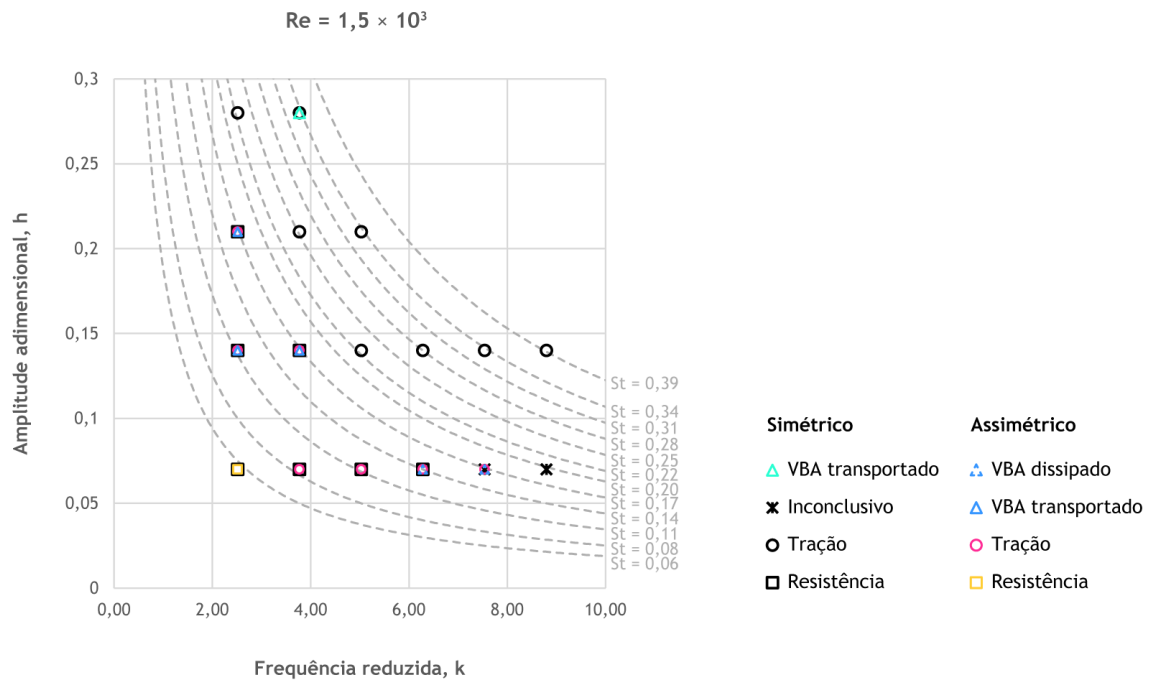


Figura 34 | Tipo de esteira em função de k e h para $Re = 1,5 \times 10^3$ em movimento simétrico e assimétrico.

Como foi analisado na secção 3.2, para o movimento simétrico a $Re = 1,5 \times 10^3$, apenas para $St \geq 0,22$ obteve-se esteiras produtoras de tração. Por sua vez, o gráfico do movimento assimétrico mostra que, para a fração de assimetria testada, a $St \geq 0,08$, o perfil apresenta-se como capaz de produzir uma esteira indicadora de produção de tração. Assim, a fração de assimetria parece ser uma variável que influencia, diretamente, o intervalo de St em que é observada a libertação deste tipo de esteiras. Além disso, para $t_a = 0,25$, foi observada a existência de VBA, no extradorso do perfil, para h e k mais baixos, o que seria de esperar, uma vez que t_a influencia diretamente a velocidade de descida e, pelo efeito de Knoller-Betz, o ângulo de ataque efetivo.

No movimento assimétrico, apenas uma das condições testadas forneceu uma esteira de resistência ao avanço, cujas condições correspondiam com $h = 0,07$ e $k = 2,51$. Como se pode observar, quer no gráfico do movimento assimétrico, quer na tabela 17, esta combinação de k e h coincide com o caso de menor amplitude adimensional e frequência reduzida testado, o que reforça a conclusão retirada de que h pequenos são menos vantajosos.

Através da visualização das esteiras dos diversos casos, é possível verificar que as estruturas são muito mais bem definidas que nos casos de movimento simétrico, uma vez que, como o movimento de descida é mais brusco, o movimento do perfil tem mais impacto sobre a inércia do escoamento.

Na figura 35 são apresentados dois casos do movimento assimétrico, de igual amplitude adimensional, variando a frequência reduzida e o número de Strouhal. Ambos os casos

apresentam esteiras produtoras de tração e, como esperado da análise dos casos simétricos, no caso em que k é maior (caso da direita), a proximidade de derramamento dos vórtices é menor. Além disso, neste caso é possível observar a formação de VBA no extradorso do perfil, que se dissipa logo a seguir a se formar. Apesar de na forma estática (imagens) o excesso de fumo dificultar a visualização das estruturas, na filmagem é possível detetar facilmente as estruturas cogumelo correspondentes aos jatos responsáveis pela produção de tração.

A figura 36 apresenta três casos cuja esteira é indicadora de produção de tração. Os três casos correspondem ao movimento assimétrico e a $St = 0,17$, sendo que h e k variam, respetivamente entre 0,21; 0,14; 0,07 e 2,51; 3,77; 7,54.

No caso da esquerda é visível a formação de um VBA bem definido que é conduzido, ao longo da corda, até ser libertado pelo bordo de fuga aproximadamente a meio da subida. Durante o movimento de subida, o perfil não aparenta libertar um jato na esteira, levando a acreditar que apenas durante a descida existe produção de tração. O caso do meio, $k = 3,77$; $h = 0,14$; $St = 0,17$, também apresenta a formação de um VBA de comportamento semelhante ao descrito anteriormente. O caso da direita foi analisado na figura 35, correspondendo ao segundo caso desta.

Comparando os três casos entre si, verifica-se que com o aumento de k a proximidade dos vórtices libertados na esteira reduz e, com a redução de h , a distância vertical também reduz. O terceiro caso, de h menor e k maior deixa de apresentar um VBA transportado, passando a apresentar um VBA dissipado o que, pelos casos simétricos, se deve essencialmente à redução de h .

Na figura 37 são apresentados três casos do movimento assimétrico, de $k = 2,51$. O caso da esquerda corresponde ao primeiro caso apresentado na figura 36. O segundo caso comporta-se de forma bastante semelhante ao primeiro caso, distinguindo-se apenas na dimensão vertical da esteira, devido à redução de h . No terceiro caso, onde $h = 0,07$ e, conseqüentemente, $St = 0,06$, o perfil não é capaz de produzir tração libertando uma esteira de resistência ao avanço.

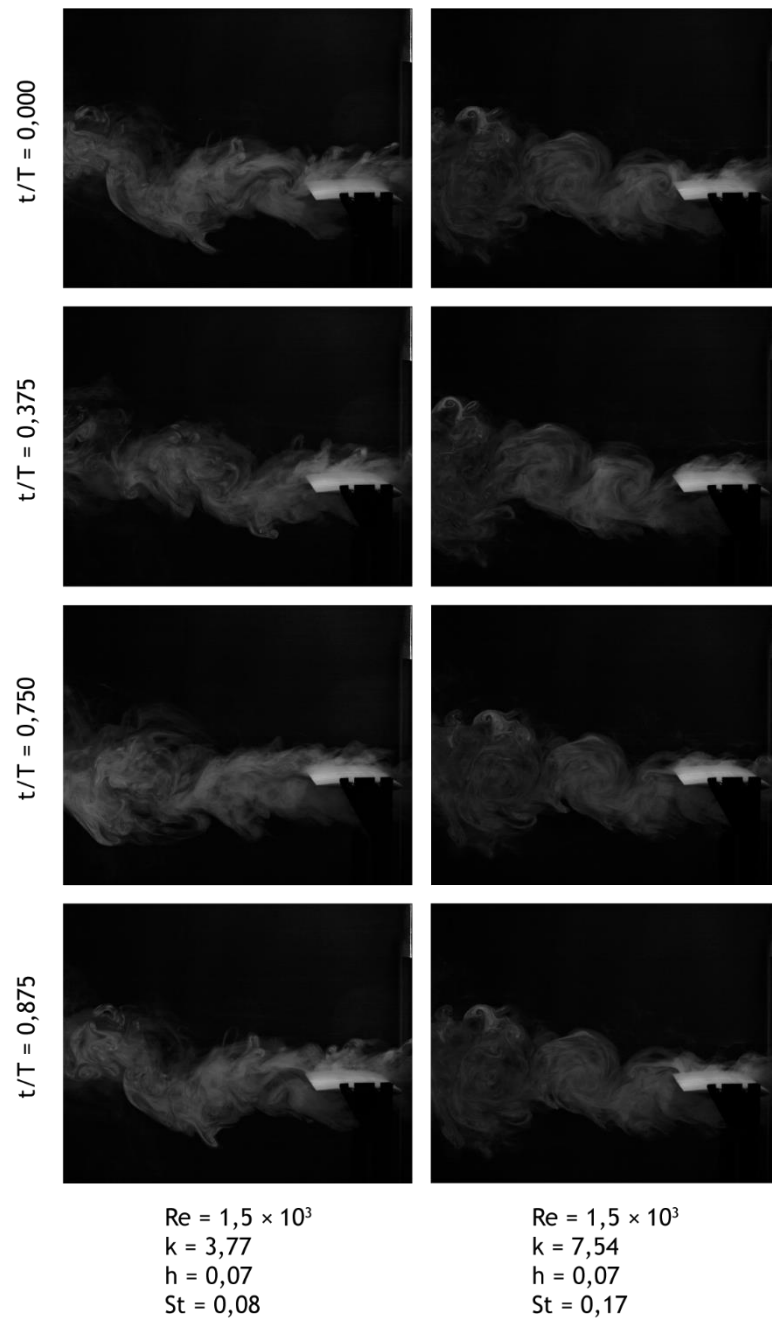


Figura 35 | Esteira libertada a diferentes k e St , mas a h constante, em movimento assimétrico.

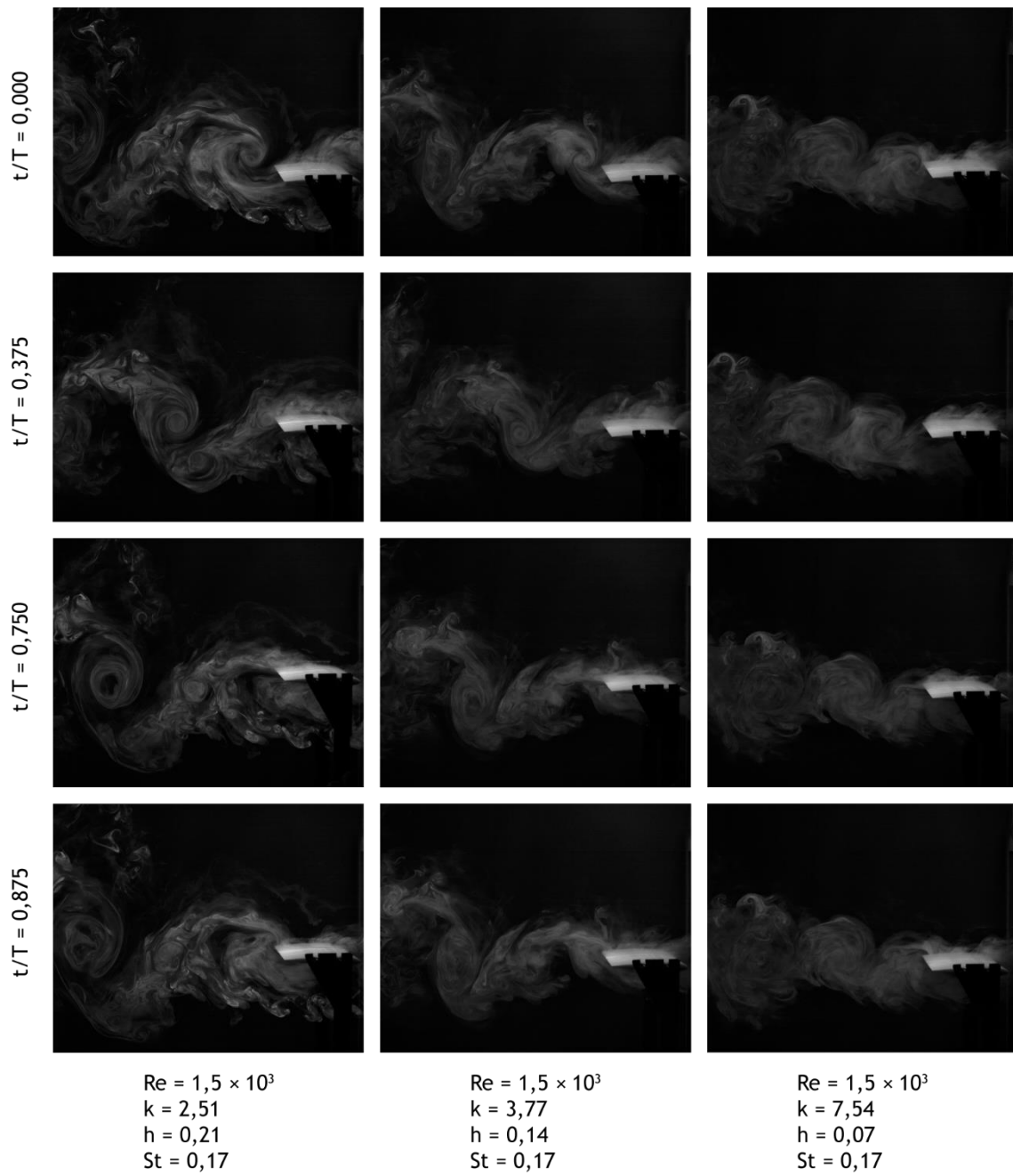


Figura 36 | Esteira libertada a diferentes k e h , mas a St constante, em movimento assimétrico.

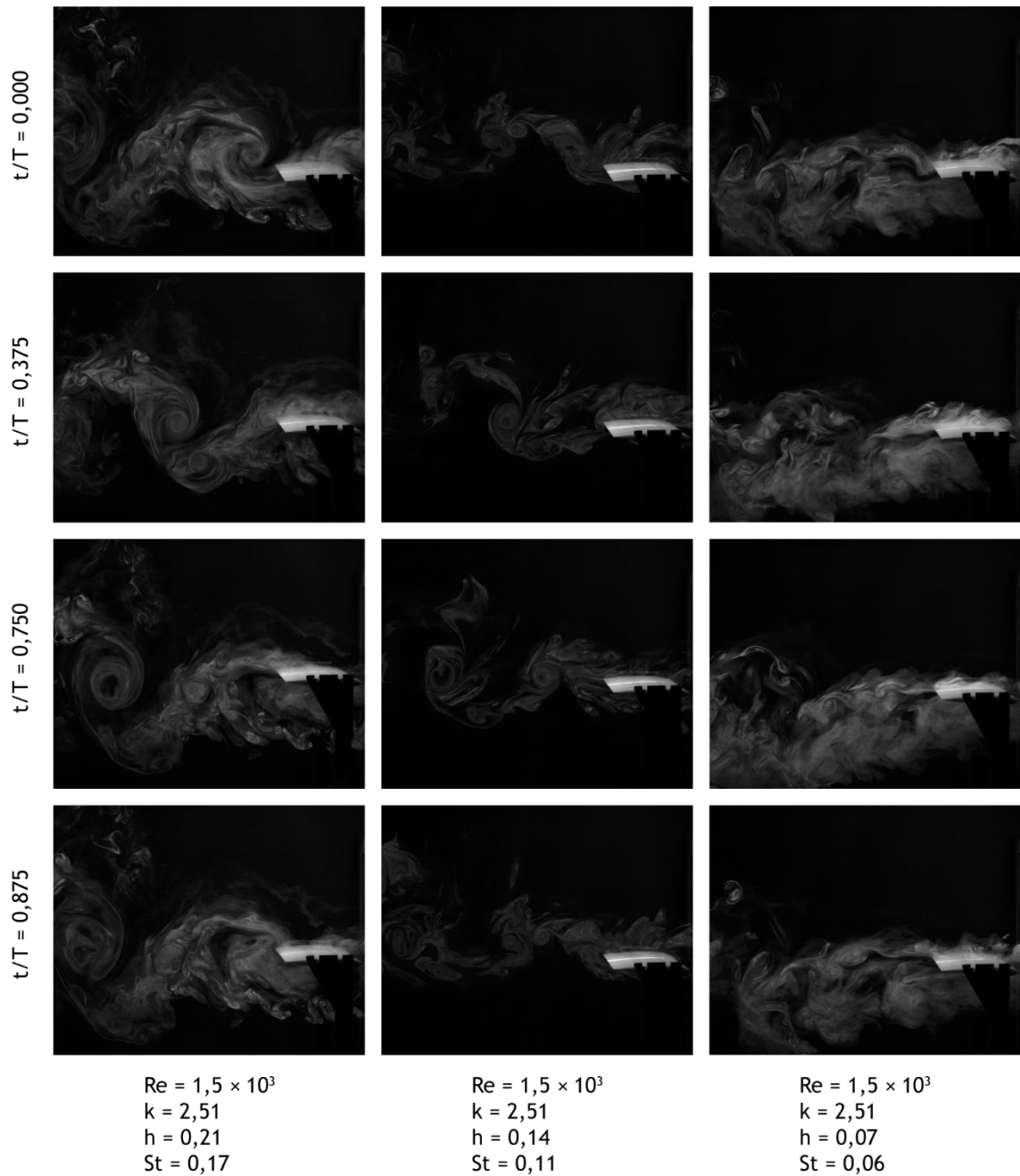


Figura 37 | Esteira libertada a diferentes h e St , mas a k constante, em movimento assimétrico.

No caso assimétrico, ao contrário do movimento simétrico, os fenômenos visualizados no extradorso do perfil não correspondem aos que surgem no intradorso do mesmo, no entanto, como já foi referido, a estrutura é opaca e, por isso, não foi possível visualizá-los. Todavia, os fenômenos que surgem no escoamento por consequência do movimento do perfil, repetem-se de período para período, com algumas diferenças de configuração devido aos efeitos turbulentos próprios do escoamento.

Nas figuras 38 e 39 são apresentados, na primeira coluna, casos do movimento assimétrico e, na segunda coluna, casos correspondentes ao movimento simétrico. As colunas da esquerda correspondem aos casos sujeitos às condições, respectivamente, $h = 0,21; k = 2,51; St = 0,17$ e $h = 0,07; k = 2,51; St = 0,06$, em movimento assimétrico. Nas colunas da direita são apresentados os casos sujeitos a, respectivamente, $h = 0,21; k = 2,51; St = 0,17$ e $h = 0,07; k = 2,51; St = 0,06$, em movimento simétrico. Na figura 38, o caso que diz respeito ao movimento assimétrico apresenta uma esteira produtora de tração e um VBA transportado ao longo da corda do perfil. Por sua vez, o caso correspondente ao movimento simétrico, sujeito às mesmas condições experimentais, apresenta uma esteira indicadora de resistência ao avanço. Na figura 39 ambos os casos apresentam uma esteira de resistência ao avanço.

Como se pode observar, na figura 38, a fração de assimetria tem a capacidade de alterar o tipo de esteira libertada pelo perfil. Na figura 39, não é possível observar a influência de t_a no tipo de esteira libertada, uma vez que ambos os casos resultaram na libertação de esteiras de resistência ao avanço, talvez porque h e, conseqüentemente St , são demasiado pequenos para que o perfil consiga produzir tração no k em questão. Contudo, é possível observar que t_a tem impacto no tempo e na forma de formação e libertação das estruturas presentes nas esteiras.

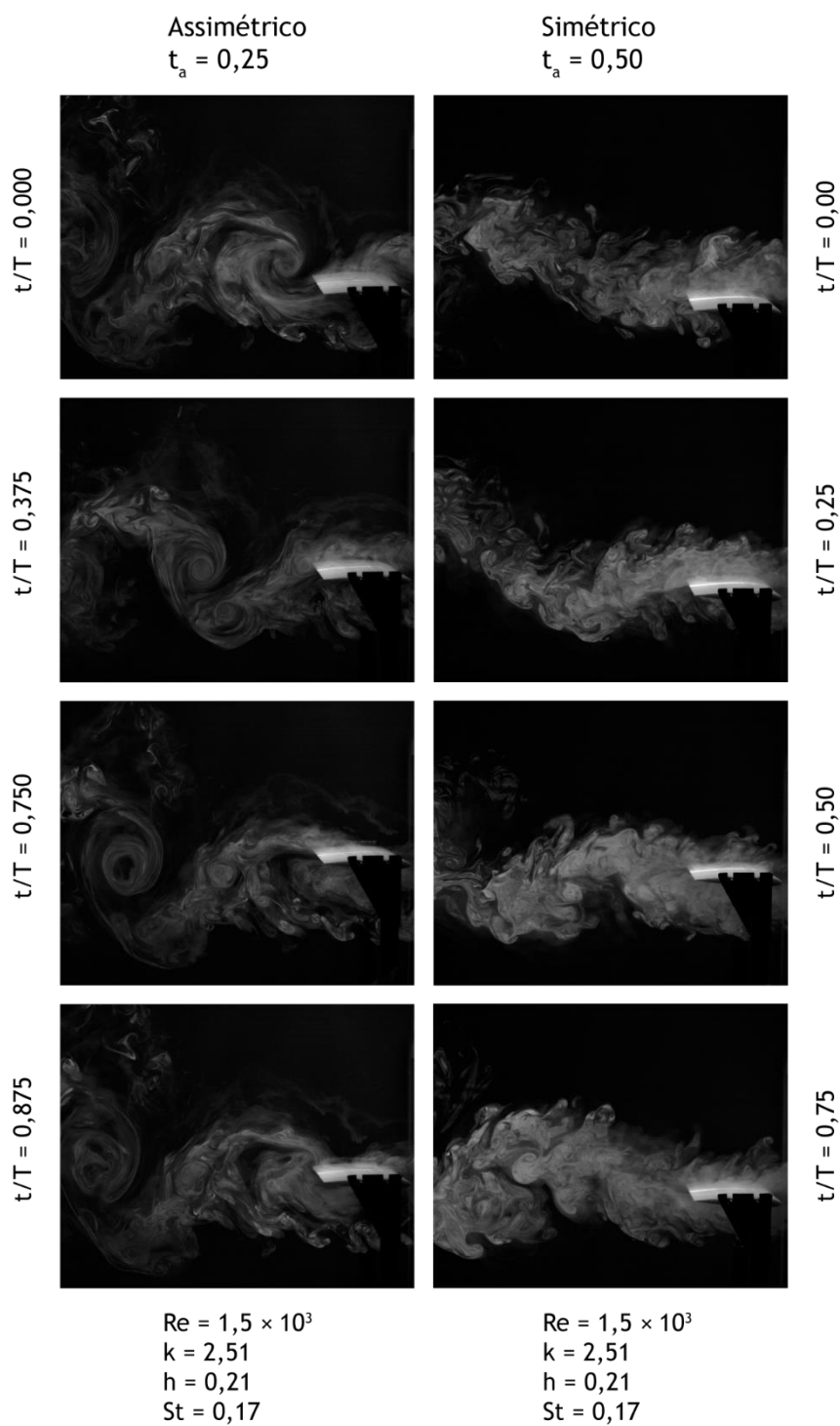


Figura 38 | Esteira libertada em função da fração de assimetria e da fração de período de movimento, para $St = 0,17$.

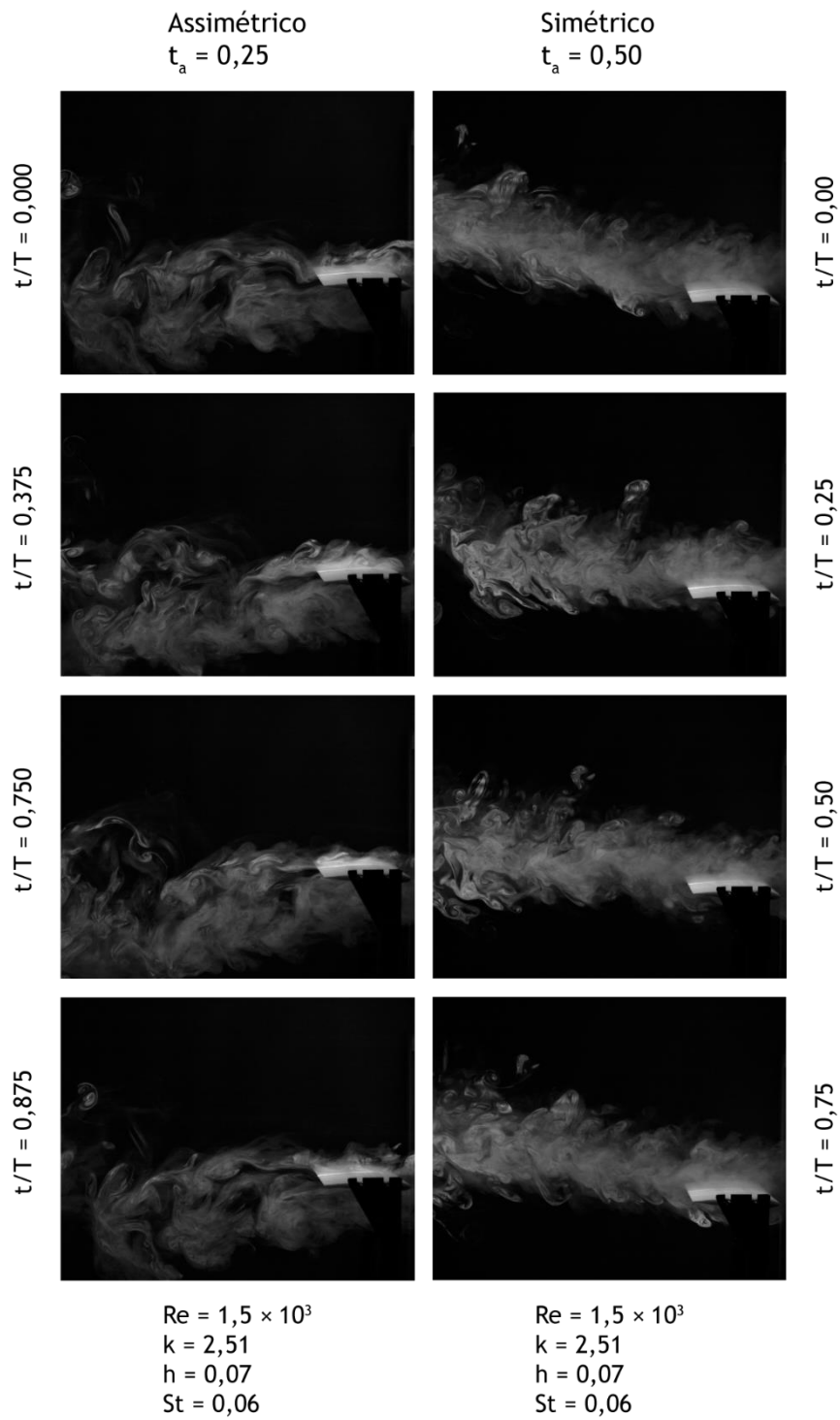


Figura 39 | Esteira libertada em função da fração de assimetria e da fração de período de movimento, para $St = 0,06$.

3.4 | Sumário

Ao longo deste capítulo apresentou-se um estudo da variação da velocidade de escoamento não perturbado, tendo-se concluído que esta variável afeta a produção de sustentação instantânea, o tipo de esteira libertada, a curvatura da esteira e os tempos de formação e libertação das estruturas presentes na esteira. Posteriormente, investigou-se a influência de Re , k , h e St nas esteiras libertadas pelo perfil NACA0012, tendo-se concluído, resumidamente, que: 1) o número de Reynolds parece afetar o intervalo de número de Strouhal em que se visualiza produção de tração; 2) a frequência reduzida afeta a proximidade (horizontal) com que os vórtices são libertados; 3) os VBFs e os VBAs dependem da frequência reduzida e da amplitude adimensional. Por último, analisou-se o impacto da fração de assimetria do movimento, concluindo-se que este parâmetro também afeta o tipo de esteira libertada pelo perfil.

Esta dissertação foi alvo de apresentação parcial em duas conferências internacionais, sendo estas: 1) “*Effect of Reynolds Number on a Plunging Airfoil*” na conferência *International Congress on Engineering - Engeneering for Evolution (ICEUBI2019)*, novembro, 2019, Covilhã [95]; 2) “*Plunging Airfoil Motion: Effects of Unequal Ascending and Descending Velocities*” na conferência *Virtual AIAA AVIATION 2020 FORUM*, junho, 2020, *online* [93]. É ainda de referir, que face as apresentações anteriormente mencionadas, no caso da primeira apresentação, a palestra menciona foi alvo de artigo publicado em livro de atas do referido congresso.

Capítulo 4 | Conclusão

“Eu não falhei. Eu apenas descobri 10000 maneiras que não funcionam.” – Thomas Edison

A natureza, desde sempre, tem sido mestre e fonte inspiradora para o Homem resolver os seus problemas e se aventurar a experimentar novas invenções e soluções. O desejo de voar surgiu da observação dos pássaros e do anseio que o ser humano possuía em experimentar tal sensação, para além de ser uma mais valia na forma de locomoção entre maiores distâncias. O mecanismo de *flapping* é a forma de locomoção de diversos animais voadores e nadadores, de vários tamanhos. Estes animais, graças aos milhões de anos de seleção natural, própria da natureza, estão bastante bem-adaptados aos seus *habitats* e à forma de locomoção, apresentando-se como sendo a solução mais eficaz. Com o intuito de encontrar novas formas de locomoção mais económicas, tem-se desenvolvido diversos estudos na área dos perfis oscilantes, a fim de compreender quais os regimes que oferecem os melhores resultados em termos de desempenho, eficiência e aproveitamento de energia.

Desta forma, este trabalho teve por base a visualização, bidimensional, das esteiras libertadas por um perfil NACA0012 sujeito a um movimento puramente vertical, periódico, não sinusoidal, simétrico e não simétrico, a diferentes combinações de velocidade, amplitude e frequência. É de referir que existe repetibilidade periódica em todos os casos, com algumas diferenças nas configurações da esteira inerentes à turbulência do escoamento.

Com os testes realizados e os dados obtidos, através da pura visualização das esteiras libertadas, não é possível a obtenção de um modelo que nos permita prever, empiricamente, o comportamento da esteira libertada e das estruturas que se formam em torno do perfil. As estruturas em torno e libertadas pelo perfil são dependentes de um conjunto de parâmetros, sendo que apenas um, individualmente, não é suficiente para indicar o tipo de desenvolvimento das esteiras. No entanto, concluiu-se que a velocidade de escoamento não perturbado afeta a produção de sustentação instantânea, o tipo de esteira libertada, os tempos de formação e de libertação das estruturas presentes nas esteiras e a curvatura: com o aumento da velocidade de escoamento não perturbado, para os mesmos valores de frequência reduzida e amplitude adimensional, foi possível visualizar que o impacto do movimento do perfil sobre o escoamento diminui, reduzindo a curvatura das esteiras libertadas e afetando, também, a capacidade de libertação de esteiras produtoras de tração, e, para o mesmo tipo de esteira libertada, observou-se que a formação e libertação das estruturas ocorre mais cedo para valores maiores de velocidades de escoamento não perturbado. Isto está de acordo com o esperado, uma vez que Re , k e h dependem deste parâmetro. O número de Reynolds influencia os tempos de libertação das zonas de vorticidade libertadas pelo bordo de fuga e o intervalo de St em que se visualiza tração.

Assim, para $Re = 1,5 \times 10^3$ observou-se esteiras indicadoras de produção de tração para $St \geq 0,22$. No entanto, para $Re = 3,1 \times 10^3$ observou-se este tipo de esteiras para $St \geq 0,14$. Como foi referido, a natureza opera, essencialmente, no intervalo de St entre 0,2 e 0,4, partindo do pressuposto que este é o intervalo de maior desempenho. Todavia, este intervalo não é indicativo dos valores de St para os quais se pode visualizar esteiras produtoras de tração, uma vez que pode existir produção dessa mesma tração, mas com desempenho menos eficiente. Para o mesmo valor de número de Reynolds, o número de Strouhal parece ser indicativo do tipo de esteira libertada pelo perfil. Contudo, em diferentes Re , este parâmetro não parece ser representativo do tipo de esteira libertada. A frequência reduzida e a amplitude adimensional (como esperado, segundo a literatura), foram os parâmetros que se destacaram como sendo as principais variáveis capazes de caracterizar o tipo de esteira libertada pelo perfil oscilante, sendo que têm um grande peso sobre os VBFs. Independentemente do número de Reynolds estudado, verificou-se, para as condições testadas, que em baixos valores de frequência reduzida e de amplitude adimensional o perfil não é capaz de libertar esteiras indicadoras de produção de tração, sendo que para $h = 0,07$ não se obteve nenhuma esteira indicadora de produção de tração e para os valores de k mais baixos apenas se obteve nas condições correspondentes às dos valores superiores de h . Concluiu-se, ainda, que k afeta a curvatura da esteira, uma vez que a proximidade (horizontal) com que os vórtices são libertados diminuiu com o aumento deste parâmetro, e, que a existência de VBAs depende essencialmente de k e h e não de St , uma vez que se obteve, para o mesmo St e Re , variando apenas k e h , casos onde se visualizou este tipo de estruturas e casos em que não se detetaram. É de salientar que h demonstrou ser o parâmetro com maior impacto na existência de separação no bordo de ataque. Além disso, pôde-se constatar que condições de amplitudes adimensionais muito baixas não apresentam um bom desempenho. Pode ser necessário operar a altas frequências reduzidas, para que em valores baixos de h se consiga obter uma esteira indicadora de produção de tração. Por fim, a fração de assimetria influencia, essencialmente, o modo como as estruturas presentes na esteira se formam, bem como os tempos de formação e libertação destas e, conseqüentemente, o tipo de esteira libertada pelo perfil. Ao contrário do movimento simétrico, onde existe criação de sustentação instantânea, mas globalmente a produção é nula, (uma vez que tanto o perfil como o movimento são ambos simétricos), no movimento assimétrico existe produção de sustentação, no entanto, a produção de tração pode tornar-se apenas instantânea, sendo que, em alguns casos estudados, apenas se visualizou a libertação de jatos durante a descida.

Assim, confirma-se que a influência de cada parâmetro nunca é independente, sendo que os parâmetros apenas ditam a tendência do tipo de esteira libertada, mas, de forma isolada, não são capazes de afirmar essa mesma tendência.

A turbulência própria do escoamento dificultou a visualização das estruturas que surgiam nas esteiras, tendo-se obtido alguns casos que apresentaram esteiras com estruturas não definidas, pois estes efeitos turbulentos perturbam as regiões de vorticidade libertadas pelo perfil. Além disso, chegou-se à conclusão que a zona de libertação do fumo deveria ser mais ampla, para que

o perfil estivesse totalmente submerso durante o movimento. Também se sentiu falta de uma zona de estabilização no túnel de vento, precedente à zona de libertação do fumo, com o intuito de reduzir algumas perturbações existentes no escoamento e, assim, facilitar a compreensão do tipo de estruturas libertadas pelo perfil.

Com este estudo (apesar de se encaixar nos trabalhos de análise das estruturas presentes na esteira de um perfil oscilante), espera-se que, de alguma forma e, juntamente com investigações futuras, se contribua, também, para os trabalhos nas outras categorias, das quais se destaca a biônica, ajudando na compreensão de uma das formas de locomoção do reino animal.

Tal como já foi apresentado, a pura visualização das esteiras para interpretação do desempenho do perfil pode ser enganosa. Assim, sugere-se, para trabalhos futuros, com o intuito de colmatar as limitações de visualização encontradas e verificar que a interpretação da esteira vai de acordo com o tipo de forças criadas pelo perfil, a reprodução dos casos estudados com sensores de força. Estes sensores completam e facilitam este tipo de análise eliminando a dúvida e a incerteza proveniente das estruturas não definidas, da turbulência própria do escoamento e dos casos em que, globalmente, a esteira aparenta ser indicadora de produção de tração, mas em que, na realidade, há libertação de pequenos VBFs indicadores de resistência ao avanço. Propõe-se, ainda, estudos mais aprofundados acerca da influência de cada parâmetro no surgimento das estruturas presentes nas esteiras dos perfis. Além disso, sugerem-se também estudos: 1) em diferentes meios, de forma a estudar a influência do número de Reynolds; 2) com diferentes perfis alares; 3) de diferentes tipos de movimento; 4) tridimensionais, de forma a perder-se menos informação; 5) de observação *in vivo* do comportamento de voo e das esteiras dos mesmos; 6) numéricos sobre a interação dos VBAs com os VBFs e de que forma esta interação afeta a força propulsiva criada pelo perfil. Para além dos estudos aqui referidos, pode ser interessante, em próximos trabalhos de investigação, o desenvolvimento de novos números adimensionais, para além dos tradicionais. Nesta mesma linha, para o número de Reynolds aqui utilizado, considerou-se a corda aerodinâmica como comprimento característico, futuramente poder-se-ia repensar a utilização de outro comprimento característico para a adimensionalização.

Referências

- [1] E. R. Rangel, “Biomimética de la naturaleza a la creación humana,” *Ciencias*, no. 98, pp. 4–8, 2010.
- [2] 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 Aronáutica, Universidade da Beira Interior, 2018.
- [3] D. A. Reay, *The History of Man-Powered Flight*, 1st ed. London: Pergamom Press, 1977.
- [4] Airbus, “Biomimicry: a fresh approach to aircraft innovation,” 2020. [Online]. Available: https://www.airbus.com/newsroom/stories/biomimicry-a-fresh-approach-to-aircraft-innovation.html?fbclid=IwAR3IFv3aHqam639e-XOFqWIqjjGYXp1596UjvEOZiAPwI1fcHOoe3vA_Uto. [Accessed: 20-Mar-2020].
- [5] W. Isaacson, *Leonardo da Vinci*, 1st ed. Porto: Porto Editora, 2019.
- [6] F. Romei, *Os Grandes Mestres da Arte: Leonardo da Vinci - A fusão da Arte com a Ciência*. Matosinhos: QuidNovi, 2003.
- [7] I. P. Alza, “Numerical and Experimental Studies of Sail Aerodynamics,” Tese em Arquitetura Naval, Universidad Politécnica de Madrid, 2012.
- [8] N. F. Lepora, P. Verschure, and T. J. Prescott, “The state of the art in biomimetics,” *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 8, pp. 1–11, 2013.
- [9] 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.
- [10] M. Hassanalian and A. Abdelkefi, “Classifications, applications, and design challenges of drones: A review,” *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 91, pp. 99–131, May 2017.
- [11] J. M. M. Barata, F. M. S. P. Neves, P. A. R. Manquinho, and T. A. J. Silva, “Propulsion for Biological Inspired Micro-Air Vehicles (MAVs),” *Open J. Appl. Sci.*, vol. 06, no. 01, pp. 7–15, 2016.
- [12] K. Fregene and C. L. Bolden, “Dynamics and Control of a Biomimetic Single-Wing Nano Air Vehicle,” in *American Control Conference (ACC)*, 2010, pp. 51–56.
- [13] E. R. Ulrich, D. J. Pines, and J. S. Humbert, “From falling to flying: the path to powered flight of a robotic samara nano air vehicle,” *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 5, pp. 1–16, 2010.
- [14] G. C. Lewin and H. Haj-Hariri, “Modelling thrust generation of a two-dimensional heaving airfoil in a viscous flow,” *J. Fluid Mech.*, vol. 492, pp. 339–362, 2003.
- [15] F. B. Detanico, F. G. Teixeira, and T. K. Silva, “A Biomimética como Método Criativo

para o Projeto de Produto,” *Des. e Tecnol.*, vol. 1, no. 02, p. 101, Dec. 2010.

- [16] National Geographic, “See how termites inspired a building that can cool itself,” 2018. [Online]. Available: <https://video.nationalgeographic.com/video/magazine/decoder/00000163-4f96-de63-afe7-7fdf708d0000>. [Accessed: 13-Nov-2019].
- [17] J. Choi, J. Hwang, Y. Jeong, J. M. Park, K. H. Lee, and J. W. Hong, “Biomimetics: forecasting the future of science, engineering, and medicine,” *Int. J. Nanomedicine*, vol. 10, p. 5701, Sep. 2015.
- [18] J. S. Carrola, M. Sousa, and J. V. F. Cardoso, “Biomimética no desenvolvimento de comboios de alta velocidade no Japão – Inspiração no Guarda-Rios,” *QuercusAmbiente*. [Online]. Available: <https://quercusambiente.pt/biomimetica-no-desenvolvimento-de-comboios-de-alta-velocidade-no-japao-inspiracao-no-guarda-rios/>. [Accessed: 03-Mar-2020].
- [19] Airbus, “Airlines are looking to reduce fuel consumption. Wake-energy retrieval could help,” 2019. [Online]. Available: <https://www.airbus.com/newsroom/stories/airlines-are-looking-to-reduce-fuel-consumption-wake-energy-retrieval-could-help.html>. [Accessed: 03-Mar-2020].
- [20] 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.
- [21] J. Young and J. C. S. Lai, “Vortex Lock-In Phenomenon in the Wake of a Plunging Airfoil,” *AIAA J.*, vol. 45, no. 2, pp. 485–490, 2007.
- [22] J. Young and J. C. S. Lai, “Oscillation Frequency and Amplitude Effects on the Wake of a Plunging Airfoil,” *AIAA J.*, vol. 42, no. 10, pp. 2042–2052, 2004.
- [23] W. Birnbaum, “Das ebene Problem des schlagenden Flugels,” *Zeitschrift für Flugtechnik und Mot.*, 1924.
- [24] W. Birnbaum, “Der Schlagflügelpropeller und die kleinen Schwingungen elastisch befestigter Tragflügel,” *Zeitschrift für Flugtechnik und Mot.*, vol. 15, no. 11/12, pp. 128–134, 1924.
- [25] X. Wu, X. Zhang, X. Tian, X. Li, and W. Lu, “A review on fluid dynamics of flapping foils,” *Ocean Eng.*, vol. 195, pp. 1–30, 2020.
- [26] J. M. Anderson, K. Streitlien, D. S. Barrett, and M. S. Triantafyllou, “Oscillating foils of high propulsive efficiency,” *J. Fluid Mech.*, vol. 360, pp. 41–72, 1998.
- [27] 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 Adv.*, vol. 9, pp. 1–12, 2019.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] W. 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.
- [31] R. Knoller, “Die Gesetze des Luftwiderstandes,” *Flug-und Mot.*, vol. 3, no. 21, pp. 1–7, 1909.
- [32] A. Betz, “Ein Beitrag zur Erklarung Segelfluges,” *Zeitschrift fur Flugtechnik und Mot.*, vol. 3, pp. 269–272, 1912.
- [33] 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, Apr. 1990.
- [34] R. Katzmayr, “Effect of Periodic Changes of Angle of Attack on Behavior of Airfoils,” *Natl. Advis. Comm. Aeronaut.*, 1922.
- [35] S. Ober, “Note on the Katzmayr Effect on Airfoil Drag,” Massachusetts, 1925.
- [36] E. A. R. Camacho, “Numerical Analysis of a Plunging NACA0012 Airfoil,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Aeronutica, Universidade da Beira Interior, 2019.
- [37] T. von Karman and J. M. Burgers, *General Aerodynamic Theory-Perfect Fluids*, vol. 2. Berlin: Julius Springer, 1935.
- [38] J. B. Bratt, *Flow Patterns in the Wake of an Oscillating Aerofoil*, 6th ed., vol. 7. London: Price, 1953.
- [39] C. J. Wood and S. F. A. Kirmani, “Visualization of heaving aerofoil wakes including the effect of a jet flap,” *J. Fluid Mech.*, vol. 41, no. 3, pp. 627–640, 1970.
- [40] P. Freymuth, “Propulsive Vortical Signature of Plunging and Pitching Airfoils,” *AIAA J.*, vol. 26, no. 7, pp. 881–883, 1988.
- [41] M. M. Koochesfahani, “Vortical Patterns in the Wake of an Oscillating Airfoil,” *AIAA J.*, vol. 27, no. 9, pp. 1200–1205, 1989.
- [42] K. D. Jones, C. M. Dohring, and M. F. Platzer, “Wake structures behind plunging airfoils - A comparison of numerical and experimental result,” in *Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 1996.
- [43] 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.
- [44] J. C. S. Lai and M. F. Platzer, “Jet Characteristics of a Plunging Airfoil,” *AIAA J.*, vol. 37, no. 12, pp. 1529–1537, 1999.
- [45] K. D. von Ellenrieder, K. Parker, and J. Soria, “Flow structures behind a heaving and pitching finite-span wing,” *J. Fluid Mech.*, vol. 490, no. 4, pp. 129–138, 2003.

- [46] K. Parker, K. D. von Ellenrieder, and J. Soria, *Morphology of the forced oscillatory flow past a finite - Span wing at low Reynolds number*, vol. 571, 2007.
- [47] V. de Brederode, *Fundamentos de Aerodinâmica Incompressível*, 1st ed. Lisboa: Gráfica Monumental, 1997.
- [48] 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.
- [49] S. Heathcote, Z. Wang, and I. Gursul, “Effect of spanwise flexibility on flapping wing propulsion,” *J. Fluids Struct.*, vol. 24, pp. 183–199, 2008.
- [50] A. Das, R. K. Shukla, and R. N. Govardhan, “Existence of a sharp transition in the peak propulsive efficiency of a low-Re pitching foil,” *J. Fluid Mech.*, vol. 800, pp. 307–326, 2016.
- [51] K. B. Lua, K. C. Lai, T. T. Lim, and K. S. Yeo, “On the aerodynamic characteristics of hovering rigid and flexible hawkmoth-like wings,” *Exp. Fluids*, vol. 49, pp. 1263–1291, 2010.
- [52] W. Medjroubi, B. Stoevesandt, B. Carmo, and J. Peinke, “High-order numerical simulations of the flow around a heaving airfoil,” *Comput. Fluids*, vol. 51, pp. 68–84, 2011.
- [53] K. B. Lua, T. T. Lim, and K. S. Yeo, “Aerodynamic forces and flow fields of a two-dimensional hovering wing,” *Exp. Fluids*, vol. 45, pp. 1047–1065, 2008.
- [54] I. Fenercioglu and O. Cetiner, “Categorization of flow structures around a pitching and plunging airfoil,” *J. Fluids Struct.*, vol. 31, pp. 92–102, 2012.
- [55] M. A. Ashraf, J. Young, and J. C. S. Lai, “Effect of Airfoil Thickness, Camber and Reynolds Number on Plunging Airfoil Propulsion,” in *AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2009, no. January, pp. 1–10.
- [56] M. Yu, Z. J. Wang, and H. Hu, “High fidelity numerical simulation of airfoil thickness and kinematics effects on flapping airfoil propulsion,” *J. Fluids Struct.*, 2013.
- [57] M. R. Visbal, “High-Fidelity Simulation of Transitional Flows past a Plunging Airfoil,” *AIAA J.*, vol. 47, no. 11, pp. 2685–2697, 2009.
- [58] C. Liang, K. Ou, S. Premasathan, A. Jameson, and Z. J. Wang, “High-order accurate simulations of unsteady flow past plunging and pitching airfoils,” *Comput. Fluids*, vol. 40, pp. 236–248, 2011.
- [59] X. Lin, J. Wu, and T. Zhang, “Performance investigation of a self-propelled foil with combined oscillating motion in stationary fluid,” *Ocean Eng.*, vol. 175, pp. 33–49, 2019.
- [60] Q. Zhu, “Optimal frequency for flow energy harvesting of a flapping foil,” *J. Fluid Mech.*, vol. 675, pp. 495–517, 2011.
- [61] Y. S. Baik and L. P. Bernal, “Experimental study of pitching and plunging airfoils at low

- Reynolds numbers,” *Exp. Fluids*, vol. 53, pp. 1979–1992, 2012.
- [62] K. Lu, Y. H. Xie, D. Zhang, and J. B. Lan, “Numerical investigations into the asymmetric effects on the aerodynamic response of a pitching airfoil,” *J. Fluids Struct.*, vol. 39, pp. 76–86, 2013.
- [63] K. Lu, Y. H. Xie, and D. Zhang, “Numerical study of large amplitude, nonsinusoidal motion and camber effects on pitching airfoil propulsion,” *J. Fluids Struct.*, vol. 36, pp. 184–194, 2013.
- [64] C. Kang, Y. S. Baik, L. Bernal, M. V. Ol, and W. Shyy, “Fluid Dynamics of Pitching and Plunging Airfoils of Reynolds Number between 1×10^4 and 6×10^4 ,” in *AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2009, pp. 1–20.
- [65] M. R. Amiralaei, H. Alighanbari, and S. M. Hashemi, “An investigation into the effects of unsteady parameters on the aerodynamics of a low Reynolds number pitching airfoil,” *J. Fluids Struct.*, vol. 26, pp. 979–993, 2010.
- [66] D.-H. Kim and J.-W. Chang, “Unsteady boundary layer for a pitching airfoil at low Reynolds numbers,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 24, pp. 429–440, 2010.
- [67] W. Medjroubi, B. Stoevesandt, and J. Peinke, “Wake classification of heaving airfoils using the spectral/hp element method,” *J. Comput. Appl. Math.*, vol. 236, pp. 3774–3782, 2012.
- [68] J. M. Moubogha, U. Ehrenstein, and J. A. Astolfi, “Forces on a pitching plate: An experimental and numerical study,” *Appl. Ocean Res.*, vol. 69, pp. 27–37, 2017.
- [69] D. G. Bohl and M. M. Koochesfahani, “MTV measurements of the vortical field in the wake of an airfoil oscillating at high reduced frequency,” *J. Fluid Mech.*, vol. 620, pp. 63–88, 2009.
- [70] M. V. Ol, “Vortical Structures in High Frequency Pitch and Plunge at Low Reynolds Number,” in *AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, 2007.
- [71] A. Eslam Panah and J. H. J. Buchholz, “Parameter dependence of vortex interactions on a two-dimensional plunging plate,” *Exp. Fluids*, vol. 55, 2014.
- [72] M. A. Ashraf, J. Young, and J. C. S. Lai, “Oscillation Frequency and Amplitude Effects on Plunging Airfoil Propulsion and Flow Periodicity,” *AIAA J.*, vol. 50, no. 11, pp. 2308–2324, 2012.
- [73] E. M. Elarbi, “Plunging Frequency-Amplitude Effects on Propulsion Performance of Flapping NACA 0012 Wing,” *AIAA Aerosp. Sci. Meet. Incl. New Horizons Forum Aerosp. Expo.*, pp. 1–15, 2013.
- [74] R. I. Zaman, J. C. S. Lai, J. Young, and M. A. Ashraf, “Comparison Study of Non-Sinusoidal Pitch over Sinusoidal Pitch at Higher Angle of Attack,” in *AIAA Applied Aerodynamics Conference*, 2014, pp. 1–13.

- [75] P. A. Dewey, B. M. Boschitsch, K. W. Moored, H. A. Stone, and A. J. Smits, “Scaling laws for the thrust production of flexible pitching panels,” *J. Fluid Mech.*, vol. 732, pp. 29–46, 2013.
- [76] J. A. Esfahani, E. Barati, and H. R. Karbasian, “Comparative investigations in the effect of angle of attack profile on hydrodynamic performance of bio-inspired foil, (corrected),” *J. Nav. Archit. Mar. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 99–108, Dec. 2013.
- [77] I. E. Garrick, “Propulsion of a Flapping and Oscillating Airfoil,” 1936.
- [78] R. Ramamurti and W. Sandberg, “Simulation of Flow About Flapping Airfoils Using Finite Element Incompressible Flow Solver,” *AIAA J.*, vol. 39, no. 2, pp. 253–260, Feb. 2001.
- [79] J. A. Esfahani, E. Barati, and H. R. Karbasian, “Fluid structures of flapping airfoil with elliptical motion trajectory,” *Comput. Fluids*, vol. 108, pp. 142–155, 2015.
- [80] R. Godoy-Diana, J. L. Aider, and J. E. Wesfreid, “Transitions in the wake of a flapping foil,” *Phys. Rev. E*, vol. 77, pp. 1–5, 2008.
- [81] G.-Y. He, Q. Wang, X. Zhang, and S.-G. Zhang, “Numerical analysis on transitions and symmetry-breaking in the wake of a flapping foil,” *Acta Mech. Sin.*, vol. 28, no. 6, pp. 1551–1556, 2012.
- [82] A. E. Panah and J. H. J. Buchholz, “Vortex Shedding and Wake Structure of a Plunging Wing,” in *AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2012, pp. 1–16.
- [83] D. Yu, X. Sun, X. Bian, D. Huang, and Z. Zheng, “Numerical study of the effect of motion parameters on propulsive efficiency for an oscillating airfoil,” *J. Fluids Struct.*, vol. 68, pp. 245–263, 2017.
- [84] S. Srigrarom and C. W. S. Vincent, “Effect of pitching and heaving motions of SD8020 hydrofoil on thrust and efficiency for swimming propulsion,” in *AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, 2008, no. June, pp. 1–14.
- [85] 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*, vol. 425, pp. 707–711, 2003.
- [86] G. S. Triantafyllou, M. S. Triantafyllou, and M. A. Grosenbaugh, “Optimal Thrust Development in Oscillating Foils with Application to Fish Propulsion,” *J. Fluids Struct.*, vol. 7, pp. 205–224, 1993.
- [87] P. Freymuth, “Propulsive Vortical Signatures of Plunging and Pitching Airfoils,” in *AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 1988, pp. 1–11.
- [88] I. H. Tuncer, R. Walz, and M. F. Platzer, “A Computational Study on the Dynamic Stall of a Flapping Airfoil,” *Am. Inst. Aeronaut. Astronaut.*, pp. 219–225, 1998.
- [89] K. B. Lua, T. T. Lim, K. S. Yeo, and G. Y. Oo, “Wake-Structure Formation of a Heaving Two-Dimensional Elliptic Airfoil,” *AIAA J.*, vol. 45, no. 7, pp. 1571–1583, 2007.

- [90] Q. Xiao and W. Liao, "Numerical Study of Asymmetric Effect on a Pitching Foil," *Int. J. Mod. Phys. C*, vol. 20, no. 10, pp. 1663–1680, 2009.
- [91] Y. Zhang, R. Yuan, K. Lu, and Y. Xie, "Asymmetric Sinusoidal Motion Effect on Aerodynamics of a Plunging Airfoil," *Adv. Mater. Res.*, vol. 712–715, pp. 1410–1413, 2013.
- [92] D. Floryan, T. Van Buren, and A. J. Smits, "Swimmers' wake structures are not reliable indicators of swimming performance," *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 15, no. 2, 2020.
- [93] D. Rodrigues, E. A. R. Camacho, F. M. S. P. Neves, J. M. M. Barata, and A. R. R. Silva, "Plunging Airfoil Motion: Effects of Unequal Ascending and Descending Velocities," in *AIAA AVIATION 2020 FORUM*, 2020, pp. 1–11.
- [94] P. A. Castro, "Projecto e Instalação de um Túnel de Vento para a Realização do Estudo Experimental da Interacção de um Jacto de Parede e uma Camada Limite," Projeto Final de Engenharia Aeronáutica, Universidade da Beira Interior, 2004.
- [95] D. C. Rodrigues, E. A. R. Camacho, F. M. da S. P. N. Neves, and Silva, "Effect of Reynolds Number on a Plunging Airfoil," *KnE Eng.*, vol. 2020, pp. 692–703, 2020.