



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Distribuição de Pressão de Jatos de Impacto Através de Escoamento Cruzado do F-35B

Ana Teresa Sanches Cerdeira

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

Orientador: Prof. Doutor Jorge Manuel Martins Barata

Covilhã, Junho de 2017

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Jorge Manuel Martins Barata, por me ter sugerido a realização deste trabalho e me ter acompanhado em todas as etapas de elaboração desta dissertação. Agradeço as muitas sugestões, a dedicação, o encorajamento, o conhecimento, a ajuda e toda a disponibilidade da sua parte.

Seguidamente, quero agradecer a todos os professores pelo conhecimento que me transmitiram ao longo de todo o meu percurso escolar e académico e, em particular, aos do Departamento de Ciências Aeroespaciais da Universidade da Beira Interior. De uma forma especial, agradeço ao Professor Doutor André Resende Rodrigues da Silva os vários conselhos, o apoio, a disponibilidade e a ajuda.

Quero também agradecer à Doutora Diana Filipa da Conceição Vieira pelo apoio dado principalmente durante a minha fase de aprendizagem, tanto na parte de documentação bibliográfica como na realização da montagem experimental. A ela lhe agradeço por me ter introduzido também neste tema, pela ajuda que nunca me negou no decorrer da execução desta dissertação e pela sua amizade.

Ao Doutor Fernando Manuel da Silva Pereira das Neves agradeço pela disponibilidade e ajuda, que quando pedida nunca hesitou em dar-me ao longo de todo este trabalho.

Agradeço ao Técnico de Laboratório, Senhor Rui Manuel Tomé Paulo, por toda a ajuda disponibilizada e contribuição dada na construção e modificação da montagem experimental.

Quero agradecer também a todos os meus amigos o apoio, o encorajamento, a paciência e a amizade durante todo o meu percurso escolar e académico.

Por último, mas não menos importantes, agradeço a toda a minha família, em especial aos meus pais e irmão pelo suporte, compreensão, dedicação, apoio e força que me deram.

Ana Teresa Cerdeira
Covilhã, Junho de 2017

Resumo

Uma aeronave V/STOL quando paira junto do solo ou aterriza cria um escoamento tridimensional extremamente complexo entre os jatos, a superfície da própria aeronave e o solo. Devido à forte interação dos jatos de descolagem com o plano do solo, há a formação de um jato de parede que flui radialmente desde o ponto de impacto ao longo da superfície do solo e que interage com escoamentos cruzados causados por vento lateral ou pelo próprio movimento da aeronave. São várias as consequências que daí podem resultar, tais como: perdas do poder de descolagem, de sustentação e de potência dos motores devido à re-ingestão dos gases de escape e diminuição da pressão nas superfícies inferiores das asas e da fuselagem, provocando uma força de sucção do aparelho em direção ao solo.

O escoamento de jatos incidentes sobre superfícies através de um escoamento cruzado está especialmente associado a este tipo de aeronaves e tem sido amplamente estudado com diversas motivações e aplicações práticas. Contudo, a maioria dos estudos realizados consideram altas alturas de impacto e baixas razões de velocidade entre o jato e o escoamento cruzado. Assim, no que diz respeito ao problema de *ground effect* da aeronave V/STOL, os trabalhos já efetuados não apresentam grande relevância. Devido também à complexidade das novas configurações de aeronaves V/STOL, como é o caso do *F-35B*, é importante continuar os estudos já realizados, nomeadamente a distribuição de pressão que permitirá compreender melhor o fenómeno de *ground effect* referido.

Atendendo a que ainda não existem resultados publicados de medições de pressões para o caso de dois jatos incidentes alinhados com o escoamento cruzado, cuja relevância é precisamente o *F-35B*, esta dissertação é dedicada ao estudo experimental da distribuição de pressão de jatos de impacto através de escoamento cruzado nas partes inferiores da fuselagem e da asa do *F-35B* para V_j/U_0 iguais a 15, 22.5 e 33.7 e para H/D_m igual a 3. Com o objetivo de complementar e comparar este estudo, é apresentada também uma simulação numérica deste escoamento. Através desta são obtidas as distribuições de pressão para as mesmas condições da experiência realizada, mas também junto ao solo. Para além disto, é mostrado o escoamento médio no plano vertical de simetria.

Verifica-se maioritariamente a existência de regiões com pressões negativas e nulas. Nas regiões perto dos jatos estão presentes elevados coeficientes de pressão negativos que dão origem a uma região de sucção à volta dos jatos de impacto. Através da utilização do esquema numérico QUICK, apresentamos soluções com um grande nível de precisão numérica, já que este possibilita a obtenção de soluções independentes da dimensão da malha com um número menor de pontos do que o exigido por outros esquemas. Nas localizações dos jatos verifica-se a existência das pressões mais elevadas e as regiões de pressões negativas junto aos jatos de impacto estão associadas com o núcleo dos *ground vortices*. Observa-se a formação de um *ground vortex* na região entre os jatos de impacto, fenómeno este que ainda não foi descrito na literatura, já que era esperado encontrar um escoamento em repuxo nesta zona para baixas alturas de impacto. Ao compararmos a forma da região de pressões negativas com a forma do *ground vortex* verificamos que estas são bastante semelhantes, observando-se a envolvimento do jato incidente como um “cachecol”.

Palavras-chave

Distribuição de Pressão, Escoamento Cruzado, *F-35B*, Jatos de Impacto, Vórtice de Solo e V/STOL.

Abstract

At their hovering phase of flight, V/STOL aircrafts create a three dimensional flowfield between jets, airframe surface and ground. The impingement of each downward-directed jet on the ground results in the formation of a wall jet which flows radially from the impinging point along the ground surface. Ground effect may occur and change the lift forces on the aircraft, cause reingestion of exhaust gases into the engine intake and raise fuselage skin temperatures. A V/STOL aircraft operating in ground vicinity with front wind or small forward movement may result in enhanced under pressures in the aft part of the aircraft causing a suction down force and a change of the pitching movement towards the ground.

Experiments on the aerodynamics of jets through a crossflow have mostly been reported for large impingement heights, for low velocity ratios between the jet and the crossflow and the focus of most studies are the velocity distribution on the flow field. These works have only peripheral relevance to the VSTOL *F-35B* ground effect problem, being the pressure distribution an important parameter to analyse this phenomenon.

For the new generation of V/STOL aircrafts, such as *F-35B*, no relevant studies can be found, because the impinging jets are aligned with the crossflow and this geometry has not yet been considered. An experimental study was done to provide information to the pressure measurement along the bottom of the fuselage and the wing of the vectored-thrust *F-35B* fighter configuration in the transition-speed range. The experiments were carried out for $V_j/U_0 = 15, 22.5$ and 33.7 , and for $H/D_m = 3$. To complete this investigation and compare with the experimental results, a numerical simulation for the same impingement height and velocity ratios was also performed. Furthermore, it is presented the pressure measurement next to the ground and the predicted mean vertical velocity component distribution along the vertical plane of symmetry.

The existence of regions with negative and null pressures are predominant. Near the impingement jets there are large negative pressure coefficients, that are responsible for the suckdown phenomenon. High level of numerical accuracy was obtained by grid refinement and the use of the high order method QUICK. On the impingement jets locations we can see the regions with high static pressure and the low pressures which are associated with the core of the ground vortexes. We can observe the formation of a ground vortex in the region between the impingement jets, a fact that has not been reported in the literature and which is surprising at the first sight, because the expected was to find an upwash fountain flow for lower impingement heights. Comparing the shapes of the negative pressure regions with the ground vortex we can verify that they are very similar, with the crossflow wrapping around the impinging point like a scarf.

Keywords

Crossflow, *F-35B*, Ground Vortex, Impinging Jets, Pressure Distribution and V/STOL.

Conteúdo

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
Nomenclatura	xv
Lista de Acrónimos	xvii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Escoamentos Estudados	2
1.3 Revisão Bibliográfica	4
1.3.1 Estudos Experimentais	5
1.3.2 Estudos Teóricos e Numéricos	27
1.3.3 Estudos Experimentais e Numéricos	36
1.4 Objetivos da Dissertação	46
1.5 Organização da Dissertação	47
2 Método Experimental	49
2.1 Instalação Experimental	49
2.2 Disposição dos Jatos e Dimensões Geométricas Relevantes	50
2.3 Velocidades Estudadas	51
2.4 Medições das Pressões	52
2.5 Calibração	53
2.5.1 Calibração do Escoamento Cruzado	53
2.5.2 Calibração dos Jatos	56
2.6 Resumo dos Dados Experimentais	58
3 Resultados	59
3.1 Resultados Experimentais	59
3.1.1 Distribuições de Pressão Estática	59
3.1.2 Discussão	70
3.2 Resultados Numéricos	71
3.2.1 Método Computacional	71
3.2.2 Distribuição de Pressão na Parede Superior ($H/D_m \approx 3$)	76
3.2.3 Distribuição de Pressão no Solo ($H \approx 0$)	77
3.2.4 Escoamento Médio no Plano de Simetria ($Z \approx 0$)	79
4 Conclusões	81
Bibliografia	83

Lista de Figuras

Figura 1.1	Aeronaves V/STOL: <i>Harrier AV-8</i> (à esquerda) e <i>JSF F-35B</i> (à direita) . . .	1
Figura 1.2	Vista tridimensional do <i>ground vortex</i> formado pelo impacto de um jato no solo através de um escoamento cruzado	3
Figura 1.3	Representação do fenómeno de <i>ground vortex</i> adaptado ao <i>JSF F-35B</i> . . .	3
Figura 1.4	Representação esquemática dos vários escoamentos resultantes de dois jatos incidentes	4
Figura 1.5	Escoamento existente por baixo de uma aeronave V/STOL	4
Figura 2.1	Instalação experimental	49
Figura 2.2	Secção de teste	50
Figura 2.3	Altura de impacto	50
Figura 2.4	Esquema da disposição geométrica dos jatos na secção de teste e sistema de coordenadas utilizado	51
Figura 2.5	Posicionamento das tomadas de pressão e dos jatos	52
Figura 2.6	Malha criada na placa para a colocação das tomadas de pressão com as respetivas coordenadas e numeração	53
Figura 2.7	Multimanómetro inclinável utilizado para medir as pressões	53
Figura 2.8	Representação da posição das guilhotinas 1 (à esquerda) e 2 (à direita) . .	54
Figura 2.9	Consola de controlo do túnel de vento	54
Figura 2.10	Micromanómetro utilizado durante a atividade experimental	56
Figura 2.11	Instalação usada na atividade experimental para o controlo das pressões	57
Figura 3.1	Distribuição de pressão na parte inferior da fuselagem e da asa ($H/D_m = 3$) para $V_j/U_0 = 15$ (adimensionalizada pela pressão dinâmica) obtida experimentalmente	70
Figura 3.2	Distribuição de pressão na parte inferior da fuselagem e da asa ($H/D_m = 3$) para $V_j/U_0 = 22.5$ (adimensionalizada pela pressão dinâmica) obtida experimentalmente	70
Figura 3.3	Distribuição de pressão na parte inferior da fuselagem e da asa ($H/D_m = 3$) para $V_j/U_0 = 33.7$ (adimensionalizada pela pressão dinâmica) obtida experimentalmente	70
Figura 3.4	Domínio computacional utilizado na simulação numérica	74
Figura 3.5	Exemplo de monitorização dos resíduos do primeiro jato	75
Figura 3.6	Perfis horizontais da componente vertical da velocidade adimensionalizados pela velocidade média dos jatos. Verificação da independência de malha	76
Figura 3.7	Distribuição de pressão na parte inferior da fuselagem e da asa ($H/D_m = 2.98 \approx 3$) para $V_j/U_0 = 15$ (adimensionalizada pela pressão dinâmica) obtida numericamente	76
Figura 3.8	Distribuição de pressão na parte inferior da fuselagem e da asa ($H/D_m = 2.98 \approx 3$) para $V_j/U_0 = 22.5$ (adimensionalizada pela pressão dinâmica) obtida numericamente	77

Figura 3.9	Distribuição de pressão na parte inferior da fuselagem e da asa ($H/D_m = 2.98 \approx 3$) para $V_j/U_0 = 33.7$ (adimensionalizada pela pressão dinâmica) obtida numericamente	77
Figura 3.10	Distribuição de pressão junto do solo ($H/D_m = 0.01 \approx 0$) para $V_j/U_0 = 15$ (adimensionalizada pela pressão dinâmica) obtida numericamente	78
Figura 3.11	Distribuição de pressão junto do solo ($H/D_m = 0.01 \approx 0$) para $V_j/U_0 = 22.5$ (adimensionalizada pela pressão dinâmica) obtida numericamente	78
Figura 3.12	Distribuição de pressão junto do solo ($H/D_m = 0.01 \approx 0$) para $V_j/U_0 = 33.7$ (adimensionalizada pela pressão dinâmica) obtida numericamente	78
Figura 3.13	Distribuição da componente vertical da velocidade ao longo do plano vertical de simetria ($Z \approx 0$) para $V_j/U_0 = 15$ (adimensionalizada pela velocidade média dos jatos) obtida numericamente	79
Figura 3.14	Distribuição da componente vertical da velocidade ao longo do plano vertical de simetria ($Z \approx 0$) para $V_j/U_0 = 22.5$ (adimensionalizada pela velocidade média dos jatos) obtida numericamente	79
Figura 3.15	Distribuição da componente vertical da velocidade ao longo do plano vertical de simetria ($Z \approx 0$) para $V_j/U_0 = 33.7$ (adimensionalizada pela velocidade média dos jatos) obtida numericamente	80

Lista de Tabelas

Tabela 1.1	Sumário dos trabalhos experimentais referentes a escoamento de um jato	7
Tabela 1.2	Sumário dos trabalhos experimentais referentes a escoamento de vários jatos	18
Tabela 1.3	Sumário dos trabalhos teóricos e numéricos referentes a escoamento de um ou de vários jatos	28
Tabela 1.4	Sumário dos trabalhos experimentais e numéricos referentes a escoamento de um ou de vários jatos	37
Tabela 2.1	Razões de velocidade e velocidades médias dos jatos e do escoamento cruzado estudadas	52
Tabela 2.2	Constantes utilizadas na calibração do escoamento cruzado para as três razões de velocidade	55
Tabela 2.3	Calibração do escoamento cruzado para $V_j/U_0 = 15$ de maneira a obter $U_0 = 2.40$ m/s	55
Tabela 2.4	Calibração do escoamento cruzado para $V_j/U_0 = 22.5$ de maneira a obter $U_0 = 1.60$ m/s	56
Tabela 2.5	Calibração do escoamento cruzado para $V_j/U_0 = 33.7$ de maneira a obter $U_0 = 1.07$ m/s	56
Tabela 2.6	Constantes utilizadas na calibração do escoamento cruzado para as três razões de velocidade	57
Tabela 2.7	Calibração dos jatos de impacto para as três razões de velocidade estudadas de maneira a obter $V_j = 36$ m/s	58
Tabela 2.8	Resumo dos dados experimentais mais relevantes do estudo efetuado	58
Tabela 3.1	Resultados experimentais para $V_j/U_0 = 15$	61
Tabela 3.2	Resultados experimentais para $V_j/U_0 = 22.5$	64
Tabela 3.3	Resultados experimentais para $V_j/U_0 = 33.7$	67
Tabela 3.4	Constantes do modelo de turbulência	73
Tabela 3.5	Descrição dos termos fonte	73

Nomenclatura

C_μ, C_1, C_2	Constantes do modelo de turbulência
C_f	Coefficiente de fricção na superfície
C_p	Coefficiente de pressão
D	Diâmetro do jato
g	Aceleração da gravidade
G	Taxa de geração de energia cinética turbulenta
g_1, g_2	Guilhotinas que permitem controlar a velocidade do escoamento cruzado (1 e 2, respetivamente)
H	Altura de impacto
h	Altura de líquido final registada no manómetro
h_{ref}	Altura de líquido inicial registada no manómetro e considerada como referência
Δh	Diferença de alturas entre as posições final e inicial (referência) de líquido
J	Razão de quantidade de movimento
k	Energia cinética turbulenta
L	Distância entre os eixos dos jatos quando estes se encontram dispostos lado a lado
M	Número de Mach
NPR	Razão de pressões do bocal de saída do jato
Nu	Número de Nusselt
p, P	Pressão
p_{comp}	Pressão do ar vindo do compressor
p_{dep}	Pressão de entrada no depósito
p_{pulv}	Pressão do pulverizador
$p_{\mu m}$	Diferença entre as pressões de estagnação e estática registada no micromanómetro
p_T	Pressão total ou pressão de estagnação
p_0	Pressão estática
Pr	Número de Prandtl
q	Pressão dinâmica
R	Constante universal dos gases perfeitos
Re	Número de Reynolds
Ro	Número de rotação do jato
S	Distância entre os eixos dos jatos quando estes se encontram alinhados com o escoamento cruzado
S_ϕ	Termo fonte na equação de transporte da variável dependente ϕ
$swirl$	Rotação do jato
T	Temperatura
Tu	Intensidade de turbulência

U	Componente horizontal da velocidade na direção do escoamento cruzado, $U = \bar{U} + u'$
\bar{U}	Componente horizontal da velocidade média na direção do escoamento cruzado
u'	Componente horizontal da flutuação da velocidade na direção do escoamento cruzado
U_0	Velocidade média do escoamento cruzado
V	Componente vertical da velocidade, $V = \bar{V} + v'$
\bar{V}	Componente vertical da velocidade média
v'	Componente vertical da flutuação da velocidade
V_j	Velocidade à saída do jato
W	Componente horizontal da velocidade na direção perpendicular ao escoamento cruzado, $W = \bar{W} + w'$
\bar{W}	Componente horizontal da velocidade média na direção perpendicular ao escoamento cruzado
w'	Componente horizontal da flutuação da velocidade na direção perpendicular ao escoamento cruzado
X	Coordenada horizontal na direção do escoamento cruzado
Y	Coordenada vertical
Z	Coordenada horizontal na direção perpendicular ao escoamento cruzado

Caracteres Gregos

α	Ângulo de inclinação do multimanómetro
Γ_ϕ	Coefficiente de transporte da variável dependente ϕ
δ_{ij}	Tensor delta de Kronecker
ε	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta
θ	Ângulo de inclinação do jato
μ	Viscosidade dinâmica
μ_T	Viscosidade turbulenta
ρ	Massa específica do fluido
$\sigma_{k,\varepsilon}$	Números de Prandtl/Schmidt para k e ε
ϕ	Ângulo de enviesamento do jato
	Variável dependente ϕ
ϕ_P	Valor da variável dependente ϕ no ponto P
ω	Taxa de dissipação específica

Índices

1	Valores referentes ao primeiro jato (localizado a montante)
2	Valores referentes ao segundo jato (localizado a jusante)
m	Valores médios entre o primeiro e o segundo jatos
j	Valores à saída do jato
0	Valores relativos ao escoamento cruzado

Lista de Acrónimos

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DPIV	<i>Digital Particle Image Velocimetry</i>
LCT	<i>Liquid Crystal Thermography</i>
LDA	<i>Laser Doppler Anemometry</i>
LDV	<i>Laser Doppler Velocimetry</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
LIF	<i>Laser Induced Fluorescence</i>
PIV	<i>Particle Image Velocimetry</i>
POD	<i>Proper Orthogonal Decomposition</i>
PTV	<i>Particle Tracking Velocimetry</i>
QUICK	<i>Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics</i>
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
RSM	<i>Reynolds Stress Model</i>
SARC	<i>Spalart-Allmaras for Rotation and Curvature</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i>
SST	<i>Shear Stress Transport</i>
TR-PIV	<i>Time Resolved Particle Image Velocimetry</i>
URANS	<i>Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
V/STOL	<i>Vertical/Short Take-off and Landing</i>
WALE	<i>Wall-Adapting Local Eddy-viscosity</i>
WMLES	<i>Wall Modeled Large Eddy Simulation</i>

Capítulo 1

Introdução

Neste primeiro capítulo são descritas aplicações práticas de jatos turbulentos que incidem (do inglês, *impinging jets*) em superfícies planas através de um escoamento cruzado (do inglês, *crossflow*) de baixa velocidade. É dado particular destaque ao estudo do campo de escoamento existente abaixo das aeronaves V/STOL (do inglês, *vertical/short take-off and landing aircraft*) quando operam perto do solo. Também é apresentada uma revisão bibliográfica enquadrada no estado da arte e relevância prática/teórica dos resultados já existentes acerca dos efeitos provocados por jatos de impacto através de um escoamento cruzado. São descritos os objetivos da presente dissertação e como esta se encontra organizada.

1.1 Motivação

O estudo de escoamentos de um ou vários jatos através de um escoamento cruzado tem um interesse muito grande em vários problemas de engenharia. São de destacar os seguintes exemplos: arrefecimento das pás de turbinas, descarga de resíduos líquidos em rios, emissão de poluentes para a atmosfera através de chaminés ou a injeção de ar secundário na zona de diluição da câmara de combustão de uma turbina a gás. Outra aplicação prática, e a mais relevante no que diz respeito a esta dissertação, é o escoamento criado por baixo de uma aeronave de V/STOL, quando esta se encontra junto do solo, descolando ou aterrando na vertical ou com um impulso para a frente pequeno.

A aeronave para a qual esta dissertação se encontra direcionada é o *Joint Strike Fighter F-35B*, que está em fase final de desenvolvimento para substituir o *Harrier*. Estas duas últimas encontram-se representadas na figura 1.1.



Figura 1.1: Aeronaves V/STOL: *Harrier AV-8* (à esquerda) e *JSF F-35B* (à direita).¹

¹Aviation Week Network, (2016, 10 October). *Pilot reaction to flying the F-35B*. Available: <http://aviationweek.com/blog/pilot-reaction-flying-f-35b>.

1.2 Escoamentos Estudados

Quando uma aeronave V/STOL se encontra em operação há três fases distintas durante o voo, sendo todas elas diferentes, com as suas próprias características peculiares do escoamento. Um voo V/STOL compreende a fase em que a aeronave se encontra a pairar (do inglês, *hover phase*), a transição para voo horizontal e a operação neste último modo de voo. A primeira fase é a mais complexa e pode ainda ser subdividida em mais duas fases, porque o escoamento associado a cada uma delas é completamente diferente. Assim, a *hover phase* é composta pelas fases de operação de saída do solo e de *hover* na vizinhança do solo.

Durante a sua aterragem ou quando está a pairar junto do solo, a aeronave V/STOL cria um escoamento tridimensional muito complexo entre os jatos, a superfície da própria aeronave e o solo. Assim, é fundamental compreender o escoamento produzido pelos jatos de um avião V/STOL para o projeto dos seus sistemas de propulsão, pois os problemas causados devido aos efeitos relacionados com os jatos auxiliares de descolagem, quando o avião está junto do solo, podem levar a que haja uma redução significativa da eficácia da aeronave, tanto em termos de capacidade de carga como de raio de ação.

Neste tipo de escoamento verifica-se uma forte interação dos jatos de descolagem com o plano do solo, o que resulta na formação de um jato de parede (do inglês, *wall jet*) que flui radialmente desde o ponto de impacto ao longo da superfície do solo e interage com escoamentos cruzados causados por vento lateral ou pelo próprio movimento da aeronave. Consequentemente, podem ocorrer perdas do poder de descolagem, devido ao arrastamento do fluido em repouso (do inglês, *entrainment*), quando a aeronave se encontra perto do solo para fazer a transição para voo horizontal. Deste fenómeno resulta também a diminuição da pressão nas superfícies inferiores das asas e da fuselagem (do inglês, *suckdown*), provocando uma força de sucção do aparelho em direção ao solo. Há ainda outras consequências que podem ser referidas, tais como: perdas de sustentação, reforço do arrastamento do ar em repouso² perto do solo, perdas de potência dos motores devido à re-ingestão dos gases de escape e possíveis instabilidades aerodinâmicas causadas pelo impacto de um escoamento em repuxo (do inglês, *fountain impingement*) na parte inferior da aeronave. Além dos efeitos já mencionados, devido à existência de um escoamento lateral, pode também ocorrer a deflexão dos jatos auxiliares de descolagem e do repuxo³, o que leva a que haja uma alteração do ponto de aplicação e da direção da força de descolagem e à consequente dificuldade de controlo da aeronave.

Um fenómeno que é importante destacar, e que se encontra representado nas figuras 1.2 e 1.3, é a formação do vórtice de solo (do inglês, *ground vortex*⁴), que resulta da interação do jato de parede, anteriormente mencionado, com um escoamento livre paralelo à parede no sentido oposto, ou seja, um escoamento cruzado.

²A expressão “arrastamento do ar em repouso” é a que tem sido utilizada para fazer referência à expressão inglesa “*entrainment*”.

³A palavra “repuxo” será usada ao longo da presente dissertação para referenciar um escoamento idêntico a um jato vertical ascendente, sendo este escoamento designado em inglês por “*upwash flow*”, “*fountain flow*” ou “*fountain upwash flow*”.

⁴A palavra “*ground vortex*” será utilizada para fazer referência a um escoamento giratório na superfície de incidência do jato onde as linhas de corrente apresentam um padrão circular.

⁵K. Knowles and D. Bray, “Ground vortex formed by impinging jets in crossflow,” *Journal of Aircraft*, vol. 30, no. 6, pp. 872-878, 1993.

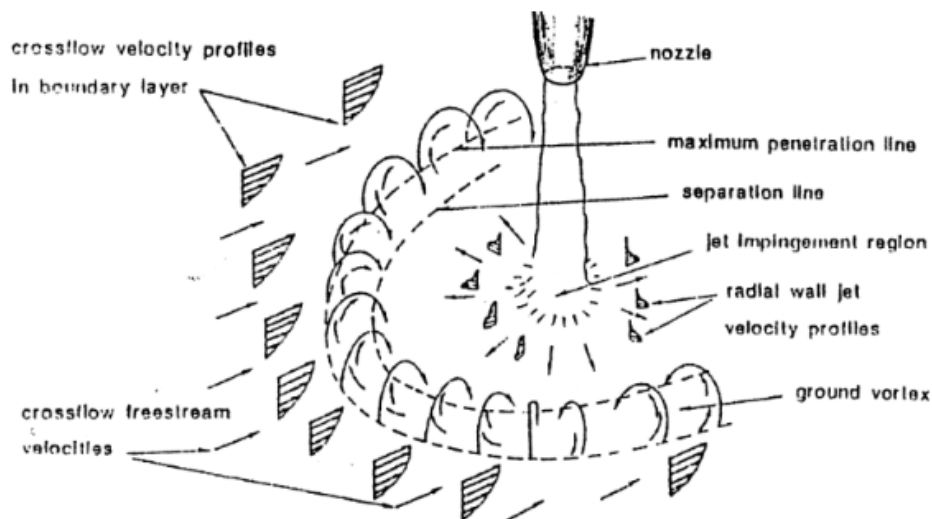


Figura 1.2: Vista tridimensional do *ground vortex* formado pelo impacto de um jato no solo através de um escoamento cruzado.⁵



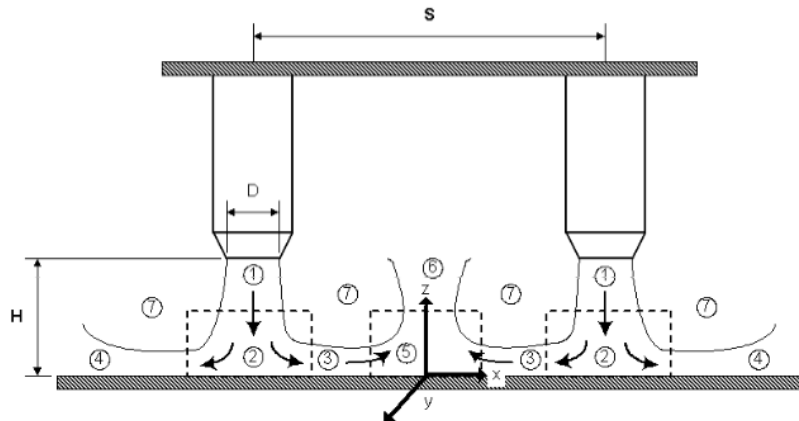
Figura 1.3: Representação do fenômeno de *ground vortex* adaptado ao JSF F-35B.⁶

Assim, o *ground vortex* é um escoamento fortemente curvado que se forma a montante do jato de descolagem. Este tipo de escoamento é influenciado por diversos parâmetros, tais como: altura de incidência, velocidade do jato incidente, existência ou não de escoamento cruzado e geometria do bocal do jato incidente. Se em vez de um jato de descolagem, existirem dois jatos posicionados lado a lado em frente ao escoamento cruzado, aparecerão dois *ground vortices*, assim como um escoamento em repuxo no plano vertical de simetria, devido à colisão de dois jatos de parede radiais individuais, tal como se pode ver na figura 1.4.

O estudo dos escoamentos de um ou vários jatos através de um escoamento cruzado, para além do interesse do ponto de vista fundamental para a Mecânica dos Fluidos, tem contribuído também para o desenvolvimento e verificação de modelos de turbulência e métodos numéricos, já que neles existem simultaneamente vários mecanismos envolvidos, tais como: curvaturas do

⁶J. M. M. Barata, "Multiple jet/wall/cross-wind interaction relevant to VSTOL ground effects," in *International Powered Lift Conference*, (Los Angeles, CA), Aug. 12-14, 2013.

⁷A. J. Saddington, K. Knowles, and P. M. Cabrita, "Flow visualization and measurements in a short take-off, vertical landing fountain flow," in *45th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, (Reno, NV), Jan. 8-11, 2007.



- | | |
|---------------------------|------------------------------|
| 1. Lift jet flow | 5. Fountain formation region |
| 2. Jet impingement region | 6. Fountain upwash flow |
| 3. Inner wall jet flow | 7. Entrainment region |
| 4. Outer wall jet flow | |

Figura 1.4: Representação esquemática dos vários escoamentos resultantes de dois jatos incidentes.⁷

escoamento, zonas de recirculação e de elevadas intensidades de turbulência, escoamento em repuxo e formação do *ground vortex*, tal como representado na figura 1.5.

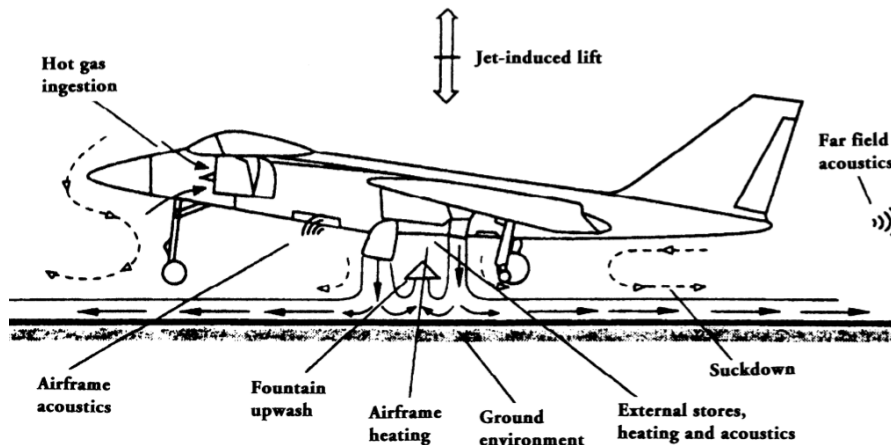


Figura 1.5: Escoamento existente por baixo de uma aeronave V/STOL.⁸

1.3 Revisão Bibliográfica

Nesta secção é apresentada uma revisão bibliográfica de estudos numéricos e experimentais já efetuados para diferentes geometrias de posicionamento dos jatos, razões de velocidade entre o jato e o escoamento cruzado, alturas de impacto e técnicas usadas. Para uma melhor compreensão, esta secção foi subdividida em três partes de acordo com o tipo de estudo realizado, ou seja: uma primeira parte sobre trabalhos experimentais, uma segunda parte com trabalhos

⁸R. E. Kuhn, R. J. Margason, and P. Curtis, "Jet-Induced Effects: The Aerodynamics of Jet and Fan-Powered V/STOL Aircraft in Hover and Transition," in *Progress in Astronautics and Aeronautics* vol. 217. Reston, VA: AIAA, 2006.

numéricos e teóricos e, por fim, uma terceira parte referente a trabalhos simultaneamente experimentais e numéricos.

1.3.1 Estudos Experimentais

O escoamento de um ou de vários jatos através de escoamento cruzado tem sido alvo de vários estudos experimentais. As motivações e aplicações de cada estudo são diferentes, de acordo com as geometrias dos jatos e com as razões de velocidade entre os jatos e o escoamento cruzado que foram consideradas pelos vários autores.

Na tabela 1.1 encontram-se sumariados alguns dos trabalhos experimentais já realizados relativos a um jato.

As referências [1] e [2], usando anemometria de fio quente, apresentaram medidas da trajetória do jato, de velocidade média, de intensidade de turbulência (Tu) e de temperatura (T), mas para razões de velocidade entre o jato e o escoamento cruzado (V_j/U_0) relativamente pequenos (< 10), verificando-se a deflexão da trajetória do jato devido às forças de pressão. As trajetórias baseadas no máximo de temperatura não são coincidentes com as do máximo de velocidade e a razão de quantidade de movimento, $J = \rho_j V_j^2 / \rho_0 U_0^2$, é o parâmetro que afeta diretamente a trajetória do jato, como visto por [2]. Utilizando técnicas de anemometria de fio quente e de laser, [3] apresentaram medidas das tensões de corte para um escoamento não confinado e para razões de velocidade tão pequenas (1.15 e 2.3), que o seu interesse para $V/STOL$ é bastante reduzido. Estes autores observaram que na região a montante o escoamento é anisotrópico e concluíram que os zeros dos gradientes da energia cinética turbulenta e da velocidade média não coincidem com os zeros da tensão de corte. Também em [4], os autores estudaram o escoamento de um jato de ar através de escoamento cruzado não confinado recorrendo à anemometria de fio quente, mas novamente as razões V_j/U_0 são muito pequenas (0.5, 1 e 2).

Em [5], recorreu-se à utilização da técnica *Particle Image Velocimetry* (PIV) e o conjunto de medições realizado mostrou claramente as diferentes fases da geração dos vórtices e a sua interação perto da camada limite do escoamento de parede, incluindo a separação do escoamento a partir da parede. Os mapas de vorticidade revelaram a existência de vórtices na camada de corte do jato e mostraram as suas trajetórias depois do impacto.

Na referência [6], os autores apresentaram a distribuição de pressão na superfície perto da saída do jato, tendo verificado que para a razão de velocidade mais elevada ($V_j/U_0 = 12$), esta pode ser visualizada qualitativamente como uma sobreposição do efeito das alterações de velocidade devido ao bloqueio do escoamento pela forma do jato e de aceleração por arrastamento do escoamento na camada de corte na fronteira do jato.

O escoamento de um jato através de escoamento cruzado confinado foi estudado por [7] recorrendo a *Particle Tracking Velocimetry* (PTV). A utilização de um jato gerador de vórtices melhorou efetivamente a transferência de calor da superfície interna das pás fixas de uma turbina de gás.

O estudo do efeito da rotação de um jato de impacto foi feito por [8] e verificaram que, para

um dado número de Reynolds do jato (Re_j), as distribuições de pressão e de fluxo de massa são praticamente as mesmas quer haja ou não rotação. Na condição de não-rotação, o número de Nusselt (Nu) médio na placa de impacto aumenta com Re_j . Com o aumento do número de rotação do jato (Ro), o Nu na placa de impacto diminui até cerca de 20%, devido à colisão do jato ser afetada pelos escoamentos secundários rotativos induzidos por Coriolis, flutuabilidade e forças centrífugas.

Em [9], as imagens capturadas com recurso a PIV foram usadas para ilustrar a análise da dinâmica instantânea das estruturas de vórtices. Também com recurso a esta técnica de visualização, na referência [10], os autores mostraram que o *ground vortex* é mais sensível a alterações na velocidade do escoamento, U_0 , do que na altura de impacto, H .

A colisão de um jato de parede com uma camada limite foi estudada por [11], [12] e [13] recorrendo a *Laser Doppler Velocimetry* (LDV) para obterem medidas da trajetória do jato, velocidades médias e turbulentas, que foram utilizadas para a determinação das tensões turbulentas, de balanços de energia cinética turbulenta (k), de quantidade de movimento e caracterização da vorticidade. Os resultados obtidos revelaram a existência de uma pequena zona de recirculação localizada a montante do ponto de separação e que a estrutura turbulenta do escoamento altamente curvado está sujeita a distorção. As medições da energia cinética turbulenta revelaram que na zona de colisão do jato de parede com a camada limite existe um ganho local de energia por convecção.

Na referência [14], os autores estudaram o escoamento de um jato de impacto através de escoamento cruzado e a possibilidade de controlar a transferência de calor usando uma nervura. Para tal, recorreram à técnica *Liquid Crystal Thermography* (LCT), tendo verificado que, para as razões de velocidade mais baixas ($V_j/U_0 = 1.0$ e 1.4), a presença da nervura tem um efeito mais pronunciado no aumento da transferência de calor. Para razões de velocidade mais elevadas ($V_j/U_0 = 2.0$ e 2.8), a sua presença torna a taxa de transferência de calor mais uniforme, mas verifica-se que o efeito do jato incidente tende a ser mais fraco.

Em [15], utilizou-se o *polarographic (ellectrodifusion) method* para medir as tensões de corte na parede e o *Time Resolved Particle Image Velocimetry* (TR-PIV) para os campos de velocidade. A distribuição do coeficiente de fricção da superfície (C_f) apresenta um pico na região onde as estruturas primárias de grande escala colidem com a parede e com o aumento do número de Reynolds (Re), tanto os vórtices com pequena ou grande frequência afetam a variação das tensões na camada limite.

Mais recentemente, [16] estudaram o efeito da rotação de um jato na superfície de impacto, tendo verificado que a redução da pressão de estagnação (p_T) com a rotação não é linear e que praticamente segue uma relação quadrática para um dado Re_j . Para baixos valores de rotação ($swirl \leq 0.29$), o comportamento do coeficiente de pressão (C_p) é similar ao dos escoamentos sem rotação ($swirl = 0$) para distâncias de impacto pequenas e a pressão é independente do Re , não se verificando o mesmo para valores de rotação maiores. O máximo coeficiente de pressão afasta-se do ponto de impacto com rotações mais elevadas e um C_p de parede negativo ocorre perto do ponto de estagnação para $H/D = 1$, devido à separação do escoamento em rotação contrária a partir da superfície de impacto, o que já não se verifica para H/D maiores.

Tabela 1.1: Sumário dos trabalhos experimentais referentes a escoamento de um jato.

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Keffer e Baines (1963)	Jato de ar através de escoamento cruzado não confinado. $D = 9.5 \text{ mm}$ $H/D = 16$ $V_J/U_0 = 2, 4, 6, 8 \text{ e } 10$	<ul style="list-style-type: none"> • Fio quente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade média ao longo do eixo do jato. • Intensidade de turbulência ao longo do eixo do jato. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os perfis da velocidade média do jato exibem alguma semelhança usando o eixo da trajetória como um dos eixos de coordenadas.
Kamotani e Greber (1972)	Jato de ar através de escoamento cruzado não confinado. $D = 6.35 \text{ mm}$ $H/D = 10$ $J = \rho_J V_J^2 / \rho_0 U_0^2 = 15 \text{ a } 60$ $Re = 2800 \text{ a } 4200$ baseado em U_0 e D .	<ul style="list-style-type: none"> • Fio quente para a velocidade. • Termopar de ferro-constantan para a temperatura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura. • Distribuições longitudinal e transversal da velocidade. • Intensidade de turbulência. 	<ul style="list-style-type: none"> • As trajetórias do jato baseadas na velocidade média e temperatura máxima dependem da razão de fluxos mássicos. • Para razões de fluxo mássico mais elevadas, o par de vórtices a jusante é o fenômeno dominante que influencia a distribuição da temperatura e velocidade. • A intensidade de turbulência aumenta com J.
Crabb, Durão e Whitelaw (1981)	Jato de ar através de escoamento cruzado não confinado. $D = 25.4 \text{ mm}$ $H/D = 0.25 \text{ a } 4$ $U_0 = 12 \text{ m/s}$ $V_J/U_0 = 1.15 \text{ e } 2.3$	<ul style="list-style-type: none"> • LDA. • Fio quente. 	$\bar{U}, \bar{V}, \overline{u'^2}, \overline{v'^2}, \overline{w'^2}, \overline{u'v'}, \overline{u'w'}$ no plano de simetria.	<ul style="list-style-type: none"> • Verifica-se a existência do par de vórtices na zona a jusante da saída do jato. Nesta zona, as regiões de velocidade elevada são compostas principalmente por fluido do escoamento cruzado. • Na região a montante, o escoamento é anisotrópico, mas para jusante torna-se isotrópico, mas ainda ocorrem variações significativas, especialmente na esteira e devido à predominância da componente Z. • Os zeros dos gradientes da energia cinética turbulenta e da velocidade média não coincidem com os zeros das tensões de corte.

Tabela 1.1: Sumário dos trabalhos experimentais referentes a escoamento de um jato (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Andreopoulos e Rodi (1984)	<p>Jato de ar através de escoamento cruzado não confinado.</p> <p>$D = 50$ mm</p> <p>$U_0 = 13.9$ m/s</p> <p>$V_j/U_0 = 0.5, 1$ e 2</p> <p>$Re = 20500, 41000$ e 82000</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Fio quente. 	<p>$\overline{U}, \overline{V}, \overline{W}, \overline{u'^2}, \overline{v'^2}, \overline{w'^2}, \overline{u'v'}, \overline{v'w'}$ e $\overline{u'w'}$ no plano de simetria.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Quando a razão de velocidade entre o jato e o escoamento é pequena (0.5) verifica-se que a deflexão do jato se dá logo após a sua saída. • A esteira que se forma atrás do jato aumenta de dimensão quando V_j/U_0 aumenta. • Quando a camada limite se aproxima do jato gera um vórtice em contra-rotação com a forma de uma ferradura. • A energia cinética turbulenta e a tensão de corte $\overline{u'v'}$ estão diretamente relacionadas com o gradiente $\partial U/\partial Y$ de tal forma que $\overline{u'v'}$ pode ser descrita por um modelo de viscosidade efetiva. • Em algumas regiões com grande divergência ou convergência de linhas de corrente, o gradiente $\partial W/\partial Z$ também contribui para a produção de energia cinética turbulenta e de $\overline{u'v'}$. • A tensão de corte $\overline{u'w'}$ é produzida pelos gradientes $\partial U/\partial Z$ e $\partial W/\partial Y$ e não pode ser representada pela relação da viscosidade turbulenta, pois o último gradiente mencionado não é tido em consideração.

Tabela 1.1: Sumário dos trabalhos experimentais referentes a escoamento de um jato (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Landreth e Adrian (1990)	<p>Jato de água incidente numa placa plana.</p> <p>$D = 26.9 \text{ mm}$</p> <p>$H/D = 4$</p> <p>$V_j = 0.244 \pm 0.002 \text{ m/s}$</p> <p>$Re_j = 6564$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • PIV. 	<ul style="list-style-type: none"> • Campos de velocidade instantâneos. • Campos de vorticidade instantâneos. • Campos da taxa de tensão de deformação. • Velocidades médias. • Campos de flutuação da velocidade instantânea. 	<ul style="list-style-type: none"> • O conjunto de medições realizado mostra claramente as diferentes fases da geração dos vórtices e a sua interação perto da camada limite do escoamento de parede, incluindo a separação do escoamento a partir da parede. • Os mapas da vorticidade revelaram a existência de vórtices na camada de corte do jato e mostraram as suas trajetórias depois do impacto. • Os mapas da taxa de tensão de deformação mostraram a presença de estruturas que ocorrem simultaneamente nas mostradas nos mapas de vorticidade.
Dennis, Tso e Margason (1993)	<p>Escoamento perpendicular de um jato subsónico numa placa plana através de escoamento cruzado subsónico.</p> <p>$D = 50.8 \text{ mm}$</p> <p>$H/D = 15.6$</p> <p>$4 < V_j/U_0 < 12$</p> <p>$M_j = 0.91$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Módulos transdutores de pressão. • Fotografia Schlieren. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização do escoamento. • Distribuição de pressão (coeficiente de pressão). 	<ul style="list-style-type: none"> • Para a razão V_j/U_0 mais elevada, a distribuição de pressão na superfície perto da saída do jato pode ser visualizada qualitativamente como uma sobreposição do efeito das alterações de velocidade devido ao bloqueio do escoamento pela forma do jato e de aceleração por arrastamento do escoamento na camada de corte na fronteira do jato.

Tabela 1.1: Sumário dos trabalhos experimentais referentes a escoamento de um jato (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Nakabe, Inaoka, Ai e Suzuki (1997)	<ul style="list-style-type: none"> • Jato de ar através de escoamento cruzado confinado: $D = 10$ mm $H/D = 4$ • Jato gerador de vórtices: $D = 6$ mm $H/D = 5$ $\phi = 90^\circ$ $\theta = 45^\circ$ $Re_0 = 40000$ 	<ul style="list-style-type: none"> • PTV. 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição do número de Nusselt. • Transferência de calor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Foi demonstrado experimentalmente que a transferência de calor foi reforçada em torno da origem, dependendo da velocidade do jato. • A geração de vórtices melhora efetivamente a transferência de calor da superfície interna das pás fixas de uma turbina de gás.
Parsons e Han (1998)	<p>Estudo do efeito da rotação de um jato de impacto de arrefecimento por um conjunto de buracos circulares em linha.</p> $D = 1.59$ mm $H/D = 4.0$ $S/D = 5.0$ $Pr = 0.72$ $5000 < Re_j < 10000$ $0.0 < Ro < 0.0028$	<ul style="list-style-type: none"> • Manómetro inclinado. • Unidade Scanivalve para registrar as leituras de pressão estática medidas em todas as tomadas de pressão. 	<ul style="list-style-type: none"> • Número de Nusselt. • Distribuição de pressão e de fluxo de massa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Para um dado Re_j, as distribuições de pressão e de fluxo de massa são praticamente as mesmas quer haja ou não rotação. • Quando não temos rotação, o Nu médio na placa de impacto aumenta com Re_j e tem a mesma tendência de estudos realizados por outros investigadores. • Com o aumento de Ro até 0.0028, o Nu na placa de impacto diminui até cerca de 20%, devido à colisão do jato ser afetada pelos escoamentos secundários rotativos induzidos por Coriolis, flutuabilidade e forças centrífugas.

Tabela 1.1: Sumário dos trabalhos experimentais referentes a escoamento de um jato (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Behrouzi e McGurk (2000)	<p>Escoamento de um jato/unidade de admissão com e sem a presença de escoamento cruzado num túnel de água.</p> <p>$S/D_j = 6$ $V_j = 2.66 \text{ m/s}$ $U_0 = 0.076, 0.113 \text{ e } 0.15 \text{ m/s}$ $V_j/U_0 = 18, 24 \text{ e } 35$</p> <ul style="list-style-type: none"> • Jato genérico: $D_j = 12.4 \text{ mm}$ $H_j/D_j = 7.5$ • Unidade de admissão: $D = 3D_j = 37.5 \text{ mm}$ $H/D_j = 9.5$ 	<ul style="list-style-type: none"> • PIV. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização do escoamento. • Vetores de velocidade instantânea. • Campos de velocidade instantânea. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os resultados obtidos mostraram que o método utilizado foi bem sucedido no fornecimento de medições quantitativas dos campos de velocidade num campo de escoamento complexo jato/admissão. • As imagens capturadas com esta técnica foram usadas para ilustrar a análise da dinâmica instantânea das estruturas de vórtices.
Eyles, Lawson e Knowles (2002)	<p>Escoamento de um jato incidente numa placa com movimento através de um escoamento cruzado.</p> <ul style="list-style-type: none"> • PIV: $12.5 \text{ mm} < D < 25.4 \text{ mm}$ $3 < H/D < 10$ $2 < NPR < 4$ $U_0 = 10, 15 \text{ e } 20 \text{ m/s}$ • LDA: $H/D = 10$ $NPR = 3.72$ $U_0 = 10 \text{ m/s}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • PIV. • LDA. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização do escoamento. • Mapa vetorial instantâneo do <i>ground vortex</i>. • Mapa vetorial médio do <i>ground vortex</i>. • Posição instantânea da localização central do vórtice. • Posição média central do <i>ground vortex</i>. • Distribuição espectral. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os resultados obtidos com PIV mostraram que o <i>ground vortex</i> é mais sensível a alterações em U_0 do que em H/D. • A análise do espectro de dados com LDA, realizada a partir do núcleo do vórtice, revelou que a maioria da energia espectral está presente até cerca de 30 Hz. Assim, o sistema PIV utilizado com uma taxa de <i>frames</i> de 15 Hz tem capacidade insuficiente para capturar a maior parte das características do escoamento transiente do <i>ground vortex</i>.

Tabela 1.1: Sumário dos trabalhos experimentais referentes a escoamento de um jato (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Barata, Castro, Silvestre e Durão (2005)	Colisão de um jato de parede com uma camada limite. $V_j = 6 \text{ m/s}$ $U_0 = 3.48 \text{ m/s}$ $V_j/U_0 = 1.7$	• LDV.	• Trajetórias. $\bar{U}, \bar{V}, \sqrt{\overline{u'^2}}, \sqrt{\overline{v'^2}}, \overline{u'v'}$	<ul style="list-style-type: none"> • Os resultados obtidos revelam a existência de uma pequena zona de recirculação localizada a montante do ponto de separação. • Os resultados revelam ainda que a estrutura turbulenta do escoamento altamente curvado está sujeita a distorção. • Apenas na região defletida a montante, o sinal das tensões de corte é consistente com o sinal da tensão de corte de acordo com a hipótese de viscosidade turbulenta.
Barata, Ribeiro, Santos e Silva (2009)	Colisão de um jato de parede com uma camada limite. $V_j = 13.7 \text{ m/s}$ $U_0 = 6.9 \text{ m/s}$ $U_0/V_j = 0.50$	• LDV.	$\bar{U}, \bar{V}, \sqrt{\overline{u'^2}}, \sqrt{\overline{v'^2}}, \overline{u'v'}$ • Caracterização da vorticidade.	• Os resultados revelaram a existência de um pequeno vórtice localizado a montante (no sentido do escoamento do jato de parede) do ponto de separação. Estas zonas muito pequenas de recirculação interagem com o <i>ground vortex</i> .

Tabela 1.1: Sumário dos trabalhos experimentais referentes a escoamento de um jato (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
<p>Barata, Durão, Santos e Silva (2010)</p>	<p>Colisão de um jato de parede com uma camada limite de baixa velocidade. $V_j = 13.7 \text{ m/s}$ $U_0 = 6.9 \text{ m/s}$ $V_j/U_0 = 2.0$</p>	<p>• LDV.</p>	<p>• Perfis horizontais e verticais da energia cinética turbulenta em três regiões do escoamento. Regiões horizontais: $12 \text{ mm} < Y < 25 \text{ mm}$, $25 \text{ mm} < Y < 85 \text{ mm}$ e $Y > 85 \text{ mm}$. Regiões verticais: $-120 \text{ mm} < X < -20 \text{ mm}$, $-20 \text{ mm} < X < 40 \text{ mm}$ e $X > 40 \text{ mm}$. • Contornos da produção de energia cinética turbulenta por convecção, pelas tensões normais, pelas tensões de corte e pelos termos difusivo e dissipativo (outros termos).</p>	<p>• Os resultados da energia cinética turbulenta revelaram que na zona de colisão do jato de parede com a camada limite existe um ganho local de energia por convecção. • A produção de energia cinética turbulenta tende a ser equilibrada pelas perdas de difusão e de dissipação. • A pequena contribuição do termo convectivo para a produção de energia cinética turbulenta é menor do que a produção devida às tensões normais e de corte. • No geral, os resultados indicam que a modelação da turbulência deste escoamento pode exigir um tratamento adequado da produção pelas tensões normais, o que é importante na zona de colisão.</p>

Tabela 1.1: Sumário dos trabalhos experimentais referentes a escoamento de um jato (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Wang, Sundén, Borg e Abrahamsson (2011)	<p>Escoamento de um jato de impacto através de escoamento cruzado e estudo da possibilidade de controlar a transferência de calor usando uma nervura.</p> <p>$D_{interno} = 22.5 \text{ mm}$ $D_{externo} = 25 \text{ mm}$ $Re_j = 80000$ $Re_0 = 160000$ $1.0 < V_j/U_0 < 2.8$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • LCT. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização do escoamento. • Número de Nusselt. • Número de Nusselt máximo. • Contornos do número de Nusselt. • Variação do número de Nusselt ao longo do ponto de estagnação. • Efeito do Re_j na posição do ponto de estagnação. • Efeito da razão V_j/U_0 na distribuição do número de Nusselt. 	<ul style="list-style-type: none"> • Em geral, a presença da nervura modifica significativamente o padrão de transferência de calor do jato incidente. • Para todos os casos testados, a variação do número de Nusselt através do ponto de estagnação altera a sua forma, indicando que a região de maior transferência de calor se expande mais com o uso da nervura. Em particular, a presença da nervura tem um efeito mais pronunciado no aumento da transferência de calor a baixas razões de velocidade ($V_j/U_0 = 1.0$ e 1.4). • Para razões de velocidade mais elevadas ($V_j/U_0 = 2.0$ e 2.8), a presença da nervura torna a taxa de transferência de calor mais uniforme, mas verifica-se que o efeito do jato incidente tende a ser mais fraco.

Tabela 1.1: Sumário dos trabalhos experimentais referentes a escoamento de um jato (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
<p>Hassan, Assoum, Sobolik, Vétel, Abed-Meraim, Garon e Sakout (2012)</p>	<p>Jato circular incidente numa placa plana. $D = 7.8 \text{ mm}$ $H/D = 2.08$ $Re_j = 1260 \text{ e } 2450$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Polarographic (electrodiffusion) method</i> para as tensões na camada de corte. • TR-PIV para os campos de velocidade. 	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade média na direção do escoamento. • Intensidade de turbulência. • Coeficiente de fricção na superfície. • Visualização da dinâmica dos vórtices. • Espectro de energia das flutuações das tensões de corte na parede. 	<ul style="list-style-type: none"> • Verificaram-se valores elevados da intensidade turbulenta na região do jato livre e na região do impacto onde os vórtices azimutais se desenvolvem. O valor máximo da intensidade de turbulência corresponde à região de impacto das estruturas transversais. • A distribuição do coeficiente médio de fricção da superfície apresenta um pico na região onde as estruturas primárias de grande escala colidem com a parede. • Com o aumento do Re, tanto os vórtices com pequena ou grande frequência afetam a variação das tensões na camada limite. • As correlações cruzadas das tensões da camada limite confirmam a importância das diferentes estruturas vorticais na distribuição das tensões da camada limite.

Tabela 1.1: Sumário dos trabalhos experimentais referentes a escoamento de um jato (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Ahmed, Al-Abdeli e Guzzomi (2015)	<p>Estudo do efeito da rotação de um jato na superfície de impacto.</p> <p>$D_{inicial} = 50$ mm $D_{final} = 40$ mm $1 < H/D < 6$ $0 < swirl < 1.05$ $Re_j = 11600, 24600$ e 35000</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Fio quente. • Micromanómetro digital. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização do escoamento. • Perfis de velocidade. • Intensidades de turbulência. • Distribuição da pressão na superfície. 	<ul style="list-style-type: none"> • Verificou-se que a redução da pressão de estagnação com a rotação não é linear e que praticamente segue uma relação quadrática para um dado Re_j. • Para baixos valores de rotação ($swirl \leq 0.27$), o comportamento do coeficiente de pressão é similar ao dos escoamentos sem rotação ($swirl = 0$) para distâncias de impacto pequenas. • O máximo C_p afasta-se do ponto de impacto com rotações mais elevadas. • Um coeficiente de pressão de parede negativo ocorre perto do ponto de estagnação a $H/D = 1$, devido à separação do escoamento em rotação contrária a partir da superfície de impacto, o que já não se verifica para H/D maiores. • Para $swirl \leq 0.29$, a pressão é independente do Re, não se verificando o mesmo para valores de rotação maiores.
Long e New (2016)	<p>Escoamento de um jato elíptico incidente numa placa plana.</p> <p>$D_{maior} = 36.7$ mm $D_{menor} = 12.3$ mm $D_{hidraulico} = 17.4$ mm $H/D = 1, 2$ e 4 $Re_j = 2100$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • LIF. • DPIV. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização do escoamento. • Campos de velocidade. • Coeficiente de fricção na superfície. • Visualização da dinâmica dos vórtices. 	<ul style="list-style-type: none"> • O tamanho do dipolo do vórtice e o espaçamento entre dois dipolos de vórtices consecutivos diminui quando a distância de impacto é reduzida. • Os comportamentos chave vorticais ocorrem mais perto do ponto de impacto com H/D maiores. • Estas grandes influências devido às variações de H/D são relativamente similares às verificadas para jatos de impacto circulares.

Em 2016, [17] analisaram o escoamento de um jato elíptico incidente numa placa plana, através das técnicas *Laser Induced Fluorescence* (LIF) e *Digital Particle Image Velocimetry* (DPIV). Os resultados obtidos revelaram que o tamanho do dipolo do vórtice e o espaçamento entre dois dipolos de vórtices consecutivos diminui quando a distância de impacto é reduzida e que os comportamentos chave vorticiais ocorrem mais perto do ponto de impacto quando estas distâncias são maiores. Estas grandes influências devido às variações da distância de impacto são relativamente similares às verificadas para jatos de impacto circulares.

O escoamento gerado por múltiplos jatos incidentes numa superfície plana através de escoamento cruzado tem bastante importância para V/STOL, devido à formação de um escoamento ascendente idêntico a um repuxo. Na tabela 1.2 encontram-se sumariados alguns dos trabalhos experimentais já realizados relativos a vários jatos.

Na referência [18], foi estudado o escoamento de dois jatos de impacto subsónicos através de escoamento cruzado de baixa velocidade. Os resultados mostraram que as forças resultantes do *ground effect* de uma aeronave V/STOL em voo pairado podem ser muito sensíveis ao espaçamento entre os jatos e à geometria da fuselagem da aeronave. Foram encontradas instabilidades no escoamento em repuxo com e sem modelo de aeronave, utilizando um espaçamento entre jatos próximo de três diâmetros e para alturas de impacto baixas.

Em [19], os autores estudaram também o escoamento de dois jatos (lado a lado e em linha) considerando a existência de um escoamento cruzado, embora para uma razão de velocidades muito pequena (3 a 8) e sem ocorrer incidência dos jatos numa placa. Os resultados apresentados foram distribuições de pressão na placa situada no plano de saída dos jatos e confirmaram a existência de valores negativos neste plano.

O escoamento de um ou de dois jatos gémeos incidentes numa placa plana com ou sem movimento foi estudado por [20]. Verificaram que a penetração dos jatos no solo aumenta com a razão de velocidades, altura dos jatos, razão de pressões no bocal de saída dos jatos (NPR) e ângulo de inclinação (θ) destes. A diminuição desta ocorre quando a placa se move, devido à redução do défice de momento do escoamento cruzado e ao aumento da tensão na camada de corte do jato.

Recorrendo a técnicas de fumo, óleo e pigmento e LCT, [21] procedeu à visualização do escoamento de jatos incidentes numa superfície com e sem a presença de escoamento cruzado. Verificou que um *ring vortex* à volta da linha central foi gerado pela interação do jato livre com o escoamento envolvente. Quando o escoamento cruzado esteve presente na experiência, os “*lower adverse vortices*” não são particularmente afetados, enquanto os “*upper adverse vortices*” são arrastados pelo escoamento cruzado.

A visualização das linhas de corrente e a distribuição do coeficiente de pressão numa superfície plana num escoamento de jatos incidentes foram estudadas por [22]. Verificaram que o máximo principal dos perfis de C_p corresponde ao centro de impacto, o segundo máximo corresponde à linha de reinserção e o mínimo corresponde à projeção do centro do *ground vortex*. Os resultados da comparação entre a distribuição de pressão na parede de impacto e as visualizações permitem o estabelecimento de ligações entre a presença de linhas de corrente singulares na parede de impacto e as distribuições de pressão na parede.

Tabela 1.2: Sumário dos trabalhos experimentais referentes a escoamento de vários jatos.

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Hill Jr. e Jenkins (1980)	<p>Escoamento de dois jatos axi-simétricos subsônicos de impacto através de escoamento cruzado de baixa velocidade.</p> <p>$D = 50.8 \text{ mm}$ $1.5 < H/D < 4$ $2 < S/D < 4$ $V_j = 91.4 \text{ m/s}$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Sting balance</i> para medir a interferência das forças de solo no modelo da aeronave e nos modelos bidimensionais. • <i>Kiel probe and static probe</i> para medir as propriedades do escoamento em repuxo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Perfis de pressão. • Efeito do espaçamento entre jatos nas forças resultantes do efeito do solo. • Variação da pressão máxima no solo. • Efeito da altura de impacto nas forças resultantes do efeito do solo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os resultados mostraram que as forças resultantes do efeito do solo de uma aeronave V/STOL em voo pairado podem ser muito sensíveis ao espaçamento entre os jatos e à geometria da fuselagem da aeronave. • As forças de interferência aumentam à medida que o espaçamento entre jatos diminui, atingindo o seu máximo para S/D entre 3 e 4. • Foram encontradas instabilidades no escoamento em repuxo com e sem modelo de aeronave, utilizando um espaçamento entre jatos próximo de três diâmetros e para alturas de impacto baixas. • Para $S/D < 2.8$ não se verificaram instabilidades, mas produziram-se forças de interferência menos favoráveis.

Tabela 1.2: Sumário dos trabalhos experimentais referentes a escoamento de vários jatos (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Schetz e Jakubowsky (1984)	<p>Escoamento de um ou de dois jatos (lado a lado e em linha) através de escoamento cruzado.</p> <p>$D = 49.2 \text{ mm}$</p> <p>$2 < S/D < 6$</p> <p>$14.5 \text{ m/s} < U_0 < 35.8 \text{ m/s}$</p> <p>$3 < V_j/U_0 < 8$</p> <p>$\theta = 75^\circ, 90^\circ \text{ e } 105^\circ$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Unidade Scanivalve (48 portas). 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição de pressão na superfície. • Mapas isobáricos de ΔC_p. 	<ul style="list-style-type: none"> • No caso dos jatos alinhados, a interação entre eles resultou na proteção do jato a jusante pelo jato a montante. Aumentando V_j/U_0 verificou-se um aumento da área de superfície influenciada pelos jatos e o centro efetivo da força normal moveu-se para a frente. Aumentando θ, o centro efetivo da região de interação moveu-se para a frente. • Para os jatos colocados lado-a-lado verificou-se: velocidade de escoamento significativamente maior (pressões na superfície reduzidas) entre os jatos e aumento do bloqueio do escoamento cruzado e alastramento deste para os lados (quando comparado com o caso de apenas um jato), resultando no aumento da velocidade do escoamento (pressões mais baixas) nos lados livres dos jatos.

Tabela 1.2: Sumário dos trabalhos experimentais referentes a escoamento de vários jatos (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Knowles e Bray (1993)	<p>Escoamento de um ou de dois jatos gémeos incidentes numa placa plana com ou sem movimento.</p> <p>$D = 12.7 \text{ mm}$ $2 < H/D < 10$ $1.05 < NPR < 4$ $0.013 < U_0/V_j < 0.1$ $-5^\circ < \theta < 10^\circ$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Standoff probe</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização do escoamento. • Perfis de pressão no plano do chão. • Efeito da razão U_0/V_j. • Efeito do movimento da placa plana na espessura da camada limite do escoamento cruzado. • Efeito da altura de impacto. • Efeito da razão de pressão NPR. • Efeito do ângulo θ. 	<ul style="list-style-type: none"> • Foi confirmado que há uma relação constante entre a distância de penetração, a distância de separação e a posição do núcleo do vórtice. Assim, qualquer um destes parâmetros pode ser usado para quantificar a penetração no solo. • A penetração dos jatos no solo aumenta com V_j/U_0, altura dos jatos, NPR e θ. A diminuição desta ocorre quando a placa plana se move, devido à redução do déficit de momento do escoamento cruzado e do aumento da tensão na camada de corte do jato.
Carcasci (1999)	<p>Jatos incidentes numa superfície com e sem a presença de escoamento cruzado.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Técnica de fumo: $D = 20 \text{ mm}$ $H/D = 2$ $S/D = 6$ • Técnica de óleo e pigmento: $H/D = 2, 4 \text{ e } 8$ $S/D = 6 \text{ e } 12$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Técnicas de fumo, óleo e pigmento e LCT. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização do escoamento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Um <i>ring vortex</i> à volta da linha central é gerado pela interação do jato livre com o escoamento envolvente. • Quando a distância entre as superfícies é pequena e o Re elevado, o <i>ring vortex</i> determina o alto coeficiente de transferência de calor à volta do ponto de estagnação na placa plana. • Quando o escoamento cruzado esteve presente na experiência, os “<i>lower adverse vortices</i>” não são particularmente afetados, enquanto os “<i>upper adverse vortices</i>” são arrastados pelo escoamento cruzado. • Os <i>ring vortices</i> são influenciados pelo escoamento cruzado.

Tabela 1.2: Sumário dos trabalhos experimentais referentes a escoamento de vários jatos (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Bernard, Brizzi e Bousgarbiès (2000)	Escoamento de jatos incidentes numa superfície plana. $D = 10 \text{ mm}$ $Re_j = 12600$	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Spreading over method.</i> • <i>Argon Laser.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização das linhas de corrente. • Distribuição do coeficiente de pressão. 	<ul style="list-style-type: none"> • O máximo principal dos perfis de C_p corresponde ao centro de impacto, o segundo máximo corresponde à linha de reinserção e o mínimo corresponde à projeção do centro do <i>ground vortex</i>. • Os resultados da comparação entre a distribuição de pressão na parede de impacto e as visualizações permitem o estabelecimento de ligações entre a presença de linhas de corrente singulares na parede de impacto e as distribuições de pressão na parede.
Saddington e Knowles (2000)	Escoamento de jatos co-anulares incidentes numa placa plana. $D = 50.28 \text{ mm}$ $d_{interno} = 35.81 \text{ mm}$ $d_{central} = 35.33 \text{ mm}$ $1.0 < NPR_{interno} < 3.5$ $1.0 < NPR_{central} < 3.5$ $1.4 < H/D < 10$	<ul style="list-style-type: none"> • Configuração 1: Tubo de Pitot. • Configuração 2: Três células de peso. 	<ul style="list-style-type: none"> • Perfis de pressão. • <i>Jet induced suckdown.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Os jatos co-anulares possuem relativamente boa axi-simetria. • Com um escoamento subsónico no núcleo, as medições da força de <i>suckdown</i> em <i>ground effect</i> são largamente independentes de NPR. Com um escoamento supersónico no núcleo, os resultados indicam que o perfil normal do jato co-anular apresenta baixas percentagens de <i>suckdown</i> para $H/D < 5$.

Tabela 1.2: Sumário dos trabalhos experimentais referentes a escoamento de vários jatos (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Geers, Tummers e Hanjalić (2004)	<p>Escoamento de um ou de vários (13) jatos incidentes sobre uma superfície sem escoamento cruzado.</p> <ul style="list-style-type: none"> Um jato: <ul style="list-style-type: none"> $D = 36 \text{ mm}$ $H/D = 2$ $V_j = 9.6 \text{ m/s}$ $Re_j = 2.3 \times 10^4$ 13 jatos dispostos num arranjo hexagonal: <ul style="list-style-type: none"> $D = 13 \text{ mm}$ $H/D = 4$ $S/D = 2$ $Re_j = 18.2 \times 10^3$ 	<ul style="list-style-type: none"> LDA. PIV. 	$\bar{U}, \bar{V}, \sqrt{\overline{u'^2}}, \sqrt{\overline{v'^2}}, \overline{u'^2}, \overline{v'^2}$ e $\overline{u'v'}$ <ul style="list-style-type: none"> Velocidades instantâneas. 	<ul style="list-style-type: none"> Em ambas as geometrias, na região de impacto dos jatos, o campo de tensões turbulentas é caracterizado por uma forte anisotropia. A interação entre os jatos de parede originada pelos jatos exteriores e o escoamento cruzado produzido pelos jatos interiores forma um vórtice em forma de ferradura que envolve os jatos exteriores. A posição deste vórtice coincide com uma região de elevada energia cinética turbulenta.
Saddington, Knowles e Cabrita (2007)	<p>Jatos gémeos incidentes numa placa plana através de escoamento cruzado.</p> <ul style="list-style-type: none"> $D = 12.7 \text{ mm}$ $H/D = 2.4, 4.4, 6.4 \text{ e } 8.4$ $S/D = 3, 5 \text{ e } 7$ $1.05 < NPR < 4$ 	<ul style="list-style-type: none"> PIV. LDV. 	<ul style="list-style-type: none"> Visualização do escoamento. Campos de velocidade. Taxa de decaimento. Espetro de energia. 	<ul style="list-style-type: none"> A velocidade média vertical do repuxo foi consistente ao longo de toda a gama de testes realizada e, por isso, independente da altura do jato e da razão de pressão NPR. A velocidade máxima vertical local do repuxo diminuiu com o aumento da altura do jato em relação ao solo. Observou-se que a taxa de decaimento é dependente da NPR.

Tabela 1.2: Sumário dos trabalhos experimentais referentes a escoamento de vários jatos (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Yin, Zhang e Lin (2007)	<p>Escoamento de dois jatos gémeos.</p> <p>$D = 44 \text{ mm}$</p> <p>$S/D = 1.5, 1.75 \text{ e } 1.89$</p> <p>$10 \text{ m/s} < V_j < 25 \text{ m/s}$</p> <p>$Re_j = 3.33 \times 10^4, 5 \times 10^4 \text{ e } 8.33 \times 10^4$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Movable X-hot wire probe.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Perfis de velocidade média. • Perfis de energia turbulenta. • Tensão de corte de Reynolds. 	<ul style="list-style-type: none"> • Na direção do escoamento, os jatos gémeos são claramente separados perto do bocal de saída do jato. Fora desta região, os dois jatos interagem, misturam-se e aparecem como se fossem apenas um jato. • Os perfis de velocidade e de energia turbulenta são praticamente simétricos em relação à linha central dos dois jatos para vários Re e espaçamentos entre os dois jatos. • A interferência entre os dois jatos aumenta à medida que Re aumenta. Esta interferência aumenta à medida que o espaçamento entre os dois jatos diminui. • O comprimento da mistura dos dois jatos pode ser aumentado reduzindo S/D ou então aumentando Re.

Tabela 1.2: Sumário dos trabalhos experimentais referentes a escoamento de vários jatos (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Saddington, Knowles e Cabrita (2009)	<p>Jatos gémeos com configuração afunilada para dentro ou para fora.</p> <p>$D = 12.7$ mm</p> <p>$H/D = 2.4, 4.4, 6.4$ e 8.4</p> <p>$S/D = 7$</p> <p>$NPR = 1.05, 2, 3, 3.25, 3.5, 3.75$ e 4</p> <p>$\theta = -15^\circ, -10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ e 15°</p>	<ul style="list-style-type: none"> • PIV. 	<p>Quantificar e analisar o efeito do afunilamento dos jatos em:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Impacto dos jatos. • Características no campo de escoamento médio. • Disseminação e deterioração do repuxo. • Razão do momento de fluxo do repuxo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Para uma razão de pressão baixa ($NPR = 1.05$) observou-se uma boa correlação entre o produto do momento do jato transportado para a região de formação do repuxo e a separação lateral dos pontos de estagnação do jato, assim como na relação dos picos da velocidade vertical na fonte. Para razões de pressão sub-expandidas a correlação ainda existe, mas verifica-se uma maior dispersão nos dados. • A taxa de decaimento da velocidade vertical máxima no repuxo mostrou ter uma forte dependência com NPR. • A inclusão de bocais afunilados (com inclinação θ) não alterou significativamente a distribuição da razão de quantidade de movimento do repuxo relativamente à configuração paralela equivalente.

Tabela 1.2: Sumário dos trabalhos experimentais referentes a escoamento de vários jatos (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
<p>Barata, Carvalho, Neves, Silva, Vieira e Durão (2014)</p>	<p>Jatos gémeos alinhados com um escoamento cruzado de baixa velocidade.</p> <p>$D = 15 \text{ mm}$ $H/D = 20.1$ $S/D = 6$ $V_j = 36 \text{ m/s}$ $U_0 = 1.6 \text{ m/s}$ $V_j/U_0 = 22.5$ $Re_j = 4.3 \times 10^4$</p>	<p>• LDV.</p>	<p>• Visualização do escoamento.</p> <p>$\bar{U}, \bar{V}, \sqrt{u'^2}, \sqrt{v'^2}$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Os resultados obtidos mostraram uma grande penetração do primeiro jato (localizado a montante), que é defletido pelo escoamento cruzado e atinge o solo, dando origem a um <i>ground vortex</i> devido à colisão da parede radial com o escoamento cruzado, envolvendo o ponto de impacto como um “cachecol”. • O segundo jato (localizado a jusante) é menos afetado pelo escoamento em termos de deflexão, pois o primeiro jato e o seu <i>ground vortex</i> bloqueiam o escoamento, fazendo com que este choque no jato de parede a jusante resultante do primeiro jato, não atingindo o solo. • Os perfis horizontais das tensões normais não permitem identificar completamente as camadas de corte em torno dos jatos, pois não exibem picos claros nas bordas e os valores no centro são também elevados.

Tabela 1.2: Sumário dos trabalhos experimentais referentes a escoamento de vários jatos (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Barata, Neves, Vieira e Silva (2014)	<p>Jatos gémeos alinhados com um escoamento cruzado de baixa velocidade.</p> <p>$D = 15 \text{ mm}$ $H/D = 20.1$ $S/D = 6$ $V_j = 36 \text{ m/s}$ $U_0 = 1.6 \text{ m/s}$ $V_j/U_0 = 22.5$ $Re_j = 4.3 \times 10^4$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • LDV. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização do escoamento. $\bar{U}, \bar{V}, \sqrt{u'^2}, \sqrt{v'^2}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Devido ao confinamento do escoamento e do <i>ground vortex</i>, o escoamento cruzado é bloqueado, o que provoca a sua aceleração na parte superior do escoamento, contribuindo para uma mistura melhorada para cada escoamento secundário. Como consequência, não foi possível identificar qualquer jato de parede ou <i>ground vortex</i> resultante do segundo jato (localizado a montante). • O efeito da colisão do segundo jato de impacto com o jato de parede a jusante resultante do primeiro jato de impacto (localizado a montante) nunca foi relatado antes na bibliografia, necessitando a ocorrência deste fenómeno de investigação futura.

Em [23], os autores estudaram o escoamento de jatos co-anulares incidentes numa placa plana, tendo verificado que estes possuem relativamente boa axi-simetria. Com um escoamento sub-sónico no núcleo, as medições da força de *suckdown* em *ground effect* são largamente independentes de *NPR*. Com um escoamento supersónico no núcleo, os resultados indicaram que o perfil normal do jato co-anular apresentava baixas percentagens de *suckdown* para $H/D < 5$.

Utilizando uma técnica de PIV, [24] estudaram o escoamento de um ou de vários jatos incidentes sobre uma superfície sem escoamento cruzado para baixas alturas de impacto. Em ambas as geometrias, na região de impacto dos jatos, o campo de tensões turbulentas é caracterizado por uma forte anisotropia. A interação entre os jatos de parede originada pelos jatos exteriores e o escoamento cruzado produzido pelos jatos interiores formou um vórtice em forma de ferradura que envolveu os jatos exteriores. A posição deste vórtice coincide com uma região de elevada energia cinética turbulenta.

Na referência [25], os autores estudaram jatos gémeos incidentes numa placa plana através de escoamento cruzado, tendo verificado que a velocidade média vertical do repuxo é independente da altura do jato e de *NPR* e que a velocidade máxima vertical local do repuxo diminuiu com o aumento da altura do jato em relação ao solo. Os autores [26] também estudaram o escoamento de dois jatos gémeos, tendo obtido resultados para os perfis de velocidade média e de energia turbulenta e ainda da tensão de corte de Reynolds. Na direção do escoamento, os jatos gémeos são claramente separados perto do bocal de saída do jato. Fora desta região, os dois jatos interagem, misturam-se e aparecem como se fossem apenas um jato. Jatos gémeos com configuração afunilada para dentro ou para fora foram estudados por [27] recorrendo a PIV. Chegaram à conclusão de que a inclusão de bocais afunilados não alterava significativamente a distribuição da razão de quantidade de movimento do repuxo relativamente à configuração paralela equivalente. Mais recentemente, [28] e [29] estudaram jatos gémeos alinhados com um escoamento cruzado de baixa velocidade através de LDV. Procederam à visualização do escoamento e obtiveram resultados das velocidades médias e das tensões normais. Os resultados obtidos mostraram uma grande penetração do primeiro jato (localizado a montante), que é defletido pelo escoamento cruzado e atinge o solo, dando origem a um *ground vortex* devido à colisão da parede radial com o escoamento cruzado, envolvendo o ponto de impacto como um “cachecol”. O segundo jato (localizado a jusante) é menos afetado pelo escoamento em termos de deflexão, pois o primeiro jato e o seu *ground vortex* bloqueiam o escoamento, fazendo com que este choque no jato de parede a jusante resultante do primeiro jato, não atingindo o solo.

1.3.2 Estudos Teóricos e Numéricos

Embora o presente trabalho seja principalmente experimental, é importante também mencionar alguns trabalhos numéricos já realizados, encontrando-se estes sumariados na tabela 1.3.

Em [30] foi utilizado o método das diferenças finitas para calcular o escoamento de um jato através de escoamento cruzado, mas para razões de velocidade extremamente pequenas (0.1 e 0.3). Embora os resultados obtidos fossem semelhantes aos resultados experimentais para $V_j/U_0 = 0.1$, apareceram algumas diferenças para $V_j/U_0 = 0.3$ que não permitiram avaliar a precisão do método usado.

Tabela 1.3: Sumário dos trabalhos teóricos e numéricos referentes a escoamento de um ou de vários jatos.

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Rodi e Srivatsa (1980)	Escoamento de um jato através de escoamento cruzado. $V_j/U_0 = 0.1$ e 0.3	<ul style="list-style-type: none"> • Método das diferenças finitas. • Modelo de turbulência $k - \epsilon$. 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuições da pressão total. • Pressão na parede. 	<ul style="list-style-type: none"> • Para $V_j/U_0 = 0.1$, os resultados obtidos numericamente são semelhantes aos resultados experimentais obtidos por outros autores. • Para $V_j/U_0 = 0.3$, existem discrepâncias entre os resultados obtidos e os dados experimentais, provavelmente devido à grande simplificação da representação do transporte turbulento pelo modelo de viscosidade/difusividade utilizado.
Barata e Durão (1989)	Escoamento de um ou de dois jatos gémeos incidentes numa placa plana através de escoamento cruzado de baixa velocidade. $D = 20$ mm $H/D = 5$ $V_j = 3$ m/s $U_0 = 0.1$ m/s $Re_j = 60000$	<ul style="list-style-type: none"> • Método das diferenças finitas. • Modelo de turbulência $k - \epsilon$. • Esquemas híbrido e QUICK. 	<ul style="list-style-type: none"> • Trajetórias. • Velocidades médias. 	<ul style="list-style-type: none"> • Malhas com 8670 e 69360 nós. • Os resultados numéricos são semelhantes aos obtidos em estudos anteriores experimentalmente, embora em algumas regiões se verifiquem diferenças que são devidas à insuficiência de nós da malha utilizada. • O uso do esquema QUICK gera soluções mais precisas do que o esquema híbrido.

Tabela 1.3: Sumário dos trabalhos teóricos e numéricos referentes a escoamento de um ou de vários jatos (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Knowles (1996)	<p>Estudo da modelação de jatos de impacto usando as correções de Rodi e de Malin ao modelo de turbulência $k - \varepsilon$.</p> <p>Estudo de um jato livre e de um jato de impacto.</p> <p>$1.05 < NPR < 3$</p> <p>$1\% < Tu < 15\%$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de turbulência $k - \varepsilon$ <i>standard</i>. • Modelo de turbulência $k - \varepsilon$ com as correções de Rodi e de Malin. 	<ul style="list-style-type: none"> • Perfis de velocidade. • Decaimento da velocidade axial. • Crescimento do jato de parede. 	<ul style="list-style-type: none"> • O aumento de NPR tende a reduzir a taxa de decaimento da velocidade na linha central do jato livre. • O aumento de Tu à saída do jato promove uma mistura mais rápida e, portanto, o decaimento do jato livre. • Aumentando a altura do bocal verificou-se o aumento da espessura do jato de parede a um dado raio. Contudo, a taxa de decaimento não parece ser afetada, sendo a influência principal o aumento na espessura inicial do jato de parede. • O modelo $k - \varepsilon$ <i>standard</i> sobredimensiona o decaimento do jato livre e subdimensiona o crescimento do jato de parede radial. A correção de Rodi melhora a previsão do jato livre e a correção de Malin faz um pequeno, mas inadequado, melhoramento na previsão do jato de parede radial. • A previsão do jato de parede é fortemente dependente do cálculo do jato livre.
Yang e Hao (1999)	<p>Escoamento de três jatos turbulentos com e sem uma superfície em movimento.</p> <p>$0.05 < U_s/V_j < 0.25$</p> <p>$Re = 11000, 22000$ e 44000</p> <p>$P/W = 2, 3$ e 5</p> <p>(U_s é a velocidade da superfície, P é o <i>pitch</i> e W é a largura do bocal)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de turbulência $k - \varepsilon$. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente de fricção na superfície. • Vetores de velocidade. • Número de Nusselt. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os autores concluíram que os efeitos de interferência são intensificados quando os jatos estão mais próximos, a distância de separação das saídas dos jatos é pequena e quando a superfície de impacto dos jatos é relativamente grande. • Os jatos de parede ganham cada vez mais importância quando o espaçamento entre jatos e a distância de impacto são pequenas e a velocidade do jato é aumentada.

Tabela 1.3: Sumário dos trabalhos teóricos e numéricos referentes a escoamento de um ou de vários jatos (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Behrouzi (2000)	Escoamento de dois jatos gémeos incidentes numa placa plana. $H/D = 3$ e 5 $S/D = 9$ e 14	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de turbulência $k - \varepsilon$. • Esquema híbrido (1ª ordem). • QUICK (2ª ordem). 	<ul style="list-style-type: none"> • Trajetórias. • Perfis de velocidade. • Decaimento da velocidade máxima. 	<ul style="list-style-type: none"> • O estudo efetuado revelou que as previsões obtidas para os campos de velocidade estão maioritariamente de acordo com os resultados LDV obtidos experimentalmente num estudo anterior. • No que diz respeito às previsões para a região do repuxo, estas revelaram-se muito afastadas dos resultados experimentais, devido aos muitos erros produzidos pelo modelo $k - \varepsilon$ na previsão das regiões vorticiais.
Chiriac e Ortega (2002)	Escoamento de um jato incidente numa placa isotérmica. $D = 10$ mm $H/D = 5$ $0.2 \text{ m/s} < V_j < 0.6 \text{ m/s}$ $250 < Re_j < 750$ $Pr = 0.72$	<ul style="list-style-type: none"> • Método das diferenças finitas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Campos de velocidade. • Contornos de temperatura. • Coeficientes de pressão na parede. • Coeficientes de fricção na parede. • Número de Nusselt. • Espectros de frequências. • Contornos de vorticidade. 	<ul style="list-style-type: none"> • A visualização das simulações numéricas mostrou a complexidade do campo de escoamento: estável para $Re_j = 250$ e 500 e instável para $Re_j = 750$. • Os coeficientes de pressão na parede, de fricção na parede e de transferência de calor atingiram um valor máximo na vizinhança do ponto de estagnação, tal como era esperado. • O impacto da dependência do Nu com o Re é diminuído no regime instável, pois a transferência de calor é melhorada pelos mecanismos não-lineares instáveis. • Em comparação, para os casos estáveis, o número de Nusselt de estagnação é diretamente proporcional ao número de Reynolds do jato, dependendo principalmente da magnitude da velocidade.

Tabela 1.3: Sumário dos trabalhos teóricos e numéricos referentes a escoamento de um ou de vários jatos (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
El-Gabry e Kaminsky (2005)	<p>Escoamento de um arranjo de jatos inclinados e incidentes numa placa plana através de escoamento cruzado.</p> <p>$H/D = 1$ e 2</p> <p>$10000 < Re_j < 35000$</p> <p>$NPR = 1.17$</p> <p>$\theta = 30^\circ, 60^\circ$ e 90°</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de turbulência $k - \varepsilon$ <i>standard</i>. • Modelo Yang-Shih. 	<ul style="list-style-type: none"> • Número de Nusselt. • Número de Nusselt médio. • Energia cinética turbulenta. • Taxa de dissipação. • Temperatura estática. 	<ul style="list-style-type: none"> • O modelo $k - \varepsilon$ <i>standard</i> é um modelo de turbulência para números de Reynolds elevados e é melhor a modelar regiões em que o núcleo do escoamento é turbulento e não é aconselhado para regiões muito próximas da parede, onde os efeitos viscosos são dominantes. • Os modelos de baixo número de Reynolds podem ser integrados para a parede, eliminando a necessidade de um tratamento especial. Assim, o modelo de Yang-Shih, embora tenha sobre-estimado o pico do Nu (quando comparado com o modelo anterior), revelou-se mais eficaz na previsão da transferência de calor entre os jatos.
Bevilaqua, Margason e Gaharan (2007)	<p>Desenvolvimento de uma teoria para a perda no jato de elevação em aeronaves V/STOL em voo pairado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de turbulência $k - \varepsilon$. 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição da pressão estática. • Velocidades horizontal e vertical do jato. • Perda de potência. 	<ul style="list-style-type: none"> • Concluiu-se que as soluções para os jatos dadas através de dados experimentais são válidas para prever o comprimento do cone potencial do jato e o arrastamento do ar em repouso pelo jato através do uso do modelo de turbulência $k - \varepsilon$. • Estudos na sensibilidade da malha e turbulência mostraram que o tamanho da malha afetava o resultado quando a intensidade de turbulência foi inferior a 10% da velocidade média.

Tabela 1.3: Sumário dos trabalhos teóricos e numéricos referentes a escoamento de um ou de vários jatos (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Miao, Wu e Chen (2009)	<p>Escoamento de múltiplos jatos de refrigeração confinados (em linha e escalonados) sobre uma placa plana através de escoamento cruzado com diferentes orientações (paralelo, híbrido e oposto).</p> <p>$D = 5 \text{ mm}$ $H/D = 1, 3 \text{ e } 6$ $2440 < Re_j < 14640$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de turbulência $k - \varepsilon$. 	<ul style="list-style-type: none"> • Número de Nusselt. 	<ul style="list-style-type: none"> • Com o aumento de Re_j, a transferência de calor é melhorada. • A orientação híbrida do escoamento cruzado cria menor queda de pressão do que nos casos de orientação paralela e oposta. • Os números de Nusselt local e médio são mais elevados no caso da orientação híbrida. • Para o mesmo Re_j e com $H/D = 3$, a configuração de todos os jatos em linha proporciona uma melhor refrigeração do que o caso em que os jatos se encontram escalonados.
Xiao, Tang, Liang e Zhang (2011)	<p>Escoamento de um e de quatro jatos alinhados através de escoamento cruzado.</p> <p>$D = 10 \text{ mm}$ $H/D = 10$ $L/D = 5$ $2.38 < V_j/U_0 < 17.88$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de turbulência $k - \varepsilon$. 	<ul style="list-style-type: none"> • Trajetória do jato. • Decaimento da velocidade média na trajetória do jato. • Campos de velocidade. • Energia cinética turbulenta. 	<ul style="list-style-type: none"> • As trajetórias de um único jato são ligeiramente maiores do que as registadas para o primeiro jato do grupo dos quatro para a mesma razão V_j/U_0. Estas diferenças diminuem com a diminuição desta razão de velocidades. • As trajetórias dos jatos a jusante são menos defletidas do que as do primeiro jato. • Os campos de escoamento para um único jato e para o primeiro jato do grupo de quatro mostram ter um desenvolvimento similar no escoamento próximo. • As energias cinéticas turbulentas de um único jato e do primeiro jato do grupo de 4 mostram distribuições semelhantes, assim como os 3 jatos a jusante também possuem distribuições similares.

Tabela 1.3: Sumário dos trabalhos teóricos e numéricos referentes a escoamento de um ou de vários jatos (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Ostheimer e Yang (2012)	<p>Escoamento de dois jatos gémeos lado a lado através de escoamento cruzado.</p> <p>$D = 20$ mm $H/D = 5$ $S/D = 5$ $V_j = 5.275$ m/s $U_0 = 0.176$ m/s $Re = 105000$ $V_j/U_0 = 30$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de turbulência $k - \varepsilon$ <i>standard</i>. • RSM. 	<ul style="list-style-type: none"> • Vetores de velocidade. • Velocidades médias. • Tensões normais e de corte. 	<ul style="list-style-type: none"> • No geral, os resultados obtidos, tanto com o modelo $k - \varepsilon$ como com o RSM, corresponderam aos obtidos experimentalmente em estudos anteriores. • Comparando com os dados experimentais, as previsões obtidas para as velocidades médias com o RSM são apenas ligeiramente melhores do que as obtidas com o modelo $k - \varepsilon$. • Contudo, as previsões das tensões de Reynolds pelo RSM são pobres quando comparadas com os dados experimentais, indicando que para se conseguir capturar estas características do escoamento instáveis com detalhe é necessário usar, por exemplo, o LES (já utilizado em estudos anteriores).
Vieira, Barata, Neves e Silva (2015)	<p>Dois jatos gémeos incidentes numa superfície e alinhados com um escoamento de baixa velocidade.</p> <p>$D = 15$ mm $H/D = 20.1$ $S/D = 6$ $15 < V_j/U_0 < 60$ $43000 < Re_j < 105000$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de turbulência $k - \varepsilon$. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização do escoamento. • Trajetórias. • Velocidade média na componente vertical. 	<ul style="list-style-type: none"> • Para razões V_j/U_0 maiores, a deflexão do primeiro jato (localizado a montante) é mais pequena e mais próximo deste jato está o <i>ground vortex</i>. • Os resultados obtidos mostraram que para as duas razões V_j/U_0 mais baixas, os dois jatos não se misturam e não é detetada a presença de <i>ground vortex</i>. Para $V_j/U_0 = 33.7$ e 60, o <i>ground vortex</i> está completamente presente e move-se com o aumento desta razão de velocidades.

Tabela 1.3: Sumário dos trabalhos teóricos e numéricos referentes a escoamento de um ou de vários jatos (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Penumadu e Rao (2017)	<p>Escoamento de vários jatos em regime de baixo número de Reynolds através de escoamento cruzado.</p> <p>$200 \mu m < D < 1000 \mu m$ com incrementos de $200 \mu m$ $H/D = 5$ $Re_j < 3000$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • RANS, URANS, LES, WMLES e modelo de turbulência SST $k - \omega$. 	<ul style="list-style-type: none"> • Queda da pressão total. • Número de Nusselt. • Coeficiente de transferência de calor. • Perfis de velocidade e de temperatura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Foi observado a partir das simulações LES que o escoamento cruzado afeta os jatos a jusante significativamente. Para além disso, estes jatos começam a oscilar devido às grandes velocidades do escoamento cruzado. • Observou-se também que as simulações CFD sobre-estimavam a queda de pressão significativamente, por cerca de 50%. • Verificou-se que grande parte da queda de pressão ocorre devido ao efeito de contração na entrada do bocal do jato e à perda de energia cinética nos bocais. • A queda de pressão é extremamente sensível a mudanças no diâmetro do jato, mas não é sensível a mudanças da altura de impacto H/D.

Na referência [31], os autores estudaram o escoamento de um ou de dois jatos gêmeos incidentes numa placa plana através de escoamento cruzado de baixa velocidade através do método das diferenças finitas, modelo de turbulência $k - \varepsilon$ e esquemas híbrido e *Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics* (QUICK). Os resultados numéricos obtidos são semelhantes aos obtidos experimentalmente, embora em algumas regiões se verifiquem diferenças que são devidas à insuficiência de nós da malha usada e do método de turbulência $k - \varepsilon$ não prever corretamente a estrutura turbulenta da zona de impacto.

Um estudo da modelação de jatos de impacto usando as correções de Rodi e de Malin ao modelo de turbulência $k - \varepsilon$ foi realizado por [32]. O modelo $k - \varepsilon$ *standard* sobredimensiona o decaimento do jato livre e subdimensiona o crescimento do jato de parede radial. A correção de Rodi melhora a previsão do jato livre e a correção de Malin faz um pequeno, mas inadequado, melhoramento na previsão do jato de parede radial.

O escoamento de três jatos turbulentos com e sem uma superfície em movimento foi estudado por [33], recorrendo ao mesmo modelo de turbulência dos dois estudos anteriores. Verificouse que os jatos de parede ganham cada vez mais importância quando o espaçamento entre jatos (S) e a distância de impacto são pequenas e a velocidade do jato é aumentada. Ainda recorrendo ao mesmo modelo de turbulência, [34] analisou o caso de dois jatos gêmeos a incidirem numa placa plana para baixas alturas de impacto. No que diz respeito às previsões para a região do repuxo, estas revelaram-se muito afastadas dos resultados experimentais, devido aos muitos erros produzidos pelo modelo de turbulência usado na previsão das regiões vorticiais.

Utilizando o método das diferenças finitas, [35] simularam o escoamento de um jato incidente numa placa isotérmica, tendo a visualização das simulações numéricas mostrado a complexidade do campo de escoamento: estável para $Re_j = 250$ e 500 e instável para $Re_j = 750$. Para os casos estáveis, o Nu de estagnação é diretamente proporcional ao Re_j , dependendo principalmente da magnitude da velocidade; o impacto da dependência do Nu com o Re é diminuído no regime instável, pois a transferência de calor é melhorada pelos mecanismos não-lineares instáveis.

Em [36], os autores estudaram o escoamento de um arranjo de jatos inclinados e incidentes numa placa plana através de escoamento cruzado, usando, para isso, os modelos de turbulência $k - \varepsilon$ e Yang-Shih. O primeiro modelo referido é usado para Re elevados, não sendo aconselhado para regiões muito próximas da parede, onde os efeitos viscosos são dominantes. O segundo modelo, embora tenha sobre-estimado o pico do Nu , revelou-se mais eficaz na previsão da transferência de calor entre os jatos.

O desenvolvimento de uma teoria para a perda no jato de elevação em aeronaves V/STOL em voo pairado foi feito em [37]. Concluiu-se que as soluções para os jatos dadas através de dados experimentais são válidas para prever o comprimento do cone potencial do jato e o arrastamento do ar em repouso pelo jato, através do uso do modelo de turbulência $k - \varepsilon$. O tamanho da malha afetava o resultado quando a intensidade de turbulência foi inferior a 10% da velocidade média.

Medições do número de Nusselt foram efetuadas por [38] a partir do modelo $k - \varepsilon$ no escoamento de múltiplos jatos de refrigeração confinados através de escoamento cruzado com diferentes orientações. Verificou-se que a orientação híbrida é a que cria menor queda de pressão quando

comparada com os casos de orientações paralela e oposta.

Na referência [39], os autores simularam o escoamento de um e de quatro jatos alinhados através de escoamento cruzado com o modelo de turbulência $k - \varepsilon$. Os campos de escoamento e as energias cinéticas turbulentas para um único jato e para o primeiro jato do grupo de quatro mostraram ter distribuições semelhantes, assim como os três jatos a jusante também possuem distribuições similares.

Com mais interesse para aplicações V/STOL, os trabalhos existentes na literatura são muito mais escassos. Destaca-se o estudo realizado por [40], em que temos uma altura de impacto baixa e uma razão de velocidades elevada. Comparando com os dados experimentais, as previsões obtidas para as velocidades médias com o RSM são apenas ligeiramente melhores do que as obtidas com o modelo $k - \varepsilon$. Contudo, o mesmo já não se verifica na previsão das tensões de Reynolds pelo *Reynolds Stress Model* (RSM), sendo necessário recorrer, por exemplo, ao *Large Eddy Simulation* (LES).

Em 2015, [41] estudaram dois jatos gêmeos incidentes numa superfície e alinhados com um escoamento de baixa velocidade recorrendo mais uma vez ao modelo de turbulência $k - \varepsilon$. Verificaram que para razões V_j/U_0 maiores, a deflexão do jato a montante é mais pequena e que mais próximo deste está o *ground vortex*. Os resultados obtidos mostraram também que para as razões V_j/U_0 mais baixas, os dois jatos não se misturam e não é detetada a presença de *ground vortex*. Para $V_j/U_0 = 33.7$ e 60 , o *ground vortex* está completamente presente e move-se com o aumento desta razão de velocidades.

Mais recentemente, [42], utilizando *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS), *Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes* (URANS), LES, *Wall Modeled Large Eddy Simulation* (WMLES) e o modelo de turbulência *Shear Stress Transport* (SST) $k - \omega$, simularam o escoamento de vários jatos em regime de baixo número de Reynolds através de escoamento cruzado. Observaram que as simulações *Computational Fluid Dynamics* (CFD) sobre-estimavam a queda de pressão significativamente, por cerca de 50%. Verificaram que grande parte da queda de pressão ocorria devido ao efeito de contração na entrada do bocal do jato e à perda de energia cinética nos bocais. Concluíram que a queda de pressão é extremamente sensível a mudanças do diâmetro do jato (D), não se verificando o mesmo com mudanças da altura de impacto.

1.3.3 Estudos Experimentais e Numéricos

Na tabela 1.4 encontram-se sumariados alguns dos trabalhos experimentais e numéricos já realizados relativos a um ou a vários jatos.

Em [43] foram apresentados resultados importantes para aplicações V/STOL, uma vez que consideraram a altura do jato igual a 3 (ainda que as razões de velocidade usadas tenham sido muito pequenas), mas apenas conseguiram verificar que o ponto de incidência do jato em escoamento confinado varia espacialmente com o escoamento cruzado, pois as medições foram insuficientes para mostrar com mais detalhe a natureza do escoamento.

Tabela 1.4: Sumário dos trabalhos experimentais e numéricos referentes a escoamento de um ou de vários jatos.

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Stoy e Ben-Haim (1973)	<p>Jato de ar através de escoamento cruzado confinado.</p> <p>$D = 12.7 \text{ mm}$</p> <p>$H/D = 3.05$</p> <p>$V_j/U_0 = 2.5 \text{ a } 7.7$</p> <p>$Re_j = 10000 \text{ a } 50000$ com incrementos de 10000.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tubo de Pitot e os dados foram colocados em cartões para o programa computacional. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ponto de incidência do jato. • Trajetória do jato. • Comprimento da região potencial. 	<ul style="list-style-type: none"> • O ponto de incidência do jato em escoamento confinado varia espacialmente com o escoamento cruzado.
Knowles e Bray (1991)	<p>Escoamento de um ou de dois jatos gémeos incidentes numa superfície com e sem movimento e na presença de escoamento cruzado.</p> <p>$D = 12.7 \text{ mm}$</p> <p>$2 < H/D < 10$</p> <p>$1.05 < NPR < 4$</p> <p>$-5^\circ < \theta < 10^\circ$</p> <p>$0.01 < U_0/V_j < 0.1$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental: Tubo de Pitot. • Numérico: modelo de turbulência $k - \epsilon$. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização do escoamento. • Distribuição da pressão estática na superfície. 	<ul style="list-style-type: none"> • A penetração aumenta com o aumento da razão V_j/U_0. • A penetração diminui quando é usada uma placa com rotação, devido à redução do défice de momento do escoamento cruzado e ao aumento da tensão de corte do jato de parede. • A penetração aumenta com a razão de pressão do bocal até ao limite, sendo reduzida para altas razões de pressão, mas com um segundo pico à volta de $NPR = 3$. • A penetração aumenta também com o ângulo θ. • Através do modelo computacional para o alargamento do bocal foi possível verificar que o pico da penetração ocorre quando os dois jatos começam a fundir-se.

Tabela 1.4: Sumário dos trabalhos experimentais e numéricos referentes a escoamento de um ou de vários jatos (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Barata (1993)	Dois ou três jatos axi-simétricos incidentes numa placa plana através de um escoamento cruzado de baixa velocidade. $D = 20$ mm $H/D = 5$ $S/D = 5$ $L/D = 15$ $V_j = 5.1$ m/s $U_0 = 0.17$ m/s $V_j/U_0 = 30$ $Re_j = 105000$	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental: LDV. • Numérico: método de diferenças finitas e modelo de turbulência $k - \varepsilon$. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização do escoamento. • Trajetórias. • Velocidades médias. • Energia cinética turbulenta. • Distribuição de pressão. 	<ul style="list-style-type: none"> • Malha com 22382 pontos e 86112 pontos para 2 e 3 jatos, respetivamente. • Para todos os escoamentos estudados, os resultados mostraram (para cada jato) um padrão semelhante ao que ocorre para apenas um jato de impacto. • O método numérico falha na previsão dos níveis de turbulência no escoamento em repuxo. • Observaram-se grandes zonas de baixa pressão.
Barata, Durão, Heitor e McGuirk (1993)	Escoamento de um jato através de um escoamento de baixa velocidade. $D = 20$ mm $H/D = 5$ $V_j = 3$ m/s $V_j/U_0 = 30$ $Re_j = 6 \times 10^4$	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental: LDV. • Numérico: método de diferenças finitas e modelo de turbulência $k - \varepsilon$. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização do escoamento. • Trajetórias. • Velocidades médias. • Velocidades turbulentas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Malhas com 8670 pontos e 69360 pontos. • Combinando os resultados experimentais e numéricos foi possível, através do modelo de viscosidade turbulenta, simular a estrutura da turbulência perto e longe do impacto.

Tabela 1.4: Sumário dos trabalhos experimentais e numéricos referentes a escoamento de um ou de vários jatos (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Behrouzi e McGuirk (1998)	<p>Dois jatos incidentes numa placa plana com e sem a presença de escoamento cruzado.</p> <p>$D = 15 \text{ mm}$ $H/D = 13$ $S/D = 13$</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1º caso - 2 jatos gémeos com a mesma velocidade e sem a presença de escoamento cruzado: $V_j = 2.5 \text{ m/s}$ $Re_j = 37500$ $V_j/U_0 = \infty$ • 2º caso - 2 jatos com velocidades diferentes e sem a presença de escoamento cruzado: $V_{j_{montante}}/V_{j_{usante}} = 1.32$ • 3º caso - 2 jatos gémeos com a mesma velocidade e com a presença de escoamento cruzado: $V_j = 2.5 \text{ m/s}$ $Re_j = 37500$ $Re_0 = 41000$ $V_j/U_0 = 10$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental: LDV. • Numérico: modelo de turbulência $k - \varepsilon$. 	<ul style="list-style-type: none"> • Trajetórias. • Velocidades médias. • Velocidades turbulentas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Verificou-se que a região do repuxo é caracterizada por uma turbulência acentuada e que é também uma região onde a produção de tensões normais é dominante. • O modelo de turbulência $k - \varepsilon$ usado mostrou ser bastante adequado para prever os resultados experimentais.

Tabela 1.4: Sumário dos trabalhos experimentais e numéricos referentes a escoamento de um ou de vários jatos (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Barata (2000)	<p>Escoamento de um jato de impacto através de um escoamento cruzado de baixa velocidade.</p> <p>$H/D = 5$ $V_j = 3 \text{ m/s}$ $V_j/U_0 = 30$ $Re_j = 6 \times 10^4$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental: LDV. • Numérico: métodos das diferenças finitas e dos volumes finitos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização do escoamento. • Trajetórias 2D e 3D. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os resultados mostraram a incapacidade do método de visualização 2D para ilustrar a aceleração do escoamento cruzado sobre o vórtice a montante, o qual está associado com uma região de baixas pressões. • O método 3D apresentado permite obter uma imagem mais representativa deste escoamento complexo e evita as distorções ou erros causados pela influência relativa da componente da velocidade perpendicular ao plano de visualização.
Saddington e Knowles (2001)	<p>Um jato através de escoamento cruzado (réplica do jato de uma aeronave V/STOL).</p> <p>$D = 25.4 \text{ mm}$ $H/D = 60$ $U_0 = 10, 20 \text{ e } 30 \text{ m/s}$ $NPR = 1.586, 2.0, 3.0 \text{ e } 4.0$</p> <ul style="list-style-type: none"> • Posição do jato: direção do escoamento, central e contrária ao escoamento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental: Tomadas de pressão estática e <i>tuft probe</i>. • Numérico: modelo de turbulência $k - \epsilon$. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização do escoamento. • Distribuições de pressão. • Velocidade de <i>downwash</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os resultados mostraram que em geral o jato de arrastamento apareceu para introduzir uma componente de velocidade tangencial localizada, o que alterou a distribuição de pressões nas partes superior e inferior da asa. • O efeito das entradas na asa foi o de criar um aumento da sustentação, devido à ingestão do escoamento, alterando a velocidade local e a direção do escoamento livre à frente da asa.

Tabela 1.4: Sumário dos trabalhos experimentais e numéricos referentes a escoamento de um ou de vários jatos (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Alvi, Ladd e Bower (2002)	<p>Escoamento de um jato supersónico incidente numa superfície sem escoamento cruzado.</p> <p>$D = 25.4$ mm</p> <p>$H/D = 1.6, 2.0$ e 3.0</p> <p>$NPR = 5$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental: PIV, <i>Scanivalve unit connected to a Validyne strain-gauge transducer e shadowgraph system.</i> • Numérico: modelo de 1 equação SARC e modelo de 2 equações SST. 	<ul style="list-style-type: none"> • Trajetórias. • Visualização do escoamento. • Distribuições de pressão. • Distribuição do coeficiente de fricção. • Campos de velocidade. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os resultados computacionais obtidos com os modelos de turbulência SARC e SST foram praticamente idênticos. Ambos os modelos conseguiram capturar as características mais importantes deste escoamento complexo e corresponderam relativamente bem aos resultados obtidos experimentalmente. • Tanto os resultados experimentais como computacionais revelaram a presença da <i>stagnation bubble</i>, que contém escoamento de baixa velocidade em recirculação.
Baydar e Ozmen (2005)	<p>Escoamento de um jato incidente numa superfície sem escoamento cruzado.</p> <p>$D = 25$ mm</p> <p>$0.2 < H/D < 6$</p> <p>$Re_j = 30000, 40000$ e 50000</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental: TSI IFA-100 <i>hot wire anemometer.</i> • Numérico: modelo de turbulência $k - \epsilon$. 	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidades médias. • Velocidades turbulentas. • Distribuições de pressão. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os resultados numéricos obtidos estão de acordo com os resultados experimentais, com exceção dos resultados obtidos para $H/D < 1$. • As distribuições de pressão sobre a superfície de impacto são independentes do número de Reynolds, mas dependem fortemente de H/D.

Tabela 1.4: Sumário dos trabalhos experimentais e numéricos referentes a escoamento de um ou de vários jatos (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Dano e Liburdy (2007)	<p>Escoamento de 49 (7x7) jatos circulares e elípticos (0° e 90°) através de escoamento cruzado semi-confinado.</p> <p>$D_{\text{jatos}_{\text{circulares}}} = 1.270 \text{ mm}$ $D_{\text{jatos}_{\text{elipticos}}} = 1.138 \text{ mm}$ $H/D = 4$ $S/D = 6.25$ $Re = 8500 \text{ e } 15900$ $0 < U_0/V_j < 0.19$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • DPIV. • POD (<i>Matlab</i>). • Algoritmo de detecção de vórtices. 	<ul style="list-style-type: none"> • Campos de velocidade instantânea. • Localização e quantificação da natureza dos vórtices instantâneos dentro do escoamento. 	<ul style="list-style-type: none"> • O estudo revelou que os jatos elípticos (0°) apresentam uma maior geração de energia cinética, o que corresponde a um aumento na energia cinética turbulenta, especialmente quando comparados com os mesmos jatos elípticos mas a 90°. • Nos jatos elípticos (0°) é detetado um aumento no número de estruturas vorticiais comparativamente aos jatos circulares, embora as distribuições de energia modais sejam semelhantes.
Abdel-Fattah (2007)	<p>Escoamento de 2 jatos gémeos incidentes numa placa sem escoamento cruzado.</p> <p>$D = 10 \text{ mm}$ $3 < H/D < 12$ $L/D = 3, 5 \text{ e } 8$ $9.5 \times 10^4 < Re_j < 22.4 \times 10^4$ $0^\circ < \theta < 20^\circ$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental: manómetro. • Numérico: método dos volumes finitos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição de pressão na parede. • Velocidades axial e radial. • Energia cinética turbulenta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os resultados obtidos concluíram que o ponto de estagnação principal se afasta na direção radial quando θ aumenta. • Um ponto de estagnação secundário é criado entre os 2 jatos, sendo que a pressão diminui nesse ponto se Re diminuir ou se θ aumentar. • A energia cinética turbulenta aumenta no interior de cada região de vórtice com a diminuição de θ e/ou de H/D. • A intensidade da zona de recirculação entre os jatos diminui com o aumento de θ e H/D. • Verificou-se um aumento da pressão atmosférica e do valor da pressão sub-atmosférica quando se aumentou Re para todos os valores de ângulos de inclinação. • Aumentando H/D e diminuindo Re, a diferença de pressão entre o ponto de estagnação principal e secundário diminui.

Tabela 1.4: Sumário dos trabalhos experimentais e numéricos referentes a escoamento de um ou de vários jatos (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Barata (2013)	<p>Um jato, dois jatos gêmeos lado a lado e alinhados e três jatos incidentes numa superfície na presença de um escoamento cruzado de baixa velocidade.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Um jato: $D = 20 \text{ mm}$; $H/D = 5$ $V_j/U_0 = 30$; $Re_j = 60000$ • Dois jatos gêmeos lado a lado: $S/D = 5$; $H/D = 5$ $V_j/U_0 = 30$; $Re_j = 105000$ • Dois jatos gêmeos alinhados com o escoamento cruzado: $D = 15 \text{ mm}$; $L/D = 6$ $H/D = 20.1$; $V_j/U_0 = 33.7$ $Re_j = 43000$ • Três jatos (1 a montante e 2 a jusante): $S/D = 5$; $L/D = 15$ $H/D = 5$; $V_j/U_0 = 30$ $Re_j = 105000$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental: LDV. • Numérico: modelo de turbulência $k - \epsilon$. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização do escoamento. • Trajetórias. • Velocidades médias. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os resultados ajudam a uma melhor compreensão do escoamento existente por baixo de uma aeronave V/STOL que esteja a operar junto ao solo com vento frontal ou pequeno impulso para a frente, o que pode resultar na existência de pressões negativas por baixo da aeronave.

Tabela 1.4: Sumário dos trabalhos experimentais e numéricos referentes a escoamento de um ou de vários jatos (continuação).

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Wae-Hayee, Tekasakul, Eiamsa-ard e Nuntadusit (2015)	<p>Escoamento de 4 jatos lado a lado incidentes numa placa com escoamento cruzado.</p> <p>$D = 13.2 \text{ mm}$ $H/D = 2$ $S/D = 3$ $Re_j = 13400$ $V_j/U_0 = 3, 5 \text{ e } 7$ $T_j = 27.6 \text{ }^\circ\text{C}$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental: TLC, técnica de processamento de imagem para avaliar o número de Nusselt e técnica de filme de óleo. • Numérico: método dos volumes finitos e modelo de turbulência SST. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização do escoamento. • Número de Nusselt. • Velocidades. • Energia cinética turbulenta. 	<ul style="list-style-type: none"> • As interações entre os jatos de impacto e o escoamento cruzado de alta velocidade causam um aumento da intensidade turbulenta do jato antes do impacto, resultando num número de Nusselt elevado no ponto de estagnação.
Dai, Jia, Zhang, Shu e Mi (2016)	<p>Estudo da influência de diferentes razões de velocidade baixas nas estruturas do escoamento de um jato inclinado através de um escoamento cruzado.</p> <p>$D = 23 \text{ mm}$ $H/D = 6$ $Re_0 = 1712$ $\theta = 35^\circ$</p> <ul style="list-style-type: none"> • Experimental: $V_j/U_0 = 0.5, 1.0, 1.5 \text{ e } 2.0$ • Numérico: $V_j/U_0 = 0.5 \text{ e } 2.0$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental: LIF e PIV. • Numérico: modelo de turbulência <i>WALE Subgrid-scale</i> e LES. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização do escoamento. • Perfis laterais da velocidade e da tensão de Reynolds. • Vorticidade. 	<ul style="list-style-type: none"> • Foi demonstrado que as estruturas vorticiais de grande escala mudam drasticamente com diferentes razões V_j/U_0. • O método LES utilizado mostrou ser bastante capaz de capturar o escoamento e as características de mistura para o caso de um jato inclinado através de um escoamento cruzado, o que seria dificilmente resolvido apenas por métodos experimentais. • A combinação dos resultados numéricos com os resultados experimentais revelou a origem do par de vórtices em contra-rotação para as diferentes razões de velocidade.

Na referência [44], os autores estudaram o escoamento de um ou de dois jatos gêmeos incidentes numa superfície com e sem movimento e na presença de escoamento cruzado. Verificaram que a penetração aumentava com o aumento da razão V_j/U_0 , NPR e com o ângulo de inclinação do bocal do jato e que diminuiu quando usaram uma placa com rotação.

Dois ou três jatos axi-simétricos incidentes numa placa plana através de um escoamento cruzado de baixa velocidade foram estudados por [45], tendo este estudo particular interesse já que tinham $H/D = 5$ e $V_j/U_0 = 30$. Para todos os escoamentos estudados, os resultados mostraram (para cada jato) um padrão semelhante ao que ocorre apenas para um jato de impacto, embora se tenha confirmado a falha do método numérico na previsão dos níveis de turbulência no escoamento em repuxo. Observaram-se grandes zonas de baixa pressão.

Combinando os resultados experimentais e numéricos, através do modelo de viscosidade turbulenta, [46] conseguiram simular a estrutura da turbulência perto e longe do impacto de um jato através de um escoamento de baixa velocidade.

O estudo de vários casos de dois jatos incidentes numa placa plana com e sem a presença de escoamento cruzado foi feito por [47]. Os resultados obtidos permitiram verificar que a região do repuxo é caracterizada por uma turbulência acentuada e que é também uma região onde a produção de tensões normais é dominante.

Em [48], o autor estudou o escoamento de um jato de impacto através de um escoamento de baixa velocidade. Os resultados mostraram a incapacidade do método de visualização 2D para ilustrar a aceleração do escoamento cruzado sobre o vórtice a montante, o qual está associado a uma região de baixas pressões. O método 3D apresentado permitiu obter uma imagem mais representativa deste escoamento complexo e evita as distorções ou erros causados pela influência relativa da componente da velocidade perpendicular ao plano de visualização.

Utilizando uma réplica do jato de uma aeronave V/STOL, [49] analisaram um jato através de escoamento cruzado. Os resultados mostraram que, em geral, o jato de arrastamento apareceu para introduzir uma componente de velocidade tangencial localizada, o que alterou a distribuição de pressões nas partes superior e inferior da asa.

O escoamento de um jato supersônico incidente numa superfície sem escoamento cruzado foi visto por [50], sendo os resultados computacionais obtidos com os modelos de turbulência *Spalart-Allmaras for Rotation and Curvature* (SARC) e SST praticamente idênticos. Tanto os resultados experimentais como os computacionais revelaram a presença da *stagnation bubble*, que contém escoamento de baixa velocidade em recirculação.

Na referência [51], a simulação numérica apenas foi realizada para alturas de impacto inferiores a 0.1, sendo de elevada importância para perceber quais os efeitos deste tipo de escoamento para alturas de impacto tão pequenas. Verificaram que as distribuições de pressão sobre a superfície de impacto são independentes de Re , mas que dependem fortemente de H/D .

O escoamento de 49 jatos (7x7) circulares e elípticos (0° e 90°) através de escoamento cruzado semi-confinado foi estudado por [52]. Nos jatos elípticos a 0° há um aumento na energia cinética turbulenta, especialmente quando comparados com os mesmos jatos elípticos, mas a 90° . Nos jatos elípticos a 0° é detetado um aumento no número de estruturas vorticiais compa-

rativamente aos jatos circulares, embora as distribuições de energia modais sejam semelhantes.

Em [53], através do método dos volumes finitos e de um manómetro, o autor estudou o escoamento de dois jatos gémeos incidentes numa placa sem escoamento cruzado. Concluiu que o ponto de estagnação principal se afasta na direção do escoamento radial quando o ângulo de inclinação do jato é aumentado. O aumento deste ângulo e de H/D diminui a intensidade na zona de recirculação entre os jatos e a energia cinética turbulenta no interior das regiões caracterizadas por vorticidade.

Com o trabalho realizado por [54], através de LDV e do modelo de turbulência $k-\varepsilon$, foi possível compreender melhor o escoamento existente por baixo de uma aeronave V/STOL que esteja a operar junto do solo com vento frontal ou pequeno impulso para a frente, o que pode resultar na existência de pressões negativas por baixo da aeronave.

Em 2015, [55] estudaram o escoamento de quatro jatos lado a lado incidentes numa placa com escoamento cruzado, recorrendo ao método dos volumes finitos e ao modelo de turbulência SST. Verificaram que as interações entre os jatos de impacto e o escoamento cruzado de alta velocidade causaram um aumento da intensidade turbulenta do jato antes do impacto, resultando num Nu elevado no ponto de estagnação.

Mais recentemente, [56] estudaram a influência de diferentes razões de velocidade baixas nas estruturas do escoamento de um jato inclinado através de um escoamento cruzado. Foi demonstrado que as estruturas vorticiais de grande escala mudam drasticamente com diferentes razões V_j/U_0 . A combinação dos resultados numéricos com os resultados experimentais revelou a origem do par de vórtices em contra-rotação para as diferentes razões de velocidade.

1.4 Objetivos da Dissertação

Através da revisão bibliográfica apresentada verificamos que na maioria dos estudos realizados, que envolvem escoamentos de jatos através de um escoamento cruzado, são consideradas altas alturas de impacto e baixas razões de velocidade entre o jato e o escoamento cruzado. Estes trabalhos apenas têm uma relevância periférica do problema de *ground effect* da aeronave V/STOL. Os trabalhos relevantes para este problema têm sido efetuados por um grupo muito reduzido de investigadores de Inglaterra, Estados Unidos e Portugal, mas têm-se concentrado na caracterização do escoamento médio e turbulento em efeito de solo. No entanto, todos reconhecem a importância da distribuição de pressão para analisar este fenómeno. Contudo, ainda não existem resultados publicados para o caso de dois jatos incidentes alinhados com o escoamento cruzado, cuja relevância é precisamente o *F-35B*.

Esta dissertação tem como objetivo principal apresentar um estudo experimental da distribuição de pressão de jatos de impacto através de escoamento cruzado nas partes inferiores da fuselagem e da asa do *F-35B* para V_j/U_0 iguais a 15, 22.5 e 33.7 e para H/D_m igual a 3. De maneira a complementar este estudo e, em alguns casos, para que se possa fazer uma comparação, foi também realizado um estudo numérico. Neste serão apresentados gráficos da distribuição de pressão para as mesmas condições da experiência realizada, mas também junto do solo, ou seja, para $Y = H \approx 0$. A distribuição da componente vertical da velocidade, V , ao longo do plano

vertical de simetria, isto é, $Z \approx 0$, também será mostrada para as três razões de velocidade.

1.5 Organização da Dissertação

Este trabalho encontra-se estruturado em quatro capítulos principais: Introdução, Método Experimental, Resultados e Conclusões.

Neste primeiro capítulo foi apresentada uma revisão bibliográfica de trabalhos relativos a escoamentos de jatos através de um escoamento cruzado, com o objetivo de definir melhor a contribuição desta dissertação.

No segundo capítulo é descrita a montagem experimental e procedimento de medição realizados no presente trabalho. É de referir que algumas das decisões tomadas no decorrer desta investigação foram tomadas com base em estudos anteriormente realizados, daí a importância da revisão bibliográfica efetuada.

O capítulo 3 é dedicado à apresentação dos resultados, o que inclui gráficos da distribuição de pressão ao longo da parte inferior da fuselagem e da asa (obtidos experimental e numericamente) e junto ao solo (obtidos numericamente). São também apresentados outros gráficos obtidos computacionalmente, tais como as distribuições de V ao longo do plano vertical de simetria. Todos estes gráficos são analisados e, a partir deles, são feitos os comentários considerados mais relevantes.

Por fim, no último capítulo constam os resultados principais e conclusões que se podem retirar deste estudo.

Capítulo 2

Método Experimental

Neste segundo capítulo é descrita a instalação experimental e os procedimentos de medição utilizados no presente trabalho. É apresentada uma descrição do túnel de vento, da secção de teste e da dimensão e da disposição dos jatos na mesma. Seguidamente é feita referência ao sistema de coordenadas utilizado. São também referidas as razões de velocidade, V_j/U_0 , estudadas e as velocidades médias dos jatos e do escoamento cruzado que foram usadas ao longo da experiência. A criação da malha com as tomadas de pressão na placa e a medição das mesmas com o multimanómetro são explicadas detalhadamente. Segue-se a apresentação da calibração da atividade experimental antes de se iniciarem as medições. Por fim, para uma melhor clareza e compreensão, é apresentado um resumo de todos os dados experimentais usados no presente estudo.

2.1 Instalação Experimental

A instalação experimental utilizada no presente trabalho encontra-se representada na figura 2.1. Durante todo o processo de *design*, nomeadamente para a parte da camada limite do escoamento, foram seguidas as recomendações de [57] para túneis de vento de circuito aberto. Um ventilador com potência nominal de 15 kW dirige um escoamento máximo de 3000 m³/h através da camada limite do túnel de vento com uma secção de saída de 400x300 mm².

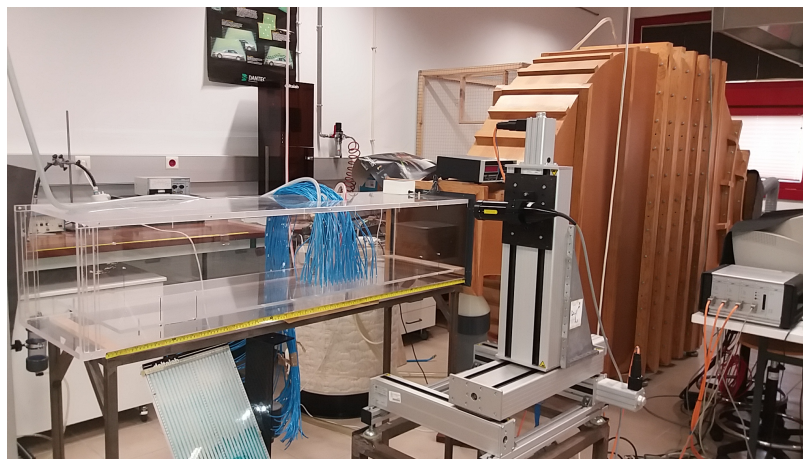


Figura 2.1: Instalação experimental.

A secção de teste usada nesta instalação experimental, mostrada na figura 2.2, é feita de *perspex*, um termoplástico transparente e difícil de quebrar, sendo amplamente utilizado devido à sua facilidade de ser moldado em qualquer formato. Também conhecido pelo nome de acrílico, o nome específico deste polímero sintético é polimetil-metacrilato. As dimensões interiores da caixa usada como secção de teste são as mesmas da secção de saída do túnel de vento para evitar que o escoamento cruzado seja perturbado. O seu comprimento é de aproximadamente

1400 mm e é uma adaptação da que foi utilizada num trabalho experimental anterior por [58], para $H = 300 = 20D$ mm, na qual os furos situados no topo desta passaram a servir para a passagem de toda a tubagem, tanto dos jatos como dos tubos usados para as medições das pressões.

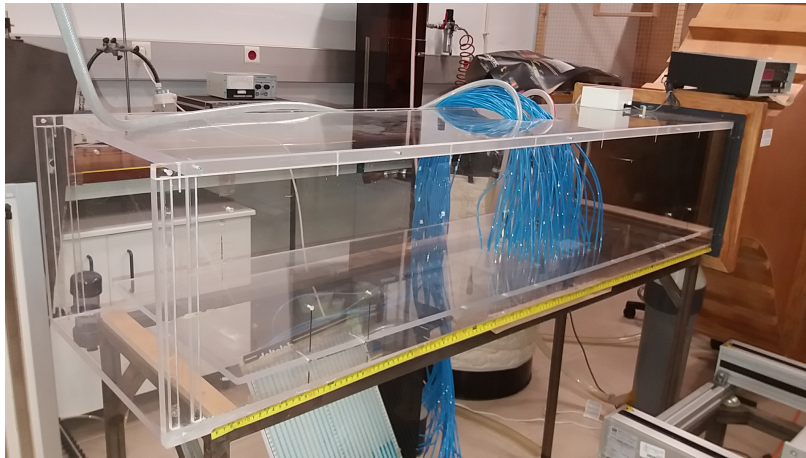


Figura 2.2: Secção de teste.

Este trabalho experimental é dedicado à medição da pressão na parte inferior da fuselagem e da asa do *F-35B* para uma baixa altura de impacto ($H/D_m \approx 3$), daí a colocação de uma placa suplementar, como visível na figura 2.3. É de referir também que apenas foram feitas medições em metade da secção, ou seja, do plano vertical de simetria para um dos lados, atendendo à simetria do escoamento.

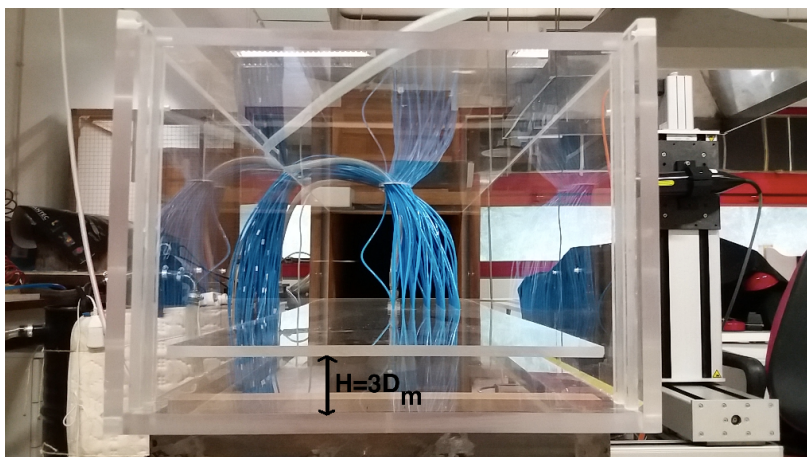


Figura 2.3: Altura de impacto.

2.2 Disposição dos Jatos e Dimensões Geométricas Relevantes

Na figura 2.4 está representada esquematicamente a disposição geométrica dos jatos na secção de teste, assim como algumas dimensões geométricas relevantes para este estudo. É indicado o sentido do escoamento cruzado e o sistema de eixos utilizado. A origem das coordenadas, X , e vertical, Y , é considerada no ponto médio entre os centros dos jatos. A coordenada X é

positiva no sentido da saída do túnel de vento, Y é positiva na direção vertical e Z é medida na horizontal perpendicularmente ao escoamento cruzado. É também representado o plano vertical de simetria da secção de teste, ou seja, em $Z = 0$.

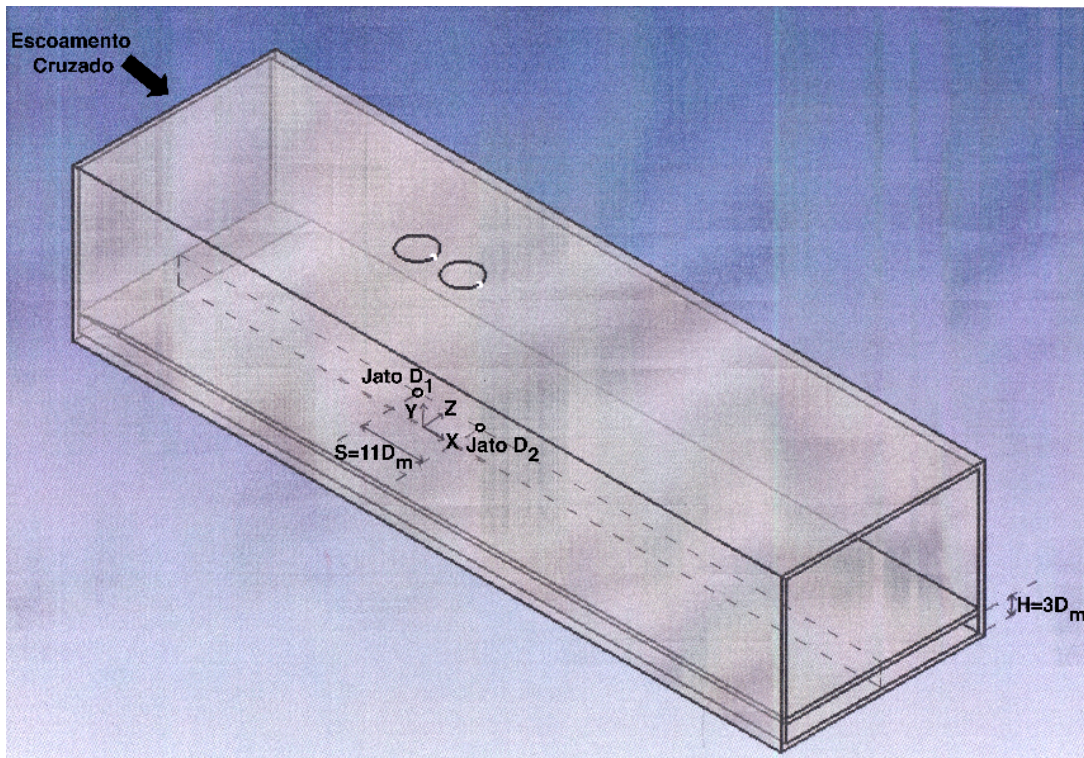


Figura 2.4: Esquema da disposição geométrica dos jatos na secção de teste e sistema de coordenadas utilizado.

Ao contrário do que já tinha sido feito em trabalhos anteriores, nesta experiência foram usadas as dimensões de um modelo de *F-35B*. Assim, os dois jatos têm diâmetros diferentes, tendo o primeiro/da frente (D_1) e o segundo/de trás (D_2) 11 mm e 10.35 mm de diâmetro interno, respetivamente. O espaçamento entre jatos usado foi $S = 120 \approx 11D_m$ mm, onde o diâmetro médio dos jatos é dado por $D_m = (D_1 + D_2)/2 = 10.675$ mm. Ambos os jatos estão montados verticalmente na placa que foi construída para efetuar a medição das pressões, com os eixos contidos no plano vertical de simetria paralelo ao escoamento cruzado. Tal como já referido, a altura de impacto utilizada foi $H = 32 \approx 3D_m$ mm.

É importante também mencionar que na extremidade da placa situada à saída do túnel de vento foi colada uma rampa em madeira com uma inclinação suave (7°), visível também na figura 2.4, de maneira a não perturbar tanto o escoamento vindo do túnel de vento e a não provocar a separação do mesmo.

2.3 Velocidades Estudadas

Na tabela 2.1 encontram-se registadas as razões de velocidade entre os jatos e o escoamento cruzado utilizadas, assim como as velocidades médias dos jatos e do escoamento cruzado. Como se pode verificar, optámos por manter as velocidades dos jatos, V_j , constantes e iguais a 36.0

m/s, enquanto a velocidade do escoamento cruzado, U_0 , foi sendo alterada. Tal razão deveu-se ao facto de haver uma maior facilidade de controlo da velocidade do escoamento cruzado do que das velocidades dos jatos. Estas razões de velocidade foram usadas com o objetivo de continuar e completar o estudo experimental iniciado por [58]. É de referir também que, tal como se pode ver na tabela 2.8 da secção 2.6 do presente capítulo, tratando-se de um trabalho experimental, as velocidades dos jatos utilizadas não são exatamente iguais às apresentadas na tabela 2.1, mas são bastante próximas destas.

Tabela 2.1: Razões de velocidade e velocidades médias do jato e do escoamento cruzado estudadas.

Razões de velocidade V_j/U_0	Velocidades médias dos jatos V_j [m/s]	Velocidades médias do escoamento cruzado U_0 [m/s]
15.0	36.0	2.40
22.5	36.0	1.60
33.7	36.0	1.07

2.4 Medições das Pressões

A placa na qual foram feitas as medições das pressões foi também construída em acrílico, com o mesmo comprimento e largura da secção de teste, na qual foram feitos 76 furos com 1 mm de diâmetro interno e colocados 2 bocais que representam os jatos de impacto, como se pode ver na figura 2.5.

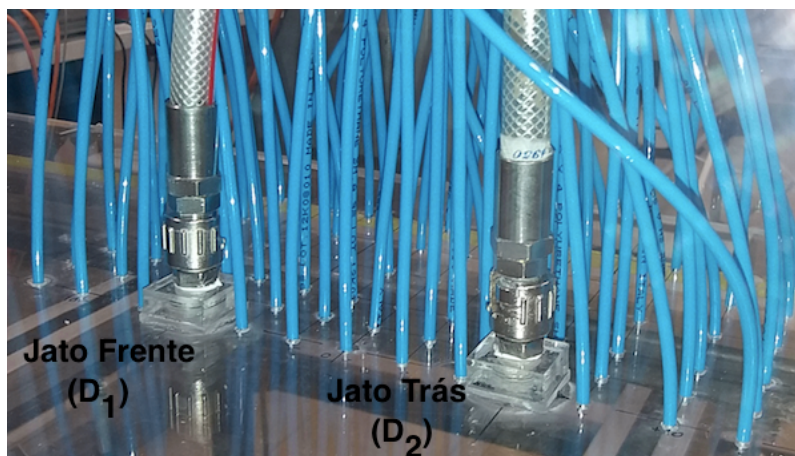


Figura 2.5: Posicionamento das tomadas de pressão e dos jatos.

A malha criada com as tomadas de pressão na placa é também mostrada na figura 2.6, correspondendo cada nó da malha à localização de uma tomada de pressão. São também indicadas as coordenadas adimensionalizadas pelo diâmetro médio dos jatos e a numeração efetuada para cada tomada de pressão.

As medições das pressões foram feitas recorrendo a um multimanómetro com 22 tomadas de pressão, ilustrado na figura 2.7. Assim, foi necessário proceder à realização de várias medições, já que tínhamos 76 locais onde queríamos medir a pressão. Após se ter verificado que as

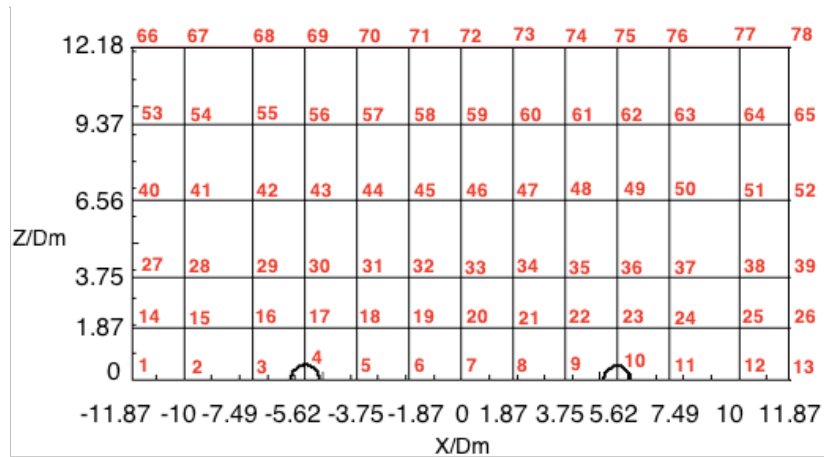


Figura 2.6: Malha criada na placa para a colocação das tomadas de pressão com as respectivas coordenadas e numeração.

diferenças de pressões registadas eram muito pequenas, optámos por usar um ângulo de inclinação do multimanómetro, α , cerca de 7° com o plano horizontal, por forma a obter uma maior precisão nos resultados.

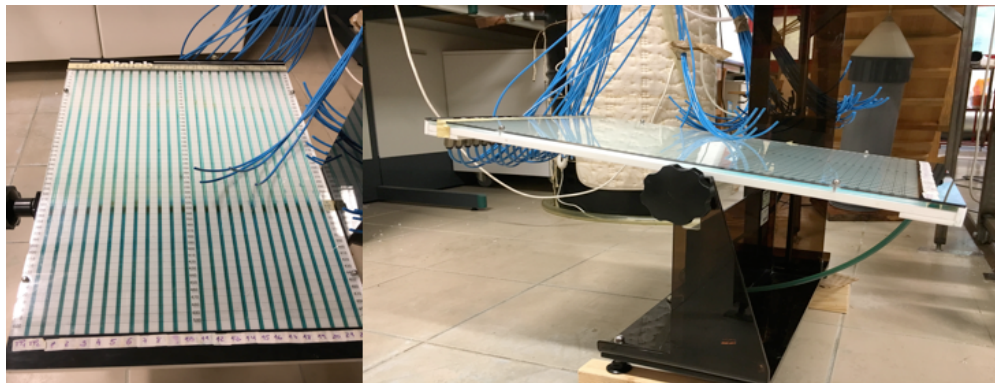


Figura 2.7: Multimanómetro inclinável utilizado para medir as pressões.

2.5 Calibração

Antes de se iniciarem as medições das pressões é necessário proceder à calibração da atividade experimental, estando esta focada essencialmente em duas partes fundamentais: calibração do escoamento cruzado e calibração dos jatos.

2.5.1 Calibração do Escoamento Cruzado

A calibração do escoamento cruzado consistiu basicamente em ajustar as guilhotinas, visíveis na figura 2.8, que permitem a passagem do ar vindo do compressor para o túnel de vento. Para re-ferenciar a posição das guilhotinas foi usada uma escala conforme se descreve em detalhe mais à frente. A calibração do túnel de vento foi realizada sem a presença dos jatos de impacto. Foi usada uma segunda referência na calibração, que consistiu na frequência do variador do motor do ventilador, cuja consola se encontra representada na figura 2.9, tendo sido utilizada uma

frequência de 25 Hz. Uma terceira referência de calibração consistiu na medição da pressão dinâmica à entrada da secção de teste com um tubo de Pitot e um micromanómetro conforme se descreve também seguidamente.

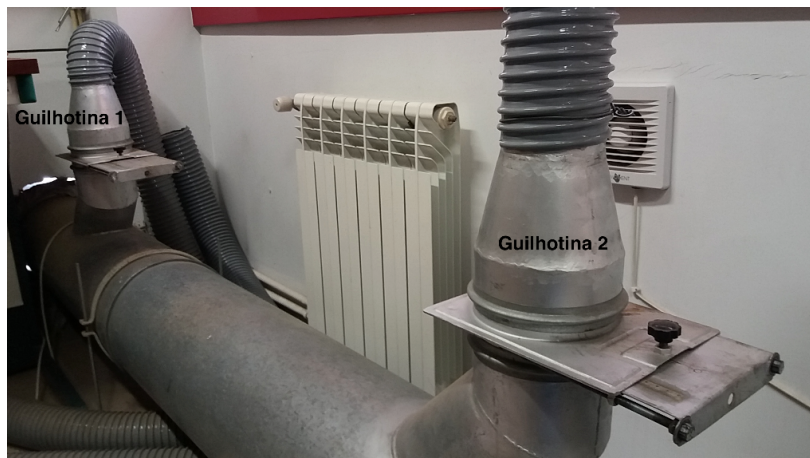


Figura 2.8: Representação da posição das guilhotinas 1 (à esquerda) e 2 (à direita).



Figura 2.9: Consola de controlo do túnel de vento.

De acordo com os testes efetuados por [58], optámos por seguir o mesmo procedimento efetuado de forma a controlar a velocidade do escoamento cruzado para os valores pretendidos. Assim, deixámos a guilhotina 1 (g_1) totalmente aberta, ajustando apenas a guilhotina 2 (g_2).

Na tabela 2.2 encontram-se registadas as constantes utilizadas na calibração do escoamento cruzado para as três razões de velocidade estudadas, sendo g a aceleração da gravidade, T_{ar} a temperatura do ar, p_{ar} a pressão do ar, R_{ar} a constante universal dos gases perfeitos para o ar e ρ_{ar} a massa específica do ar.

Tal como já referido, optámos por manter a posição da guilhotina 1 constante e igual a 130 mm. Os valores da temperatura e da pressão do ar do laboratório foram medidos recorrendo ao termómetro/barómetro presente na respetiva sala. Por uma questão de simplicidade, considerámos o ar como sendo um fluido perfeito e, recorrendo à equação 2.1, calculámos a massa específica do ar. É de referir também que o valor de p_{ar} deve ser convertido de bar para Pa

Tabela 2.2: Constantes utilizadas na calibração do escoamento cruzado para as três razões de velocidade.

g_1 [mm]	130
g [m/s ²]	9.8
T_{ar} [°C]	19
p_{ar} [bar]	0.986
R_{ar} [J/kg.K]	287
ρ_{ar} [kg/m ³]	1.18

(multiplicando por 10^5) e que T_{ar} tem de ser usado em K (somando 273 ao valor de T_{ar} em °C), para que ρ_{ar} venha em kg/m³.

$$\rho_{ar} = \frac{p_{ar}}{R_{ar} \times T_{ar}} \quad (2.1)$$

Como mostrado na tabela 2.3, começámos por colocar a guilhotina 2 na posição dos 55.0 mm e fomos variando esta até obtermos a velocidade desejada para o escoamento cruzado de 2.40 m/s, o que aconteceu com $g_2 = 71.0$ mm. Os dados registados na coluna $p_{\mu m}$ foram os valores registados no micromanómetro, representado na figura 2.10, que é um instrumento sensível e que permite medir diferenças muito pequenas na pressão. Assim, $p_{\mu m}$ corresponde à diferença entre as pressões de estagnação e estática registada no micromanómetro, sendo o valor registado neste originado pela posição das duas guilhotinas. Recorrendo ao tubo de Pitot que se encontra no túnel de vento no final do convergente à entrada da secção de teste, e estando este ligado ao micromanómetro, conseguimos medir a cada instante qual a diferença entre a pressão de estagnação e a pressão estática em mm H₂O. Desta forma conseguimos fixar a velocidade exata à saída do túnel de vento do escoamento cruzado. Como nesta experiência optámos por manter a guilhotina 1 totalmente aberta e apenas variámos a posição da guilhotina 2, à medida que esta última era fechada, os valores registados no micromanómetro diminuía e, por sua vez, a velocidade do escoamento cruzado também decrescia. Os valores da diferença entre as pressões total ou de estagnação e a pressão estática, $p_T - p_0$, e de U_0 foram calculados recorrendo às equações 2.2 e 2.3, respetivamente, sendo esta última equação deduzida a partir da equação de Bernoulli.

Tabela 2.3: Calibração do escoamento cruzado para $V_j/U_0 = 15$ de maneira a obter $U_0 = 2.40$ m/s.

g_2 [mm]	$p_{\mu m}$ [mm H ₂ O]	$p_T - p_0$ [Pa]	U_0 [m/s]
55.0	0.249	2.44	2.03
57.0	0.263	2.58	2.09
62.0	0.279	2.73	2.15
70.0	0.343	3.36	2.39
72.0	0.351	3.44	2.41
71.0	0.347	3.40	2.40

$$p_T - p_0 = g \times p_{\mu m} \quad (2.2)$$

$$p_T = \frac{1}{2} \times \rho_{ar} \times U_0^2 + p_0 \Leftrightarrow U_0 = \sqrt{\frac{2 \times (p_T - p_0)}{\rho_{ar}}} \quad (2.3)$$



Figura 2.10: Micromanómetro utilizado durante a atividade experimental.

Nas tabelas 2.4 e 2.5 é seguido o mesmo procedimento de registo e de cálculo efetuado na tabela 2.3, só que para as outras duas razões de velocidade, ou seja, $V_j/U_0 = 22.5$ e $V_j/U_0 = 33.7$, respetivamente. Para obter velocidades de escoamento cruzado igual a 1.60 m/s foi necessário colocar a guilhotina 2 nos 45.5 mm e para 1.07 m/s colocou-se $g_2 = 34.0$ mm.

Tabela 2.4: Calibração do escoamento cruzado para $V_j/U_0 = 22.5$ de maneira a obter $U_0 = 1.60$ m/s.

g_2 [mm]	$p_{\mu m}$ [mm H ₂ O]	$p_T - p_0$ [Pa]	U_0 [m/s]
41.0	0.122	1.20	1.43
43.0	0.135	1.32	1.50
45.0	0.151	1.48	1.58
47.0	0.169	1.66	1.68
46.0	0.159	1.56	1.63
45.5	0.154	1.51	1.60

Tabela 2.5: Calibração do escoamento cruzado para $V_j/U_0 = 33.7$ de maneira a obter $U_0 = 1.07$ m/s.

g_2 [mm]	$p_{\mu m}$ [mm H ₂ O]	$p_T - p_0$ [Pa]	U_0 [m/s]
25.0	0.027	0.26	0.66
35.0	0.073	0.72	1.10
33.0	0.063	0.62	1.03
34.0	0.068	0.67	1.07

2.5.2 Calibração dos Jatos

Seguidamente à calibração do escoamento cruzado realizou-se a calibração dos jatos de impacto, tendo esta sido realizada sem a presença de escoamento cruzado.

Apesar de no presente trabalho não ter sido utilizado *seeding*, optámos por utilizar a mesma instalação usada na atividade experimental realizada por [58], estando esta representada na figura 2.11. É de referir também que, para além dos dois manómetros de controlo da pressão representados nessa figura há ainda um terceiro manómetro que permite regular a pressão vinda do compressor. A medição da velocidade em cada jato foi feita recorrendo a um tubo de Pitot, posicionado à saída dos jatos, e a um manómetro logo no início da experiência, ou seja, antes

de se realizarem quaisquer medições de pressão.

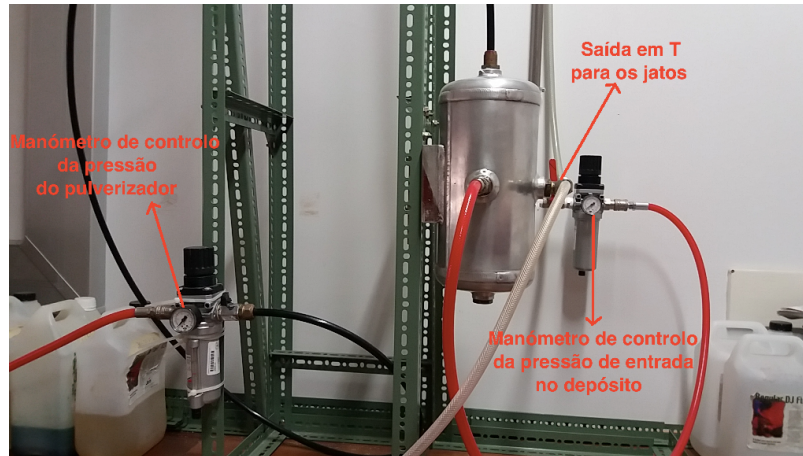


Figura 2.11: Instalação usada na atividade experimental para o controle das pressões.

Na tabela 2.6 encontram-se registadas as constantes utilizadas na calibração dos jatos para as três razões de velocidade estudadas, sendo ρ_{agua} a massa específica da água e h_{ref} a altura de água registada no manómetro e considerada como referência. Tal como se pode ver nessa mesma tabela, as pressões do compressor, p_{comp} , e do pulverizador, p_{pulv} , foram mantidas constantes e iguais a 2 bar, apenas tendo sido variada a pressão de entrada no depósito, p_{dep} , como mostrado na tabela 2.7.

Tabela 2.6: Constantes utilizadas na calibração do escoamento cruzado para as três razões de velocidade.

ρ_{ar} [kg/m ³]	1.2
ρ_{agua} [kg/m ³]	1000
g [m/s ²]	9.8
h_{ref} [mm]	600
p_{comp} [bar]	2
p_{pulv} [bar]	2

A diferença de alturas, Δh , medida no manómetro é dada pela equação 2.4, em que h é a altura de água final registada no manómetro.

$$\Delta h = h - h_{ref} \quad (2.4)$$

A velocidade à saída do jato pode ser calculada recorrendo à equação 2.5. É de referir que nesta equação é necessário converter Δh de mm para m (multiplicando por 10^{-3}), para que a velocidade do jato, V_j , venha em m/s.

$$\frac{1}{2} \times \rho_{ar} \times V_j^2 = \rho_{agua} \times g \times \Delta h \Leftrightarrow V_j = \sqrt{\frac{2 \times \rho_{agua} \times g \times \Delta h}{\rho_{ar}}} \quad (2.5)$$

Por fim, na tabela 2.7 consta a calibração dos jatos para as três razões de velocidade estudadas, sendo visível que à medida que se aumenta a pressão de entrada no depósito, a velocidade do jato também vai aumentando. Verificou-se que para uma pressão de entrada no depósito igual

a 1.67 bar se conseguiu obter aproximadamente a velocidade desejada de 36 m/s à saída dos jatos. Como os dois jatos não possuem o mesmo diâmetro era de esperar que a velocidade no jato com diâmetro D_1 fosse inferior à registada no outro jato, já que este último possui um diâmetro menor. Apesar desta diferença de velocidades, obtiveram-se velocidades bastante próximas uma da outra ($V_1 = 35.71$ m/s e $V_2 = 36.17$ m/s).

Tabela 2.7: Calibração dos jatos de impacto para as três razões de velocidade estudadas de maneira a obter $V_j = 36$ m/s.

p_{dep} [bar]	h [mm H ₂ O]	Δh [mm]	V_1 [m/s]	V_2 [m/s]
2.00	506	94.0	39.20	-
1.00	557	43.0	26.52	-
1.33	540	60.0	31.32	-
1.67	522	78.0	35.71	-
2.00	504	96.0	-	39.62
1.00	555	45.0	-	27.12
1.33	538	62.0	-	31.84
1.67	520	80.0	-	36.17

2.6 Resumo dos Dados Experimentais

Em forma de resumo, na tabela 2.8 são apresentados os dados experimentais mais relevantes deste estudo. Como se pode verificar, a velocidade média dos jatos é igual a 35.94 m/s, estando, assim, bastante próxima da velocidade inicialmente pretendida de 36.0 m/s.

Tabela 2.8: Resumo dos dados experimentais mais relevantes do estudo efetuado.

Diâmetro do jato da frente, D_1 [mm]	11
Diâmetro do jato de trás, D_2 [mm]	10.35
Diâmetro médio, D_m [mm]	10.675
Espaçamento entre jatos, S [mm]	$11D_m$
Altura de impacto, H [mm]	$3D_m$
Velocidade do jato da frente, V_1 [m/s]	35.71
Velocidade do jato de trás, V_2 [m/s]	36.17
Velocidade média dos jatos, V_m [m/s]	35.94
Velocidades do escoamento cruzado, U_0 [m/s]	1.07 ; 1.60 ; 2.40
Razões de velocidade, V_j/U_0	33.7 ; 22.5 ; 15

Capítulo 3

Resultados

Neste terceiro capítulo são apresentados os resultados obtidos com este estudo. Inicialmente são mostrados os resultados experimentais, o que inclui gráficos da distribuição de pressão ao longo da parte inferior da fuselagem e da asa do *F-35B* para $H/D_m = 3$ e para $V_j/U_0 = 15$, 22.5 e 33.7. Com o objetivo de se poder estabelecer uma comparação, seguem-se os gráficos para as condições referidas, mas obtidos numericamente. De maneira a completar este estudo incluem-se também as distribuições de pressão junto do solo, $H \approx 0$, para as mesmas três razões de velocidade. Por fim, são apresentados os gráficos da distribuição da componente vertical da velocidade média no plano vertical de simetria, $Z \approx 0$, também estes obtidos computacionalmente. Todos estes resultados são analisados e discutidos e, a partir deles, são feitos os comentários considerados mais relevantes.

3.1 Resultados Experimentais

Tal como já mencionado, inicialmente são apresentados os resultados experimentais das distribuições de pressão, estando esta secção dividida em duas subsecções. Na primeira constam os valores da pressão estática obtidos para cada uma das razões de velocidade e na segunda são apresentados graficamente e é feita a análise dos resultados obtidos.

3.1.1 Distribuições de Pressão Estática

Nesta subsecção estão presentes as medições efetuadas para as três razões de velocidade. Começando pela mais baixa, ou seja, $V_j/U_0 = 15$, os dados estão registados na tabela 3.1.

A numeração efetuada para as tomadas de pressão e as coordenadas X e Z adimensionalizadas pelo diâmetro médio, isto é, X/D_m e Z/D_m , estão de acordo com a figura 2.6 do capítulo 2. A referida tabela encontra-se dividida em 6 zonas, cada uma composta por 13 tomadas de pressão (à excepção da primeira, que tem 11 tomadas de pressão e 2 jatos, estando estes últimos sombreados num tom mais escuro), que correspondem aos 6 planos verticais em que foram medidas as pressões. Para uma melhor e mais rápida identificação, foi usada uma gradação de cinzentos, correspondendo o mais claro ao plano vertical de simetria da secção de teste, $Z/D_m = 0$, e o mais escuro ao plano mais afastado, $Z/D_m = 12.18$.

À semelhança do que também foi realizado aquando da calibração dos jatos na subsecção 2.5.2, também no capítulo anterior, a diferença de alturas medida no manómetro é dada pela equação 2.4. É de referir que, neste caso, são apresentados diferentes valores para h_{ref} , devido à dificuldade de uma estabilização uniforme do álcool desnaturado para as 22 tomadas de pressão do multimanómetro.

Tal como já referido, atendendo a que as diferenças de pressões registadas eram muito pequenas, o multimanómetro foi inclinado com um ângulo, α , cerca de 7° com o plano horizontal,

de maneira a obter uma maior precisão nos resultados. Assim, é necessário multiplicar estas diferenças de pressões pelo \sin do referido ângulo, como mostrado na nona coluna da tabela 3.1.

A pressão existente em cada uma das tomadas de pressão é calculada através da equação 3.1, não esquecendo que é necessário converter $\Delta h \times \sin(\alpha)$ de mm para m (multiplicando por 10^{-3}) para que a pressão, p , venha em Pa.

$$p = \Delta h \times \sin(\alpha) \times g \times \rho_{alcooldesnaturado} \quad (3.1)$$

Os resultados obtidos para a pressão foram adimensionalizados pela pressão dinâmica, q , sendo esta última calculada através da expressão 3.2.

$$q = \frac{1}{2} \times \rho_{ar} \times V_m^2 \quad (3.2)$$

Como os valores obtidos após o cálculo desta razão entre pressões eram muito pequenos, decidiu multiplicar-se estes por 10^3 , estando estes últimos presentes na última coluna da tabela 3.1. É de referir também que são estes os resultados que posteriormente serão representados nos gráficos das distribuições de pressão ao longo da parte inferior da fuselagem e da asa.

Por uma questão de simplicidade e de uma melhor compreensão, iremos proceder à análise e discussão dos gráficos das distribuições de pressão apenas no final da apresentação das medições realizadas para as diferentes razões de velocidade. Assim, será feita uma análise conjunta dos três gráficos, na subsecção seguinte, atendendo à existência de algumas semelhanças entre eles.

Na tabela 3.2 é seguido o mesmo procedimento de registo e de cálculo efetuado na tabela 3.1, só que para $V_j/U_0 = 22.5$.

De modo análogo, na tabela 3.3 é também seguido um procedimento similar ao efetuado nas tabelas 3.1 e 3.2, mas para $V_j/U_0 = 33.7$.

Tabela 3.1: Resultados experimentais para $V_j/U_0 = 15$.

Tomadas de pressão	X [mm]	Z [mm]	X/D_m	Z/D_m	h_{ref} [mm]	h [mm]	Δh [mm]	$\Delta h \times \sin(\alpha)$ [mm]	p [Pa]	p/q	$p/q \times 10^3$
1	-126.75	0	-11.87	0	317	320	3	0.366	2.902	0.003809	3.809
2	-106.75	0	-10	0	318	316	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
3	-80	0	-7.49	0	318	315	-3	-0.366	-2.902	-0.003809	-3.809
4	-60	0	-5.62	0							
5	-40	0	-3.75	0	320	322	2	0.244	1.935	0.002539	2.539
6	-20	0	-1.87	0	319	321	2	0.244	1.935	0.002539	2.539
7	0	0	0	0	322	324	2	0.244	1.935	0.002539	2.539
8	20	0	1.87	0	321	319	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
9	40	0	3.75	0	322	308	-14	-1.706	-13.544	-0.017776	-17.776
10	60	0	5.62	0							
11	80	0	7.49	0	322	322	0	0	0	0	0
12	106.75	0	10	0	322	322	0	0	0	0	0
13	126.75	0	11.87	0	322	322	0	0	0	0	0
14	-126.75	20	-11.87	1.87	322	326	4	0.487	3.870	0.005079	5.079
15	-106.75	20	-10	1.87	322	321	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
16	-80	20	-7.49	1.87	322	319	-3	-0.366	-2.902	-0.003809	-3.809
17	-60	20	-5.62	1.87	322	322	0	0	0	0	0
18	-40	20	-3.75	1.87	321	323	2	0.244	1.935	0.002539	2.539
19	-20	20	-1.87	1.87	310	323	13	1.584	12.576	0.016506	16.506
20	0	20	0	1.87	320	323	3	0.366	2.902	0.003809	3.809
21	20	20	1.87	1.87	320	320	0	0	0	0	0
22	40	20	3.75	1.87	318	307	-11	-1.341	-10.641	-0.013966	-13.966
23	60	20	5.62	1.87	318	318	0	0	0	0	0
24	80	20	7.49	1.87	317	316	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
25	106.75	20	10	1.87	316	316	0	0	0	0	0
26	126.75	20	11.87	1.87	315	315	0	0	0	0	0
27	-126.75	40	-11.87	3.75	316	321	5	0.609	4.837	0.006348	6.348
28	-106.75	40	-10	3.75	318	319	1	0.122	0.967	0.001270	1.270

Tabela 3.1: Resultados experimentais para $V_j/U_0 = 15$ (continuação).

Tomadas de pressão	X [mm]	Z [mm]	X/D_m	Z/D_m	h_{ref} [mm]	h [mm]	Δh [mm]	$\Delta h \times \sin(\alpha)$ [mm]	p [Pa]	p/q	$p/q \times 10^3$
29	-80	40	-7.49	3.75	318	315	-3	-0.366	-2.902	-0.003809	-3.809
30	-60	40	-5.62	3.75	320	318	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
31	-40	40	-3.75	3.75	320	319	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
32	-20	40	-1.87	3.75	322	322	0	0	0	0	0
33	0	40	0	3.75	321	322	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
34	20	40	1.87	3.75	321	321	0	0	0	0	0
35	40	40	3.75	3.75	322	314	-8	-0.975	-7.739	-0.010157	-10.157
36	60	40	5.62	3.75	322	317	-5	-0.609	-4.837	-0.006348	-6.348
37	80	40	7.49	3.75	322	320	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
38	106.75	40	10	3.75	322	321	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
39	126.75	40	11.87	3.75	322	321	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
40	-126.75	70	-11.87	6.56	322	326	4	0.487	3.870	0.005079	5.079
41	-106.75	70	-10	6.56	322	324	2	0.244	1.935	0.002539	2.539
42	-80	70	-7.49	6.56	321	322	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
43	-60	70	-5.62	6.56	321	321	0	0	0	0	0
44	-40	70	-3.75	6.56	321	320	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
45	-20	70	-1.87	6.56	320	320	0	0	0	0	0
46	0	70	0	6.56	318	318	0	0	0	0	0
47	20	70	1.87	6.56	318	318	0	0	0	0	0
48	40	70	3.75	6.56	317	317	0	0	0	0	0
49	60	70	5.62	6.56	316	314	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
50	80	70	7.49	6.56	315	313	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
51	106.75	70	10	6.56	317	316	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
52	126.75	70	11.87	6.56	318	317	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
53	-126.75	100	-11.87	9.37	318	321	3	0.366	2.902	0.003809	3.809
54	-106.75	100	-10	9.37	320	322	2	0.244	1.935	0.002539	2.539
55	-80	100	-7.49	9.37	315	317	2	0.244	1.935	0.002539	2.539
56	-60	100	-5.62	9.37	316	318	2	0.244	1.935	0.002539	2.539
57	-40	100	-3.75	9.37	316	318	2	0.244	1.935	0.002539	2.539

Tabela 3.1: Resultados experimentais para $V_j/U_0 = 15$ (continuação).

Tomadas de pressão	X [mm]	Z [mm]	X/D_m	Z/D_m	h_{ref} [mm]	h [mm]	Δh [mm]	$\Delta h \times \sin(\alpha)$ [mm]	p [Pa]	p/q	$p/q \times 10^3$
58	-20	100	-1.87	9.37	318	320	2	0.244	1.935	0.002539	2.539
59	0	100	0	9.37	318	319	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
60	20	100	1.87	9.37	320	320	0	0	0	0	0
61	40	100	3.75	9.37	319	320	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
62	60	100	5.62	9.37	318	320	2	0.244	1.935	0.002539	2.539
63	80	100	7.49	9.37	320	320	0	0	0	0	0
64	106.75	100	10	9.37	320	320	0	0	0	0	0
65	126.75	100	11.87	9.37	320	321	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
66	-126.75	130	-11.87	12.18	321	322	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
67	-106.75	130	-10	12.18	320	322	2	0.244	1.935	0.002539	2.539
68	-80	130	-7.49	12.18	321	322	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
69	-60	130	-5.62	12.18	321	322	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
70	-40	130	-3.75	12.18	320	322	2	0.244	1.935	0.002539	2.539
71	-20	130	-1.87	12.18	320	320	0	0	0	0	0
72	0	130	0.00	12.18	320	321	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
73	20	130	1.87	12.18	320	320	0	0	0	0	0
74	40	130	3.75	12.18	318	318	0	0	0	0	0
75	60	130	5.62	12.18	318	318	0	0	0	0	0
76	80	130	7.49	12.18	317	317	0	0	0	0	0
77	106.75	130	10	12.18	316	316	0	0	0	0	0
78	126.75	130	11.87	12.18	315	315	0	0	0	0	0

Tabela 3.2: Resultados experimentais para $V_j/U_0 = 22.5$.

Tomadas de pressão	X [mm]	Z [mm]	X/D_m	Z/D_m	h_{ref} [mm]	h [mm]	Δh [mm]	$\Delta h \times \sin(\alpha)$ [mm]	p [Pa]	p/q	$p/q \times 10^3$
1	-126.75	0	-11.87	0	318	318	0	0	0	0	0
2	-106.75	0	-10	0	319	316	-3	-0.366	-2.902	-0.003809	-3.809
3	-80	0	-7.49	0	319	317	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
4	-60	0	-5.62	0							
5	-40	0	-3.75	0	321	320	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
6	-20	0	-1.87	0	320	321	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
7	0	0	0	0	322	328	6	0.731	5.804	0.007618	7.618
8	20	0	1.87	0	322	311	-11	-1.341	-10.641	-0.013966	-13.966
9	40	0	3.75	0	322	311	-11	-1.341	-10.641	-0.013966	-13.966
10	60	0	5.62	0							
11	80	0	7.49	0	322	322	0	0	0	0	0
12	106.75	0	10	0	322	322	0	0	0	0	0
13	126.75	0	11.87	0	322	322	0	0	0	0	0
14	-126.75	20	-11.87	1.87	322	322	0	0	0	0	0
15	-106.75	20	-10	1.87	322	318	-4	-0.487	-3.870	-0.005079	-5.079
16	-80	20	-7.49	1.87	323	321	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
17	-60	20	-5.62	1.87	322	321	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
18	-40	20	-3.75	1.87	322	321	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
19	-20	20	-1.87	1.87	321	320	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
20	0	20	0	1.87	321	326	5	0.609	4.837	0.006348	6.348
21	20	20	1.87	1.87	320	310	-10	-1.219	-9.674	-0.012697	-12.697
22	40	20	3.75	1.87	318	310	-8	-0.975	-7.739	-0.010157	-10.157
23	60	20	5.62	1.87	318	316	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
24	80	20	7.49	1.87	317	318	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
25	106.75	20	10	1.87	316	316	0	0	0	0	0
26	126.75	20	11.87	1.87	315	317	2	0.244	1.935	0.002539	2.539
27	-126.75	40	-11.87	3.75	317	318	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
28	-106.75	40	-10	3.75	318	317	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270

Tabela 3.2: Resultados experimentais para $V_j/U_0 = 22.5$ (continuação).

Tomadas de pressão	X [mm]	Z [mm]	X/D_m	Z/D_m	h_{ref} [mm]	h [mm]	Δh [mm]	$\Delta h \times \sin(\alpha)$ [mm]	p [Pa]	p/q	$p/q \times 10^3$
29	-80	40	-7.49	3.75	318	316	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
30	-60	40	-5.62	3.75	320	319	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
31	-40	40	-3.75	3.75	320	319	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
32	-20	40	-1.87	3.75	322	320	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
33	0	40	0	3.75	321	323	2	0.244	1.935	0.002539	2.539
34	20	40	1.87	3.75	321	317	-4	-0.487	-3.870	-0.005079	-5.079
35	40	40	3.75	3.75	322	316	-6	-0.731	-5.804	-0.007618	-7.618
36	60	40	5.62	3.75	322	320	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
37	80	40	7.49	3.75	322	321	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
38	106.75	40	10	3.75	322	322	0	0	0	0	0
39	126.75	40	11.87	3.75	322	324	2	0.244	1.935	0.002539	2.539
40	-126.75	70	-11.87	6.56	322	322	0	0	0	0	0
41	-106.75	70	-10	6.56	322	320	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
42	-80	70	-7.49	6.56	321	319	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
43	-60	70	-5.62	6.56	321	320	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
44	-40	70	-3.75	6.56	320	320	0	0	0	0	0
45	-20	70	-1.87	6.56	320	320	0	0	0	0	0
46	0	70	0	6.56	318	318	0	0	0	0	0
47	20	70	1.87	6.56	318	318	0	0	0	0	0
48	40	70	3.75	6.56	317	317	0	0	0	0	0
49	60	70	5.62	6.56	316	314	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
50	80	70	7.49	6.56	315	313	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
51	106.75	70	10	6.56	317	316	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
52	126.75	70	11.87	6.56	318	317	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
53	-126.75	100	-11.87	9.37	318	320	2	0.244	1.935	0.002539	2.539
54	-106.75	100	-10	9.37	320	321	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
55	-80	100	-7.49	9.37	319	320	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
56	-60	100	-5.62	9.37	320	321	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
57	-40	100	-3.75	9.37	320	320	0	0	0	0	0

Tabela 3.2: Resultados experimentais para $V_j/U_0 = 22.5$ (continuação).

Tomadas de pressão	X [mm]	Z [mm]	X/D_m	Z/D_m	h_{ref} [mm]	h [mm]	Δh [mm]	$\Delta h \times \sin(\alpha)$ [mm]	p [Pa]	p/q	$p/q \times 10^3$
58	-20	100	-1.87	9.37	320	320	0	0	0	0	0
59	0	100	0	9.37	319	319	0	0	0	0	0
60	20	100	1.87	9.37	319	319	0	0	0	0	0
61	40	100	3.75	9.37	319	319	0	0	0	0	0
62	60	100	5.62	9.37	319	319	0	0	0	0	0
63	80	100	7.49	9.37	320	319	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
64	106.75	100	10	9.37	318	319	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
65	126.75	100	11.87	9.37	319	319	0	0	0	0	0
66	-126.75	130	-11.87	12.18	320	319	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
67	-106.75	130	-10	12.18	320	319	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
68	-80	130	-7.49	12.18	320	319	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
69	-60	130	-5.62	12.18	319	320	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
70	-40	130	-3.75	12.18	319	319	0	0	0	0	0
71	-20	130	-1.87	12.18	318	318	0	0	0	0	0
72	0	130	0.00	12.18	318	318	0	0	0	0	0
73	20	130	1.87	12.18	317	317	0	0	0	0	0
74	40	130	3.75	12.18	316	316	0	0	0	0	0
75	60	130	5.62	12.18	316	316	0	0	0	0	0
76	80	130	7.49	12.18	317	317	0	0	0	0	0
77	106.75	130	10	12.18	317	317	0	0	0	0	0
78	126.75	130	11.87	12.18	319	319	0	0	0	0	0

Tabela 3.3: Resultados experimentais para $V_j/U_0 = 33.7$.

Tomadas de pressão	X [mm]	Z [mm]	X/D_m	Z/D_m	h_{ref} [mm]	h [mm]	Δh [mm]	$\Delta h \times \sin(\alpha)$ [mm]	p [Pa]	p/q	$p/q \times 10^3$
1	-126.75	0	-11.87	0	318	316	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
2	-106.75	0	-10	0	319	318	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
3	-80	0	-7.49	0	319	318	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
4	-60	0	-5.62	0							
5	-40	0	-3.75	0	321	314	-7	-0.853	-6.772	-0.008888	-8.888
6	-20	0	-1.87	0	320	317	-3	-0.366	-2.902	-0.003809	-3.809
7	0	0	0	0	322	325	3	0.366	2.902	0.003809	3.809
8	20	0	1.87	0	322	312	-10	-1.219	-9.674	-0.012697	-12.697
9	40	0	3.75	0	322	315	-7	-0.853	-6.772	-0.008888	-8.888
10	60	0	5.62	0							
11	80	0	7.49	0	322	322	0	0	0	0	0
12	106.75	0	10	0	322	322	0	0	0	0	0
13	126.75	0	11.87	0	322	323	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
14	-126.75	20	-11.87	1.87	322	322	0	0	0	0	0
15	-106.75	20	-10	1.87	322	321	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
16	-80	20	-7.49	1.87	322	322	0	0	0	0	0
17	-60	20	-5.62	1.87	322	320	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
18	-40	20	-3.75	1.87	322	316	-6	-0.731	-5.804	-0.007618	-7.618
19	-20	20	-1.87	1.87	321	318	-3	-0.366	-2.902	-0.003809	-3.809
20	0	20	0	1.87	321	324	3	0.366	2.902	0.003809	3.809
21	20	20	1.87	1.87	320	311	-9	-1.097	-8.707	-0.011427	-11.427
22	40	20	3.75	1.87	318	313	-5	-0.609	-4.837	-0.006348	-6.348
23	60	20	5.62	1.87	318	316	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
24	80	20	7.49	1.87	317	316	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
25	106.75	20	10	1.87	316	316	0	0	0	0	0
26	126.75	20	11.87	1.87	315	314	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
27	-126.75	40	-11.87	3.75	317	316	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
28	-106.75	40	-10	3.75	318	317	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270

Tabela 3.3: Resultados experimentais para $V_j/U_0 = 33.7$ (continuação).

Tomadas de pressão	X [mm]	Z [mm]	X/D_m	Z/D_m	h_{ref} [mm]	h [mm]	Δh [mm]	$\Delta h \times \sin(\alpha)$ [mm]	p [Pa]	p/q	$p/q \times 10^3$
29	-80	40	-7.49	3.75	318	317	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
30	-60	40	-5.62	3.75	320	318	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
31	-40	40	-3.75	3.75	320	316	-4	-0.487	-3.870	-0.005079	-5.079
32	-20	40	-1.87	3.75	322	319	-3	-0.366	-2.902	-0.003809	-3.809
33	0	40	0	3.75	321	322	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
34	20	40	1.87	3.75	321	314	-7	-0.853	-6.772	-0.008888	-8.888
35	40	40	3.75	3.75	322	318	-4	-0.487	-3.870	-0.005079	-5.079
36	60	40	5.62	3.75	322	320	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
37	80	40	7.49	3.75	322	320	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
38	106.75	40	10	3.75	322	321	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
39	126.75	40	11.87	3.75	321	320	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
40	-126.75	70	-11.87	6.56	322	322	0	0	0	0	0
41	-106.75	70	-10	6.56	321	320	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
42	-80	70	-7.49	6.56	321	320	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
43	-60	70	-5.62	6.56	320	320	0	0	0	0	0
44	-40	70	-3.75	6.56	320	320	0	0	0	0	0
45	-20	70	-1.87	6.56	320	320	0	0	0	0	0
46	0	70	0	6.56	318	319	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
47	20	70	1.87	6.56	318	317	-1	-0.122	-0.967	-0.001270	-1.270
48	40	70	3.75	6.56	317	317	0	0	0	0	0
49	60	70	5.62	6.56	316	313	-3	-0.366	-2.902	-0.003809	-3.809
50	80	70	7.49	6.56	315	313	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
51	106.75	70	10	6.56	313	311	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
52	126.75	70	11.87	6.56	314	312	-2	-0.244	-1.935	-0.002539	-2.539
53	-126.75	100	-11.87	9.37	314	315	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
54	-106.75	100	-10	9.37	316	316	0	0	0	0	0
55	-80	100	-7.49	9.37	316	316	0	0	0	0	0
56	-60	100	-5.62	9.37	318	318	0	0	0	0	0
57	-40	100	-3.75	9.37	318	318	0	0	0	0	0

Tabela 3.3: Resultados experimentais para $V_j/U_0 = 33.7$ (continuação).

Tomadas de pressão	X [mm]	Z [mm]	X/D_m	Z/D_m	h_{ref} [mm]	h [mm]	Δh [mm]	$\Delta h \times \sin(\alpha)$ [mm]	p [Pa]	p/q	$p/q \times 10^3$
58	-20	100	-1.87	9.37	318	319	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
59	0	100	0	9.37	319	320	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
60	20	100	1.87	9.37	319	320	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
61	40	100	3.75	9.37	319	320	1	0.122	0.967	0.001270	1.270
62	60	100	5.62	9.37	320	320	0	0	0	0	0
63	80	100	7.49	9.37	319	319	0	0	0	0	0
64	106.75	100	10	9.37	320	320	0	0	0	0	0
65	126.75	100	11.87	9.37	320	320	0	0	0	0	0
66	-126.75	130	-11.87	12.18	320	320	0	0	0	0	0
67	-106.75	130	-10	12.18	320	320	0	0	0	0	0
68	-80	130	-7.49	12.18	320	320	0	0	0	0	0
69	-60	130	-5.62	12.18	319	319	0	0	0	0	0
70	-40	130	-3.75	12.18	318	318	0	0	0	0	0
71	-20	130	-1.87	12.18	318	318	0	0	0	0	0
72	0	130	0.00	12.18	317	317	0	0	0	0	0
73	20	130	1.87	12.18	316	316	0	0	0	0	0
74	40	130	3.75	12.18	315	315	0	0	0	0	0
75	60	130	5.62	12.18	315	315	0	0	0	0	0
76	80	130	7.49	12.18	316	316	0	0	0	0	0
77	106.75	130	10	12.18	316	316	0	0	0	0	0
78	126.75	130	11.87	12.18	318	318	0	0	0	0	0

3.1.2 Discussão

Os gráficos das medições de pressões obtidas experimentalmente e adimensionalizadas pela pressão dinâmica a $H/D_m = 3$, para $V_j/U_0 = 15, 22.5$ e 33.7 , estão apresentados nas figuras 3.1, 3.2 e 3.3, respectivamente. A localização dos jatos de impacto é identificada através de dois círculos no plano de simetria, $Z/D_m = 0$. As cores quentes estão associadas a valores mais elevados de pressão, enquanto as cores frias correspondem a baixas (e negativas) pressões.

Tal como foi mencionado no capítulo 2, apenas foram feitas medições de pressões em metade da secção de teste, devido à existência de simetria neste escoamento. Assim, nos gráficos apresentados seguidamente foi utilizada a ferramenta *mirror* do *Tecplot*, de maneira a criar um espelho dos resultados obtidos.

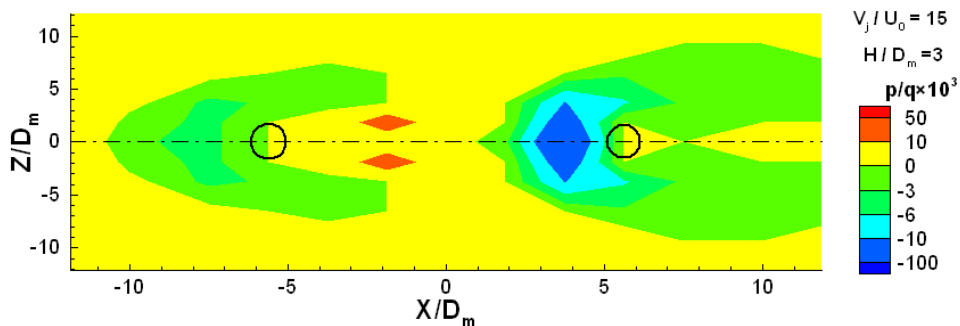


Figura 3.1: Distribuição de pressão na parte inferior da fuselagem e da asa ($H/D_m = 3$) para $V_j/U_0 = 15$ (adimensionalizada pela pressão dinâmica) obtida experimentalmente.

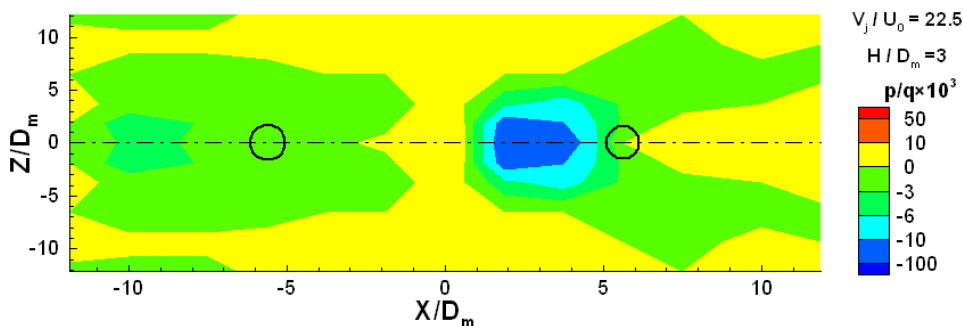


Figura 3.2: Distribuição de pressão na parte inferior da fuselagem e da asa ($H/D_m = 3$) para $V_j/U_0 = 22.5$ (adimensionalizada pela pressão dinâmica) obtida experimentalmente.

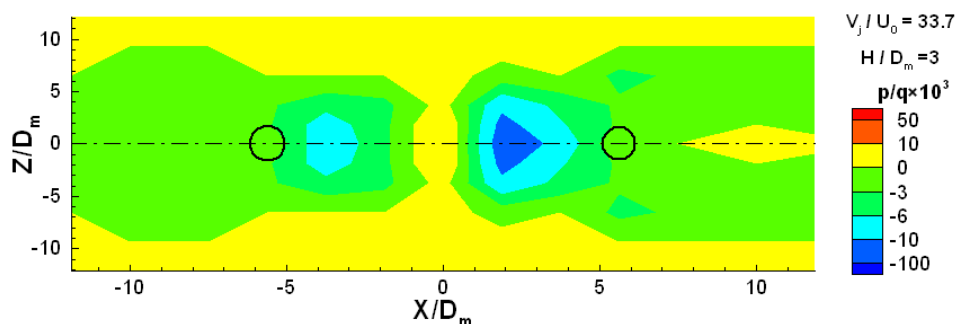


Figura 3.3: Distribuição de pressão na parte inferior da fuselagem e da asa ($H/D_m = 3$) para $V_j/U_0 = 33.7$ (adimensionalizada pela pressão dinâmica) obtida experimentalmente.

Analisando os resultados para todas as razões de velocidade estudadas verifica-se maioritariamente a presença de regiões com cores frias, a que correspondem pressões negativas, e zonas de pressão nula. As regiões perto dos jatos são aquelas em que se verificam maiores efeitos da pressão. Aí ocorrem elevados coeficientes de pressão negativos dando origem a uma região de sucção à volta dos jatos de impacto.

A existência de pressões negativas (regiões assinaladas em tons de verde e de azul) junto a cada jato são bem visíveis nos três gráficos obtidos e estão associadas às presenças dos dois *ground vortices* aí existentes. Contudo, apenas a montante do segundo jato são registadas regiões a azul, não se tendo verificado o mesmo na zona a montante do jato da frente, facto este que será evidenciado nos resultados numéricos apresentados posteriormente.

Seria também esperado que na região de impacto dos jatos se observassem os valores mais elevados de pressão, mas como na zona de localização destes não foi colocada nenhuma tomada de pressão, não é possível ver qual é a distribuição de pressão existente nesta área, sendo os valores apresentados nesta região resultado da interpolação feita pelo programa utilizado para a elaboração dos gráficos, *Tecplot*.

Como os jatos têm um diâmetro relativamente pequeno e a altura de incidência também é reduzida, a zona de estagnação tem um tamanho muito pequeno que não se consegue determinar com a escala presente. Nos três gráficos verifica-se que não há resolução suficiente, tanto na zona de impacto dos jatos como na região entre eles, ou seja, para $-5.62 \leq X/D_m \leq 5.62$, para captar os fenómenos aí existentes, o que é devido ao número relativamente reduzido de tomadas de pressão nesta região.

3.2 Resultados Numéricos

Tal como já foi referido, de maneira a estabelecer uma comparação com os resultados já apresentados e a completar estes, nesta secção estão presentes alguns resultados provenientes do estudo numérico efetuado. Assim, esta secção encontra-se dividida em quatro subsecções. Na primeira é descrito sucintamente o método computacional utilizado, é apresentado um exemplo de convergência com a monitorização dos resíduos e é feita a verificação da independência de malha. Nas três subsecções seguintes são mostrados os gráficos obtidos: distribuições de pressão para $H/D_m \approx 3$ e $H \approx 0$ e distribuição de V em $Z \approx 0$ para $V_j/U_0 = 15, 22.5$ e 33.7 . Todos estes resultados são analisados e discutidos e, a partir deles, são feitos os comentários considerados mais relevantes.

3.2.1 Método Computacional

Nesta subsecção é descrito o modelo matemático utilizado, sendo apresentadas as equações diferenciais a resolver, o modelo de turbulência empregue, a discretização das equações diferenciais, o esquema numérico usado e as condições de fronteira do domínio computacional. Posteriormente é mostrado um exemplo de convergência com a monitorização dos resíduos do primeiro jato e é realizada a verificação da independência da malha.

A descrição de um escoamento turbulento envolve a equação da continuidade e a solução das equações de Navier-Stokes. Em 3.3 encontra-se a equação da continuidade.

$$\rho \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_i} = 0 \quad (3.3)$$

As três equações de conservação de momento para um escoamento permanente, incompressível, isotérmico e tridimensional em coordenadas cartesianas são expressas por 3.4.

$$\rho \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (3.4)$$

O modelo de turbulência $k - \varepsilon$ foi usado neste trabalho e assume que as tensões turbulentas são proporcionais aos gradientes da velocidade média. Assim, as tensões turbulentas estão relacionadas com a velocidade através da viscosidade turbulenta, μ_T , como mostrado na equação 3.5. δ_{ij} é o tensor delta de Kronecker.

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial X_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3.5)$$

A energia cinética turbulenta, k , é dada por 3.6.

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) \quad (3.6)$$

A viscosidade turbulenta, que é derivada a partir do modelo de duas equações de turbulência $k - \varepsilon$ [59], pode ser representada pela expressão 3.7, em que C_μ é uma constante empírica.

$$\mu_T = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon \quad (3.7)$$

Em 3.8 e 3.9 estão as equações de transporte da energia cinética turbulenta, k , e da sua taxa de dissipação, ε , respetivamente. C_1 e C_2 são constantes do modelo de turbulência e σ_k e σ_ε são os números de Prandtl/Schmidt para k e ε , respetivamente.

$$\rho \bar{U}_i \frac{\partial k}{\partial X_i} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial X_i} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (3.8)$$

$$\rho \bar{U}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_i} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_i} \right) + (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} \quad (3.9)$$

A taxa de geração de energia cinética turbulenta, G , é dada pela equação 3.10.

$$G = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial X_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_j} \quad (3.10)$$

As constantes do modelo de turbulência que têm proporcionado uma boa concordância com os

resultados experimentais para uma vasta gama de escoamentos turbulentos são as indicadas por [59] e que se encontram representadas na tabela 3.4.

Tabela 3.4: Constantes do modelo de turbulência.

C_μ	C_1	C_2	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

A obtenção de uma solução numérica para escoamentos turbulentos exige a solução aproximada de um sistema de equações algébricas discretizadas, deduzidas a partir das equações diferenciais 3.3-3.4 e 3.8-3.9, que elas representam. Esta discretização é obtida usando um método de diferenças finitas, que envolve a integração das equações de transporte em cada volume de controlo definido por uma malha tridimensional cartesiana não uniforme. As equações de transporte de quantidade de movimento de k e de ε podem ser escritas na forma geral da equação 3.11.

$$\frac{\partial U\phi}{\partial X} + \frac{\partial V\phi}{\partial Y} + \frac{\partial W\phi}{\partial Z} = \frac{\partial}{\partial X} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial Z} \right) + S_\phi \quad (3.11)$$

Na equação 3.11, ϕ representa cada uma das componentes da velocidade, a energia cinética turbulenta ou a dissipação e o coeficiente de transporte Γ_ϕ e o termo fonte S_ϕ tomam valores diferentes para cada ϕ em particular, como visível na tabela 3.5.

Tabela 3.5: Descrição dos termos fonte.

ϕ	S_ϕ
\bar{U}	$-\frac{\partial P}{\partial X}$
\bar{V}	$-\frac{\partial P}{\partial Y}$
\bar{W}	$-\frac{\partial P}{\partial Z}$
k	$G - \rho\varepsilon$
ε	$C_1\varepsilon\frac{G}{k} - C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k}$

As equações de diferenças finitas são obtidas por discretização da equação de transporte 3.11 para cada uma das variáveis ϕ . O método de discretização usado neste estudo é explicado em detalhe por [60]. Este envolve a integração da equação de transporte 3.11 sobre um volume de controlo elementar que envolve um nó central P com um valor ϕ_P . Os termos convectivos são avaliados usando o esquema QUICK proposto por [61], que não apresenta problemas de difusão numérica e que possibilita a obtenção do mesmo nível de precisão numérica com malhas muito mais grosseiras do que as que são exigidas pelo esquema híbrido.

A solução das equações de diferenças finitas baseia-se no algoritmo iterativo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) que tem sido usado por vários autores e descrito amplamente na literatura [62]. O procedimento inicia-se com a prescrição de um campo de pressões arbitrário, seguida do cálculo de U , V e W que de um modo geral não satisfazem a continuidade e, por isso, é necessário resolver uma equação de Poisson para uma variável chamada correção de pressão, que ajusta o campo inicial de pressões e de velocidades no sentido da verificação simultânea das equações de conservação da quantidade de movimento e continuidade. As equações de k e de ε são então resolvidas e o processo é repetido até que um critério de convergência definido com base nos resíduos das equações seja satisfeito.

Tal como já referido, o estudo numérico de um escoamento turbulento envolve a solução das equações da continuidade (3.3), da conservação de quantidade de movimento (3.11), da equação de transporte da energia cinética turbulenta (3.8) e da equação da dissipação da energia cinética turbulenta (3.9) no domínio considerado. Estas equações apresentam uma forma elíptica, sendo assim necessário impor condições de fronteira para todas as variáveis em todas as fronteiras do domínio. O domínio computacional corresponde às condições experimentais e encontra-se representado na figura 3.4. Como se pode observar nessa mesma figura, atendendo à simetria do escoamento e de maneira a reduzir os custos computacionais e o tempo de simulação deste escoamento, apenas simulámos metade da secção de teste. A direção do escoamento cruzado e o sistema de eixos utilizado também se encontram representados na figura 3.4.

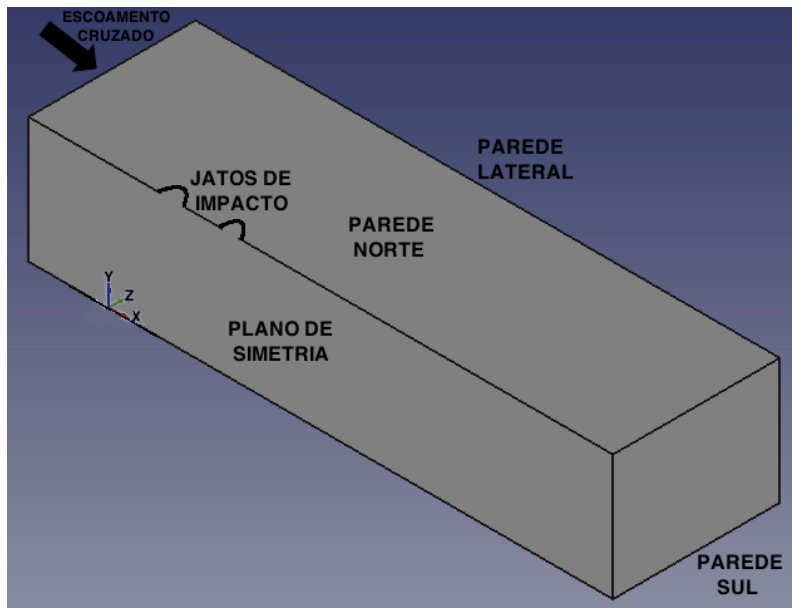


Figura 3.4: Domínio computacional utilizado na simulação numérica.

O domínio de solução possui seis condições de fronteira: um plano de entrada do escoamento cruzado, um plano de saída, um plano vertical de simetria ($Z = 0$) e três paredes sólidas que coincidem com o topo, fundo e lado da secção de teste (paredes norte, sul e lateral, respetivamente). Na parede norte estão localizados os dois jatos de impacto, a parede a sul corresponde à placa de impacto nas experiências e ao solo na situação real e a parede lateral é a responsável pelo confinamento do escoamento. A sensibilidade da solução à localização das fronteiras de entrada e de saída do escoamento cruzado foi investigada e as suas posições finais são suficientemente afastadas dos jatos para que a sua influência nos resultados fosse pequena. No plano de entrada os valores das variáveis dependentes são especificados a partir dos resultados experimentais. No plano de saída, os gradientes das variáveis dependentes na direção axial foram colocados iguais a zero. No plano de simetria, a componente normal da velocidade, W , bem como as derivadas normais de todas as outras variáveis são nulas. Nas superfícies sólidas foram usadas funções de parede nos pontos mais próximos desta, como explicado por [59], assumindo que, na região próxima da parede, o perfil de velocidades é dado pela lei logarítmica da parede e que existe equilíbrio entre a produção e dissipação de energia cinética turbulenta. Simultaneamente foram também utilizadas as condições de impermeabilidade da parede e de “não escorregamento”, fixando as velocidades normal e tangencial nulas para os pontos que coincidem com a parede.

O método computacional aqui descrito é apresentado de uma forma sucinta, sendo este apresentado mais detalhadamente por [63] e [64].

O processo iterativo é repetido até que uma alteração numa variável numa iteração para a seguinte seja tão pequena que a solução possa ser considerada e chamada de convergida. Neste caso, foram utilizadas 5000 iterações, pois desta forma as soluções não iriam mudar praticamente nada com iterações adicionais.

As diferenças entre o primeiro e o segundo membros dos análogos numéricos das equações de conservação em cada ponto da malha são chamados resíduos. A determinação de quando estes valores são já suficientemente pequenos para que a simulação numérica possa ser considerada convergida nem sempre é fácil, porque depende de muitos fatores, tais como os valores limites de cada variável ou o estabelecimento de uma escala. Assim, de maneira a facilitar este processo, é comum efetuar-se uma monitorização dos resíduos. Esta é importante, mas por vezes insuficiente, já que pode acontecer que os resíduos já tenham atingido o critério de convergência especificado, mas ainda continuem a decrescer e a solução pode ainda não ter convergido.

Neste estudo, os resíduos foram monitorizados graficamente em conjunto com a conservação global de massa (caudal total que entra no domínio, $FLOIN$, e que sai, $FLOUT$), o somatório dos resíduos da equação de conservação de massa em todos os pontos ($DSUM$) e algumas variáveis em locais críticos (V e W), tal como se pode ver na figura 3.5. Neste caso, foi escolhido o ponto $(-5.62, 2.7, 0)$ no meio do primeiro jato para monitorização. De referir que no eixo horizontal está representado o número de iterações ($ISTEP$) numa escala logarítmica. As variáveis V e W dizem respeito à componente vertical da velocidade média e à componente da velocidade média na direção do escoamento cruzado, respetivamente. Como se pode ver pela figura, a partir da iteração 1000, a solução já convergiu e os valores de V e W até estabilizaram um pouco antes (cerca da iteração 600).

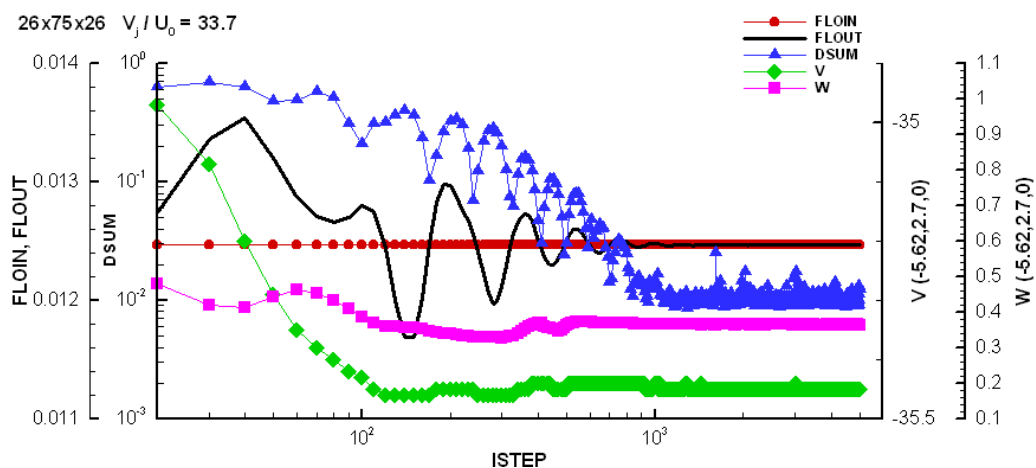


Figura 3.5: Exemplo de monitorização dos resíduos do primeiro jato.

Nesta simulação numérica, o objetivo é verificar a possibilidade de utilização do método computacional, usando os resultados do trabalho experimental realizado e estender a análise às regiões onde não foi possível obter medições. A malha utilizada convém ser uniforme, mas tem de ser refinada nas áreas com gradientes mais elevados, tais como na região de impacto dos jatos e entre eles. Para reproduzir o mais fielmente possível as condições experimentais e evitar

o aparecimento de assimetrias de origem numérica, a malha tem de ser simétrica relativamente ao centro dos jatos, o que significa que para este ponto, o número de pontos dos lados esquerdo e direito tem de ser igual.

Foram realizados vários testes, tendo sido escolhidas três malhas diferentes: 26x75x26, 34x91x34 e 39x103x39. Os resultados obtidos para as diferentes malhas estão condensados graficamente e são mostrados na figura 3.6 para os perfis horizontais da componente vertical da velocidade em $Y/D_m = 2.7$, sendo estes bastante similares para as três malhas escolhidas.

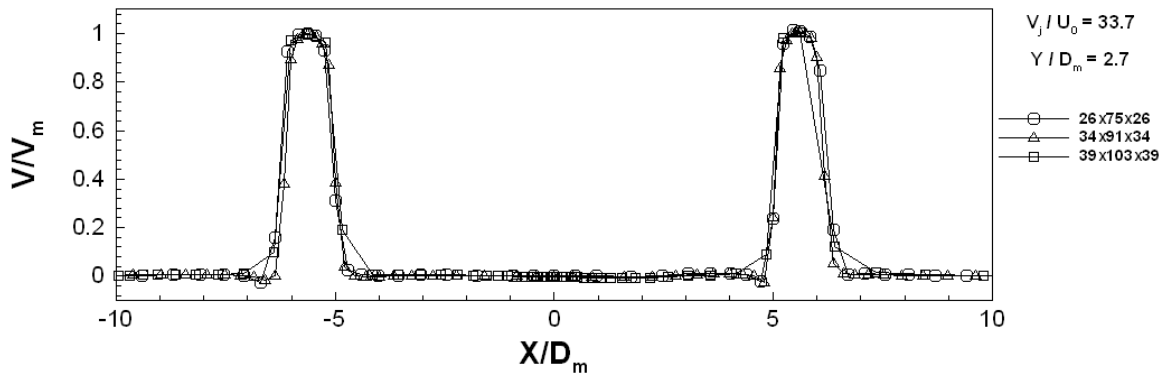


Figura 3.6: Perfis horizontais da componente vertical da velocidade adimensionalizados pela velocidade média dos jatos. Verificação da independência de malha.

Assim, como todas as malhas apresentadas são similares, escolhemos a malha menos refinada, ou seja, 26x75x26, com 50700 pontos, o que juntamente com o esquema de diferenciação de elevada ordem QUICK, permite uma boa correspondência com as experiências para este tipo de escoamentos com malhas mais grosseiras, tal como explicado por [60].

3.2.2 Distribuição de Pressão na Parede Superior ($H/D_m \approx 3$)

Os gráficos das medições de pressões obtidas numericamente e adimensionalizadas pela pressão dinâmica a $H/D_m \approx 3$, para $V_j/U_0 = 15, 22.5$ e 33.7 , estão apresentados nas figuras 3.7, 3.8 e 3.9, respetivamente.

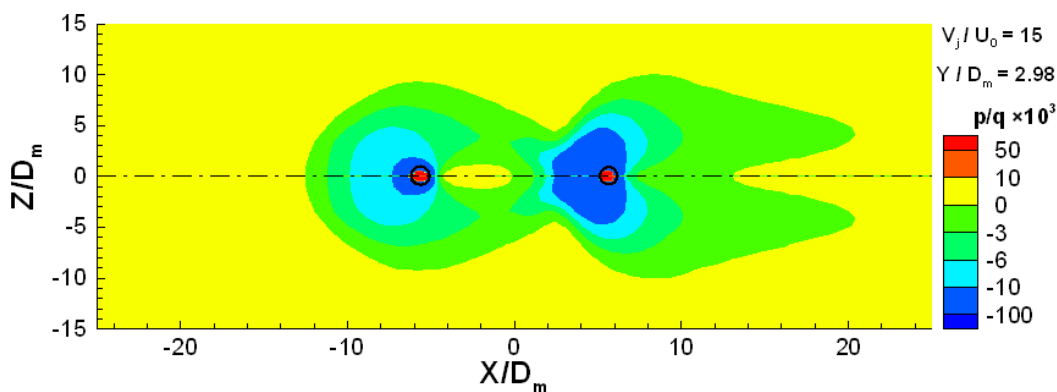


Figura 3.7: Distribuição de pressão na parte inferior da fuselagem e da asa ($H/D_m = 2.98 \approx 3$) para $V_j/U_0 = 15$ (adimensionalizada pela pressão dinâmica) obtida numericamente.

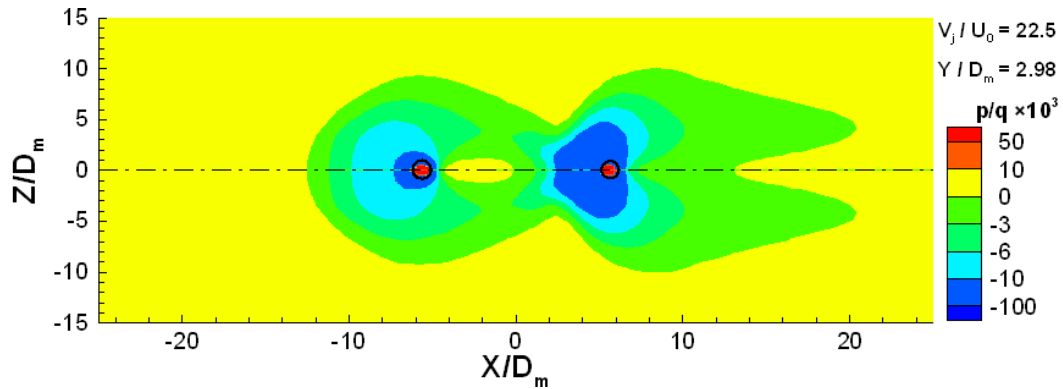


Figura 3.8: Distribuição de pressão na parte inferior da fuselagem e da asa ($H/D_m = 2.98 \approx 3$) para $V_j/U_0 = 22.5$ (adimensionalizada pela pressão dinâmica) obtida numericamente.

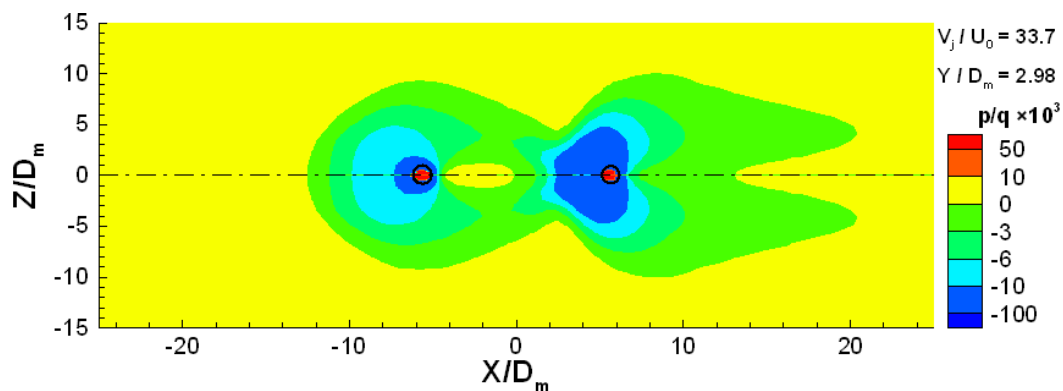


Figura 3.9: Distribuição de pressão na parte inferior da fuselagem e da asa ($H/D_m = 2.98 \approx 3$) para $V_j/U_0 = 33.7$ (adimensionalizada pela pressão dinâmica) obtida numericamente.

Analisando os resultados para todas as razões de velocidade, nas localizações dos jatos está presente uma área a vermelho correspondente às regiões de pressão mais elevada, devido aos elevados valores positivos da componente vertical da velocidade. As regiões com cores frias existentes à volta da localização dos jatos de impacto correspondem a baixas pressões e estão associadas com o arrastamento do ar em repouso pelos jatos incidentes. Nestes gráficos, já se verifica a existência destas últimas regiões mencionadas junto de ambos os jatos, ao contrário do registado nos resultados experimentais, nos quais esta característica apenas existia junto do jato de trás.

Comparando os resultados experimentais obtidos para as medições de pressões com estes numéricos para $H/D_m \approx 3$, pode concluir-se que os gráficos experimentais não têm resolução suficiente nas regiões de impacto dos jatos e entre eles, tal como já mencionado anteriormente. Ainda assim, de uma forma geral, as distribuições de pressão obtidas estão de acordo com o esperado para a situação em estudo, ou seja, uma aeronave a pairar junto ao solo.

3.2.3 Distribuição de Pressão no Solo ($H \approx 0$)

Os gráficos das medições de pressões obtidas numericamente e adimensionalizadas pela pressão dinâmica a $H \approx 0$, para $V_j/U_0 = 15$, 22.5 e 33.7 , estão apresentados nas figuras 3.10, 3.11 e 3.12, respetivamente.

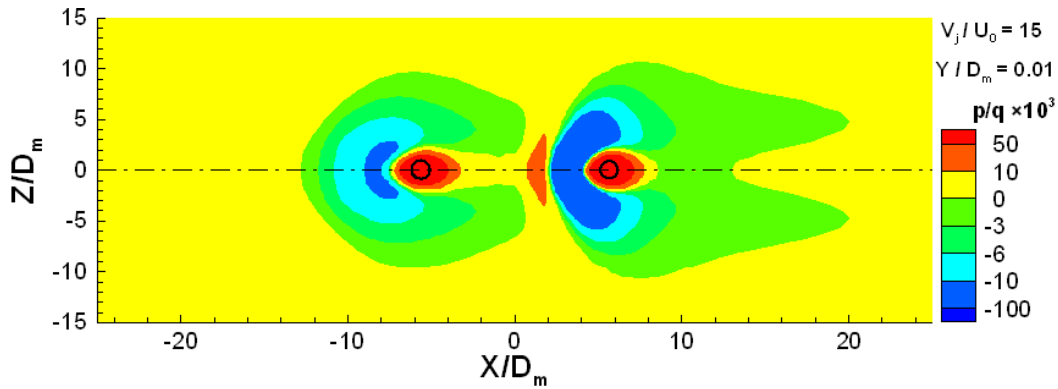


Figura 3.10: Distribuição de pressão junto do solo ($H/D_m = 0.01 \approx 0$) para $V_j/U_0 = 15$ (adimensionalizada pela pressão dinâmica) obtida numericamente.

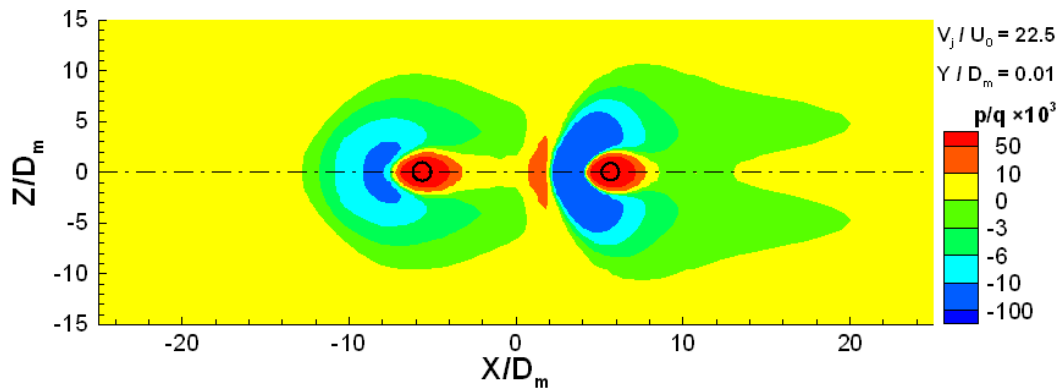


Figura 3.11: Distribuição de pressão junto do solo ($H/D_m = 0.01 \approx 0$) para $V_j/U_0 = 22.5$ (adimensionalizada pela pressão dinâmica) obtida numericamente.

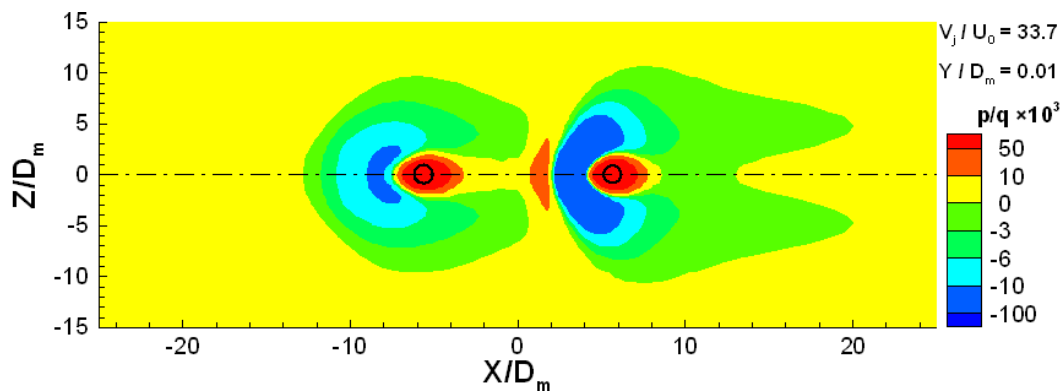


Figura 3.12: Distribuição de pressão junto do solo ($H/D_m = 0.01 \approx 0$) para $V_j/U_0 = 33.7$ (adimensionalizada pela pressão dinâmica) obtida numericamente.

Para as três razões de velocidade estudadas, o padrão dos resultados obtido é bastante semelhante para $H \approx 0$.

Comparando estes três gráficos com os obtidos numericamente para $H/D_m \approx 3$, também existem algumas semelhanças. Contudo, é de referir a presença de duas zonas a vermelho, nas regiões dos jatos, bastante maiores do que as existentes em $H/D_m \approx 3$. Nos gráficos da distribuição de pressão ao longo da parte inferior da asa e da fuselagem, as zonas a vermelho encontram-se apenas nas zonas que seccionam os dois jatos (dentro do círculo que representa

a localização dos jatos). No caso da distribuição de pressão junto do solo, estas duas regiões de cores quentes já são bastante maiores, coincidindo com as zonas de incidência dos jatos, que contêm os pontos de estagnação. Nestes pontos a pressão dinâmica dos jatos é convertida em pressão estática e formam-se jatos radiais que aceleram inicialmente devido ao forte gradiente de pressão favorável, mas que depois interagem entre si e com o escoamento cruzado. Entre as suas zonas de incidência existe uma outra zona de pressões positivas, que revela a colisão entre os dois jatos de parede e que dão origem ao início de um escoamento em repuxo (de baixo para cima). Esta zona situa-se em $X/D_m = 2$ para as três razões de velocidade. Como se analisará em maior detalhe na subsecção seguinte, o repuxo acaba por não se formar completamente e é defletido pelo escoamento cruzado.

3.2.4 Escoamento Médio no Plano de Simetria ($Z \approx 0$)

Com o objetivo de completar o estudo realizado e de compreender melhor este tipo de escoamento foram também elaborados os gráficos das distribuições da componente vertical da velocidade e *streamtraces*. Estes foram obtidos numericamente e adimensionalizados pela velocidade média dos jatos ao longo do plano vertical de simetria, para $V_j/U_0 = 15, 22.5$ e 33.7 e estão representados nas figuras 3.13, 3.14 e 3.15, respetivamente.

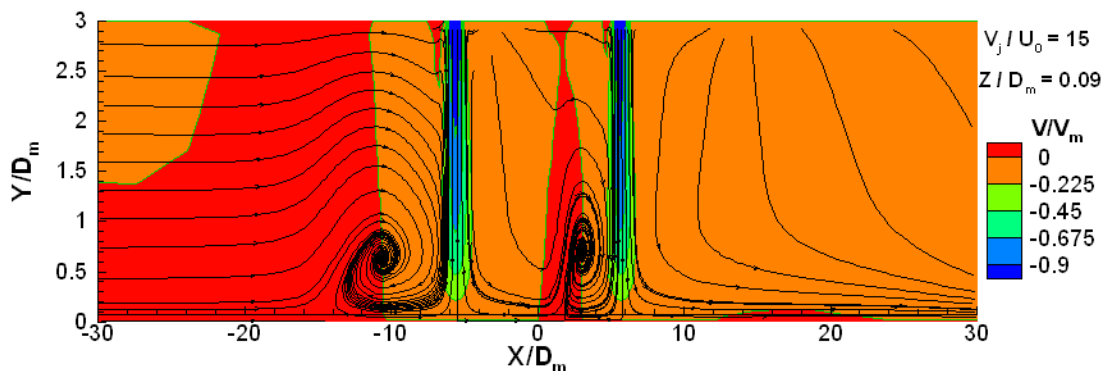


Figura 3.13: Distribuição da componente vertical da velocidade ao longo do plano vertical de simetria ($Z \approx 0$) para $V_j/U_0 = 15$ (adimensionalizada pela velocidade média dos jatos) obtida numericamente.

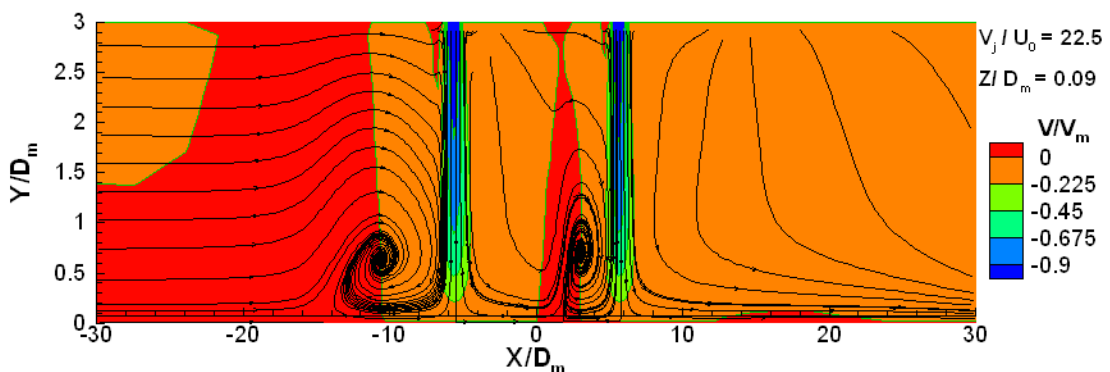


Figura 3.14: Distribuição da componente vertical da velocidade ao longo do plano vertical de simetria ($Z \approx 0$) para $V_j/U_0 = 22.5$ (adimensionalizada pela velocidade média dos jatos) obtida numericamente.

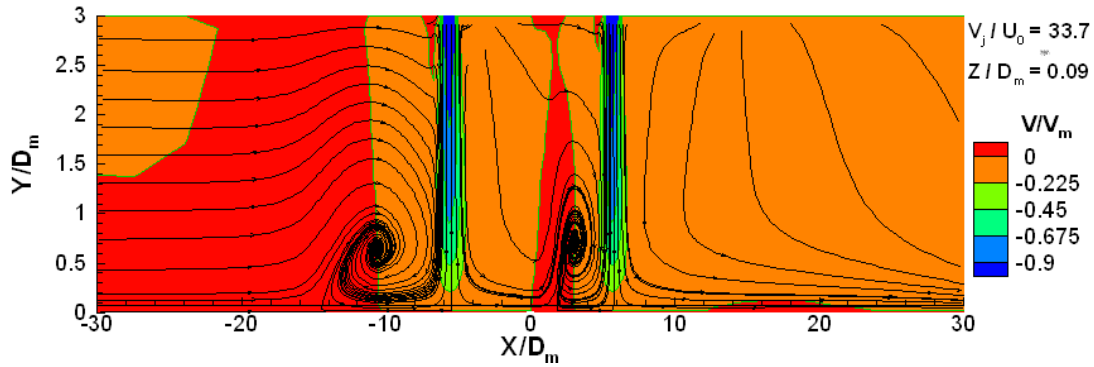


Figura 3.15: Distribuição da componente vertical da velocidade ao longo do plano vertical de simetria ($Z \approx 0$) para $V_j/U_0 = 33.7$ (adimensionalizada pela velocidade média dos jatos) obtida numericamente.

Nestes três gráficos observa-se a formação de um *ground vortex* a montante de cada jato incidente, devido à interação entre os jatos de parede e o escoamento cruzado. Tendo em consideração estudos referenciados na bibliografia, seria de esperar que, para uma baixa altura de impacto, o fenómeno de escoamento em repuxo fosse observado nestes resultados, mas este escoamento que se forma inicialmente em $X/D_m = 2$ é rapidamente defletido pelo escoamento cruzado e funde-se com o vórtice de parede do segundo jato incidente. Este resultado é completamente novo, porque, no caso de múltiplos jatos incidentes reportados até à presente data, ao escoamento em repuxo era sempre atribuído uma força de descolagem adicional para aeronaves de V/STOL, mas no caso de jatos alinhados com o escoamento cruzado (como no F-35) verifica-se que o segundo *ground vortex* anula esse efeito e, adicionalmente, intensifica o fenómeno de *suckdown* com o alargamento da região de pressões negativas (sucções) já referidas na subsecção anterior.

Os resultados obtidos mostram a existência de uma grande penetração do jato localizado a montante, que é defletido pelo escoamento cruzado e atinge o solo, dando origem a um *ground vortex* devido à colisão do jato de parede com o escoamento cruzado, envolvendo o ponto de impacto como um “cachecol”. Ao contrário do que acontece para alturas de impacto mais elevadas do que a que aqui foi estudada, apesar do jato localizado a jusante ser menos afetado pelo escoamento em termos de deflexão, devido ao bloqueio do escoamento por parte do primeiro jato e do seu *ground vortex*, o segundo jato atinge o solo e verifica-se a formação de um *ground vortex* a montante deste. Se compararmos a forma da região de pressões negativas, apresentada nas duas subsecções anteriores, com a forma do *ground vortex* verificamos que estas são bastante semelhantes, observando-se a envólvia do jato incidente como um “cachecol”.

Capítulo 4

Conclusões

Neste último capítulo são apresentadas as conclusões que consideramos mais importantes depois de todo o estudo feito nesta dissertação, indicando a sua contribuição para a investigação em jatos de impacto alinhados com um escoamento cruzado de baixa velocidade para uma pequena altura de impacto.

Os trabalhos mais relevantes nesta área, descritos na revisão bibliográfica, consideram altas alturas de impacto, baixas razões de velocidade entre o jato e o escoamento cruzado, tendo, assim, uma importância reduzida para o fenômeno de *ground effect* da aeronave V/STOL. Nestes estudos, os autores têm-se centrado na caracterização do escoamento médio e turbulento em efeito de solo, mas nenhum deles refere o caso de dois jatos incidentes alinhados com o escoamento cruzado, cuja relevância é precisamente o *F-35B*.

Com o objetivo de continuar e completar os estudos já realizados, foi feito um trabalho experimental que consistiu na medição das pressões ao longo das partes inferiores da fuselagem e da asa do *F-35B*. As experiências foram realizadas para razões de velocidade, $V_j/U_0 = 15, 22.5$ e 33.7 , a uma altura de impacto, $H = 3D_m$, e com um espaçamento entre jatos, $S = 11D_m$.

Ao analisarmos os resultados experimentais obtidos verificamos maioritariamente a existência de regiões com pressões negativas e nulas. A existência de pressões negativas junto a cada jato é bem visível e está associada à presença de dois *ground vortexes* nessas zonas. As regiões perto dos jatos são aquelas em que se verificam maiores efeitos da pressão, ocorrendo aí elevados coeficientes de pressão negativos que dão origem a uma região de sucção à volta dos jatos de impacto.

De maneira a completar a investigação realizámos também um estudo numérico, tendo sido obtidos gráficos da distribuição de pressão na parede superior ($H \approx 3D_m$) e junto do solo, ou seja, $H \approx 0$, e ainda do escoamento médio no plano vertical de simetria para as três razões de velocidade estudadas experimentalmente. Foram obtidas soluções com um grande nível de precisão numérica através da utilização do esquema numérico QUICK, que possibilita a obtenção de soluções independentes da dimensão da malha com um número menor de pontos do que o exigido por outros esquemas, o que equivale a uma diminuição do tempo de cálculo e da memória do computador.

Para $H \approx 3D_m$, nas localizações dos jatos verifica-se a existência das pressões mais elevadas, devido aos elevados valores da componente vertical da velocidade e as regiões de pressões negativas junto aos jatos de impacto estão associadas com o arrastamento do ar em repouso pelos jatos incidentes. Comparando os resultados obtidos experimentalmente para as medições de pressões com os numéricos para a altura de impacto referida, pode concluir-se que os gráficos experimentais não apresentam resolução suficiente nas regiões de impacto dos jatos e entre eles, mas que, de uma forma geral, estão de acordo com o esperado para o caso de uma aero-

nave a pairar junto do solo.

Ao compararmos os gráficos numéricos para as duas alturas de impacto, ou seja, $H \approx 3D_m$ e $H \approx 0$, os resultados obtidos são bastante semelhantes, verificando-se que, neste último caso, as duas regiões de pressões elevadas presentes nas localizações dos jatos são bastante maiores do que as existentes em $H \approx 3D_m$. Entre as zonas de incidência dos jatos existe também uma região de pressões positivas, que revela a colisão entre os dois jatos de parede e que dão origem ao início de um escoamento em repuxo. Contudo, o repuxo acaba por não se formar completamente, sendo defletido pelo escoamento cruzado, facto este que pôde ser comprovado nos gráficos das distribuições de V e *streamtraces*.

Nos resultados obtidos do escoamento médio no plano vertical de simetria observa-se a formação de um *ground vortex* na região entre os jatos de impacto, fenómeno este que ainda não tinha sido reportado na literatura e que é surpreendente à primeira vista, já que era esperado encontrar um escoamento em repuxo nesta zona para baixas alturas de impacto. Este resultado é completamente novo, já que, em todos os casos de vários jatos incidentes reportados até agora, ao escoamento em repuxo era sempre atribuído uma força de descolagem adicional para aeronaves de V/STOL. Contudo, este estudo apresenta o caso de jatos alinhados com o escoamento cruzado, verificando-se que o *ground vortex* do jato localizado a jusante anula esse efeito e que ainda intensifica o fenómeno de *suckdown* com o alargamento da região de pressões negativas. Ao compararmos a forma da região de pressões negativas com a forma do *ground vortex* verificamos que estas são bastante semelhantes, observando-se a envolvência do jato incidente como um “cachecol”.

Bibliografia

- [1] J. F. Keffer and W. D. Baines, "The round turbulent jet in a cross-wind," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 15, no. 4, pp. 481-496, 1963.
- [2] Y. Kamotani and I. Greber, "Experiments on a turbulent jet in a cross flow," *AIAA Journal*, vol. 10, no. 11, pp. 1425-1429, 1972.
- [3] D. Crabb, D. F. G. Durão, and J. H. Whitelaw, "A round jet normal to a cross-flow," *Trans. ASME: Journal of Fluids Engineering*, vol. 103, pp. 142-153, 1981.
- [4] J. Andreopoulos and W. Rodi, "Experimental investigation of jets in a crossflow," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 138, pp. 93-127, 1984.
- [5] C. C. Landreth and R. J. Adrian, "Impingement of a low Reynolds number turbulent circular jet onto a flat plate at normal incidence," *Experiments in Fluids*, vol. 9, pp. 74-84, 1990.
- [6] R. F. Dennis, J. Tso, and R. J. Margason, "Induced surface pressure distribution of a subsonic jet in a crossflow," in *International Powered Lift Conference*, (Santa Clara, CA), Dec. 1-3, 1993.
- [7] K. Nakabe, K. Inaoka, T. Ai, and K. Suzuki, "Flow visualization of longitudinal vortices induced by an inclined impinging jet in a crossflow - Effective cooling of high temperature gas turbine blades," *Energy Conversion and Management*, vol. 38, no. 10-13, pp. 1145-1153, 1997.
- [8] J. A. Parsons and J.-C. Han, "Rotation effect on jet impingement heat transfer in smooth rectangular channels with heated target walls and radially outward cross flow," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 41, no. 13, pp. 2059-2071, 1998.
- [9] P. Behrouzi and J. J. McGuirk, "Particle image velocimetry for intake ingestion in short takeoff and landing aircraft," *Journal of Aircraft*, vol. 37, no. 6, pp. 994-1000, 2000.
- [10] J. M. Eyles, N. J. Lawson, and K. Knowles. private communication, 2002.
- [11] J. M. M. Barata, P. Castro, M. A. Silvestre, and D. F. G. Durão, "The turbulence characteristics of a ground vortex flow," in *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, (Reno, NV), Jan. 10-13, 2005.
- [12] J. M. M. Barata, S. D. G. Ribeiro, P. J. C. T. Santos, and A. R. R. Silva, "Experimental study of the collision zone of a boundary layer with a wall jet," in *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, (Orlando, FL), Jan. 5-8, 2009.
- [13] J. M. M. Barata, D. F. G. Durão, P. J. C. T. Santos, and A. R. R. Silva, "Turbulent energy budgets of a ground vortex flow," in *15th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, (Lisbon, Portugal), July 5-8, 2010.
- [14] L. Wang, B. Sundén, A. Borg, and H. Abrahamsson, "Control of jet impingement heat transfer in crossflow by using a rib," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, pp. 4157-4166, 2011.

- [15] M. E. Hassan, H. H. Assoum, V. Sobolik, J. Vétel, K. Abed-Meraim, A. Garon, and A. Sakout, "Experimental investigation of the wall shear stress and the vortex dynamics in a circular impinging jet," *Experiments in Fluids*, vol. 52, pp. 1475-1489, 2012.
- [16] Z. U. Ahmed, Y. M. Al-Abdeli, and F. G. Guzzomi, "Impingement pressure characteristics of swirling and non-swirling turbulent jets," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 68, pp. 722-732, 2015.
- [17] J. Long and T. H. New, "Vortex dynamics and wall shear stress behaviour associated with an elliptic jet impinging upon a flat plate," *Experiments in Fluids*, vol. 57, 2016.
- [18] W. G. Hill Jr. and R. C. Jenkins, "Effect of nozzle spacing on ground interference forces for a two-jet V/STOL aircraft," *Journal of Aircraft*, vol. 17, no. 9, pp. 684-689, 1980.
- [19] J. A. Schetz, A. K. Jakubowski, and K. Aoyagi, "Surface pressures on a flat plate with dual jet configurations," *Journal of Aircraft*, vol. 21, no. 7, pp. 484-490, 1984.
- [20] K. Knowles and D. Bray, "Ground vortex formed by impinging jets in crossflow," *Journal of Aircraft*, vol. 30, no. 6, pp. 872-878, 1993.
- [21] C. Carcasci, "An experimental investigation on air impinging jets using visualisation methods," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 38, pp. 808-818, 1999.
- [22] A. Bernard, L.-E. Brizzi, and J.-L. Bousgarbiès, "A comparison of flow visualisation and wall pressure measurements for a jet impinging on a plane surface," *Experiments in Fluids*, vol. 29, pp. 23-29, 2000.
- [23] A. J. Saddington and K. Knowles, "Comparison of jet-induced lift loss for single and co-annular jets," in *22nd International Congress of Aeronautical Sciences*, (UK), Aug./Sept. 27-01, 2000.
- [24] L. F. G. Geers, M. J. Tummers, and K. Hanjalić, "Experimental investigation of impinging jet arrays," *Experiments in Fluids*, vol. 36, pp. 946-958, 2004.
- [25] A. J. Saddington, K. Knowles, and P. M. Cabrita, "Flow visualization and measurements in a short take-off, vertical landing fountain flow," in *45th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, (Reno, NV), Jan. 8-11, 2007.
- [26] Z.-q. Yin, H.-j. Zhang, and J.-z. Lin, "Experimental study on the flow field characteristics in the mixing region of twin jets," *Journal of Hydrodynamics*, vol. 19, no. 3, pp. 309-313, 2007.
- [27] A. J. Saddington, K. Knowles, and P. M. Cabrita, "Flow measurements in a short takeoff, vertical landing fountain: splayed jets," *Journal of Aircraft*, vol. 46, no. 3, pp. 874-882, 2009.
- [28] J. M. M. Barata, P. S. D. Carvalho, F. M. S. P. Neves, A. R. R. Silva, D. F. C. Vieira, and D. F. G. Durão, "Laser Doppler measurements of twin impinging jets aligned with a cross-flow," *Journal of Physical Science and Application*, vol. 4, no. 7, pp. 403-411, 2014.
- [29] J. M. M. Barata, F. M. S. P. Neves, D. F. C. Vieira, and A. R. R. Silva, "Experimental study of two impinging jets aligned with a crossflow," *Journal of Modern Physics*, vol. 5, pp. 1779-1788, 2014.

- [30] W. Rodi and S. K. Srivatsa, "A locally elliptic calculation procedure for three-dimensional flows and its application to a jet in a cross-flow," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 23, pp. 67-83, 1980.
- [31] J. M. M. Barata and D. F. G. Durão, "Numerical study of single and multiple impinging jets through a crossflow," in *5th International Symposium on Numerical Methods in Engineering*, (Lausanne, Switzerland), pp. 475-485, 1989.
- [32] K. Knowles, "Computational studies of impinging jets using $k - \epsilon$ turbulence models," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 22, pp. 799-810, 1996.
- [33] Y.-T. Yang and T.-P. Hao, "Numerical studies of three turbulent slot jets with and without moving surface," *Acta Mechanica*, vol. 136, pp. 17-27, 1999.
- [34] P. Behrouzi, "Numerical studies of twin-jet impingement for STOVL flow application," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol. 23, no. 6, pp. 669-676, 2000.
- [35] V. A. Chiriac and A. Ortega, "A numerical study of the unsteady flow and heat transfer in a transitional confined slot jet impinging on an isothermal surface," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, pp. 1237-1248, 2002.
- [36] L. A. El-Gabry and D. A. Kaminsky, "Numerical investigation of jet impingement with cross flow - Comparison of Yang-Shih and standard $k - \epsilon$ turbulence models," *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications: An International Journal of Computation and Methodology*, vol. 47, no. 5, pp. 441-469, 2005.
- [37] P. Bevilaqua, R. Margason, and C. Gaharan, "A jet entrainment theory for VTOL aircraft suckdown," in *45th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, (Reno, NV), Jan. 8-11, 2007.
- [38] J.-M. Miao, C.-Y. Wu, and P.-H. Chen, "Numerical investigation of confined multiple-jet impingement cooling over a flat plate at different crossflow orientations," *Numerical Heat Transfer, Part A*, vol. 55, pp. 1019-1050, 2009.
- [39] Y. Xiao, H.-W. Tang, D.-F. Liang, and J.-D. Zhang, "Numerical study of hydrodynamics of multiple tandem jets in cross flow," *Journal of Hydrodynamics*, vol. 23, no. 6, pp. 806-813, 2011.
- [40] D. Ostheimer and Z. Yang, "A CFD study of twin impinging jets in a cross-flow," *The Open Numerical Methods Journal*, vol. 4, pp. 24-34, 2012.
- [41] D. F. C. Vieira, J. M. M. Barata, F. M. S. P. Neves, and A. R. R. Silva, "Numerical simulation of twin impinging jets in tandem through a crossflow," *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 10, no. 6, pp. 123-136, 2015.
- [42] P. S. Penumadu and A. G. Rao, "Numerical investigations of heat transfer and pressure drop characteristics in multiple jet impingement system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 110, pp. 1511-1524, 2017.
- [43] R. L. Stoy and Y. Ben-Haim, "Turbulent jets in a confined crossflow," *Trans. ASME: Journal of Fluids Engineering*, vol. 95, pp. 551-556, 1973.
- [44] K. Knowles and D. Bray. private communication, 1991.
- [45] J. M. M. Barata, "Fountain flows produced by multijet impingement on a ground plane," *Journal of Aircraft*, vol. 30, no. 1, pp. 50-56, 1993.

- [46] J. M. M. Barata, D. F. G. Durão, M. V. Heitor, and J. J. McGuirk, "On the analysis of an impinging jet on ground effects," *Experiments in Fluids*, vol. 15, pp. 117-129, 1993.
- [47] P. Behrouzi and J. J. McGuirk, "Laser Doppler velocimetry measurements of twin-jet impingement flow for validation of computational models," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 30, pp. 265-277, 1998.
- [48] J. M. M. Barata, "Numerical visualisation of complex flows using experimental principles," in *38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, (Reno, NV), Jan. 10-13, 2000.
- [49] A. J. Saddington and K. Knowles, "Jet/Intake interference in short take off, vertical landing aircraft," *Journal of Aircraft*, vol. 38, no. 5, pp. 924-931, 2001.
- [50] F. S. Alvi, J. A. Ladd, and W. W. Bower, "Experimental and computational investigation of supersonic impinging jets," *AIAA Journal*, vol. 40, no. 4, pp. 599-609, 2002.
- [51] E. Baydar and Y. Ozmen, "An experimental and numerical investigation on a confined impinging air jet at high Reynolds number," *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, pp. 409-421, 2005.
- [52] B. P. E. Dano and J. A. Liburdy, "Structure detection and analysis of non-circular impinging jets in a semi-confined array configuration," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 31, pp. 991-1003, 2007.
- [53] A. Abdel-Fattah, "Numerical and experimental study of turbulent impinging twin-jet flow," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 31, pp. 1061-1072, 2007.
- [54] J. M. M. Barata, "Multiple jet/wall/cross-wind interaction relevant to VSTOL ground effects," in *International Powered Lift Conference*, (Los Angeles, CA), Aug. 12-14, 2013.
- [55] M. Wae-Hayee, P. Tekasakul, S. Eiamsa-ard, and C. Nuntadusit, "Flow and heat transfer characteristics of in-line impinging jets with cross-flow at short jet-to-plate distance," *Experimental Heat Transfer*, vol. 28, no. 6, pp. 511-530, 2015.
- [56] C. Dai, L. Jia, J. Zhang, Z. Shu, and J. Mi, "On the flow structure of an inclined jet in crossflow at low velocity ratios," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 58, pp. 11-18, 2016.
- [57] F. Durst, A. Melling, and J. H. Whitelaw, *Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry*. London: Academic Press Inc., second ed., 1981.
- [58] D. F. C. Vieira, "Turbulent Structure of the Impact of a *ground vortex* Flow," Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, June 2012.
- [59] B. E. Launder and D. B. Spalding, "The numerical computation of turbulent flows," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 269-289, 1974.
- [60] J. M. M. Barata, D. F. G. Durão, and J. J. McGuirk, "Numerical study of single impinging jet through a crossflow," *Journal of Aircraft*, vol. 26, no. 1, pp. 1002-1008, 1989.
- [61] B. P. Leonard, "A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 59-98, 1979.

- [62] S. V. Patankar and D. B. Spalding, "A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 15, no. 10, pp. 1787-1806, 1972.
- [63] J. M. M. Barata, *Estudo Numérico e Experimental de Jactos Incidentes Sobre Placas Planas Através de um escoamento Cruzado*. Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, Jan. 1989.
- [64] D. F. C. Vieira, *Twin Impinging Jets Inline with a Low-Velocity Crossflow*. Dissertação de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, Jan. 2017.
- [65] R. E. Kuhn, R. J. Margason, and P. Curtis, *Jet-Induced Effects: The Aerodynamics of Jet and Fan-Powered V/STOL Aircraft in Hover and Transition*, vol. 217 of *Progress in Astronautics and Aeronautics*. Reston, VA: AIAA, 2006.
- [66] J. M. M. Barata, "Estudo Numérico de Jactos Incidentes Sobre Superfícies Planas," Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, Apr. 1985.

