



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

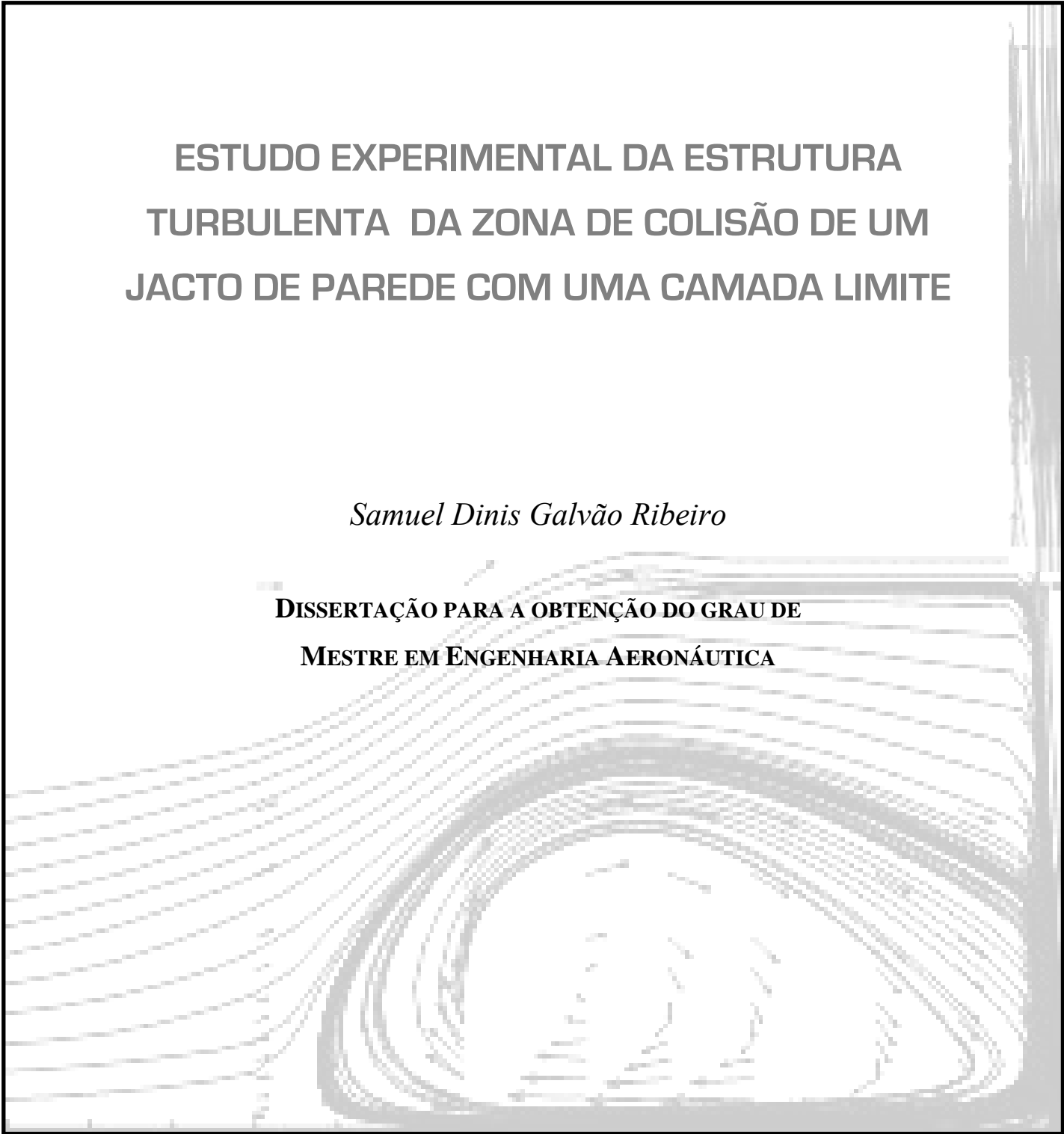
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AEROESPACIAIS



**ESTUDO EXPERIMENTAL DA ESTRUTURA
TURBULENTA DA ZONA DE COLISÃO DE UM
JACTO DE PAREDE COM UMA CAMADA LIMITE**

Samuel Dinis Galvão Ribeiro

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ENGENHARIA AERONÁUTICA**



JUNHO 2008

Samuel Dinis Galvão Ribeiro

ESTUDO EXPERIMENTAL DA ESTRUTURA TURBULENTA
DA ZONA DE COLISÃO DE UM JACTO DE PAREDE COM
UMA CAMADA LIMITE

Dissertação de Mestrado em Engenharia Aeronáutica apresentada à Universidade da Beira Interior, 2008

Tese realizada sob orientação
do Professor Doutor Eng.º Jorge Manuel Martins Barata

**Professor Associado com Agregação do Departamento de Ciências Aeroespaciais.
UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR**

Aos meus pais

Resumo

Um dos principais requisitos de projecto que deve ser tido em consideração num avião V/STOL é o sistema propulsivo quando o avião está perto do solo em transição para voo horizontal. Perdas no poder de aterragem/descolagem podem ocorrer no avião devido à re-ingestão de gases quentes; diminuição de pressão nas superfícies inferiores da asa e da fuselagem, que sugam o avião em direcção ao solo. Os gases quentes também são responsáveis pelo aumento de temperatura nos revestimentos da asa e da fuselagem. Os efeitos acima referidos são em grande parte devido a um escoamento que na literatura inglesa é designado de “ground vortex” e que surge devido à presença de um escoamento cruzado (vento ou o próprio movimento do avião). O escoamento cruzado quando interage com o jacto de parede radial, que resulta do espraiamento do jacto incidente do avião, origina o “ground vortex”. Estudos publicados sobre este tipo de escoamento são reduzidos e os poucos que aparecem reportam este tipo de escoamento num contexto secundário, pois grande parte da análise é direccionada para o problema do jacto incidente, que tem sido estudado para diversas configurações e condições de operação.

O estudo que se apresenta nesta dissertação é dedicado à identificação de parâmetros e regimes associados às instabilidades e efeitos secundários presentes no escoamento “ground vortex”. A parte mais relevante do “ground vortex” é produzido experimentalmente através de uma configuração bidimensional, resultante da interacção de um escoamento camada limite com um escoamento jacto de parede. O escoamento jacto de parede é produzido separadamente com base numa configuração bidimensional que anteriormente foi utilizada no estudo de um escoamento “repuxo”. O escoamento camada limite é produzido por um túnel de vento de sopro convencional. A interacção do escoamento jacto de parede com o escoamento camada limite dá origem a uma região com escoamento bastante curvo. Essa região pode ser estudada para diferentes razões de velocidades entre o escoamento jacto de parede e o escoamento camada limite. Esta dissertação apresenta uma análise detalhada do escoamento “ground vortex” e segue um estudo anteriormente elaborado, onde foi detectada uma pequena zona de recirculação, localizada a montante do ponto de separação, que não tinha sido reportada para este tipo de escoamento.

Este estudo apresenta um conjunto de medições efectuadas com um velocímetro Laser-Doppler para uma razão de velocidades entre o escoamento camada limite e o escoamento jacto de parede de valor 2. É também feita uma análise às características do campo de velocidades médio e turbulento, incluindo uma análise às duas componentes da velocidade, ou seja, a componente vertical e a componente horizontal.

Os resultados mostraram a possível presença de um pequeno escoamento vórtice localizado a montante do ponto de separação. Na zona de separação, onde provavelmente está o pequeno escoamento vórtice, foram identificados espectros de energia com a presença de uma pequena “bossa”, que está localizada numa largura de banda de baixas frequências, indicando a existência de concentração de energia turbulenta instável nesta zona.

A sequência encontrada para o desenvolvimento do vórtice secundário situado perto do ponto de separação da zona de colisão, através de estudos de visualização, pode ser interpretada como uma oscilação da zona de separação ou também por uma oscilação na origem virtual do escoamento deflectido. A presença de diagramas bimodais na componente horizontal da velocidade média localizados na zona de separação, confirma o comportamento de oscilação. Apesar da estrutura turbulenta na zona de separação apresentar um comportamento instável, os espectros de energia analisados para a componente horizontal da velocidade média, não revelaram a presença de picos de amplitude significativa na frequência. Contudo na zona central onde o escoamento é deflectido, ou seja, na zona de repuxo onde a componente vertical da velocidade média atinge os seus máximos, foram identificados casos pontuais com picos de energia distintos.

Abstract

A primary design consideration for S/VTOL aircraft is the flow environment induced by the propulsion system during hover with zero or small forward momentum. Ground effect phenomena may occur and change the lift forces on the aircraft, cause re-ingestion of exhaust gases into the engine intake and raise fuselage skin temperatures. An important source of each is the ground vortex which forms far upstream of the impinging jet when the resulting radial wall jet meets a crossflow. Measurements of this type of flow are very scarce, and have only been reported in the context of a secondary flow within the impinging jet flow problem with relatively different configurations and operating conditions.

The present thesis is dedicated to the identification of the parameters and relevant regimes associated with instabilities and other secondary effects of a ground vortex flow. To avoid the influence of the impinging region a plane wall jet is produced independently using a configuration already used to study two-dimensional upwash flows. The wall jet collides with the boundary layer produced using a conventional wind tunnel giving rise to a highly curved region, which can be studied for different velocity ratios between the wall jet and crossflow. This thesis presents a detailed analysis of a ground vortex flow resulting from the collision of a wall jet with a boundary layer, and follows a previous study, which has detected a small recirculating zone, located upstream the separation point not yet reported before for this type of flows.

Laser Doppler measurements are presented for a wall jet-to-boundary layer velocity ratio of 2, and include mean and turbulent velocity characteristics along the two normal directions contained in planes parallel to the nozzle axis.

The results revealed the existence of a very low broadband humps in the frequency spectra indicating concentration of unsteady turbulent energy. The source of this low frequency unsteadiness is probably associated with a small vortex located upstream the separation point.

The particular ordered sequence that was identified from the visualization studies for the small recirculation zone that appears near the separation point can also be interpreted as an oscillation of the separation zone or of the virtual deflected flow origin. In spite of the

ABSTRACT

apparent organized sequence of the turbulent structure of the collision zone, the power spectra of the horizontal velocity component does not exhibit any pronounced particular peak for the same location. In the central zone of the upwash flow where the maximum values of the vertical velocity component occurs, additional distinct high frequency peaks were also identified.



Figura 1. 1 Avião X35B SVTOL

Agradecimentos

Desejo manifestar o meu agradecimento ao meu orientador científico, Professor Doutor Jorge Manuel Martins Barata, pelos seus conselhos e orientação durante todas as fases deste trabalho bem como a sua disponibilidade sempre presente nos momentos mais difíceis.

Ao professor Doutor André Resende Rodrigues Silva também agradeço toda a transmissão de conhecimento sobre o software Tecplot que contribuiu para a valorização desta tese.

Desejo ainda agradecer a disponibilidade e apoio mostrado pelo meu amigo e colega de curso, Alexandre Maneta, pois contribuiu para que esta tese ficasse mais ilustrada em termos de desenhos.

Desejo também exprimir o agradecimento aos meus pais que muito trabalharam para garantir os meus estudos. O seu apoio psicológico e monetário contribuiu em grande parte para a realização desta tese.

Samuel Ribeiro
Covilhã, 2008

Índice

| | |
|-----------------------------------------------------------------|-------------|
| <i>Índice de figuras</i> | <i>x</i> |
| <i>Índice de tabelas</i> | <i>xiii</i> |
| <i>Nomenclatura</i> | <i>xiv</i> |
| <i>Capítulo 1</i> | <i>1</i> |
| INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 A notação aplicada | 1 |
| 1.2 Os escoamentos estudados | 2 |
| 1.3 Revisão Bibliográfica | 3 |
| 1.4 Objectivo da dissertação | 12 |
| <i>Capítulo 2</i> | <i>17</i> |
| MÉTODO EXPERIMENTAL | 17 |
| 2.1 Introdução | 17 |
| 2.2 Descrição do método | 17 |
| 2.3 Instalação experimental | 23 |
| 2.4 Análise de erros | 30 |
| <i>Capítulo 3</i> | <i>31</i> |
| RESULTADOS | 31 |
| 3.1 Introdução | 31 |
| 3.2 Instabilidades do escoamento (zona de recirculação) | 31 |
| 3.3 Definição completa das instabilidades no campo experimental | 44 |
| <i>Capítulo 4</i> | <i>53</i> |
| CONCLUSÃO | 53 |
| <i>Trabalhos futuros</i> | <i>A</i> |
| <i>Bibliografia</i> | <i>B</i> |

Índice de figuras

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1. 1 Avião X35B SVTOL | vii |
| Figura 1. 2 Avião militar X35B na fase de aterragem..... | 1 |
| Figura 1. 3 Ilustração esquemática dos vários escoamentos resultantes de dois jactos incidentes, (Saripalli 1987)..... | 4 |
| Figura 1. 4 Jactos incidentes numa superfície plana com a presença de um escoamento cruzado, (Barata et al, 2006b) | 5 |
| Figura 1. 5 Formação do “horseshoe ground vortex” devido à presença do escoamento cruzado,(Barata, 1996a)..... | 7 |
| Figura 1. 6 Pequena zona de recirculação com a ilustração das possíveis linhas de corrente para uma razão de velocidades $U_e = 0.58$, (Barata et al, 2008) | 11 |
| Figura 1. 7 A figura está dividida em duas regiões. Uma região está junto ao jacto incidente. Enquanto que a outra região se encontra na zona onde o escoamento cruzado que colide com o jacto de parede. Contudo esta última zona será analisada em detalhe nesta tese..... | 12 |
| Figura 1. 8 A imagem traduz a vista de cima do “Ground Vortex” com a forma de “horseshoe” devido à presença do escoamento “CrossFlow”. Assim no plano de simetria a componente transversal da velocidade w é anulada de acordo com o esquema acima mostrado. | 13 |
| Figura 1. 9 A pequena zona de circulação que foi identificada a montante do ponto de separação (esquematizado na figura 1.10), sendo posicionada dentro do círculo acima ilustrado. | 14 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. 10 Esquema dos escoamentos presentes neste estudo. Assim pode ser visto que o ground vortex resulta da colisão do escoamento jacto de parede (do inglês, wall jet) com o escoamento. | 15 |
| Figura 2. 1 Série de frinjas de interferência na intersecção de raios | 18 |
| Figura 2. 2 Diagrama de funcionamento do LDV | 19 |
| Figura 2. 3 Unidade de movimento que suporta o sistema de recepção e emissão óptico. | 21 |
| Figura 2. 4 Ambiente de trabalho do software BSA Flow | 21 |
| Figura 2. 5 Máquina de Fumos Techno-Fog Jem..... | 23 |
| Figura 2. 6 Posição dos escoamentos utilizados na experiência. À esquerda temos o escoamento jacto de parede e à direita o escoamento camada limite, porém na região central temos o “ground vortex” (também considerado como curved flow)..... | 23 |
| Figura 2. 7 Mesa de atravessamento sobre as guias | 26 |
| Figura 2. 8 Gráficos de calibração da instalação experimental com base na velocidade da camada limite, U_{mean} , pressão dinâmica, e no valor da frequência indicada pelo variador electrónico com a frequência a variar no sentido crescente e no sentido decrescente. ... | 27 |
| Figura 2. 9 Desenho da instalação experimental, mostrando o plano vertical de simetria da onde foram efectuadas as medições..... | 28 |
| Figura 2. 10 Instalação experimental..... | 29 |
| Figura 2. 11 Perfis de velocidade: a) jacto de parede, b) camada limite. U_{mean} corresponde à componente horizontal da velocidade média, que neste caso corresponde à velocidade média, uma vez que não existe componente vertical em ambos os perfis..... | 30 |
| Figura 3. 1 Sequência encontrada por Barata et al (2008) no comportamento do pequeno vórtice secundário..... | 32 |
| Figura 3. 2 Diagrama de vorticidades. As vorticidades induzidas pelos dois escoamentos estão ilustradas a tracejado na figura..... | 33 |

Figura 3. 3 Perfis horizontais da velocidade média $U_e= 0.5$: a) componente horizontal da velocidade, U_{mean} ; b) componente vertical da velocidade, V_{mean} 35

Figura 3. 4 Perfis horizontais das tensões normais para uma razão de velocidades $U_e= 0.5$: a) tensão normal horizontal, $\sqrt{u'^2}$; b) tensão normal vertical, $\sqrt{v'^2}$ 36

Figura 3. 5 Perfis horizontais da tensão de corte $\overline{u'v'}$ para uma razão de velocidades $U_e= 0.5$: 39

Figura 3. 6 Perfis verticais da velocidade com $U_e= 0.5$: a) componente horizontal, U_{mean} ; b) componente vertical, V_{mean} 41

Figura 3. 7 Perfis verticais da estrutura turbulenta com $U_e= 0.5$: a) perfis verticais da tensão normal, $\sqrt{u'^2}$; b) perfis verticais da tensão normal, $\sqrt{v'^2}$ 42

Figura 3. 8 Perfis verticais da estrutura turbulenta com $U_e= 0.5$: perfis verticais da tensão de corte, $\overline{u'v'}$ 43

Figura 3. 9 Linhas de valor constante das componentes da velocidade média $U_e = 2$: a) componente horizontal, U_{mean} ; b) componente vertical, V_{mean} 44

Figura 3. 10 Linhas de valor constante dos parâmetros da estrutura turbulenta com $U_e = 2$: a) tensão normal do plano horizontal, $\sqrt{u'^2}$; b) tensão normal do plano vertical, $\sqrt{v'^2}$; c) tensão de corte, $\overline{u'v'}$ 46

Figura 3. 11 Mapa de histogramas encontrados para $U_e = 2$: a) componente horizontal da velocidade, U_{mean} ; b) componente vertical da velocidade, V_{mean} 49

Figura 3. 12 Diagrama dos espectros de energia para $U_e=2$: a) componente horizontal da velocidade, U_{mean} ; b) componente vertical da velocidade, V_{mean} 50

Figura 3. 13 Espectro da componente vertical da velocidade, V_{mean} com picos de elevada frequência em $(X,Y,Z)=(-20,108,0)$ para $U_e=2$ 51

Índice de tabelas

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2. 1 Principais características do Velocímetro Laser Doppler de acordo com Barata et al, (2005)..... | 20 |
| Tabela 2. 2 Dimensões características da instalação experimental . | 24 |

Nomenclatura

- D = diâmetro interior do jacto
- f = frequência
- h = distância entre a saída do jacto e a superfície incidente
- h_v = altura do ground vortex
- U = componente horizontal da velocidade na direcção do escoamento cruzado,
 $U = U_{mean} + u'$
- U_e = razão de velocidades entre o escoamento cruzado e o escoamento jacto de parede,
 $U_e = U_o / U_j$
- U_o = velocidade média do escoamento cruzado
- U_j = velocidade média do escoamento jacto de parede (velocidade média do jacto à saída da tubeira)
- u' = componente horizontal da perturbação da velocidade na direcção do escoamento cruzado
- u'_{rms} = componente horizontal da perturbação da velocidade na direcção do escoamento cruzado *rms*, $\sqrt{u'^2}$
- $\overline{u'v'}$ = tensão de corte de Reynolds turbulenta
- V = componente vertical da velocidade, $V = V_{mean} + v'$
- v' = componente vertical da perturbação da velocidade
- v'_{rms} = componente vertical da perturbação da velocidade *rms*, $\sqrt{v'^2}$
- X = coordenada horizontal na direcção do escoamento cruzado
- Y = coordenada vertical
- w = componente transversal da velocidade, ou seja na direcção normal ao escoamento cruzado.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 A notação aplicada

Nesta dissertação empregam-se, sempre que possível, termos portugueses mesmo que a tradução de termos ingleses, de uso não vulgarizado, envolva o uso de um número superior de palavras. Também serão empregues termos em inglês, uma vez que grande parte da bibliografia que aborda o assunto estudado, se encontra escrita na língua inglesa e que para uma melhor compreensão é utilizado o vocabulário escrito em inglês. Todo o vocabulário escrito em inglês que apareça fora de parêntesis será apresentado entre aspas. Nas figuras, também são utilizados termos em inglês, uma vez, como referido anteriormente, a bibliografia encontra-se toda em inglês. Este tipo de escrita é aplicado para que possíveis erros emergentes da tradução sejam evitados, e por outro lado pelo facto de não desrespeitar os próprios autores, algumas figuras são apresentadas com expressões escritas em inglês.



Figura 1. 2 Avião militar X35B na fase de aterragem

Para efeitos de simplificação a palavra escoamento é omitida nas referências aos escoamentos camada limite, jacto de parede e “ground vortex”.

1.2 Os escoamentos estudados

O assunto abordado nesta tese tem interesse prático em grande parte, para os aviões de “descolagem rápida e aterragem vertical” que de acordo com a literatura inglesa se designam como sendo os aviões STOVL¹ e no qual pode ser referido como exemplo, o avião militar recentemente desenvolvido, o *X35B Joint Strike Fighter* (figuras 1.1 e 1.2). Estes aviões utilizam jactos incidentes (do inglês, *impinging jets*) que originam um escoamento bastante curvo², pois quando incidem numa superfície impermeável (neste caso a pista), o escoamento é espraído radialmente (do inglês, *spread*). A figura 1.4 ilustra o comportamento de dois jactos incidentes sobre uma superfície impermeável que mostra o espraçamento, porém também pode ser visualizado o “ground vortex” que surge devido à presença do “crossflow” ou escoamento cruzado. O escoamento cruzado pode surgir caso exista ventos laterais no momento da aterragem/descolagem do avião, ou então simplesmente devido à pequena velocidade relativa do avião no momento da aterragem/descolagem. O avião quando opera na fase de aterragem/descolagem apresenta instabilidades, contudo grande parte dessas instabilidades aparecem devido ao comportamento turbulento do escoamento tridimensional que se forma na parte inferior do avião. Vários estudos foram elaborados no sentido de tentar perceber o comportamento deste escoamento complexo. Sabe-se que o designado “ground vortex” é um dos responsáveis pelas instabilidades. A figura 1.3 ilustra os escoamentos responsáveis pela formação do “ground vortex”, que surge quando o escoamento jacto de parede (do inglês, *wall jet flow*) colide com o escoamento cruzado. O escoamento jacto de parede resulta do jacto incidente que é deflectido por uma superfície plana. Na figura4, descrita por Saripalli (1987) são esquematizados os vários escoamentos resultantes de dois jactos incidentes, porém pode ser observado o escoamento jacto de parede designado pelo número 3.

Neste estudo pretende-se perceber as instabilidades resultantes do “ground vortex”, resultante da colisão de um escoamento jacto de parede (do inglês *wall jet* que é o escoamento resultante do espraçamento do jacto incidente) com um escoamento cruzado (do

¹ STOVL, designado na literatura inglesa como sendo “Short Take-off and Vertical Landing Aircraft”

² As palavras inglesas que são utilizadas para designar este escoamento são “highly curved flow”

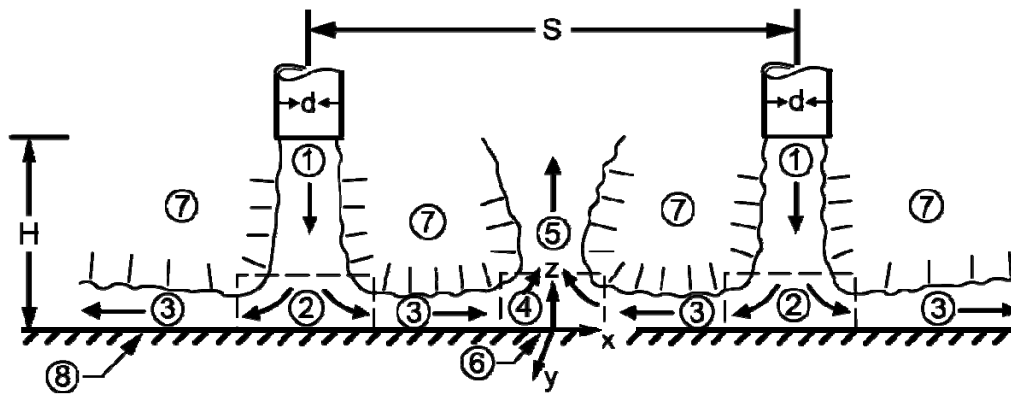
inglês *crossflow*) que apresenta o mesmo perfil de velocidades de um escoamento camada limite. Assim como meio para tentar perceber as instabilidades, foram realizadas medições com um Laser Doppler Velocimeter (LDV) para uma razão de velocidades entre o escoamento jacto de parede e o escoamento cruzado $U_e=0,5$. Deste estudo experimental resultou a obtenção de um conjunto de medidas de velocidade média e turbulenta levaram a uma definição geral de todo o campo experimental (do inglês, *flowfield*), cujo detalhe permitiu avaliar o comportamento da zona de estagnação comprovando a existência de uma pequena zona de recirculação perto do ponto de estagnação que pode estar associada à comparência das instabilidades do “ground vortex”.

1.3 Revisão Bibliográfica

Nesta secção é feita uma revisão bibliográfica que tenta abranger na medida do possível grande parte da investigação publicada até à data presente relacionada com os aviões S/VTOL³, uma vez que abrange número quantitativo de publicações. Na investigação realizada até à presente data, com aplicabilidade em aviões S/VTOL, realça-se a distinção dos vários estudos feitos nesta matéria. Esses estudos podem ser repartidos em dois temas ou situações, um primeiro relacionado com o estudo de um ou mais jactos incidentes sobre superfícies planas que engloba estudos experimentais e numéricos com ou sem a presença de escoamento cruzado. No caso de vários jactos incidentes, pode existir a formação do “fountain upwash”⁴, conforme se ilustra na figura 1.3.

³ Do ingles, “Short/Vertical Take-Off and Landing Aircraft”

⁴ É um escoamento “em repuxo”, que se forma devido à colisão de dois jactos de parede



- | | |
|------------------------------|----------------------------------------|
| 1.Lift jet flow | 5.Fountain up-wash flow |
| 2.Jet impingement region; | 6.Wall jet interaction stagnation line |
| 3.Wall jet flow | 7.Entrainment |
| 4.Fountain formation region; | 8.Ground Plane |

Figura 1. 3 Ilustração esquemática dos vários escoamentos resultantes de dois jactos incidentes, (Saripalli 1987).

O segundo tema abordado pode ser relacionado mais com o “ground vortex”, embora exista uma ligação com o primeiro tema, uma vez que o “ground vortex” aparece através de um jacto incidente com a presença de um escoamento cruzado, todavia o que se pretende é identificar e descrever todo o comportamento do “ground vortex”. A análise apresentada nesta tese insere-se mais no segundo tema. Nestes dois temas os parâmetros mais importantes no estudo do escoamento por baixo de um avião são a razão de velocidades, U_e e a altura de incidência h/D .

Esta revisão tem como objectivo definir melhor a contribuição desta dissertação. É ainda de referir que simplesmente são citados os principais investigadores que apresentaram trabalhos com aplicação nos aviões de S/VTOL. Muitos dos estudos já publicados e com relevância no problema de S/VTOL usaram pequenas distâncias na aplicação do jacto incidente ($h/D < 8$) e baixas razões de velocidade entre o escoamento cruzado e o escoamento jacto de parede ($U_e < 0,1$). Alguma informação relevante para o escoamento formado debaixo de um avião de S/VTOL quando este se encontra junto à pista foi tida em conta em alguns casos limite como por exemplo $h/D = 0,4$, contudo sem a presença de escoamento cruzado (Saripalli, 1983 e 1987). Foram realizados alguns estudos para compreender o efeito do escoamento cruzado com a presença de uma superfície aplicada no plano de saída do jacto. Utilizou-se essa configuração, pois o que se pretendia era simular as partes inferiores de um avião S/VTOL, nomeadamente o intradorso das asas e a fuselagem.

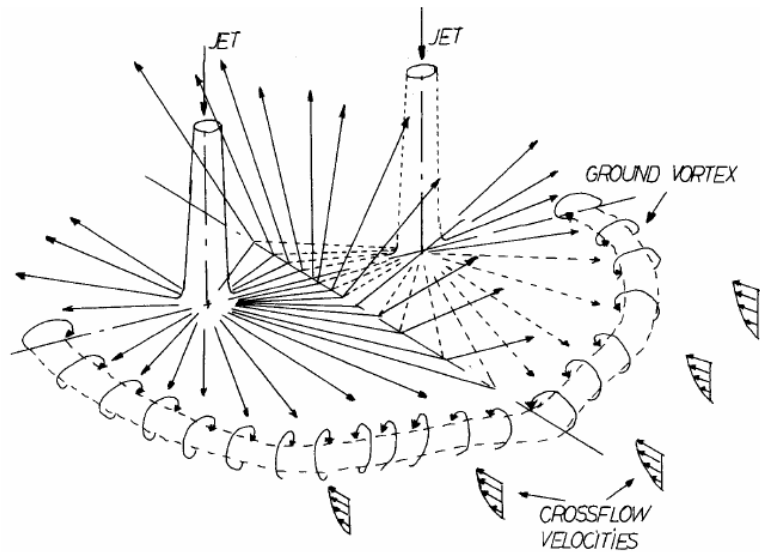


Figura 1. 4 Jactos incidentes numa superfície plana com a presença de um escoamento cruzado, (Barata et al, 2006b) .

Escoamentos que apresentam uma forma curva, que na literatura inglesa são designados como “curved flows” são comuns na natureza. Este tipo de escoamento, por exemplo, surge quando um determinado escoamento incide sobre uma superfície impermeável. A superfície obriga a que o escoamento seja deflectido em diversas direcções de acordo com o que é esquematizado na figura 1.4.

Dois exemplos de aplicabilidade deste tipo de escoamentos são por exemplo o arrefecimento de pás de turbina e o escoamento produzido pelos jactos de um avião de “descolagem rápida e aterragem vertical” designado geralmente por S/VTOL. No último exemplo, quando o avião se encontra na situação de descolagem ou aterragem utiliza jactos incidentes direccionados para a pista. Estes jactos permitem que o avião permaneça no ar (situação de descolagem ou aterragem), contudo quando eles incidem na pista espriam-se radialmente e a partir do ponto de incidência, formam-se escoamentos com a configuração de jactos de parede junto à superfície da pista. A interacção dos jactos de parede com o plano da pista dá origem a perdas no “efeito sustentador” resultante dos jactos incidentes (jactos auxiliares de descolagem ou aterragem). Estas perdas podem reduzir de maneira significativa a eficácia do aparelho em termos de carga e de raio de acção. Estes efeitos envolvem perdas do poder de descolagem que estão associadas com o “arrastamento”(do

inglês, *entrainment*) de ar quando o avião está perto do solo em transição para voo horizontal. Em condições de aterragem/ descolagem o arrastamento do ar que envolve os jactos ocasiona uma diminuição da pressão nas superfícies inferiores da fuselagem e asas, resultando igualmente numa perda de poder de descolagem (do inglês, *suckdown*). Adicionalmente também podem ocorrer perdas de potência dos motores devido à re-ingestão dos gases quentes e instabilidades causadas pela incidência do “escoamento em repuxo”⁵ na fuselagem e asas do aparelho. Outros efeitos, devidos à existência de um escoamento lateral, podem ocorrer sendo os jactos auxiliares da descolagem e o repuxo deflectidos, alterando a direcção e o ponto de aplicação da força de descolagem/sustentação e originando momentos de “mergulho” e “rolamento” que tornam difícil o controlo do avião (e.g. Barata, 1989).

Na situação em que os escoamentos jacto de parede interagem com ventos cruzados (do inglês, *free stream* ou *crossflow*) existe a formação de um escoamento bastante curvo, segundo a bibliografia inglesa o anteriormente designado “ground vortex”. Este tipo de escoamento forma-se a montante da zona de incidência do jacto sustentador e é influenciado por diversos parâmetros como a altura de incidência, velocidade do jacto incidente, se existe a presença de um escoamento cruzado, a geometria do bocal do jacto incidente, etc... As medições deste tipo de escoamento são raras, ou foram somente descritas no contexto de um escoamento secundário relativamente a estudos efectuados sobre escoamento de jacto incidente com diferentes configurações e condições de operação, sem interesse para aviões de aterragem e descolagem rápida / vertical.

1.3.1 Estudos Experimentais e Numéricos

De acordo com que foi referido anteriormente podemos dizer que o escoamento “ground vortex” é considerado um escoamento bastante curvo. Castro e Bradshaw (1976) analisaram a estrutura turbulenta de uma camada de mistura em situação de escoamento bastante curvo. Eles descreveram este tipo de escoamento como turbulento e com propriedades de difícil análise. Um dos exemplos com propriedades de difícil análise por eles referido, são as taxas de deformação adicionais (do inglês, *extra strain rates*) e a produção de turbulência através da interacção das tensões normais com as deformações normais. É ainda de referir que um jacto incidente sobre uma superfície plana também é caracterizado como sendo um escoamento bastante curvo, pois a superfície plana obriga a que o jacto incidente seja deflectido

⁵ Do inglês, “upwash flow”, “fountain flow” ou “fountain upwash flow”

radialmente nas várias direcções. De acordo com Rockwell e Naudascher (1979) descreveram que os jactos axisimétricos, onde podemos inserir também os jactos incidentes sobre uma superfície plana, podem originar oscilações na estrutura do escoamento. Saripalli (1983) realizou estudos experimentais

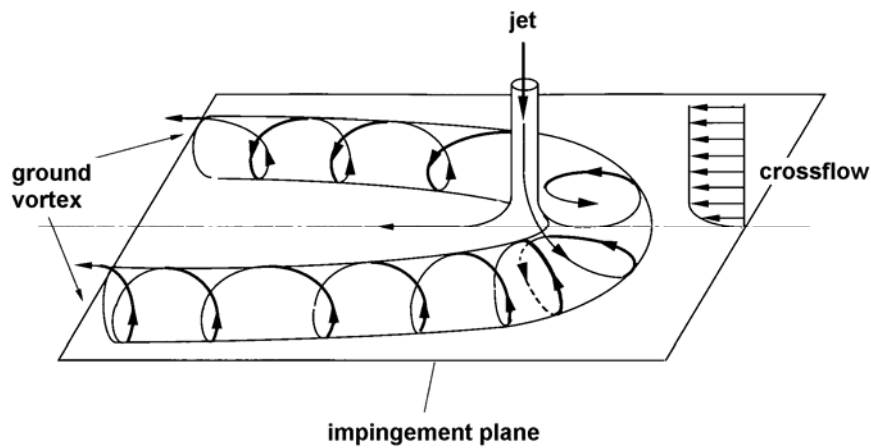


Figura 1. 5 Formação do “horseshoe ground vortex” devido à presença do escoamento cruzado,(Barata, 1996a).

de visualização para múltiplos jactos incidentes e com e sem inclinação para diferentes alturas ($H/d \leq 11$), contudo Saripalli (1987) apresentou perfis de velocidade e quantidades turbulentas, obtidos com anemometria laser, relativos ao escoamento de dois jactos de água incidentes numa superfície. Os resultados mostram que a taxa de crescimento linear da secção transversal do escoamento em repuxo é independente da altura de incidência H . Embora as alturas dos jactos estejam dentro da gama de interesse para o S/VTOL, não é considerado o efeito de um escoamento cruzado que, na situação prática de um avião de S/VTOL pode ser responsável por fenómenos tão importantes como a deflexão dos jactos incidentes e escoamento em repuxo ou ainda a formação de uma zona de recirculação a montante do ponto de incidência, envolvendo o jacto com um “cachecol” (do inglês, *horseshoe vortex*).

Num estudo numérico realizado no mesmo ano (1987) por Van Dalsem et al, para um jacto incidente com a presença de um escoamento cruzado previu o aparecimento do “cachecol” com a forma de ferradura em torno do jacto incidente com a presença de um escoamento cruzado. Foi feito o estudo para diferentes alturas ($h/D= 3, 4, 6$ e 10) e para

$U_e=0,223$ e no mesmo estudo foram detectadas oscilações que interagem com o “ground vortex” mas com uma análise muito superficial por falta de dados experimentais.

Cimbala et al (1988) realizou um estudo experimental de visualização de um jacto incidente com um escoamento cruzado (formação do *horseshoe vortex*), no qual reforça as instabilidades encontradas no “ground vortex”, referindo que as instabilidades podem estar relacionadas com a vorticidade da camada de corte do jacto incidente. Foram estudadas várias razões de velocidade ($0,1 \leq U_\infty/U_j \leq 0,4$) para cada altura h/D a variar entre 1 e 4 e verificou-se que o “ground vortex” era movido para jusante (do inglês, *downstream*) diminuindo o seu tamanho à medida que U_∞/U_j aumentava. Verificou que com a colocação de uma placa ao mesmo nível da saída do jacto de parede, o “ground vortex” era forçado a mover-se para jusante. Com a colocação da placa também se verificou uma diminuição no tamanho do “ground vortex”.

Knowles e Bray (1990 e 1991) realizaram um estudo experimental para um e dois jactos incidentes na presença de um escoamento cruzado. No seu estudo variaram os parâmetros que afectam a posição do “ground vortex” (utilizaram alturas $H/d \leq 8$). Eles também realizaram um estudo numérico mas para um jacto incidente, onde esse estudo mostrou ser válido de acordo com os resultados experimentais, contudo reportaram o facto de o “flowfield” (campo de velocidades) apresentar bastantes instabilidades especialmente quando existia o repuxo formado pelos dois jactos incidentes.

Cimbala et al (1991) fizeram medições com fio quente através do qual analisaram o espectro de frequências no “ground vortex”, onde foi verificada uma largura de banda com alguns “picos” de frequência, indicando instabilidade a baixas frequências ($f=4\text{HZ}$ para um $h/D=3$ e $U_e=0,1$). Estas instabilidades foram explicadas devido a um fenómeno cíclico de oscilações encontrado, que é designado na literatura inglesa como “puffing”. Este fenómeno é descrito com um comportamento cíclico através de um aumento e diminuição de tamanho do “ground vortex”. No estudo deste fenómeno não foi encontrada nenhuma correlação que permitisse relacionar com algumas oscilações encontradas no campo de velocidades (do inglês, *flowfield*). Grande parte das oscilações a baixa frequência são atribuídas ao “ground vortex”, pois este aumenta o seu tamanho até um limite imposto pelo “flowfield” que alimenta o “ground vortex” até esgotar a sua capacidade em fornecer energia. Quando o “ground vortex” assume proporções máximas desaparece, mas devido à presença do escoamento cruzado forma-se novamente e assim sucessivamente tornando-se num processo quase periódico. As instabilidades do “ground vortex” dão origem a variações na altura,

particularmente a baixos valores de U_e , onde o vórtice ocasionalmente atinge uma altura pouco superior a 8 diâmetros de jacto para um $U_e = 0,05$. Nesta situação existe uma variação inversa da frequência, a qual tende quase sempre linearmente para zero quando U_e diminui.

Harman et al. (1994) introduziram uma técnica para redução do tamanho e das instabilidades que o “ground vortex” apresentava. A técnica consistiu em utilizar uma rede colocada no plano transversal sobre o jacto de parede, dando origem a uma “vedação” em forma de ferradura (do inglês, *horseshoe*) em torno do jacto incidente. O estudo foi realizado para $U_\infty/U_j = 0,15$ onde a colocação da rede obteve bons resultados, pois o tamanho do “ground vortex” e as suas instabilidades foram reduzidas em mais de 70%.

Barata et al. (1987, 1989, 1991[a,b], 1994 e 1996[a,b]) realizaram estudos para razões de velocidade baixas com uma placa à saída do jacto de parede, para as configurações de um, dois e três jactos. Estes estudos referem resultados experimentais e numéricos. Na parte experimental foi utilizado o LDV para a realização de medições com razões de velocidade $U_e = 0,014, 0,024$ e $0,033$ e com alturas de incidência do jacto de $h/D = 3, 4$ e 5 , contudo as medições foram elaboradas em escoamento cruzado confinado. Estes trabalhos incluem uma análise à estrutura turbulenta das regiões de incidência e de curvatura do escoamento (do inglês, *ground vortex*). Apesar de ter sido realizada uma análise exaustiva às regiões do escoamento, os resultados não mostraram a presença de nenhum histograma bimodal nas medições efectuadas com o LDV para as frequências discretas de um ou múltiplos jactos. Assim, dos seus resultados experimentais não se pode comprovar a existência de instabilidades ou oscilações discretas. Numa primeira análise estes resultados podem ser considerados surpreendentes, porém verifica-se que as instabilidades referidas no “ground vortex” foram, unicamente, descritas para configurações distintas como a de um jacto incidente não confinado. Uma extrapolação dos resultados descritos por Cimbalá et al. (1991), que apresenta um conjunto abrangente de dados relativos a oscilações para o caso de um escoamento não confinado, daria, para a situação de escoamento confinado apresentado por Barata et al (1989) uma frequência de “puffing” do “ground vortex” com cerca de $0,2$ Hz para um $U_e = 0,033$. Contudo, conforme foi indicado, as amostras tiveram sempre um mínimo de 10 000 valores medidos no volume de controlo formado pelos raios laser, com um data rate de cerca de 100 Hz, que seria suficiente para detecção da frequência de “puffing” e, por isso, revelando que nestas condições não deverá existir. Usando o mesmo tipo de extrapolação dos resultados de Cimbalá et al. (1991) ao caso de Barata et al. (1989) também a altura do “ground vortex” deveria ser $h/D = 6$ (de $3,5$ a $9,5$), o que seria impossível

por exceder a distância disponível ao escoamento cruzado entre a parede superior e inferior do canal utilizado ($h/D=3$ a 5).

Lawson et al (2002) observaram no “ground vortex” (formado através de um jacto incidente em regime compressível com um escoamento cruzado) com um PIV (Particle Image Velocimetry) que a posição do ground vortex oscilava com frequências entre $2,5$ e 5 Hz. Também observaram através de um LDA (Laser Doppler Anemometry) que as velocidades flutuavam com frequências entre 1 e 30 Hz. O estudo foi realizado com razão de velocidades baixas ($0,026 < U_e < 0,053$) e com razões de pressão no “nozzle” (tubeira), NPR (do inglês, *nozzle pressure ratio*), que variavam desde $2,3$ a $3,7$ e com uma altura de incidência h/D a variar entre 3 e 10 . Através do PIV detectaram a presença de pequenos vórtices secundários, mas para os classificar mais em detalhe concluíram que era precisa uma frequência mais elevada para a aquisição de dados no PIV.

Pandya et al (2003) realizaram um estudo numérico com base nos resultados experimentais de Cimbala (1991). Simularam um jacto incidente com a presença de um escoamento cruzado. As equações de Navier Stokes foram resolvidas através de um solver de nome OVERFLOW que permitiu a utilização de grandes espaçamentos temporais necessários para a detecção das pequenas frequências de “puffing” do “ground vortex”. As instabilidades encontradas no estudo numérico para o “ground vortex” mostraram estar em consonância com as instabilidades encontradas nos estudos experimentais.

Barata et al.(2004) analisaram o “ground vortex” resultante de um jacto incidente num escoamento cruzado confinado, tendo verificado que a forma, o tamanho e a localização do “ground vortex” era dependente da razão entre a velocidade média de saída do jacto e a velocidade média do escoamento cruzado. Foi identificado a existência de dois regimes. Um dos regimes é caracterizado pela interacção entre o “ground vortex” e o jacto incidente, enquanto que no outro regime o “ground vortex” encontra-se a montante da zona de incidência, não havendo contacto com o jacto incidente. Foi também descrito que a aceleração do escoamento cruzado sobre “ground vortex” resultava do fenómeno de blocagem produzido por este (estreitamento da área de passagem do escoamento cruzado) e devido ao efeito de confinamento. Verificou-se que esta aceleração do escoamento está directamente relacionada com a velocidade de saída do jacto incidente. Este resultado indicou que a influência do jacto de parede a montante não se encontra limitada à zona do “ground vortex”, mas difunde-se no sentido ascendente por um mecanismo ainda pouco relatado ou conhecido. Os resultados quantitativos obtidos com anemometria laser, bem como os resultados de visualização não revelaram nenhuma oscilação perceptível do

“ground vortex”. Verificou-se que o tamanho e a localização são simplesmente dependentes da razão de velocidades U_e e da distância de incidência, h/D para o caso de o escoamento cruzado ser confinado. Esses resultados parecem indicar que o facto de existir confinamento do escoamento pode atenuar eventuais instabilidades que possam existir no “ground vortex” como também foi referido por Cimbalá et al.(1988). O facto de o estudo de Cimbalá et al.(1991) não se ter dedicado ao efeito da velocidade do jacto incidente, U_j , pode ser uma indicação de que a razão de velocidades entre o jacto incidente e o escoamento cruzado, poderia ser também um parâmetro com algum relevo.

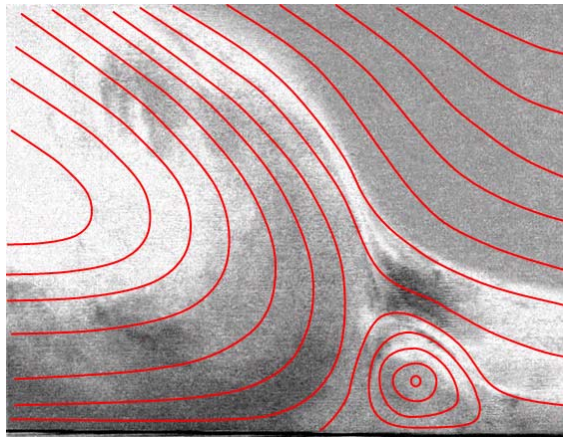


Figura 1. 6 Pequena zona de recirculação com a ilustração das possíveis linhas de corrente para uma razão de velocidades $U_e = 0.58$, (Barata et al, 2008)

Barata et al (2005) detectaram uma pequena zona de recirculação a montante do ponto de estagnação do “ground vortex” (através da interacção de um jacto de parede com o escoamento camada limite) para uma razão de velocidades $U_e = 0.58$, assunto não reportado anteriormente. Lawson et al (2002) detectaram através do PIV o aparecimento de vórtices secundários quando o “ground vortex” aumentava o seu tamanho e que por sua vez desapareciam quando o “ground vortex” diminuía de tamanho, contudo não lhes foi possível identificar claramente a sua localização. Descreveram apenas que este comportamento do escoamento era bastante instável. Provavelmente estes vórtices secundários podem estar associados à pequena zona de recirculação.

Recentemente Saddington et al. (2007) observou frequências distintas de oscilação para o caso de repuxo (do inglês, *fountain flow*) resultante de dois jactos incidentes em regime compressível e sem escoamento cruzado. As razões de pressão no “nozzle” (tubeira), NPR (do inglês, *nozzle pressure ratio*), variavam desde 1,05 a 4 e com uma altura de

incidência $h/D=4$. Os picos na densidade espectral de energia foram encontrados para uma frequência de 180 Hz , que é bastante diferente das reportadas para o caso do “ground vortex”, que só aparece quando há um escoamento cruzado.

Presentemente Barata et al (2008) num estudo mais detalhado do “ground vortex” analisaram a presença do pequeno vórtice secundário (pequena zona de recirculação) situado a montante do ponto de estagnação resultante da colisão de jacto de parede com o escoamento camada limite (“crossflow ou boundary layer” , ambas as expressões dizem respeito a escoamento cruzado) com um comportamento de “puffing” semelhante ao descrito por Cimbalá et al. (1991) com uma frequência de $8,33 \text{ Hz}$. Nesse estudo foi utilizado uma razão de velocidades $Ue = 0,58$.

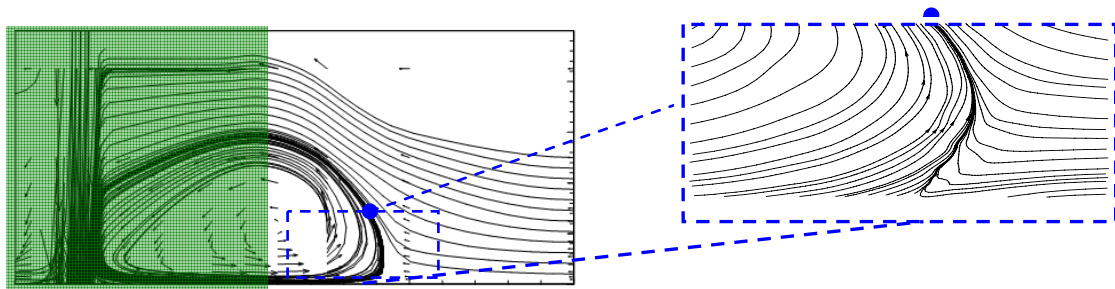


Figura 1. 7 A figura está dividida em duas regiões. Uma região está junto ao jacto incidente. Enquanto que a outra região se encontra na zona onde o escoamento cruzado que colide com o jacto de parede. Contudo esta última zona será analisada em detalhe nesta tese.

1.4 Objectivo da dissertação

O assunto abordado nesta tese é direccionado para a identificação de parâmetros e de regimes com alguma relevância no estudo das instabilidades do escoamento, onde sobretudo é pretendido compreender os efeitos secundários presentes no escoamento “ground vortex”. Para evitar a influência da região incidente (provocada pelo jacto incidente), de acordo com a figura 1.7, o “ground vortex” é produzido através da colisão de um jacto

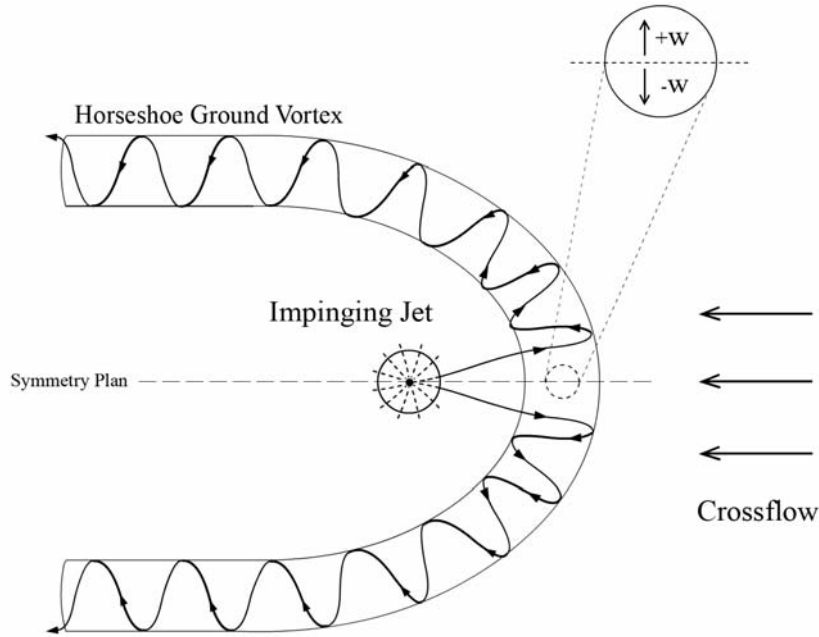


Figura 1. 8 A imagem traduz a vista de cima do “Ground Vortex” com a forma de “horseshoe” devido à presença do escoamento “CrossFlow”. Assim no plano de simetria a componente transversal da velocidade w é anulada de acordo com o esquema acima mostrado.

de parede criado sem jacto incidente (do inglês, *impinging jet*), com uma camada limite. Dado que a zona de maior importância é aquela que se situa mais a montante, no plano vertical de simetria, a componente transversal da velocidade média, w , é nula, pelo que o escoamento tem características bidimensionais. Esta hipótese foi usada anteriormente, com sucesso, por Gilbert (1983) no estudo dos escoamentos em repuxo (do inglês, *fountain upwash*). A configuração utilizada encontra-se esquematizada na figura 1.10, onde o jacto de parede colide com o escoamento camada limite produzido por um túnel de vento convencional (escoamento cruzado, *boundary layer* ou *crossflow*), resultando uma região com escoamento bastante curvatura (do inglês, *highly curved flow region*). A instalação foi projectada e construída de maneira a que esta região possa ser estudada para diferentes razões de velocidades entre o escoamento cruzado e o jacto de parede.

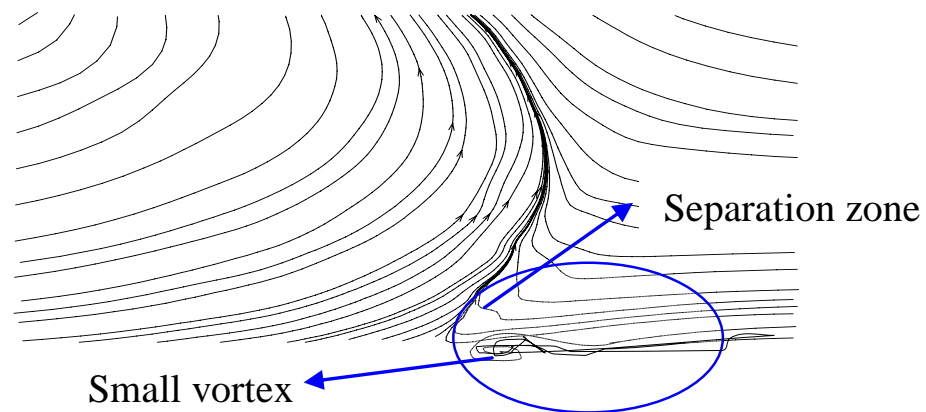


Figura 1. 9 A pequena zona de circulação que foi identificada a montante do ponto de separação (esquemático na figura 1.10), sendo posicionada dentro do círculo acima ilustrado.

Assim, no seguimento do trabalho descrito por Barata et al. (2005), que identificou uma pequena zona de recirculação a montante do ponto de separação (ver figura 1.9), esta tese apresenta uma análise detalhada do escoamento “ground vortex” numa configuração bidimensional ainda não referida anteriormente para este tipo de escoamento que resulta da colisão de um jacto de parede com uma camada limite. São abordados os seguintes aspectos:

- Campo médio e turbulento
- Histogramas das componentes da velocidade e espectros de energia.

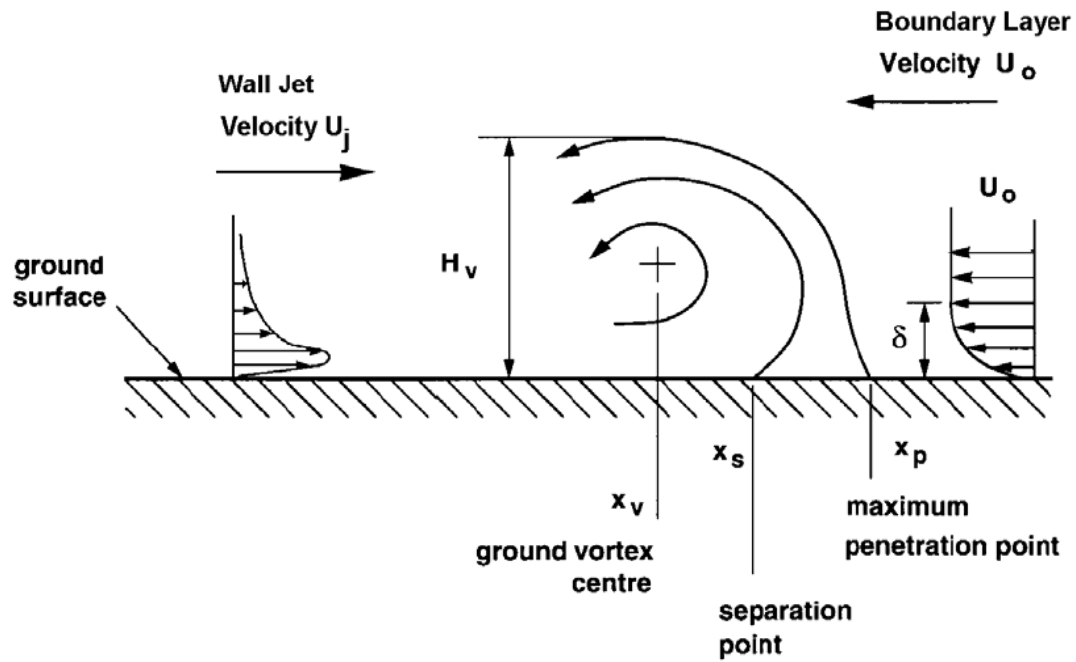


Figura 1. 10 Esquema dos escoamentos presentes neste estudo. Assim pode ser visto que o ground vortex resulta da colisão do escoamento jacto de parede (do inglês, *wall jet*) com o escoamento.

Capítulo 2

MÉTODO EXPERIMENTAL

2.1 Introdução

Este capítulo apresenta o método utilizado no estudo experimental, que se baseou na definição em pormenor do campo de velocidades através de medições obtidas com um LDV (Laser Doppler Velocimeter). Foi definida uma malha de medições tanto para o plano vertical como para o plano horizontal, de forma a resolver os gradientes mais intensos, espectáveis a partir da visualização do escoamento.

2.2 Descrição do método

2.2.1 Funcionamento do LDV

A aquisição de dados do campo experimental (do inglês, *flowfield*) foi feita através da técnica de anemometria laser, ou seja, através de LDV (Laser Doppler Velocimeter) *Dantec Flowlite 2D*. O LDV é uma técnica de medição óptica não intrusiva que é utilizada para ler as velocidades num determinado ponto no escoamento.

Na realidade o LDV não mede a velocidade do escoamento, mas sim a velocidade das partículas suspensas nele. Assim para que a medição se torne eficaz, existe a necessidade de introduzir partículas no escoamento, o que se designa na literatura inglesa como “seeding”. Estas partículas presentes no escoamento funcionam como umas “sondas” que são introduzidas no escoamento e que permitem obter a leitura de todo o campo de velocidades. Contudo algumas considerações devem ser tomadas para a escolha destas partículas, ou seja, estas não só devem ter um tamanho reduzido de forma a serem transportados no escoamento, mas também devem apresentar um tamanho suficientemente grande para dispersar uma quantidade de luz com uma frequência de Doppler que seja detectada no foto-detector. Idealmente estas partículas devem apresentar a mesma massa

específica do fluido de trabalho (podendo as forças de corpo devido à gravidade serem desprezadas). Estas também devem ter uma forma que reduza o possível aparecimento de forças de resistência, que por sua vez podem alterar as características do campo de velocidades.

As medições das velocidades são feitas com base no modelo de frinjas. O modelo de frinjas baseia-se na observação de que as ondas de luz dos raios incidentes interferem, formando uma série de frinjas de interferência na intersecção dos raios, figura 2.1.

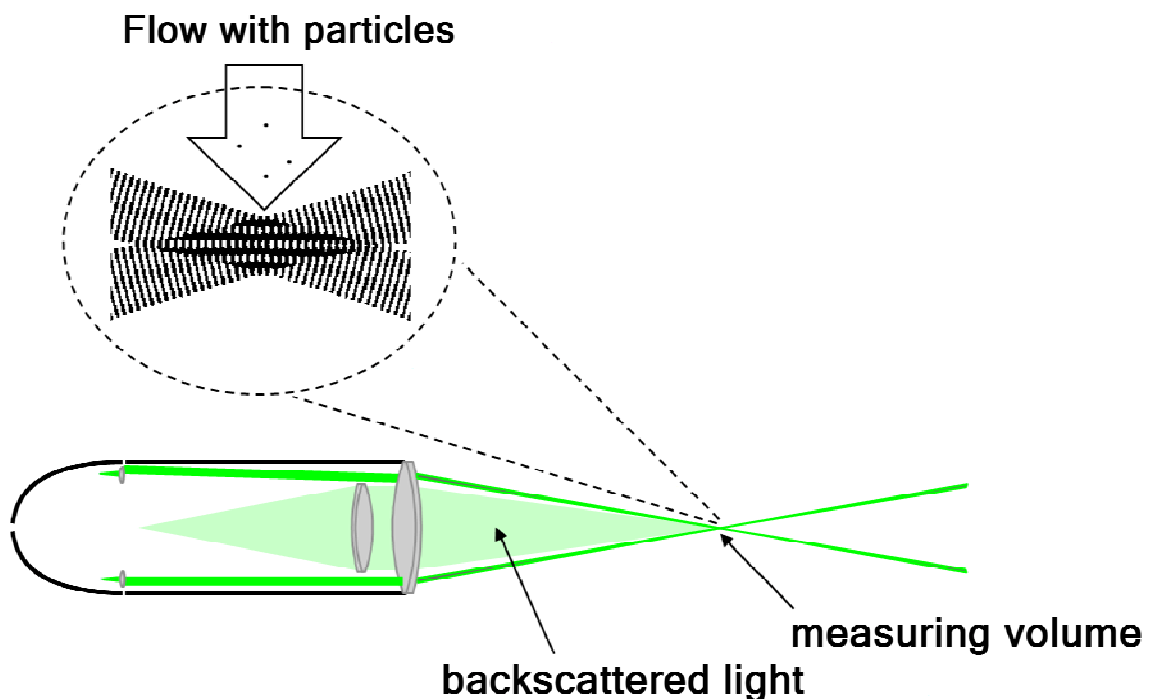


Figura 2. 1 Série de frinjas de interferência na intersecção de raios

Estas interferências na intersecção dos raios são provocadas pela passagem das partículas no volume de controle. A difusão de luz provocada pelas partículas que atravessam o volume de controle é capturada através do sistema óptico de emissão e recepção *FlowLite* que é do

tipo “back-scattered”⁶. Um foto-multiplicador converte as flutuações de intensidade de luz em sinais eléctricos que de seguida são convertidos pelo processador *BSA Flow* em dados de velocidade. Os resultados finais aparecem no *BSA Flow software*, onde duas componentes da velocidade podem ser lidas simultaneamente.

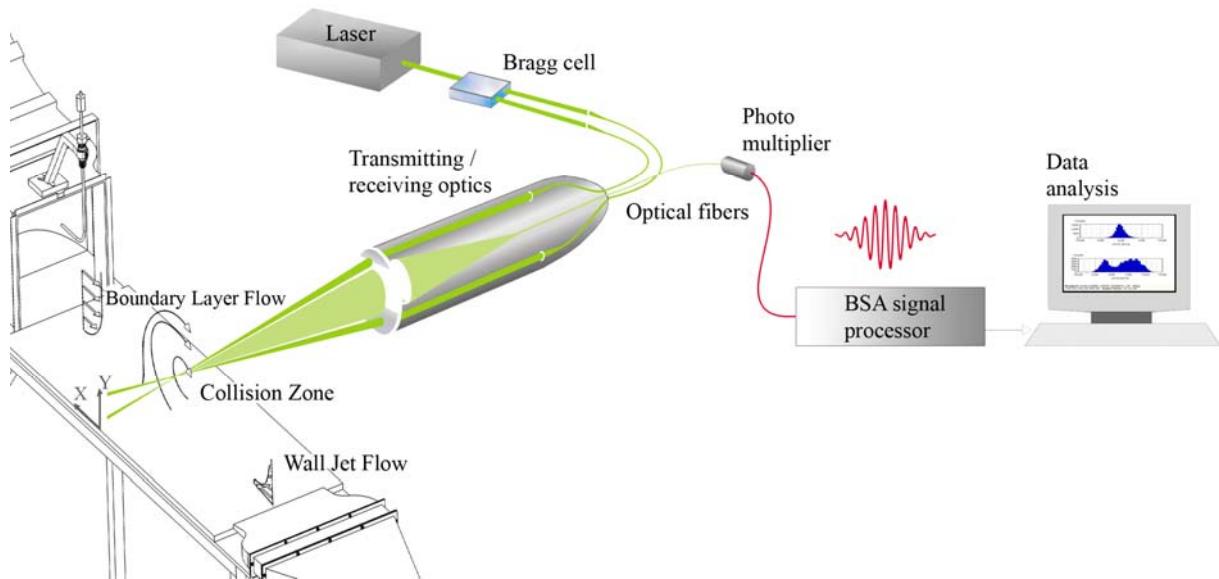


Figura 2. 2 Diagrama de funcionamento do LDV

2.2.2 Descrição das características

Este velocímetro, como foi referido anteriormente, utiliza uma configuração de dois raios (do inglês, *dual beam*), porém o sistema óptico funciona com a colecção de luz no mesmo lado que emite os raios laser em relação ao volume de controlo (do inglês, *backward-scattered*). O sistema laser em análise utiliza um laser de He-Ne com uma potência de $10mW$ e um laser “diode” de $25mW$. A sensibilidade ao sentido do escoamento foi introduzida por uma frequência $f_0 = 40MHz$ gerada numa célula de *Bragg*. Foi usada uma lente com uma distância focal de $400mm$ no sistema de transmissão de luz. O valor do meio ângulo formado entre os raios é de $2,8^\circ$ e as dimensões do volume de controle resultante

⁶ “back-scattered” significa que o receptor óptico, em relação ao volume de controlo se encontra do mesmo lado do emissor óptico

(com forma de elipsóide) são: $135 \times 6.54 \times 6.53 \mu\text{m}$ e $112 \times 5.46 \times 5.45 \mu\text{m}$, usando a definição de tamanho de raio baseada na intensidade e^{-2} .

As componentes da velocidade média, ou seja, a componente horizontal U_{mean} e a vertical V_{mean} , bem como as velocidades turbulentas e a tensão de corte $\overline{u'v'}$ foram calculadas pelo processador *Dantec BSA F60*. Este processador tem como característica o facto de apresentar dois canais preparados para o cálculo das velocidades. Na tabela 2.1 apresenta-se em resumo as características do LDV *Dantec Flowlite 2D*.

Tabela 2. 1 Principais características do Velocímetro Laser Doppler de acordo com Barata et al,(2005)

| | | |
|-------------------------------------------------------------------|-------------|-------------------|
| - Comprimento de onda, λ [nm] | 633 (He-Ne) | 532 (Diode Laser) |
| -Distância focal das lentes, f [mm] | 400 | 400 |
| -Diâmetro do raio, definido com base na intensidade e^{-2} [mm] | 1.35 | 1.35 |
| -Espaçamento entre raios, s [mm] | 38.87 | 39.13 |
| -Meio ângulo de intersecção dos raios, θ | 2.78° | 2.8° |
| - Espaçamento entre frinjas, δf [μm] | 6.53 | 5.45 |
| -Constante de transferência do velocímetro, K [MHz/ms-1] | 0.153 | 0.183 |

O sistema de recepção e emissão óptico (do inglês, *transmitting/ receiving optics*) foi colocado numa mesa de atravessamento tridimensional (liberdade de movimento nas três direcções, X, Y, Z), controlada directamente através do *software BSA Flow* para fixar todas as posições de medida. O volume de controle pode ser deslocado com o valor mínimo de $\pm 0,1\text{mm}$. A figura 2.4 mostra o ambiente de trabalho do *software BSA Flow*.



Figura 2. 3 Unidade de movimento que suporta o sistema de recepção e emissão óptico.

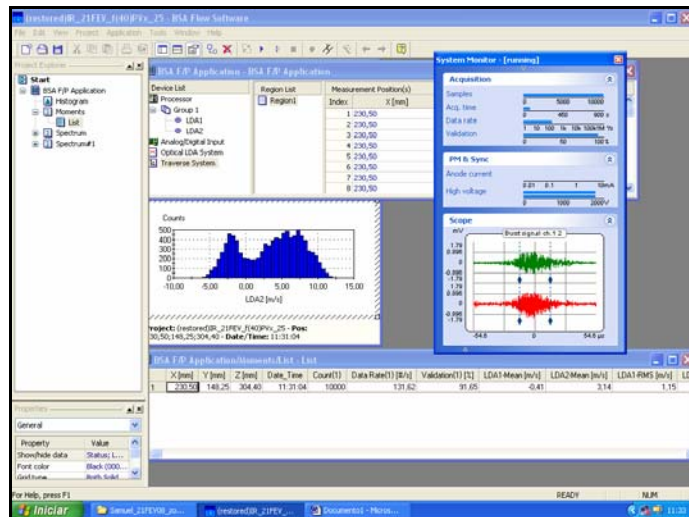


Figura 2. 4 Ambiente de trabalho do software BSA Flow

2.2.3 Partículas para dispersar a luz – “seeding”

As partículas que dispersam a luz dos raios laser têm uma enorme influência na qualidade do sinal.

A escolha do “seeding” adequado, depende de vários parâmetros. A primeira coisa a ter em consideração é o tipo de fluido com que se trabalha (por exemplo se é água ou ar) e com base nisso é que deve ser escolhido o melhor material a utilizar no “seeding”. No geral as partículas utilizadas devem ter o maior tamanho possível para dispersar uma boa

quantidade de luz, mas por outro lado, o seu tamanho deve ser limitado a partir do momento em que as partículas se tornem um obstáculo ao percurso do escoamento. Estas características permitem a obtenção de um bom “data rate” que é essencial no tratamento de dados. Assim o tamanho máximo permitido nas partículas diminui com o aumento da velocidade do escoamento, da turbulência e dos gradientes de velocidade. Idealmente as partículas devem oferecer o mínimo de resistência ao fluido e portanto o seu transporte deve ser feito de uma forma neutra (nomeadamente devem ser desprezadas as forças gravíticas).

A instalação experimental utilizada, funciona em circuito aberto, o que significa que as partículas utilizadas no “seeding” são espalhadas na área envolvente à bancada experimental. Assim todo o “seeding” não útil ao campo de velocidades deve ser removido para uma melhoria das condições de trabalho. O fluido de trabalho ar permite uma fácil remoção de todo este “seeding” não proveitoso às medições através da implementação de extractores, os quais foram utilizados com sucesso nesta instalação.

No presente estudo experimental foi utilizado como “seeding”, o fumo produzido por uma máquina geradora de fumo *Techno-Fog Jem*. Quando se utiliza o fluido ar, normalmente o “seeding” é feito com partículas de tamanho reduzido, neste caso a variar entre $0,1$ a $1 \mu m$ para o caso do fumo. Os fumos foram acumulados num reservatório a uma pressão de valor $1,5$ bar e depois “descarregados” em ambos os túneis de vento. Este método permitiu obter bons resultados, no que diz respeito ao “data rate” (>100 Hz) e na validação de dados (superiores a 90%).



Figura 2. 5 Máquina de Fumos Techno-Fog Jem

2.3 Instalação experimental

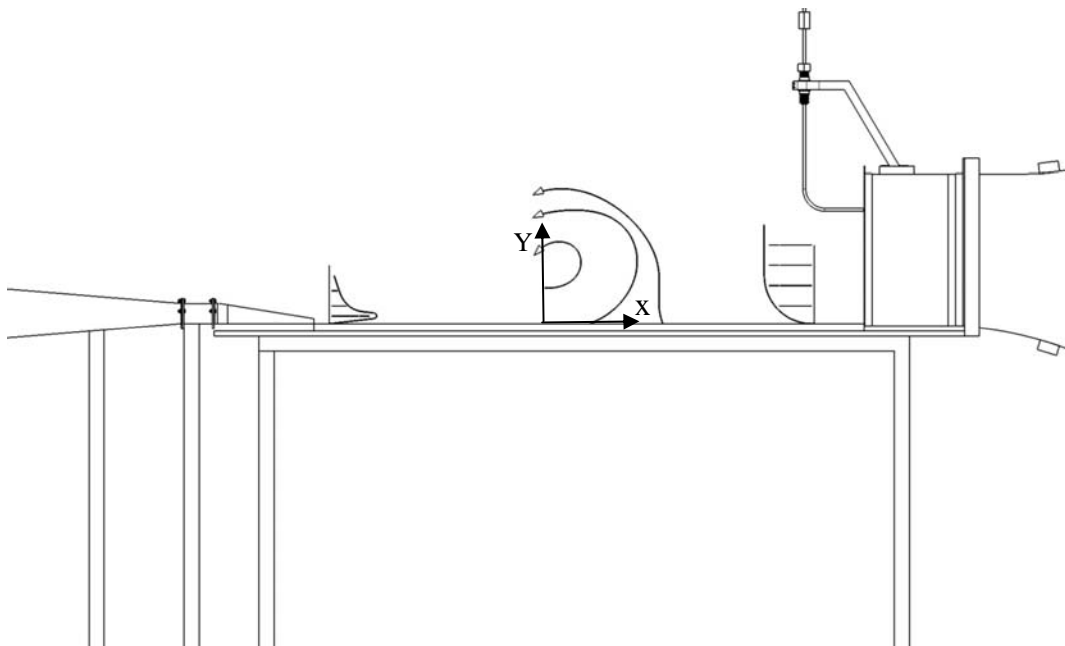


Figura 2. 6 Posição dos escoamentos utilizados na experiência. À esquerda temos o escoamento jacto de parede e à direita o escoamento camada limite, porém na região central temos o “ground vortex” (também considerado como *curved flow*).

O túnel de vento utilizado para o presente estudo foi o mesmo utilizado por Barata et al.(2005), mas com uma alteração nas saídas dos escoamentos jacto de parede e camada limite. Houve a aplicação em ambas as saídas de um bocal convergente de forma a otimizar a razão de velocidades pretendida para o presente estudo.

A figura 2.6 esquematiza os escoamentos utilizados neste estudo, onde mais esquerda da figura se encontra o túnel de vento do escoamento jacto de parede e na parte mais à direita se encontra o túnel de vento que produz o escoamento camada limite. É de referir que o projecto de construção do túnel de vento foi feito com base nas recomendações referidas por Metha e Bradshaw(1979) para um circuito em escoamento aberto. As recomendações foram seguidas em grande parte para o projecto do escoamento camada limite. É utilizado um motor *Siemens* com *15KW* de potência nominal que acciona um “*fan*” que por sua vez é capaz de produzir um escoamento com um caudal máximo de $3000\text{ m}^3/\text{h}$. Este caudal é dividido pelo o túnel do jacto de parede e pelo túnel da camada limite. Ambos os túneis têm um mecanismo que permite o controlo da quantidade de caudal.

A tabela 2.2 faz o resumo das dimensões das saídas de ambos os túneis:

Tabela 2. 2 Dimensões características da instalação experimental .

| Dimensões da saída | |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Camada Limite | <i>300mm (altura) x 280 mm(largura)</i> |
| Jacto de Parede | <i>11,5mm (altura) x 280 mm(largura)</i> |
| Distância entre a saída do jacto de parede e a saída da camada limite | <i>1100mm (comprimento)</i> |

A origem do referencial de eixos XY adoptado foi posicionada perto do ponto de máxima penetração do escoamento jacto de parede (ver figura 1.10). A coordenada X assume valores positivos na direcção do escoamento jacto de parede, bem como a coordenada Y é positiva no sentido ascendente.

2.3.1 Alinhamento e Calibração da instalação experimental

O alinhamento de toda a instalação experimental (túneis do escoamento camada limite e jacto de parede, traçadores de fumo e equipamento de medida) foi feito para que as medições fossem realizadas com precisão. Os túneis de vento da camada limite e jacto de parede foram posicionados sobre a secção experimental (secção onde foram obtidas as medições). A mesa de atravessamento foi posicionada de forma a ficar paralela à secção experimental sendo (a qual pode ser vista em detalhe na figura 2.6) composta por um sistema de controlo (que permite o movimento do volume de controlo nas três direcções) e ainda por um sistema de emissão e recepção óptico. Contudo, devido à incapacidade de “varrimento” da secção experimental pelo sistema de controlo, foram implementadas duas guias que permitiram deslocar a mesa de atravessamento paralelamente à secção experimental. Os traçadores de fumo foram colocados dentro de ambos os túneis, numa parte central, para que o “seeding” fosse eficaz no eixo de simetria da bancada experimental. O alinhamento foi então realizado eficazmente, pois o volume de controle criado pelos raios laser, quando deslocado sobre a mesa experimental, mais concretamente sobre a linha de simetria da mesa, apresentou uma trajectória coincidente. O laser não precisou de ser alinhado devido às suas especificações técnicas.

A calibração da instalação experimental foi realizada com base nos valores da velocidade camada limite, U_{mean} , e também com base nos valores de frequência registados num variador electrónico⁷. Para a realização da calibração foram definidas as frequências de 25;27.5;30;32.5;35; 37.5; 40; 42.5 e 45 Hz. Com o intervalo de frequências definido, obteve-se curva de calibração que dá a relação entre os valores da pressão dinâmica medidos com um multi-manómetro e as posições de frequência definidas, quando estas eram percorridas no sentido crescente e decrescente. Na calibração, a posição do “ground vortex” não foi tida em conta, pois a razão de velocidades entre a velocidade média do jacto de parede e a velocidade média da camada limite, que foram obtidas para cada frequência, mostraram estar próximas do valor 0,5. A velocidade da camada limite U_{mean} , varia entre 4,06 m/s (para $f=25$ Hz) e 7,68 m/s (para $f=45$ Hz). Enquanto que a pressão dinâmica varia entre 1,03 mmH₂O (para $f=25$ Hz) e 3,65 mmH₂O (para $f=45$ Hz).

⁷ O variador é uma unidade de comando que permite variar a frequência do ventilador.



Figura 2. 7 Mesa de atravessamento sobre as guias

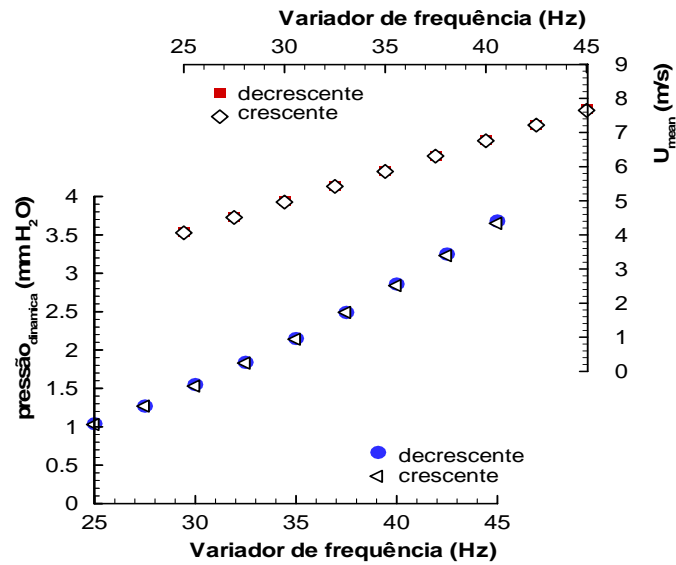


Figura 2. 8 Gráficos de calibração da instalação experimental com base na velocidade da camada limite, U_{mean} , pressão dinâmica, e no valor da frequência indicada pelo variador electrónico com a frequência a variar no sentido crescente e no sentido decrescente.

Assim, com base nas medidas obtidas na fase de calibração, foram obtidos os gráficos que se encontram ilustrados na figura 2.8 e que mostram a precisão de controle da instalação, que, como se pode verificar pela semelhança de resultados obtidos no sentido crescente e no sentido decrescente, apresenta características excelentes para a obtenção de resultados de elevada precisão.

2.3.2 A obtenção das medições

As medições do presente estudo foram feitas no plano de simetria do escoamento do jacto de parede como pode ser verificado através da figura 2.9.

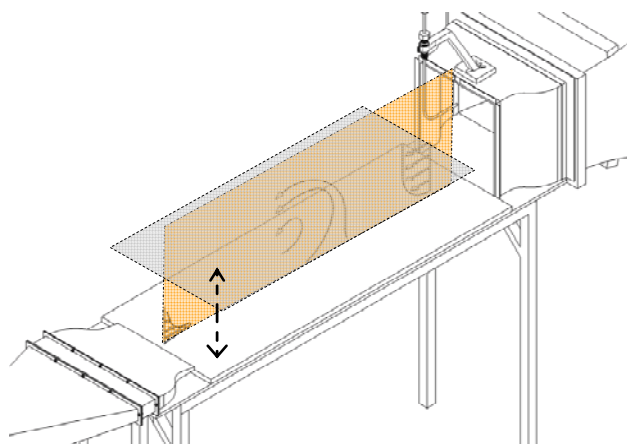


Figura 2. 9 Desenho da instalação experimental, mostrando o plano vertical de simetria da onde foram efectuadas as medições.

Foram realizadas várias medições de perfis de velocidade do jacto de parede e da camada limite para várias frequências de trabalho do ventilador. Das medições que foram realizadas, foi escolhida para o presente estudo uma frequência de trabalho no ventilador próxima de 40Hz . Esta frequência permitiu obter uma razão de velocidades entre o escoamento camada limite e jacto de parede, $U_e=0,5$. Foi utilizado um multi-manómetro digital *Furnance FCO 12*, com capacidade para medições que apresentem valores contidos entre 1 e $20\text{ mmH}_2\text{O}$. Este multi-manómetro apresenta um erro máximo de $\pm 1\%$. O valor de *pressão dinâmica* de $2,87\text{ mmH}_2\text{O}$ permitiu controlar, de forma redundante, as condições de realização das medições na secção experimental. Este valor de pressão foi também uma referência para a repetibilidade das medições, uma vez que o cálculo da pressão dinâmica no multi-manómetro, não utiliza o parâmetro temperatura e, por isso, poderiam ocorrer variações de acordo com as condições atmosféricas. Isto também permitiu manter as características do escoamento idênticas para cada medição realizada. Assim, de acordo com os perfis de velocidade medidos, obteve-se para o jacto de parede, uma velocidade média, $U_j = 13.7\text{m/s}$ e para o escoamento camada limite, uma velocidade média de valor $U_o=6.9\text{m/s}$, o que corresponde a uma razão de velocidades, $U_e = 0,5$.



Figura 2. 10 Instalação experimental

Os perfis de velocidade que foram obtidos estão de acordo com os perfis típicos, que pretendiam obter, de um jacto de parede e de uma camada limite. Estes resultados revelaram que os bocais aplicados em ambos os túneis geram com bastante sucesso a forma dos perfis pretendida. A figura 2.10 ilustra os perfis de velocidade obtidos à saída de cada bocal.

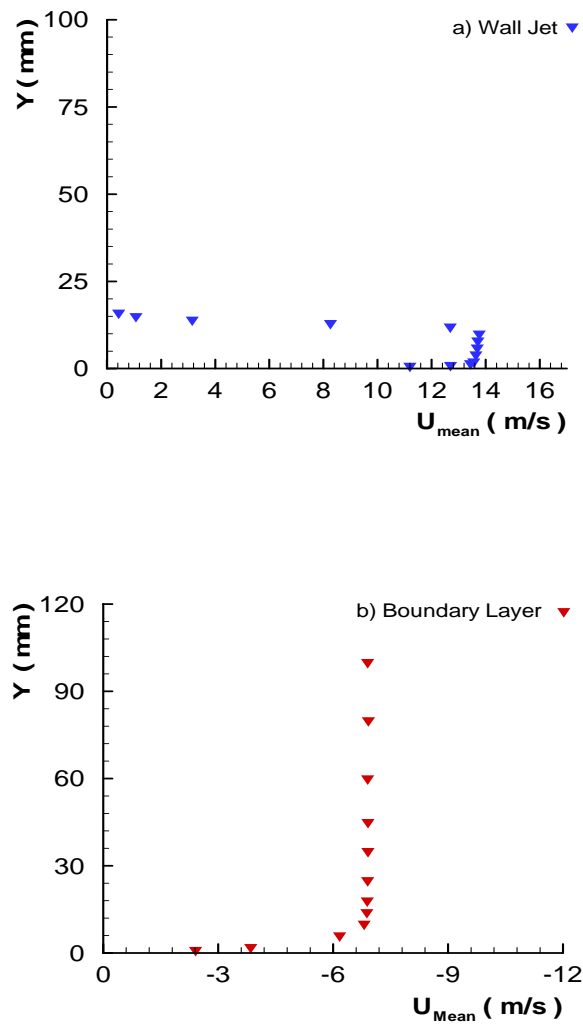


Figura 2. 11 Perfis de velocidade: a) jacto de parede, b) camada limite. U_{mean} corresponde à componente horizontal da velocidade média, que neste caso corresponde à velocidade média, uma vez que não existe componente vertical em ambos os perfis.

2.4 Análise de erros

No que diz respeito a erros aleatórios⁸, o número de medidas de velocidade usado para o cálculo do valor médio e variância foi de cerca de 10 000 e, por isso, os erros estatísticos são inferiores a 1,5 e 3% respectivamente, de acordo com a análise de Yanta et al. (1973).

⁸ Do inglês *random*.

Capítulo 3

RESULTADOS

3.1 Introdução

Os resultados obtidos vão ser discutidos em duas secções separadas.

Na primeira secção é feita uma análise ao campo médio e turbulento com base nos perfis de velocidade. Através dos perfis de velocidade é identificado a possível presença do pequeno vórtice secundário presente na zona de recirculação. Assim sendo, é feita uma análise nessa pequena zona a partir dos dados medidos no campo de velocidades.

A segunda secção será dedicada à definição completa do campo experimental de velocidades com as “streaklines”, onde será apresentado os mapas com os histogramas e com os diagramas de espectros de energia. Com base nas linhas de valor constante obtidas através das medições realizadas é igualmente identificado a presença do pequeno vórtice secundário. Contudo o comportamento de “puffing” visto para a zona de recirculação que foi descrito por Barata et al.(2008), pode estar associado às instabilidades de baixa frequência presentes na zona de separação.

3.2 Instabilidades do escoamento (zona de recirculação)

Inicialmente foram realizados estudos de visualização para que o “ground vortex” ficasse posicionado ao meio da secção experimental. Nesses estudos de visualização primária foi utilizado um fio de algodão na extremidade de uma vareta, o qual permitiu observar o comportamento do escoamento. O posicionamento do “ground vortex” no meio da bancada experimental foi possível através do mecanismo de controlo de caudal tanto para o escoamento jacto de parede bem como para o escoamento camada limite, referido anteriormente na secção 2.3.

No artigo de Barata et al. (2008) referenciaram-se as instabilidades presentes no escoamento, mas para uma razão de velocidades $Ue = 0,58$. Essas instabilidades foram visualizadas com uma câmara digital e com a ajuda de um laser que permitiu criar uma “folha” de luz sobre a bancada experimental. No comportamento do escoamento foi detectado um vórtice secundário a montante do ponto de separação do jacto de parede. O comportamento desse vórtice está de acordo com o comportamento encontrado por Cimbala et al. (1991) no seu trabalho. Este pequeno vórtice começa com um tamanho reduzido que temporalmente vai aumentando até que quando o escoamento camada limite não o alimenta mais, dá-se o “rebetamento”, ao qual os ingleses chamam de “break up”. Após o rebetamento surge um pequeno vórtice que novamente torna a crescer.

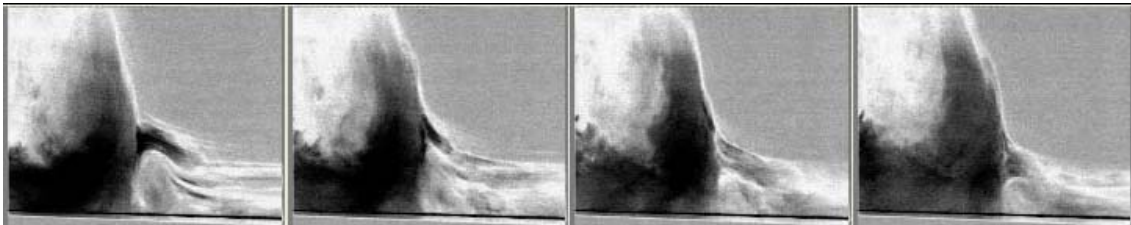


Figura 3. 1 Sequência encontrada por Barata et al (2008) no comportamento do pequeno vórtice secundário

O comportamento deste pequeno vórtice é idêntico ao “puffing” encontrado no “ground vortex” referido por Cimbala et al. (1991) e que pode ser observado na figura 3.1. Inicialmente o vórtice é bastante pequeno, mas com o tempo vai aumentando o seu tamanho. A parte do escoamento camada limite mais junto à parede apresenta vorticidade com sentido anti-horário (ver diagrama de vorticidades na figura 3.2) que influencia o crescimento do vórtice. O pequeno vórtice vai aumentando o seu tamanho até que num certo momento ganha proporções de tal forma que rebenta. A massa de fluido que surge do rebetamento é arrastada ou varrida, pelo escoamento camada limite, ou seja, segue o caminho do escoamento curvo de acordo com a figura 3.1. Pode-se dizer que existe um processo cíclico repetitivo, uma vez, que logo depois de o vórtice secundário rebentar aparece um novo pequeno vórtice que inicia novamente um processo de crescimento. Este processo repete-se com uma frequência de $8,33 \text{ Hz}$. Cimbala et al.(1991) justifica o crescimento do vórtice, ou seja, o “ground vortex”, através dos vórtices presentes na camada de corte (do inglês, *shear layer*). Os vórtices da camada de corte são transportados pelo jacto de parede e dão origem

ao “ground vortex”. Barata et al (2008) verificou uma frequência de oscilação de $8,33 \text{ Hz}$ (de acordo com resultados experimentais de visualização) semelhantes aos valores da frequência de oscilação apresentados por Cimbala et al.(1991) e que foram entre $4,2$ e $8,6 \text{ Hz}$. Contudo, existe uma diferença substancial que deve ser referida: embora o vórtice secundário tenha o mesmo sentido de vorticidade da camada limite, não pode ser agarrado e transportado pelo escoamento curvo, resultante da colisão da camada limite com o jacto de parede, pois a componente vertical da velocidade é sempre positiva acima do vórtice e, por isso, a sua origem deverá ser de natureza diferente. Assim, as instabilidades anteriormente referidas podem ser associadas ao pequeno vórtice presente a montante do ponto de separação. Mas, devido ao seu pequeno tamanho, pode não ser detectado para as pequenas razões de velocidade entre o escoamento camada limite e jacto de parede, o que justifica a inexistência de autores que confirmem inequivocamente a sua existência. Na secção 3.3 é feita a análise mais aprofundada das instabilidades presentes na zona de separação.

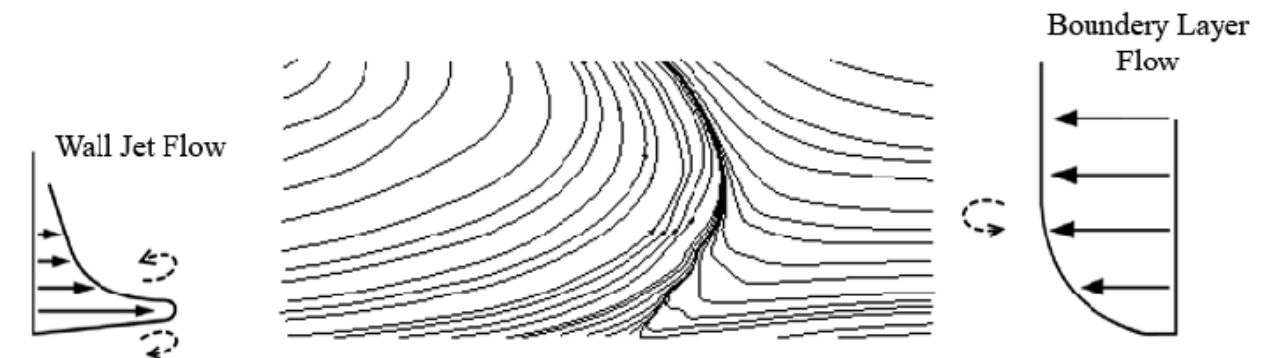
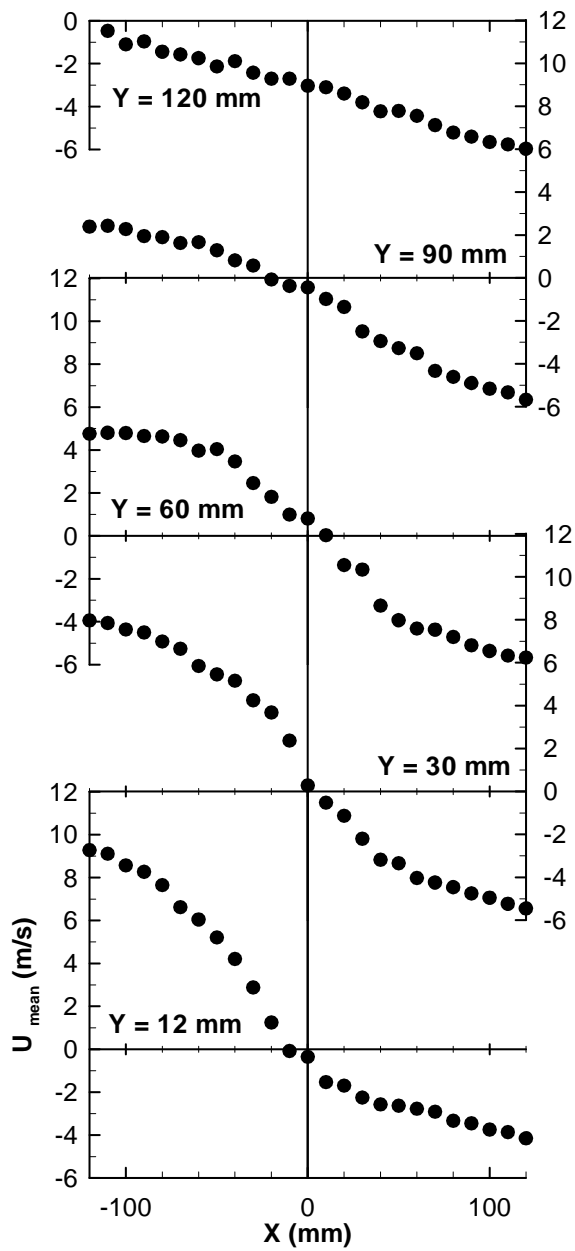


Figura 3. 2 Diagrama de vorticidades. As vorticidades induzidas pelos dois escoamentos estão ilustradas a tracejado na figura.

Embora as condições não sejam exactamente as mesmas, recorrendo ao trabalho de Cimbala et al (1991), que, deverá ser o único trabalho que relata claras evidências de instabilidades num “ground vortex” até à data, para uma razão entre velocidades $Ue = 0.5$, o comportamento de “puffing” deve corresponder a uma frequência mais ou menos próxima de $18 \pm 1 \text{ Hz}$. A figura 3.3 mostra os perfis horizontais da velocidade média U_{mean} . Os perfis confirmam a descrição acima referida do escoamento e quantificam as características médias do escoamento na zona de colisão. A componente vertical da velocidade média figura 3.3 é

negativa para $Y=12\text{ mm}$ e 30 mm e para $X > 0$, contudo no restante campo medido é positiva. Isto revela a existência do vórtice secundário, mas também revela que, quando este pequeno vórtice desaparece, ele é removido no sentido ascendente de acordo com a trajetória curva do escoamento provocada pela interação do jacto de parede com o escoamento camada limite. Os perfis horizontais de velocidade presentes na zona de colisão mostram que não ocorre uma deflexão acentuada na zona de colisão para $Y < 120\text{ mm}$. De acordo com os gráficos entre $Y=90$ e $Y=120$ existe um aumento substancial da componente vertical da velocidade. Observando os perfis horizontais da velocidade média verifica-se que o centro de deflexão do escoamento não pode ser estimado com base nos valores próximos de zero da componente horizontal da velocidade ou pelos valores máximos da componente vertical da velocidade, pois eles não coincidem. A componente horizontal da velocidade aproxima-se de zero em $Y=90\text{mm}$ e para $X=0$, enquanto que a componente vertical da velocidade é máxima em $X=-40\text{mm}$, mas para $Y=120\text{mm}$. Em $Y=120\text{mm}$ valor nulo de U_{mean} ocorre para $X=-120$. A figura 3.3 também confirma que o centro do escoamento vórtice secundário está localizado a montante do ponto de separação, mas provavelmente localizado antes do chamado ponto de penetração (ver figura 1.10). Este resultado indica que o escoamento vórtice secundário também pode estar presente noutras situações, não dependendo somente da razão de velocidades Ue , mas também do tamanho relativo da zona do jacto de parede que apresenta vorticidade com sentido horário. Pode ainda estar relacionado com o tamanho da zona em que a camada limite têm vorticidade com sentido anti-horário.

a)



b)

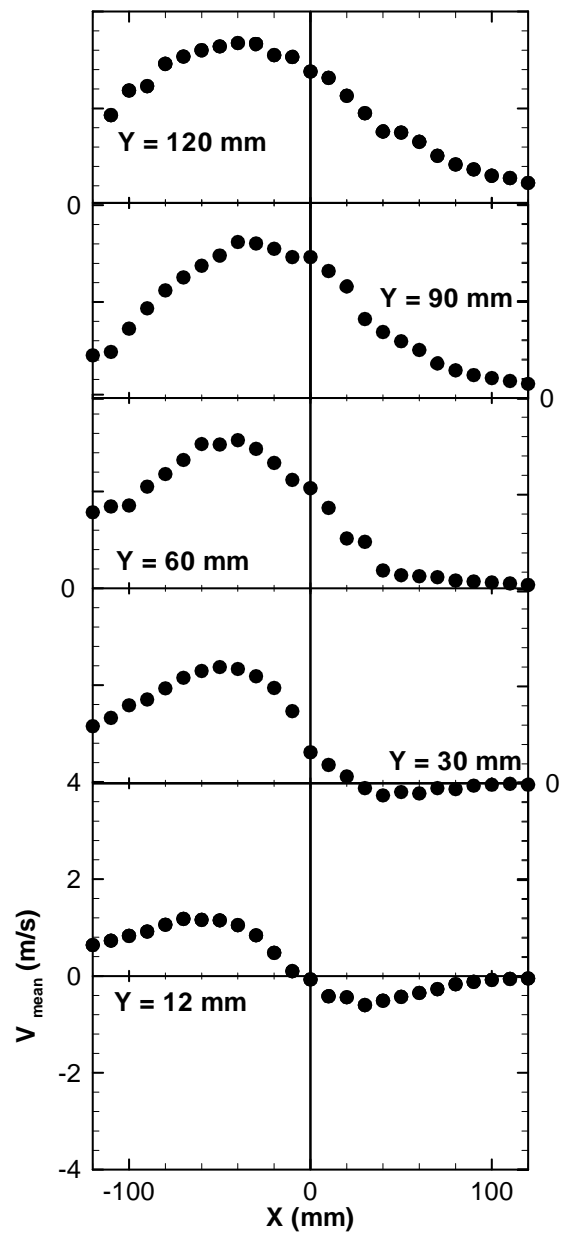


Figura 3. 3 Perfis horizontais da velocidade média $Ue= 0.5$:a) componente horizontal da velocidade, U_{mean} ; b) componente vertical da velocidade, V_{mean} .

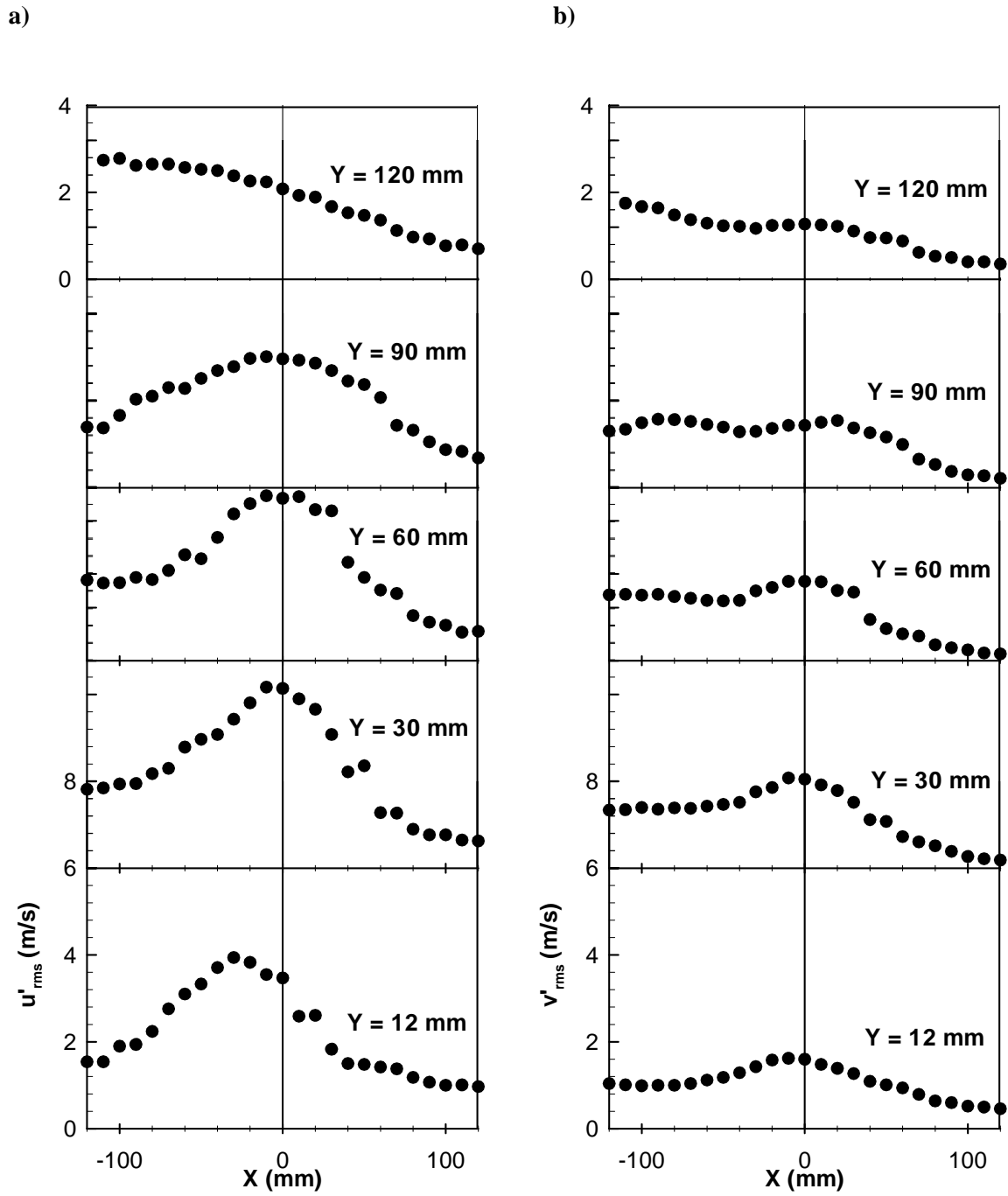


Figura 3. 4 Perfis horizontais das tensões normais para uma razão de velocidades $U_e = 0.5$: a) tensão normal horizontal, $\sqrt{u'^2}$; b) tensão normal vertical, $\sqrt{v'^2}$.

A figura 3.4 mostra os perfis horizontais de $\sqrt{u'^2}$ e $\sqrt{v'^2}$ e quantifica as características turbulentas na zona de colisão e o escoamento jacto de parede deflectido. Os picos de $\sqrt{u'^2}$ são maiores que os picos de $\sqrt{v'^2}$ na zona de colisão, o que origina elevados picos de anisotropia com $\sqrt{u'^2}/\sqrt{v'^2} \approx 2.5$. Os valores máximos das perturbações na velocidade horizontal são observados na zona de colisão, onde a componente horizontal da velocidade média é nula. Dando origem a uma intensidade de turbulência extremamente elevada com valores de $\frac{\sqrt{u'^2}}{U_{mean}}$ maiores que 100%. Para as perturbações da velocidade vertical, os valores máximos unicamente coincidem com os valores nulos da componente vertical da velocidade média e situam-se próximos da bancada experimental no plano $Y=12$ mm, assim a intensidade de turbulência local é substancialmente menor quando comparada com os valores máximos. Os valores mais elevados para a intensidade de turbulência local assumem valores na ordem de grandeza dos 70% e podem ser observados por exemplo, em $Y=90$ mm e $X=0$. Estes resultados são enganadores até uma certa extensão, pois sendo as medições feitas através do LDV e obtidas com um “data rate” suficientemente elevado para detectar possíveis oscilações de baixa frequência para a gama de instabilidades obtida (18 ± 1 Hz de acordo com Cimballa, 1991) e com tempo total suficiente para obter as 10 000 medições com erros estatísticos suficientemente baixos (1.5% e 3%, respectivamente para os valores da média e variância para um intervalo com confiança de 95%), acontece que as medições realizadas somente permitem uma média de cerca 20 ciclos. Assim, como consequência, as instabilidades podem estar a ser tratadas como turbulência.

Os perfis da tensão de corte, figura 3.5 são na generalidade consistentes com a direcção média do escoamento. Na zona de colisão ($X=0$) as tensões de corte são positivas ao longo da direcção vertical, indicando que o rápido movimento dos elementos de fluidos do jacto de parede, que tendem a mover-se no sentido ascendente juntamente com o escoamento camada limite ($u' > 0$) numa zona superior, ou seja, numa zona não muito junta à bancada experimental ($v' > 0$). Identicamente as tensões de corte presentes na parte percorrida pelo jacto de parede no escoamento deflectido ($X < 40$ mm) são negativas porque o movimento feito pelas partículas de fluido com o sentido da esquerda para a direita corresponde a perturbações da velocidade vertical negativas ($v' < 0$). Porém a localização dos valores nulos da tensão de corte ocorrem perto de $X=0$ e não coincidem com a zona central do escoamento deflectido, ao qual é associada com componente vertical da

velocidade máxima onde $\frac{\partial V}{\partial X} = 0$. Um pouco distante da parede da bancada experimental ($Y > 25mm$) com a aproximação ao ponto de separação ($X=0$), $\frac{\partial U}{\partial Y}$ aumenta no lado do jacto de parede ($X < 0$) e diminui no lado da camada limite ($X > 0$). Perto da parede $\frac{\partial V}{\partial Y}$ e $\frac{\partial U}{\partial X}$ são as tensões de deformação mais importantes, mas por outro lado a magnitude dos picos da tensão de corte diminui. Isto acontece porque o escoamento nesta região fica sujeito a um efeito de estabilização (provocado pela colisão do jacto de parede com a camada limite, o escoamento nesta região apresenta uma forma curva) do escoamento fazendo com que as tensões de corte diminuam mais do que a energia cinética turbulenta.

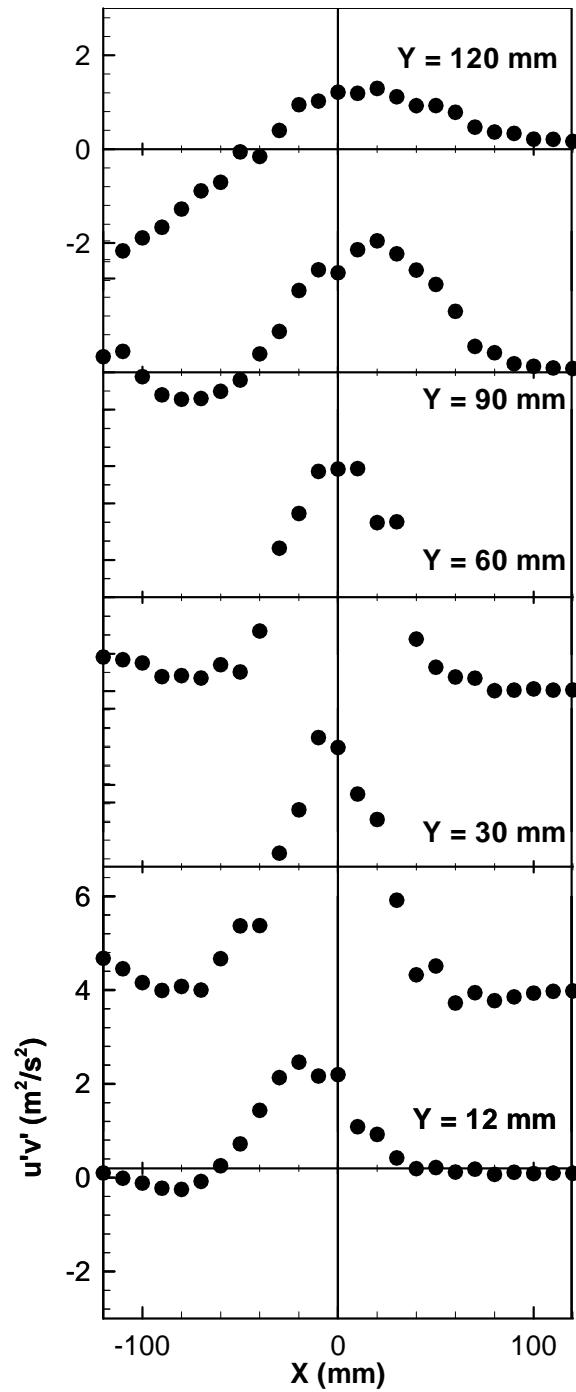


Figura 3.5 Perfis horizontais da tensão de corte $\overline{u'v'}$ para uma razão de velocidades $U_e = 0.5$:

A figura 3.6 mostra os perfis da velocidade medidos no plano vertical para duas componentes médias da velocidade, U_{mean} e V_{mean} . Os perfis de velocidade para $X=+10$, $+30$ e $+60$ mm indicam a presença de um pequeno vórtice perto do ponto de separação mas no lado da camada limite ($X > 0$), pois os valores medidos de V_{mean} são negativos na zona próxima à parede. A componente horizontal da velocidade U_{mean} também muda o seu sinal junto à parede e desta forma confirma a existência de vorticidade anti-horária na zona de colisão como já foi referido anteriormente. De acordo com a figura 3.7, os perfis verticais da estrutura turbulenta de velocidade também mostram intensidades de turbulência elevadas medidas na zona de colisão perto da parede, ou seja, em $X=0$. Como será visto na secção 3.3, tanto nos perfis verticais como horizontais da velocidade, verifica-se a presença de histogramas bimodais em ambas as componentes horizontal e vertical da velocidade na zona de estabilização.

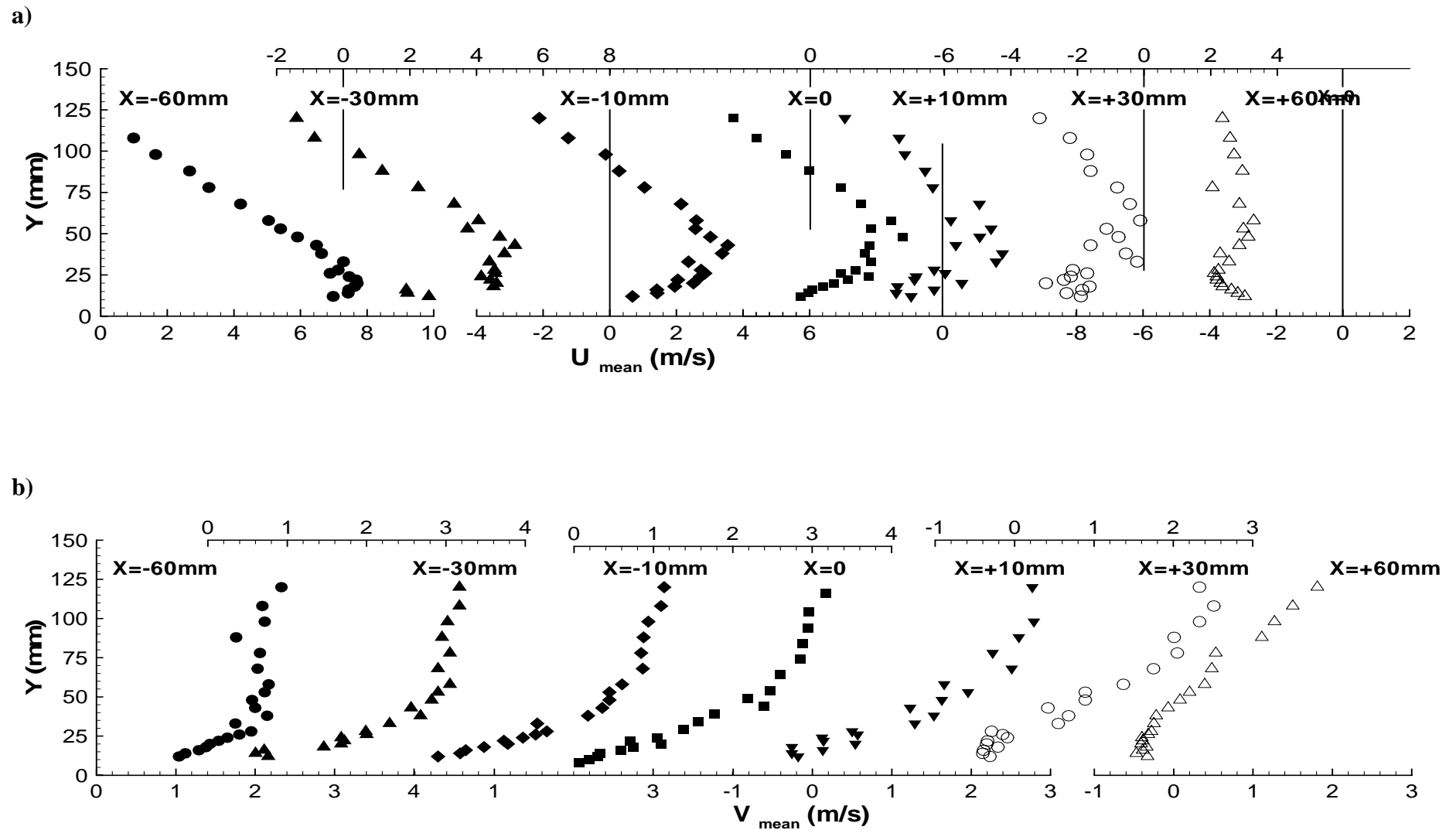


Figura 3. 6 Perfis verticais da velocidade com $U_e = 0.5$: a) componente horizontal, U_{mean} ; b) componente vertical, V_{mean} .

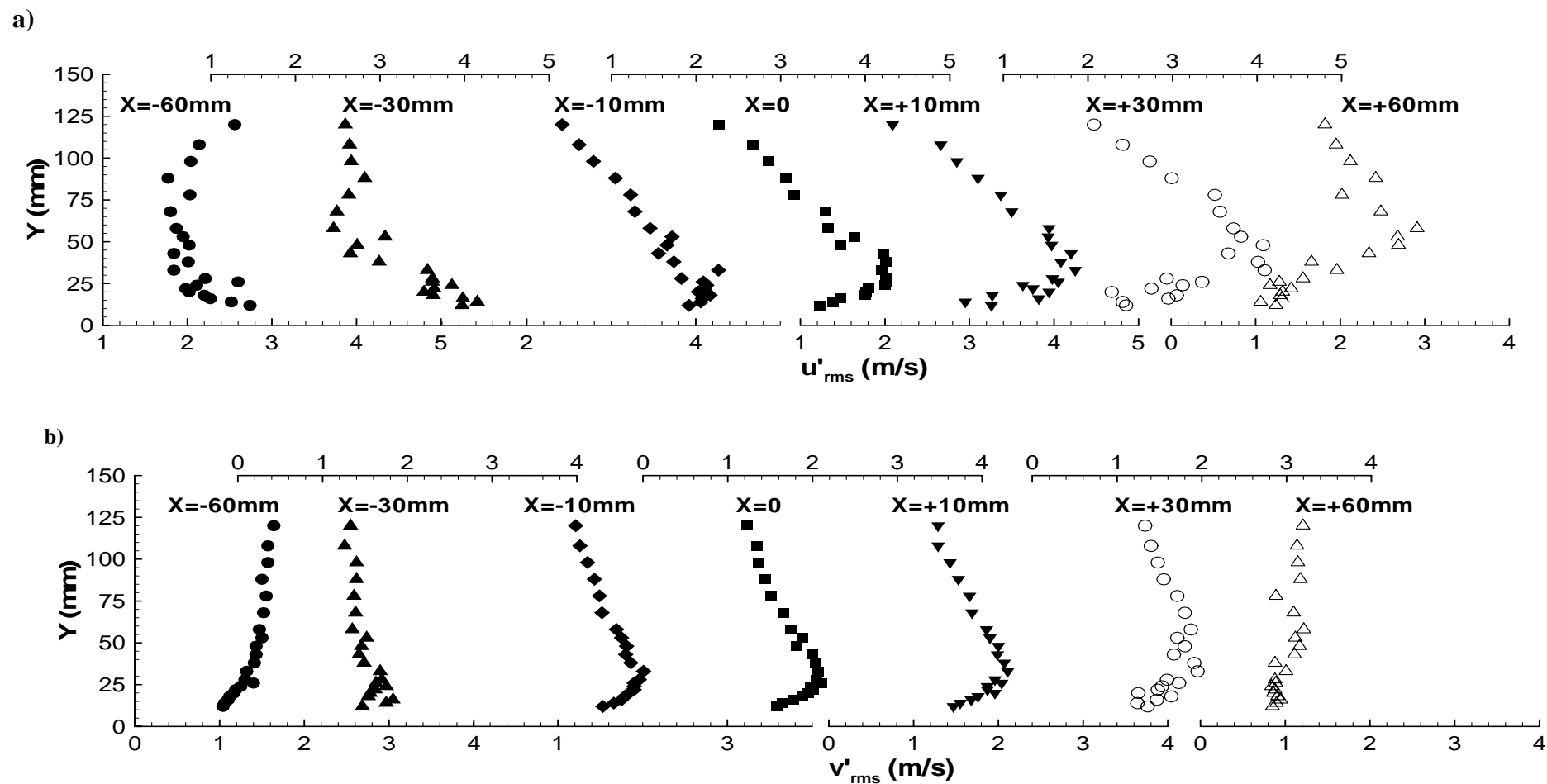


Figura 3. 7 Perfis verticais da estrutura turbulenta com $U_e = 0.5$: a) perfis verticais da tensão normal, $\sqrt{u'^2}$; b) perfis verticais da tensão normal, $\sqrt{v'^2}$.

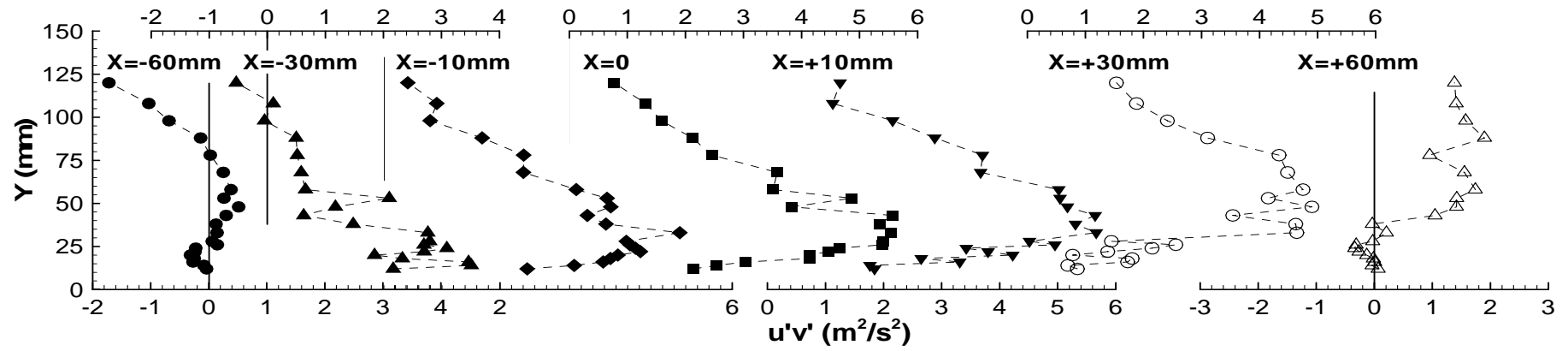


Figura 3. 8 Perfis verticais da estrutura turbulenta com $U_e = 0.5$: perfis verticais da tensão de corte, $\overline{u'v'}$.

3.3 Definição completa das instabilidades no campo experimental

Nesta secção também é feita a análise ao campo médio e turbulento, mas neste caso é feita uma análise global ao campo de velocidades. É ainda feito o estudo ao comportamento do escoamento focalizado na identificação de parâmetros e regimes associados às instabilidades presentes no campo de velocidades. É utilizada uma razão de velocidades, $U_e=2$, que de acordo com Cimbalá et al.(1991) deve corresponder a uma frequência do fenómeno de “puffing” de cerca $18Hz \pm 1Hz$.

A figura 3.9 mostra as linhas de valor constante (região no mapa que se refere a uma gama de velocidades do campo médio) das componente horizontal e da velocidade média, U_{mean} , e da componente vertical da velocidade média, V_{mean} .

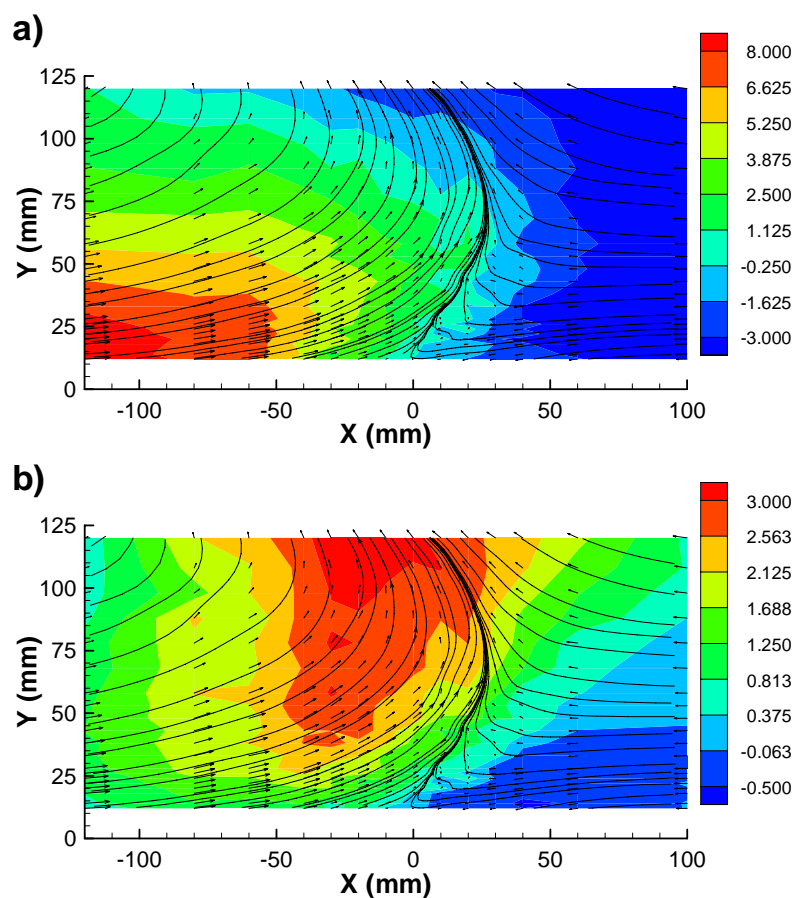


Figura 3. 9 Linhas de valor constante das componentes da velocidade média $U_e = 2$: a) componente horizontal, U_{mean} ; b) componente vertical, V_{mean} .

Estas linhas de valor constante confirmam a descrição anteriormente feita do escoamento e permitem quantificar as características do escoamento médio na zona de colisão. As linhas de corrente, que foram desenhadas através do *software Tecplot* com base nos pontos medidos experimentalmente são também mostradas na figura 3.9 com os respectivos vectores da velocidade. A componente vertical da velocidade média é negativa no lado do escoamento camada limite, próximo da parede, ou seja, para $Y < 40\text{mm}$. Porém é positiva no restante campo de velocidades. Isto confirma a presença de um vórtice secundário e indica que se o vórtice secundário for instável, ele deverá simplesmente ser transportado para cima, através do escoamento curvo resultante da colisão do escoamento camada limite com o escoamento jacto de parede. O fenómeno de “puffing” descrito por Barata et al.(2008) não foi observado para $U_e = 0,5$. A partir das velocidades medidas, pode ser concluído que o centro do escoamento deflectido (“ground vortex”) está localizado no lado do jacto de parede em $X \approx -20\text{mm}$, pois corresponde à posição onde as componentes verticais da velocidade média atingem os valores mais elevados. A figura 3.6 também indica que o centro do escoamento vórtice secundário está localizado a montante do ponto de separação, com o seu centro em $X \approx +45\text{mm}$, mas provavelmente localizado depois do chamado máximo ponto de penetração⁹. Este resultado também indica que o escoamento vórtice secundário pode estar presente em outras situações, não dependendo somente da razão de velocidades Ue , todavia pode estar associado ao tamanho relativo da vorticidade anti-horária presente na zona do jacto de parede, ou ainda pode ser influenciado pela vorticidade presente no escoamento camada limite.

A figura 3.10 ilustra as características da velocidade turbulenta na zona de colisão e também na zona de deflexão do escoamento jacto de parede. Na zona de colisão os picos de $\sqrt{u'^2}$ (figura 3.10a) são superiores relativamente aos picos de $\sqrt{v'^2}$ (figura 3.10b), dando origem a elevados níveis de anisotropia com $\sqrt{u'^2}/\sqrt{v'^2} \approx 2.5$. Os valores máximos que foram observados para as perturbações da velocidade horizontal são observadas na zona de colisão onde a componente horizontal da velocidade média é nula dando origem a uma intensidade de turbulência local bastante elevada com valores de $\frac{\sqrt{u'^2}}{U_{mean}}$ maiores que 100%.

Para os valores das flutuações da velocidade vertical, verifica-se que somente coincidem

⁹ É o ponto com velocidade nula e com a posição mais afastada do centro do ground vortex.

com os valores nulos da componente vertical da velocidade média no plano junto à bancada experimental, onde também a intensidade de turbulência local é muito menor. Como foi referido na secção anterior estes resultados podem induzir-nos em erro, pois as instabilidades podem estar ser abordadas como turbulência.

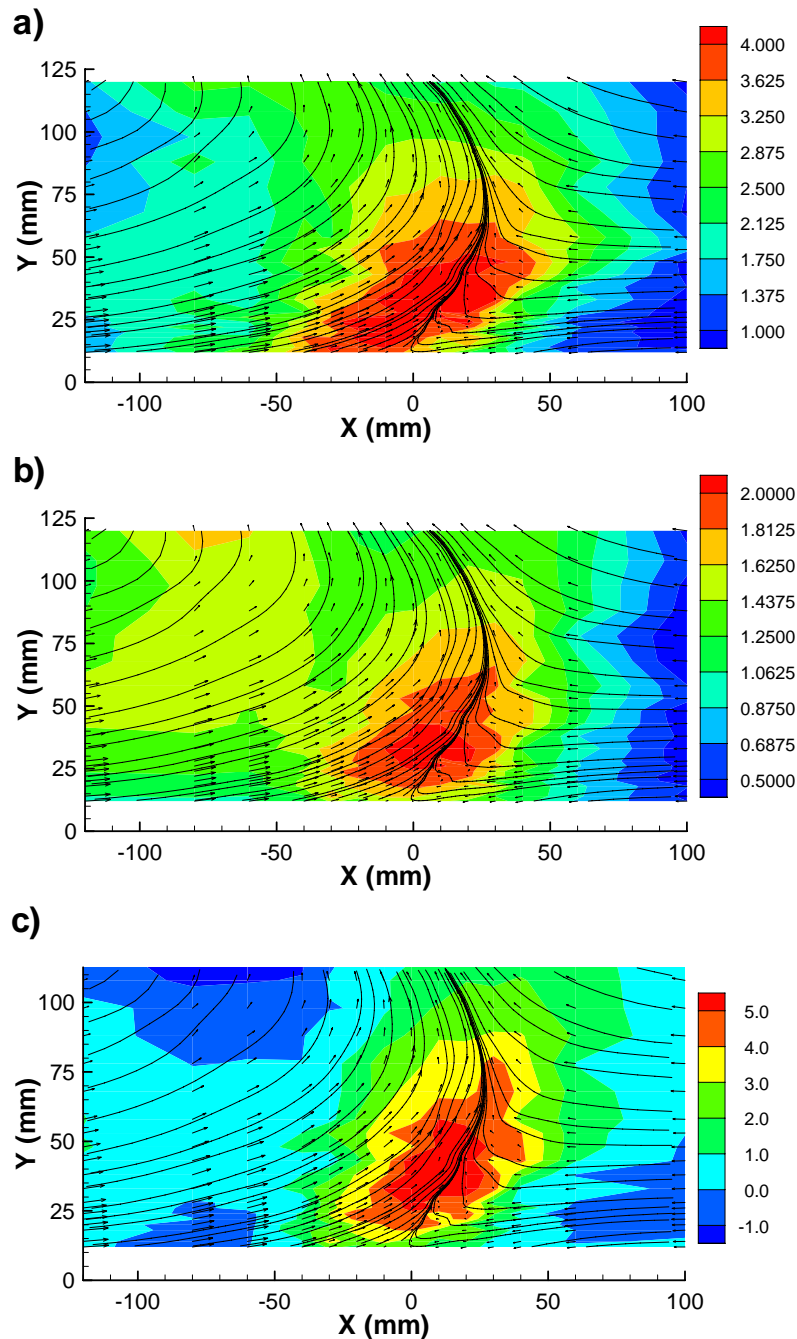


Figura 3. 10 Linhas de valor constante dos parâmetros da estrutura turbulenta com $U_e = 2$: a) tensão normal do plano horizontal, $\sqrt{u'^2}$; b) tensão normal do plano vertical, $\sqrt{v'^2}$; c) tensão de corte, $\overline{u'v'}$

A figura 3.10c mostra as linhas de valor constante da tensão de corte turbulenta, $\overline{u'v'}$, que são consistentes com a direção do escoamento médio. As tensões de corte são positivas no centro zona de colisão ao longo da direção vertical em $X=0$, sugerindo que devido ao rápido movimento dos elementos de fluido no jacto de parede ($u' > 0$), existe de certa forma uma tendência para os elementos serem transportados através do escoamento camada limite ($v' > 0$).

A tensão de corte é negativa no escoamento jacto de parede e também nas proximidades do escoamento deflectido ($-110 < X < -60\text{mm}$ e $12 < Y < 25\text{mm}$), pois a velocidade vertical apresenta perturbações negativas ($v' < 0$) devido ao movimento das partículas de fluido na direção do escoamento principal. Contudo, os valores nulos da tensão de corte ocorrem perto de $X=0$, e não coincidem com a zona central do escoamento deflectido, a qual está associada com o máximo da componente vertical da velocidade onde $\frac{\partial V}{\partial X} = 0$. Próximo do ponto de separação ($X=0$) e com uma altura de $Y > 25\text{mm}$ em relação à base da bancada experimental, $\frac{\partial U}{\partial Y}$ aumenta no lado do escoamento jacto de parede ($X < 0$) e diminui no lado do escoamento camada limite ($X > 0$). Perto da base da bancada experimental, (ou seja perto da parede) $\frac{\partial V}{\partial Y}$ e $\frac{\partial U}{\partial X}$ são as deformações de corte mais significativas (as deformações que mais interessam). Porém o valor da magnitude dos picos das tensões de corte diminui, pois o escoamento nesta região é “dominado” pela curvatura que origina um efeito estabilizador (já anteriormente descrito) no escoamento. Este efeito estabilizador presente na zona de colisão faz com que a tensão de corte seja reduzida mais do que a energia cinética turbulenta. Os maiores valores positivos da tensão de corte aparecem na zona de colisão do jacto de parede com a camada limite, mas só para valores de $Y > 12\text{mm}$. Estes valores máximos aparecem tanto do lado do escoamento camada limite como do lado do escoamento jacto de parede. Para uma melhor compreensão deve ser vista a figura 3.10c.

A sequência que foi encontrada para o comportamento da pequena zona de recirculação (zona que aparece perto do ponto de separação) com base nos estudos preliminares de visualização anteriormente descritos, pode ser interpretada como uma oscilação da zona de separação, ou então a uma oscilação da origem virtual (fictícia) onde o escoamento começa a ser deflectido. Este comportamento de oscilação da zona de separação

pode ser comprovado pela presença dos diagramas bimodais obtidos através das medições realizadas para esta zona. Os histogramas bimodais aparecem em ambas as componentes da velocidade média, ou seja, em U_{mean} e em V_{mean} .

No campo médio obtido através das medições realizadas, foram identificados e classificados vários tipos de histogramas, tanto para a componente horizontal e vertical da velocidade média (para U_{mean} e V_{mean}). Os histogramas identificados para a componente horizontal, U_{mean} , podem ser vistos na figura 3.11a, na qual pode ser visto a presença de 4 histogramas distintos. Os histogramas bimodais com picos simétricos aparecem na região central sobretudo no lado do escoamento jacto de parede onde o escoamento é defletido; Os histogramas bimodais com picos não simétricos aparecem tanto no lado do jacto de parede como no lado da camada limite mas perto da zona de colisão. No lado da camada limite os picos mais elevados são negativos, enquanto que no lado do jacto de parede os picos mais elevados são positivos. Contudo quando nos afastamos da zona de colisão temos histogramas com forma bastante idêntica à distribuição de Gauss. A figura 3.11b, mostra o mapa dos histogramas obtidos através da componente vertical da velocidade média, V_{mean} , porém podem ser identificados cinco histogramas distintos, onde o histograma bimodal que aparenta uma forma simétrica aparece numa região junto à curvatura do escoamento. Esta região apresenta umas pequenas diferenças em termos de área comparativamente com a região anteriormente referida para a componente horizontal da velocidade para o caso dos histogramas bimodais simétricos.

Embora a zona de colisão apresente uma estrutura turbulenta que foi caracterizada anteriormente, onde se observou a presença de uma sequência para o comportamento do escoamento (“puffing”), a análise ao espectro de energia (do inglês, *power spectra*) para as componentes horizontal e vertical da velocidade média não mostrou em particular na frequência, a presença de picos que se destacassem para as mesmas posições dos bimodais anteriormente referidos. Na figura 3.12 pode ser observado os vários espectros de energia para o campo de velocidades médio obtido com base nas medições feitas. Foram identificados três tipos de espectros para ambas as componentes da velocidade. A figura 3.12 mostra as regiões que estão definidas para os diferentes tipos de espectro encontrados. Assim na região de colisão onde foram encontrados os bimodais simétricos, o espectro de energia apresenta uma “bossa” característica com uma largura de banda com valores entre 4 e 15 Hz. Esta “bossa” para frequências próximas de zero indica a presença de instabilidades de baixa frequência já anteriormente mencionadas. Na parte superior da zona central onde o

escoamento é defletido atingindo os valores máximos de $V_{mean} \approx 3m/s$ foi também identificado um outro espectro característico (casos pontuais), que também apresentava uma “bossa”. A largura de banda que abrange essa bossa apresenta um valor máximo no espectro da energia para uma frequência de 15Hz, contudo este espectro apresenta picos de frequência elevada. O espectro com picos de frequência elevada encontra-se ilustrado na figura 3.12.

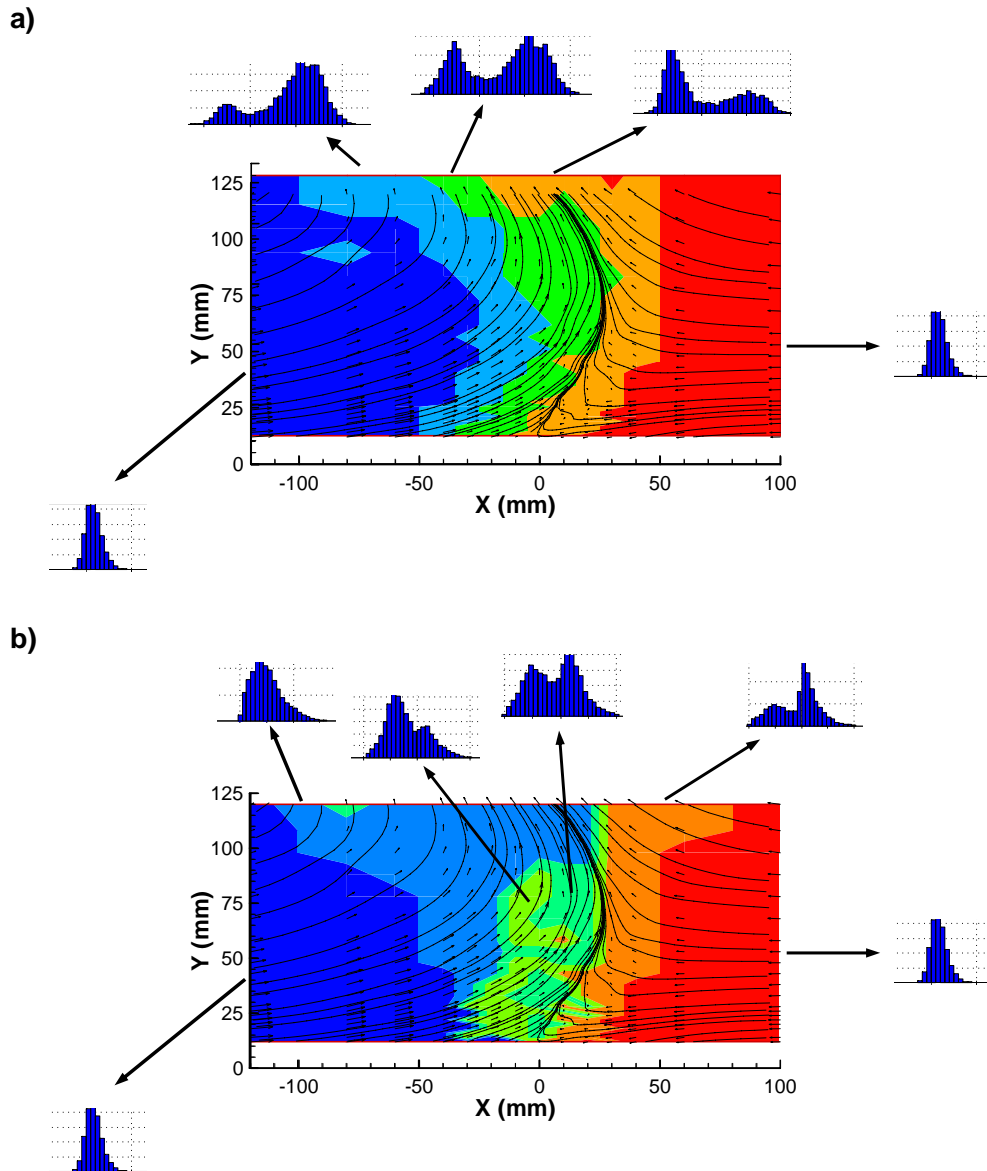


Figura 3. 11 Mapa de histogramas encontrados para $U_e = 2$: a) componente horizontal da velocidade, U_{mean} ; b) componente vertical da velocidade, V_{mean}

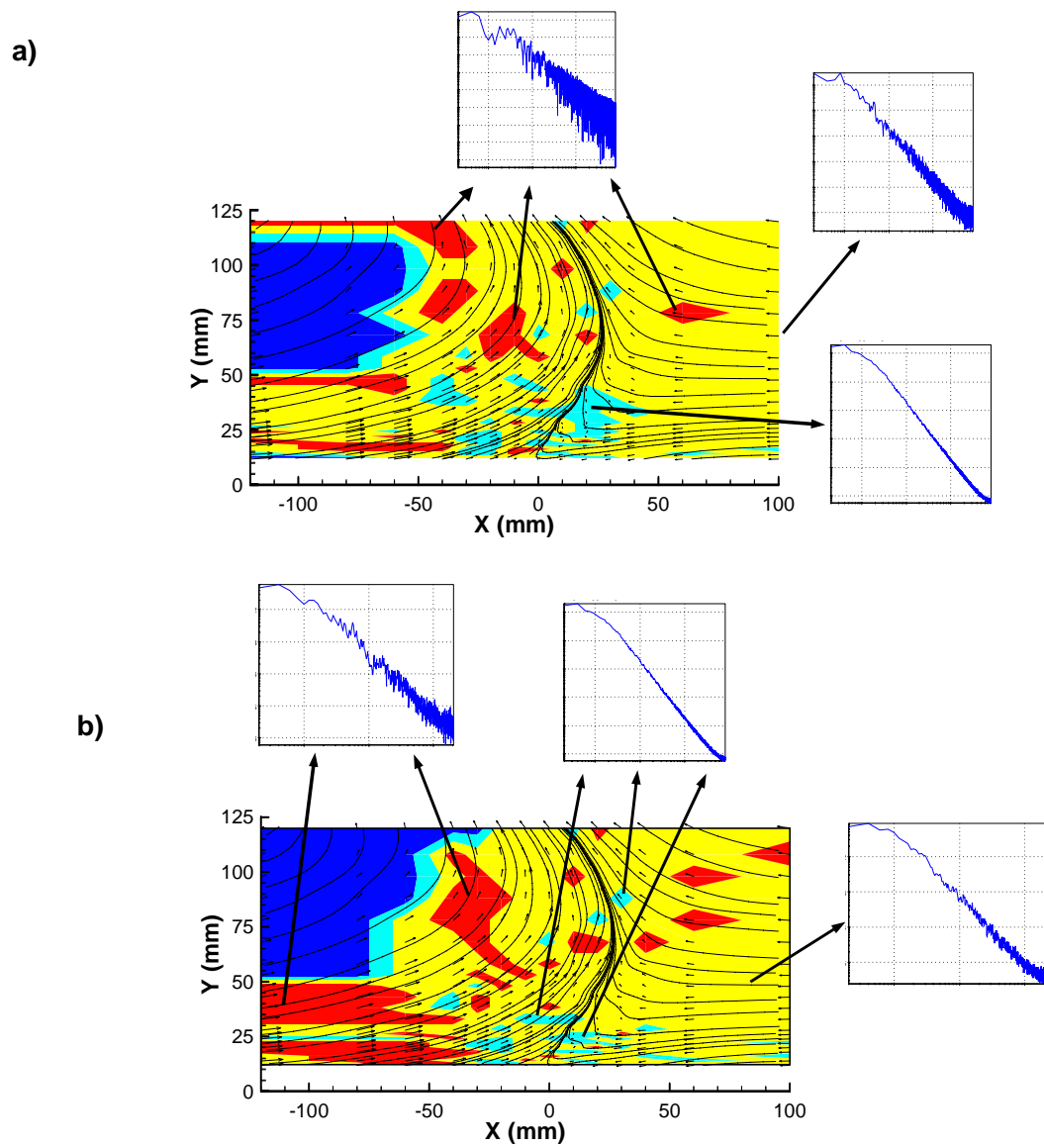


Figura 3. 12 Diagrama dos espectros de energia para $U_e=2$: a) componente horizontal da velocidade, U_{mean} ; b) componente vertical da velocidade, V_{mean} .

O aparecimento de instabilidades de baixas frequência deve estar provavelmente associado com o pequeno vórtice localizado a montante do ponto de separação. De acordo com o que já foi anteriormente referido, este vórtice secundário apresenta um comportamento cíclico de contracção e expansão, o designado “puffing” observado em várias configurações estudadas para um jacto incidente com a presença de um escoamento cruzado.

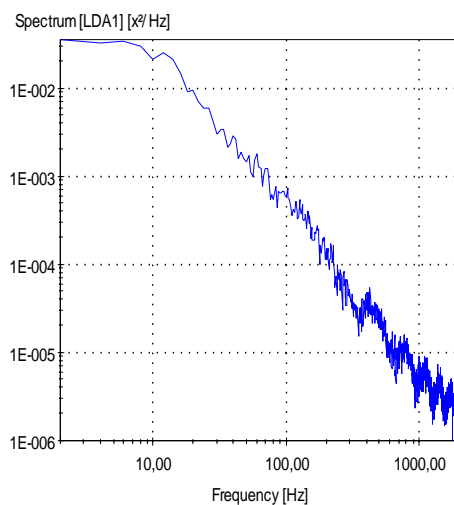


Figura 3. 13 Espectro da componente vertical da velocidade, V_{mean} com picos de elevada frequência em $(X,Y,Z)=(-20,108,0)$ para $U_e=2$.

O crescimento do vórtice secundário não pode ser atribuído aos vórtices presentes na camada de corte, os quais são transportados com o escoamento jacto de parede. Os vórtices presentes na camada de corte possivelmente não estão presentes na zona de escoamento deflectido resultante da colisão da camada limite com o jacto de parede, pois a componente vertical da velocidade média é sempre positiva acima do vórtice. As instabilidades anteriormente referidas para o caso de jacto incidente em escoamentos cruzados não confinados podem também estar associadas com o pequeno vórtice localizado a montante do ponto de separação, mas devido ao seu pequeno tamanho, pode não ter sido detectado e assim ter sido relacionado com a presença destas instabilidades de baixa frequência anteriormente descritas para razões de velocidade (entre o jacto incidente e escoamento cruzado) elevadas.

Capítulo 4

CONCLUSÃO

Nesta tese foram apresentadas e discutidas as características de um escoamento tipo “ground vortex” no plano longitudinal de simetria, para o qual se projectou e construiu uma instalação que dá origem a uma configuração bidimensional, resultante da colisão de um escoamento jacto de parede com um escoamento camada limite. As medições foram feitas com velocímetro Laser-Doppler que permitiu determinar e analisar as principais características do campo de velocidades do “ground vortex”. Foi estudada situação de uma razão de velocidades entre o escoamento camada limite e o escoamento jacto de parede, $U_e = 0,5$. Os resultados mostraram a presença de um pequeno escoamento vórtice localizado a montante do ponto de separação, ainda não referido anteriormente para este tipo de escoamento estudado. O desenvolvimento do vórtice secundário não pode ser atribuído aos vórtices da camada de corte, os quais são transportados através do jacto de parede. Os vórtices da camada de corte não poderão juntar-se ao escoamento curvo resultante da colisão da camada limite com o jacto de parede, pois a componente vertical da velocidade acima do vórtice é sempre positiva.

A sequência encontrada para o desenvolvimento do vórtice secundário situado perto do ponto de separação da zona de colisão, através de estudos de visualização efectuados por Barata et al (2008), pode ser interpretada como uma oscilação da zona de separação ou também por uma oscilação na origem virtual do escoamento deflectido. A presença de diagramas bimodais na componente horizontal da velocidade média, U_{mean} , localizados na zona de separação, confirma o comportamento de oscilação. Reporta-se ainda que apesar da estrutura turbulenta na zona de separação apresentar um comportamento instável, os espectros de energia de U_{mean} não revelaram a presença de picos de amplitude significativa na frequência. Contudo na zona central onde o escoamento é deflectido, ou seja, na zona de repuxo onde a componente vertical V_{mean} atinge os seus máximos, foram identificados casos pontuais com picos de elevada frequência.

Trabalhos futuros

No que diz respeito a trabalhos futuros, é possível estabelecer um conjunto de direcções de investigação interessantes, uma vez que esta dissertação não exaure o assunto nela abordado.

Assim, salientam-se alguns dos vários estudos que seriam interessantes realizar em seguimento a esta dissertação:

- Estudar diferentes razões de velocidades que permitissem a utilização da bancada experimental utilizada nesta dissertação. O estudo de um conjunto de razão de velocidades seria útil para o relacionamento de possíveis regimes associados com as instabilidades, bem como o relacionamento de alguns parâmetros associados às instabilidades que possivelmente originam efeitos secundários no “ground vortex”.

- A realização de um estudo numérico, validado pelos resultados experimentais presentemente apresentados, levaria uma melhor compreensão e análise dos resultados experimentais, uma vez que somente foram refinadas algumas zonas no campo de velocidades, tendo sido estas seleccionadas de acordo com os estudos experimentais de visualização.

Bibliografia

- Barata, J.M.M., Durão, D.F.G., Heitor, M.V. (1986) Experimental and Numerical Study on the Aerodynamics of Jets in Ground Effect. Tenth Symposium on Turbulence, September 22-24, Rolla, Missouri.
- Barata, J.M.M., Durão, D.F.G., Heitor, M.V. (1987), “The Turbulent Characteristics of a Single Impinging Jet Through a Crossflow. Sixth Symposium on Turbulent Shear Flows, September 7-9, Toulouse.
- Barata, J.M.M. (1989), Estudo Numérico e Experimental de Jactos Incidentes sobre Placas Planas através de um Escoamento Cruzado”, Dissertação de Doutoramento em Engenharia Mecânica, UTL, Lisboa ,Portugal
- Barata, J.M.M., Durão, D.F.G., Heitor, M.V. (1991a) Turbulent Energy Budgets in Impinging Zones. Eighth Symposium on Turbulent Shear Flows, September 9-11, Munich.
- Barata, J.M.M., Durão, D.F.G., Heitor, M.V. (1991b) Impingement of Single and Twin Turbulent Jets Through a Crossflow. AIAA Journal, Vol. 29, No. 4:595-602.
- Barata, J.M.M. (1996a) Ground Vortex Formation with Twin Impinging Jets. International Powered Lift Conference. SAE Paper 962257, November 18-20, Jupiter, Florida.
- Barata, J.M.M. (1996b) Fountain Flows Produced by Multiple Jets in a Crossflow. AIAA Journal, Vol. 34, No. 12: 2523-2530.
- Barata, J.M.M., Durão, D.F.G. (2004) Laser-Doppler Measurements of Impinging Jets Through a Crossflow. Experiments in Fluids, Vol.36, No.5:117-129.
- Barata, J.M.M., Durão, D.F.G. (2005) Laser-Doppler Measurements of a Highly Curved Flow. AIAA Journal, Vol. 43, No.12:2652-2655.
- Barata, J.M.M., Ribeiro, S., Santos, P., Silva, A., Silvestre, M., (2008) Experimental Study of Instabilities and Secondary Effects of a Ground Vortex Flow, 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 7-10 January / Reno, NV.
- Castro I P, Bradshaw P (1976) The turbulence structure of a highly curved mixing layer. J. Fluid Mech 73, Part 2: 265-304
- Cimbalá, J.M., Stinebring, D.R., Treaster, A.L., Billet, M.L., (1988) Experimental Investigation of a Jet Impinging on a Ground Plane in Crossflow. Journal of Aircraft, Vol. 25, No. 10:923-931.

BIBLIOGRAFIA

- Cimbala, J.M., Billet, M.L., Gaublomme, D.P., Oefelein, J.C. (1991) Experiments on the Unsteadiness Associated with a Ground Vortex. *Journal of Aircraft*, Vol. 28, No. 4:261-267.

- Gilbert, B.L. (1983) Detailed Turbulence Measurements in a Two-Dimensional Upwash. *AIAA 16th Fluid and Plasma Dynamics Conference*, AIAA paper 83-1678, July 12-14, Danvers, Massachusetts.

- Harman, T.B., Cimbala, J.M., Billet, M.L. (1994) Reduction in Size and Unsteadiness of VSTOL Ground Vortices by Ground Fences. *Journal of Aircraft*, Vol. 31, No. 3:579-584.

- Knowles, K., Bray, D., Bailey, P. J., Curtis, P., (1990) Impinging Jets in Crossflow. *International Powered Lift Conference*, Royal Aeronautical Society, London, 29-31 August.

- Knowles, K., Bray, D. (1991) The Ground Vortex Formed by Impinging Jets in Crossflow. *AIAA 29th Aerospace Sciences Meeting*, AIAA Paper 91-0768, January 7-10, Reno, Nevada.

- Metha R.D., Bradshaw P. (1979) Design Rules for Small Low-Speed Wind Tunnels.

- Pandya, S. A., Murman, S.M., Sankaran, V., (2003) Unsteady Computations of a Jet in Crossflow with Ground Effect. *33th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, 23-26 June / Orlando, FL.

- Rockwell, D., Naudascher, E. (1979) Self-Sustained Oscillations of Impinging Free Shear Layer. *Annual Reviews Fluid Mech.* 11:67-94.

- Saddington, A.J., Knowles, K., Cabrita, P.M. (2007) Flow Visualization and Measurements in a Short Take-off, Vertical Landing Fountain Flow. *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, January 8-11, Reno, Nevada.

- Saripalli, K.R. (1987) Laser Doppler Velocimeter Measurements in 3D Impinging Twin-Jet Fountain Flows. *Turbulent Shear Flows*, edited by Durst et al., Springer-Verlag, Berlin, 5:147-168.

- Saripalli, K.R. (1983) Visualization of Multijet Impingement Flow. *AIAA Journal*, 21:483-484.

- Van Dalsem, W.R., Panaras, A.G., Steger, J.L. (1987) Numerical Investigation of a Jet in a Ground Effect with a Crossflow. *International Powered Lift Conference*, SAE Paper 872344, December 7-10, Santa Clara, California.

- Yanta, Z., Smith, R.A. (1973) Measurements of Turbulent-Transport Properties with Laser-Doppler Velocimeter. *AIAA Paper 73-0169*, 11th Aerospace Sciences Meeting, Washington.

