



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Numerical Study of Aerodynamically Flow Interaction

Pedro dos Santos Duarte Carvalho

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Aeronáutica

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor André Resende Rodrigues da Silva

Covilhã, Outubro de 2012

Dedicatória

Por todo o apoio, amizade e inspiração Diana Vieira.

Agradecimentos

Quero agradecer ao meu orientador o Professor Doutor André Resende Rodrigues da Silva pelo seu acompanhamento em todas as etapas da elaboração desta dissertação.

Quero também agradecer a todos os professor que, durante esta jornada da minha vida académica me possibilitaram adquirir todas as ferramentas necessárias para o futuro e permitiram, através do conhecimento passado, ensinar não somente conhecimento académicos mas também lições necessárias á vivência em sociedade. Um especial agradecimento ao Professor Doutor Jorge Manuel Martins Barata.

A nível pessoal quero agradecer aos meus pais e irmão por todo o apoio dado em todos os momentos da minha jornada.

Quero agradecer ao Engenheiro Fernando Manuel Pereira Neves pela amizade e ajuda, que quando pedida nunca hesitou em dar.

Por fim, um especial agradecimento á Diana Filipa da Conceição Vieira pelo apoio incondicional desde o início da minha jornada académica das mais diversas formas apoiando-me quando mais precisava.

Pedro Carvalho

Covilhã, Outubro 2012

Resumo

Esta dissertação é constituída por dois estudos que focam a interacção entre jactos múltiplos em diferentes configurações de escoamento distribuídos em dois temas, o primeiro tema denominado '*Numerical Study of Aerodynamically Enhanced Mixing*' e o segundo '*Numerical Study of Twin Impinging Jets Aligned with Low Velocity Crossflow*'.

O primeiro tema abordada a mistura turbulenta de jactos coaxiais em duas configurações, escoamento confinado e não confinado, para razões de diâmetro inferior a 2 sendo diversas as áreas de aplicação como ejectores, bombas de jactos, câmaras de combustão para motores a jacto e particularmente, motores *turbofan* com baixa razão de *bypass*. Simulou-se computacionalmente camadas de corte bidimensionais em escoamentos de mistura de jactos utilizando o modelo de turbulência $k - \epsilon$, sendo comparados os dados numéricos resultantes da simulação com dados experimentais revelando boa capacidade de simulação para este tipo de escoamento por parte do modelo adoptado. Contudo de salientar a ausência total de qualquer tipo de recirculação apesar da forte interacção verificada entre jactos, e a região de interacção entre o jacto exterior e o jacto interior apresentou elevados níveis de energia cinética turbulenta, na configuração com superfície superior sólida.

Múltiplos jactos incidentes alinhados com escoamento cruzado de baixa velocidade representa o segundo tema abordado nesta dissertação sendo um tema de interesse para as mais diversas áreas, entre as quais, o arrefecimento de equipamentos, dispersão de poluentes e em especial para aeronaves VSTOL, ou seja aeronaves com capacidade de descolagem e aterragem vertical ou em curtas distâncias focando particularmente a aeronave F-35 aquando operando em modo VSTOL próximo do solo. Neste estudo simulou-se computacionalmente jactos múltiplos tridimensionais alinhados com escoamento cruzado embatendo numa superfície sólida para 3 razões de velocidade, comparando-se dados numéricos resultantes da simulação computacional com dados experimentais concluindo-se que o modelo computacional subdimensiona o escoamento apesar de terem sido encontrados *ground vortex* para as duas razões de velocidade mais elevadas.

Palavras-chave

VSTOL, jactos múltiplos, jactos incidentes, simulação computacional, escoamento cruzado.

Abstract

This thesis presents two studies focusing the interaction of multiple jets in two different flows configuration distributed in two themes namely ‘Numerical Study of Aerodynamically Enhanced Mixing’ and ‘Numerical Study of Twin Impinging Jets Aligned with Low Velocity Crossflow’.

The turbulent mixture of coaxial turbulent jets in a confined and an unconfined configuration for diameter ratio less than 2 is applied in several devices such as engineering ejector, jets pumps, industrial burners, combustion chambers of jet engines and in particular, turbofan engines with or without afterburners with low bypass ratio. In sequence of this study we simulate computationally a 2D shear layer in a confined and unconfined configuration for diameter ratio less than 2 using the $k - \epsilon$ turbulent model, being compared afterwards the numerical data from computational simulation with experimental results. From this study no recirculation zone were found despite the high levels of turbulent kinetic energy with high values of shear stress between jets and between second jet and solid surface revealing good capabilities of computational simulation for this kind of flow.

Multiple impinging jets aligned with a low velocity crossflow represent a subject of interest in several devices such as cooling of equipment, pollution dispersion and specialty VSTOL aircrafts with the capability of vertical take-off being a test case the F-35 aircraft when operating in VSTOL mode near ground. The present 3D computational simulation of multiple impact jets aligned with a low velocity crossflow for three velocity ratios show numerical data underdeveloped in comparison with experimental data despite the presence of *ground vortex* for the highest two velocity ratios.

Keywords

VSTOL, multiple jets, impinging jets, computational simulation, crossflow.

Índice

Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xv
Lista de Acrónimos.....	xvii
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Revisão Bibliográfica.....	7
1.3. Objectivos.....	17
2. Modelo Computacional.....	19
2.1. Modelo Matemático.....	19
2.2. Modelo Numérico e Condições de Fronteira.....	20
3. Resultados.....	31
3.1. Numerical Study of Aerodynamically Enhanced Mixing.....	31
3.2. Numerical Study of Twin Impinging Jets Aligned with Low Velocity Crossflow.....	38
3.2.1. Perfis de velocidade para razão de velocidade, $R = 22.5$	39
3.2.2. Perfis de velocidade para razão de velocidade, $R = 33.7$	46
3.2.3. Perfis de velocidade para razão de velocidade, $R = 43.8$	52
3.2.4. Análise 3D do impacto de jacto incidentes alinhados com escoamento cruzado de baixa velocidade.....	57
4. Conclusões.....	63
5. Bibliografia.....	65
6. Anexo.....	67
6.1. Artigos.....	67

Lista de Figuras

Figura 1. Aeronave F - 35 B	2
Figura 2. Harrier / AV - 8.....	3
Figura 3. Esquemática da Aeronave F - 35	4
Figura 4. Representação do escoamento na secção de teste	5
Figura 5. Esquemática da secção de teste	20
Figura 6. Configuração do escoamento: a) confinado, b) não confinado	21
Figura 7. Perfis verticais adimensionais das velocidades á entrada da secção de teste:	21
Figura 8. Representação da malha do domínio computacional confinado	22
Figura 9. Representação do domínio computacional não confinado.....	23
Figura 10. Esquemática de secções de teste	23
Figura 11. Independência de malha para configuração confinada para as estações:.....	24
Figura 12. Independência de malha para configuração não confinada para estações:	25
Figura 13. Esquemática da secção teste	26
Figura 14. Esquemática do domínio computacional	26
Figura 15. Malha exemplificativa, bidimensional no plano de simetria $Z = 0$	28
Figura 16. Malha tridimensional.....	29
Figura 17. Campos de velocidade U_{mean}/V_j , para $R = 22.5$, para as malhas:	30
Figura 18. Perfis verticais para razão de velocidade horizontal de configuração confinada ...	32
Figura 19. Perfis verticais para razão de velocidade horizontal de configuração não confinada	33
Figura 20. Perfis verticais para razão de velocidade vertical de configuração confinada	35
Figura 21. Perfis verticais para razão de velocidade vertical de configuração não confinada. 36	
Figura 22. Campos de energia cinética turbulenta para configuração confinada (a) e não confinada (b)	37
Figura 23. Imagem tridimensional do domínio computacional com representação das estações	39
Figura 24. Perfis verticais para razão de velocidade de 22.5 para:	40
Figura 25. Perfis horizontais de razão de velocidades 22.5 para:.....	43
Figura 26. Campos de velocidade de razão de velocidade 22.5 para:.....	45
Figura 27. Perfis verticais da razão de velocidades 33.7 para:	47
Figura 28. Perfis horizontais da razão de velocidade 33.7 para:	48
Figura 29. Campo de velocidades para razão de velocidades 33.7 para:	51
Figura 30. Perfis verticais da razão de velocidades de 43.8 para:	53
Figura 31. Perfis horizontais da razão de velocidades de 43.8 para:	54
Figura 32. Campos de velocidade de razões de velocidades 43.8 para:	55

Figura 33. Secção Teste completa (com plano de simetria visível) do campo de velocidades U_{mean}/V_j com marcadores para $R = 43.8$	58
Figura 34. Domínio computacional para razão de velocidade de 43.8 onde é visível campo de velocidade U_{mean}/V_j com marcadores de escoamento.....	60
Figura 35. Perfil de velocidade para razão de velocidade: a) 22.5, b) 33.7, c) 43.8.....	61
Figura 36. Comparação tridimensional para razões de velocidade: a) 22.5, c) 33.7 e d) 43.8	62

Lista de Tabelas

Tabela 1. Correspondência com figura 4	6
Tabela 2. Referências bibliográficas	14
Tabela 3. Equações diferenciais.....	19
Tabela 4. Constantes do modelo turbulento	20
Tabela 5. Dimensões da secção de teste e domínio computacional	27
Tabela 6. Razões de velocidades.....	27

Lista de Acrónimos

Φ	Propriedade escalar da equação (1)
μ_T	Viscosidade turbulenta
C_μ	Constante do modelo turbulento
C_1	Constante do modelo turbulento
C_2	Constante do modelo turbulento
σ_k	Constante do modelo turbulento
σ_ϵ	Constante do modelo turbulento
X	Coordenada horizontal
Y	Coordenada vertical
Z	Coordenada transversal
U	Velocidade horizontal
V	Velocidade vertical
W	Velocidade transversal
D	Diâmetro de jacto de impacto
H	Altura de impacto
S	Espaçamento entre centro de jactos incidentes
Re	Número de Reynolds
L	Comprimento do domínio computacional
T	Largura do domínio computacional
R	Razão entre a velocidade do jacto incidente e a velocidade do escoamento cruzado
k	Energia cinética turbulenta
ρ	Massa específica do fluido
λ	Razão de velocidade para tema de jactos múltiplos 2D
Gr	<i>Grashof number</i> ', designando parâmetro adimensionalizado na correlação de transferência de massa e calor
Z_t	Comprimento total do domínio computacional para múltiplos jactos incidentes
u	Componente da velocidade na direcção X
v	Componente da velocidade na direcção Y
r	Raio, respeitante á coordenada cilíndrica
Γ_ϕ	Coeficiente de transporte
S_ϕ	Termo fonte
ϵ	Dissipação da energia cinética turbulenta
C	Constante

Índices

mean	Valor médio
o	Valor do escoamento cruzado
j	Valor no bocal de saída do jacto incidente
i	Índice referente à direcção X
j	Índice referente à direcção Y

1. Introdução

1.1. Motivação

O processo de mistura turbulenta de jactos coaxiais em configuração confinada e não confinada representa um processo dinâmico e complexo de interesse para diversas áreas tendo aplicabilidade em ejectores, bombas de jacto, queimadores industriais, câmaras de combustão de motores a jacto, mísseis nucleares e em particular motores *turbofan*, com ou sem *afterburner*, para baixas razões de *bypass*. O tema de mistura de jactos coaxiais tem sido bastante estudado devido á sua importância em diversos equipamentos, contudo a mistura turbulenta de jactos coaxiais para razão de diâmetro entre jactos inferiores a 2 representa um tópico pouco estudado, por conseguinte, apresenta-se neste trabalho o estudo das camadas de corte geradas na sequência da mistura turbulenta de jactos bidimensionais em configuração confinada e não confinada. Através da utilização do código TEACH, sendo empregue o modelo de turbulência $k - \epsilon$, simulou-se bidimensionalmente as camadas de corte tendo sido incorporado nos resultados, nomeadamente gráficos de perfis de velocidade e campos de velocidade, a análise entre os dados numéricos gerados e dados experimentais. Com este estudo pretende-se validar o modelo computacional adoptado para este tipo de escoamento, assim como validar as conclusões experimentais do tema intitulado '*Numerical Study of Aerodynamically Enhanced Mixing*'.

O estudo de jactos incidentes alinhados com escoamento cruzado intitulado '*Numerical Study of Twin Impinging Jets Aligned with Low Velocity Crossflow*' com base num projecto experimental²⁶ consiste em dois jactos alinhados com escoamento cruzado de baixa velocidade embatendo numa superfície sólida plana. Diversos trabalhos sobre jactos incidentes em superfícies planas estão presentes na bibliografia uma vez que a aplicabilidade do conhecimento retirado é vasta sendo exemplos de aplicações o arrefecimento de pás de turbinas, moldagem de metais, arrefecimento de componente electrónicos, dispersão de poluentes em ambientes líquidos e gasosos, câmaras de combustão com injeção e tendo-se em especial interesse, na sequência deste estudo, o escoamento gerado da descolagem e aterragem vertical ou em pequena distância duma aeronave quando está próxima do solo, ou seja, aeronaves com capacidade VSTOL como o F-35B de configuração STOVL.



Figura 1. Aeronave F - 35 B

O segundo tema consiste na análise através de comparação gráfica entre dados numéricos e dados experimentais do trabalho “*Turbulent Structure of the Impact of a ground vortex flow*”²⁶ de Diana Filipa da Conceição Vieira, referenciado na bibliografia, com o intuito de verificar a capacidade de simulação do código computacional para este tipo de escoamento. O foco principal deste estudo consiste em compreender os fenómenos que ocorrem da operação da aeronave F - 35B Lightning II, figura 1ⁱ, operando em modo STOVL ou “*Short or Vertical Take-Off and Landing*” que designam aeronaves com capacidade de aterragem e descolagem vertical ou em curtas distâncias. Modo STOVL também é denominado por V/STOL ou simplesmente VSTOL. Esta aeronave apresenta a capacidade de descolar e aterrar verticalmente ou em curtas distâncias, característica muito interessante contudo de elevados problemas técnicos visto que o escoamento gerado é constituído por diversas estruturas aerodinâmicas que dificultam a operação. Segundo a Enciclopédia Luso-Brasileiraⁱⁱ V/STOL é um termo aeronáutico cujas iniciais designam “*Vertical / Short Take-Off and Landing*” aplicável a aeronaves de descolagem vertical ou curta podendo ser de dois tipos, propulsão por hélice/rotor ou para o caso de aviões, propulsão por motor combinado, podendo a propulsão e sustentação ser efectuada pelo mesmo motor ou por diferentes motores. O motor deve ser colocado no centro de gravidade da aeronave e ter quatro saídas de gases simétricos, todas com o mesmo impulso. Na descolagem as saídas são orientadas para baixo verticalmente e durante

ⁱ http://www.jsf.mil/f35/f35_variants.htm

ⁱⁱ Enciclopédia Verbo Luso-Brasileira da Cultura, Edição Século XXI, 2003. Texto da autoria de Luís M. B. Costa Campos, Professor do Instituto Superior Técnico de Lisboa



Figura 2. Harrier / AV - 8

o voo de transição rodam para trás até ficarem na posição horizontal correspondente ao voo convencional. A sequência inversa será efectuada do voo horizontal para o de transição e para voo vertical durante a aterragem, sendo que na presença de vento lateral, factor desestabilizador, a aeronave deve-se alinhar contra o vento. O motor combinado está em geral dimensionado para a descolagem vertical, sendo o peso máximo da aeronave limitado pelo impulso do motor, pelo que, em voo cruzeiro, em que o impulso necessário é menor, o motor fica sobredimensionado. Outra solução consiste em dimensionar o motor para voo cruzeiro, colocando-o na extremidade posterior da fuselagem. Deflectindo-se a saída de gases para baixo obtém-se impulso vertical, mas por forma a equilibrar estaticamente a aeronave são necessários jactos á frente do centro de gravidade, configuração representativa da aeronave em causa, F - 35.

Diversas aeronaves são exemplos de possuíram capacidade VSTOL, sendo talvez das mais conhecidas o British Aerospace Harrier/McDonnell Douglas AV - 8, representado na figura 2ⁱⁱⁱ, sendo propulsionado por um motor de propulsão/ sustentação combinado Rolls-Royce Pegasus tendo sido utilizado pela força aérea e marinha britânica, fuzileiros americanos e marinha italiana, espanhola e indiana. Outro exemplo de aeronave VSTOL é o Yakovler Yak-36 Forger utilizado pela marinha soviética, bem como o VAK 191 B, aeronave experimental alemã e o EWR VJ 101C, primeiro caça VSTOL supersónico utilizador de motores giratórios de propulsão e sustentação nas pontas das asas e motores de sustentação na fuselagem. A aeronave em foco para a qual o presente estudo foi direccionado é o F - 35 Lightning II, advém da parceria de 4 companhias, Lockheed Martin, Northrop Grumman, BAE Systems e Pratt & Whitney, na qual o sistema que permite o modo STOVL da aeronave pertence á Rolls-Royce, o Rolls-Royce LiftSystem. Durante a execução de uma das

ⁱⁱⁱ © 2012 BAE Systems.



Figura 3. Esquemática da Aeronave F - 35

manobras mais característica o F - 35, figura 3^{iv}, reduz a velocidade horizontal e através dos jactos mantém-se a pairar no ar e á medida que a aeronave desce os jactos exercem força no solo através do redireccionamento do bocal do jacto principal, laterais e motor frontal. Quando a altura do bocal do jacto ao solo é suficientemente pequena provoca a formação de um *ground vortex*, estrutura esta que consiste numa recirculação devido ao embate de um jacto numa superfície sólida com formação de jacto de parede que na presença de escoamento cruzado adquire sentido ascensional e posterior sentido contravento gerando-se o *ground vortex*, com efeitos negativos para a operação da aeronave nestas condições visto este o *ground vortex* acelera a velocidade do escoamento cruzado contornando esta estrutura diminuindo a pressão debaixo da asa com diminuição de sustentação. Contudo são diversos os fenómenos aerodinamicamente prejudiciais para a operação da aeronave como perda de potência devido á re-ingestão dos gases de escape, perdas de sustentação, aumento do arrasto próximo do solo, instabilidade aerodinâmica na superfície inferior devido á alteração das forças e momentos aplicados na aeronave e aumento da temperatura da fuselagem. Uma vez que este fenómeno é genericamente incompreendido torna-se necessário o estudo do escoamento deste tipo de forma a conhecer todos os processos e forças envolventes de forma a contrariar os efeitos nefastos á operação da aeronave.

A figura 4 consiste numa representação do escoamento simulado com os fenómenos e estruturas presentes na secção de teste tendo em conta o conhecimento dos dados experimentais *a priori*. A tabela 1 apresenta as correspondências aos números presentes na figura 4, sendo visível que o jacto montante descendente ao penetrar e embater na superfície de impacto gera jactos de parede que se propagam radialmente ao longo da superfície.

^{iv} Aircraft Imager © Lockheed Martin 2012

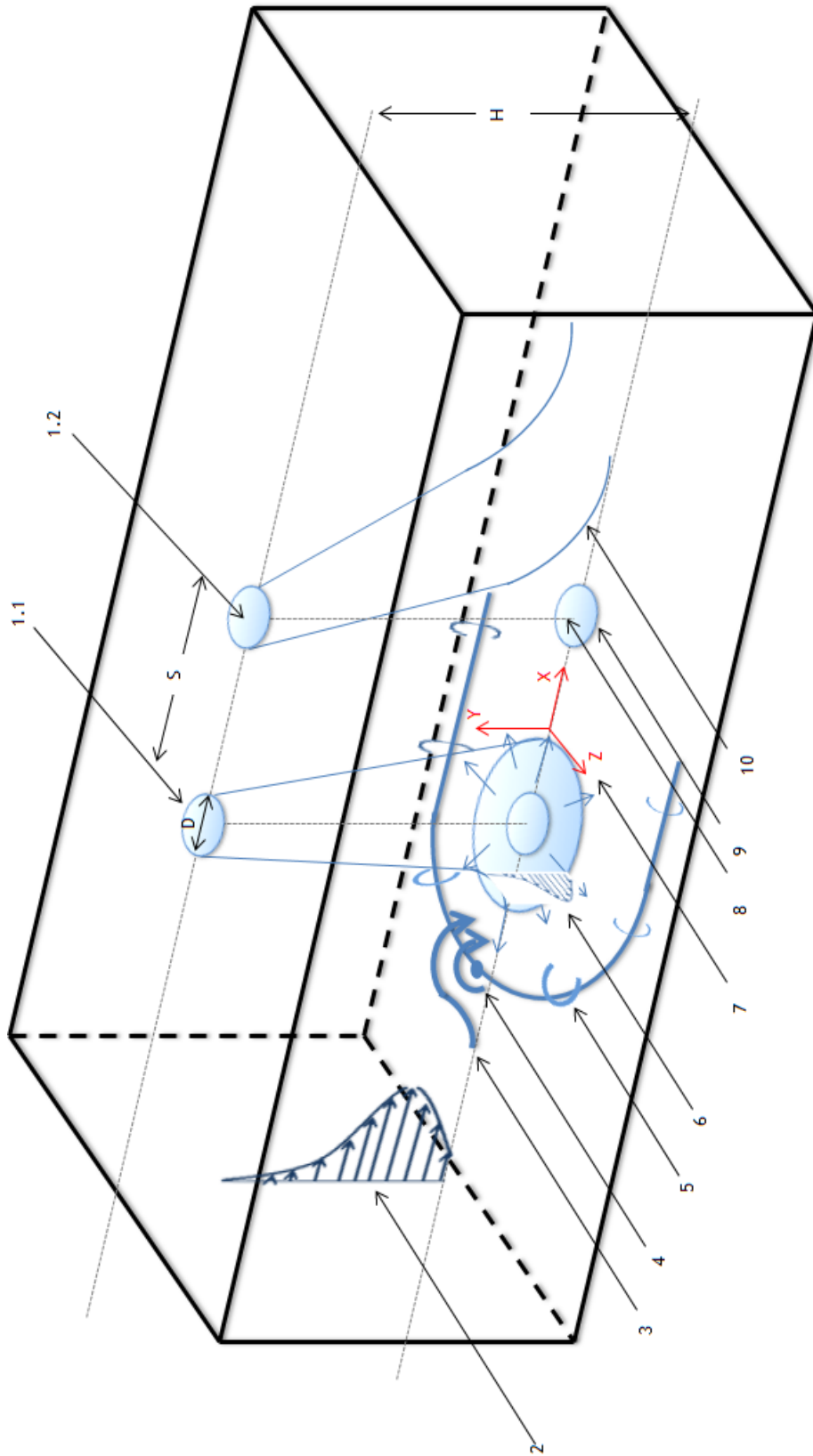


Figura 4. Representação do escoamento na secção de teste

Número	Correspondência	Denominação alternativa
1.1	Jacto montante	Primeiro jacto
1.2	Jacto jusante	Segundo jacto
2	Perfil de velocidade para escoamento cruzado	<i>Crossflow</i>
3	Ponto de penetração máximo	<i>Maximum penetration point</i>
4	Ponto de separação	<i>Separation point</i>
5	Vórtice de solo	<i>Ground vortex</i>
6	Perfil de velocidade para jacto de parede	<i>Wall jet</i>
7	Eixos de coordenadas	-
8	Eixo vertical do centro do jacto jusante	-
9	Projeção do jacto jusante na parede sul	<i>Impact point</i>
10	Linhas directrizes do escoamento	-
D	Diâmetro dos jactos de impacto	-
S	Distância entre centro de jactos	-
H	Altura de Impacto	-

Tabela 1. Correspondência com figura 4

Da interacção do jacto de parede com escoamento cruzado forma-se o *ground vortex* que se propaga longitudinalmente ao longo da secção de teste que ao contornar o jacto incidente a montante ou primeiro jacto gera uma estrutura em forma de cachecol denominado scarf vortex. Assim sendo, o presente trabalho consiste na simulação numérica de múltiplos jactos incidentes alinhados com o escoamento cruzado de baixa velocidade próximo do solo a uma altura de $H/D = 20.1$. Ao contrário de trabalhos anteriores, o presente trabalho consiste em dois jactos incidentes alinhados com o escoamento cruzado de baixa velocidade ao invés de dois jactos transversais, característica que torna a presente configuração única, característica associada á aeronave F - 35 VSTOL. Os dados experimentais serão integrados com dados numéricos permitindo assim verificar a validade do programa para este tipo de escoamento e numa fase posterior analisar de modo mais pormenorizado todos os fenómenos envolvidos, por forma a melhor entender este tipo de

escoamento e aumentar o conhecimento das estruturas formadas, em especial, a geração e propagação de *ground vortex*.

1.2. Revisão Bibliográfica

Na bibliografia existente sobre a mistura turbulenta de jactos coaxiais existem diversos parâmetros agrupados em geométricos e operacionais que influenciam o processo de mistura turbulenta. Estes parâmetros são as razões de velocidade, temperatura, de massa específica entre os jactos, efeito de compressão, níveis de turbulência presente nos jactos, gradiente de pressão e forma do bocal. Ahmed e Sharma¹ apresentaram uma revisão extensa sobre a mistura de jactos coaxiais, e do trabalho experimental efectuado com a utilização de LDV^v para as medições de pressão total e estática bem como razões de velocidade entre os dois jactos, concluíram que o decréscimo da pressão total é superior quando a razão de velocidade aumenta sendo, contudo, mínima quando a razão de velocidade é 1, isto é, quando a velocidade do jacto interior e exterior é igual. Acharya³ efectuou um estudo detalhado da influência da velocidade e razão de temperatura no processo de mistura confinado, concluindo que a tensão de corte entre os dois fluxos turbulentos é maior quando tem-se uma configuração confinada de jactos, em comparação com uma configuração não confinada. Zawacki e Weinstein⁷ e Rozeman e Weinstein⁸ efectuaram estudos numa gama alargada de razões de velocidade demonstrando a presença de vórtices perto da saída dos jactos para razões de velocidade elevadas, atribuído a um processo de mistura turbulento mais eficiente na região da camada de corte. Os resultados experimentais para razões de velocidade, λ , inferiores a 1 demonstraram que os perfis de velocidades uniformes são conseguidos muito mais rapidamente que para razões de velocidade elevadas¹⁻³. Uma vasta gama de razões de velocidade foi estudada por estes e outros investigadores revelando que a razão de velocidade é um factor importante no processo de mistura turbulenta. A razão de transferência de quantidade de movimento entre jactos aumenta quando a razão de velocidade aumenta promovendo, consequentemente, uma mistura turbulenta também mais rápida, que por sua vez é um factor importante a ter em conta em muitas aplicações práticas, tais como os sistemas de turbinas a gás para o processo de combustão e exaustão através de um bocal de saída. Outros estudos reportaram os níveis de turbulência de jactos^{9,10} concluindo que níveis elevados de turbulência permitem uma mistura mais rápida, não revelando, contudo, a presença de qualquer zona de recirculação devido às razões de velocidade utilizadas. Análises semelhantes sobre o efeito de rotação ou *swirl* no processo de mistura turbulenta^{11,12} foram efectuadas. Uma vasta gama de razões entre os diâmetros dos jactos ($2 < d_{\text{ext}}/d_{\text{int}} < 38$) também foi estudado. Quando a razão de diâmetros de jacto é elevada, a transferência da quantidade de movimento entre jactos aumenta para $\lambda > 1$ e obtêm-se mais

^v ‘*Laser Doppler Velocimetry*’, também conhecido por ‘*Laser Doppler Anemometry*’ (LDA) representa uma técnica óptica não intrusiva para medições de velocidade e distribuição turbulenta para escoamentos livres ou internos 1D, 2D e 3D.

rapidamente um perfil de velocidade axial uniforme, contudo quando a razão entre o diâmetro do jacto exterior e interior é baixa, a transferência de quantidade de movimento entre jactos aumenta para razão de velocidade, λ , inferior a 1. Razinsly e Brighton² estudaram o efeito da razão de diâmetros dos jactos entre 3 e 6 e descobriram níveis de turbulência elevados para razões mais elevadas. Eles também concluíram que o comprimento necessário para uma mistura completa não é afectado pelo intervalo de razões de diâmetros estudado. A investigação do efeito da razão de diâmetros para aplicações práticas como ejectores, demonstrou que a extensão do fluxo secundário aumenta linearmente com o diâmetro¹². Neves et al.¹³ estudaram numericamente o efeito da intensidade turbulenta no processo de mistura turbulenta de jactos coaxiais e concluíram que para níveis de intensidade turbulenta elevados do jacto externo um vórtice é sempre encontrado para razões de velocidade de 6 ou superiores sendo independente da razão de intensidade turbulenta. Quando a intensidade turbulenta do jacto interior é constante e a razão de intensidade turbulenta diminui, a zona de recirculação diminui o seu tamanho, movendo-se o seu centro para montante até desaparecer. A existência de gradiente de pressão favorável tem um efeito semelhante, revelado que este é um parâmetro adicional a ter em consideração como a razão de velocidade e a razão de níveis de intensidade turbulenta no que toca á zona de recirculação. Sendo apresentado na tese de doutoramento do mesmo o estudo experimental de jactos múltiplos na qual este tema se baseou.

Tendo em conta o tema de jactos incidentes múltiplos intitulado '*Numerical Study of Twin Impinging Jets Aligned with Low Velocity Crossflow*', é apresentado na tabela 2 um resumo esquematizado da bibliografia referente ao tema. Rodi e Srivatsa¹⁴ através da comparação de dados experimentais com numéricos utilizando método de diferenças finitas com o intuito de comparação de métodos elíptico e parabólicos para jactos incidentes com diâmetro de $D = 25.4$ mm a uma altura de impacto H de 53.85 mm para duas razões de velocidade de 0.1 e 0.3, concluíram que o método elíptico desenvolvido demonstrou maior economia computacional.

Barata et al¹⁵ desenvolveram um estudo com água para razão de velocidade de 30 a uma altura do bocal de jacto até placa de impacto de $H/D = 5$ e $Re = 6 \times 10^6$ utilizando o algoritmo SIMPLE^{vi} com método híbrido e QUICK^{vii} na qual próximo da placa fora utilizado método de Lauder e Spalding. A razão de declínio do jacto incidente é prevista acima do real sugerindo razões de difusão elevadas. Já a velocidade próximo de parede está prevista abaixo do real. Concluíram que é preferível utilizar o modelo de transporte de tensão de Reynolds para a simulação deste tipo de escoamento.

^{vi} '*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*', representa um método numérico utilizado para resolução das equações de Navier - Stokes, desenvolvido por Spalding e Patankar.

^{vii} '*Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics*', representa um método de interpolação quadrática para modelação dos termos convectivos da equação geral de transporte de uma variável Φ .

Autores	Escoamento	Método	Resultados	Comentários
<p>W. Rodi</p> <p>S. K. Srivatsa</p>	<p>D = 25.4 mm</p> <p>L = 308.4 mm</p> <p>H = 53.85 mm</p> <p>X = 1219.2 mm</p> <p>R = 0.1, 0.3</p>	<p>Experimental com fins de comparação com modelo numérico utilizando método de diferenças finitas para resolução das equações de governo referenciadas.</p>	<p>Gráficos de configuração do escoamento.</p> <p>Gráfico $\frac{P_T}{\frac{1}{2}\rho w^2_{in}} vs Y/D$</p> <p>Gráficos $\frac{P_T}{\frac{1}{2}\rho w^2_{in}} vs Z/D$</p> <p>Gráficos $\frac{P}{\frac{1}{2}\rho w^2_{in}} vs Z/D$</p>	<p>O novo método elíptico proposto apresenta maior economia em termos de memória computacional tendo aplicação para diversos tipos de escoamento.</p>
<p>J. M. M. Barata</p> <p>D. F. G. Durão</p> <p>M. V. Heitor</p> <p>J. J. McGuiirk</p>	<p>Água</p> <p>Re = 6×10^6</p> <p>R = $V_j / U_0 = 30$</p> <p>H / D = 5</p>	<p>Método das diferenças finitas baseado no algoritmo SIMPLE, com utilização do método QUICK para modelação</p>	<p>Visualização da configuração do escoamento</p> <p>Perfis verticais da velocidade horizontal</p> <p>Perfis verticais da flutuação da velocidade</p> <p>Distribuição dos vectores de velocidade média.</p> <p>Perfil dos termos de produção e convecção, nas equações de conservação para energia cinética turbulenta.</p>	<p>A razão de decréscimo do jacto incidente é menor sendo que as velocidades perto da parede apresentam valores abaixo do esperado estando presentes erros elevados de modelação principalmente na zona de impacto do modelo computacional.</p> <p>Concluindo a preferência na utilização do modelo de transporte da tensão de Reynolds.</p>

<p>J. M. M. Barata</p>	<p>Escoamento de água com diâmetro de jacto D = 20 mm a uma altura de impacto H/D = 5 e de comprimento L/D = 15. Re_j = 105,000 R = V_j/U₀ = 30</p>	<p>Escoamento experimental cujos resultados foram obtidos através de 'Laser Doppler Measurements', tendo sido comparado os dados experimentais com dados numéricos resultantes do modelo computacional baseado nas equações tridimensionais de Navier-Stokes através das diferenças finitas com esquema QUICK recorrendo ao modelo de turbulência k - ε</p>	<p>Gráficos $\frac{\bar{u}}{V_j}$ vs Z/D Gráficos $\frac{\bar{v}}{V_j}$ vs Z/D Gráficos $\frac{1}{3}k/V_j^2 \times 10^3$ vs Z/D Gráficos $\frac{\bar{u}}{V_j}$ vs X/D Gráficos $\frac{\bar{v}}{V_j}$ vs X/D Gráficos $\frac{1}{3}k/V_j^2 \times 10^3$ vs X/D Gráficos $\frac{P}{P_a}$ vs (S - Z)/D Gráficos $\frac{P}{P_{st}}$ vs (S - Z)/D</p>	<p>Os dados demonstram que jactos incidentes penetram no escoamento cruzado gerando-se uma configuração semelhante ao de um escoamento típico de 2 a 3 jactos. A fonte ascendente central forma-se devido á interacção dos jactos de parede com a influência dos vórtices de solo a jusante. Os dados revelam níveis de turbulência não previstos no escoamento ascensional próximo do solo. O método computacional mostra uma capacidade adequada de simulação genérica para este tipo do escoamento.</p>
<p>M. A. Leschziner N. Z. Ince</p>	<p>Escoamento de água e ar dependente do caso em estudo, sendo, por conseguinte, simulado computacionalmente 3 casos de estudos (i., ii. e iii.) baseados em configurações de escoamentos experimentais.</p>	<p>Fora utilizado o modelo de tensão de Reynolds e modelo de viscosidade eddy, k - ε .</p>	<p>Gráficos de campos de velocidade Gráficos de campos de tensão de Reynolds. Contornos do escoamento consoante número de Mach. Gráficos da variação da pressão-estática e dinâmica. Perfis de tensão normal.</p>	<p>Neste artigo são comparados dois modelos numéricos, o modelo de tensão de Reynolds e modelo de viscosidade eddy k - ε, tendo por bases os seguintes trabalhos experimentais: (i) Saripalli`s incompressible twin jets (ii) Abbot and White`s compressible twin jets (iii) Barata et al.`s incompressible jet in cross-flow Concluindo-se que de uma forma genérica o modelo de tensão de Reynolds apresenta melhor capacidade de simulação.</p>

<p>E. Baydar Y. Ozmen</p>	<p>Escoamento de ar na qual um jacto vertical confinado por duas placas de distanciamento variável embate numa parede de impacto para 3 números de Reynolds: Re = 30000, 40000 e 50000 H / D = 1, 2 e 4</p>	<p>Experimentalmente simulou-se o escoamento utilizando 'hot wire anemometry' Simulou-se numericamente o mesmo escoamento utilizando diferenças finitas com método SIMPLEC, utilizando-se o modelo de turbulência, $k - \epsilon$</p>	<p>Perfis de velocidade axial Distribuição do coeficiente de pressão radial</p>	<p>A placa causa um abrandamento do escoamento que deflecte o fluxo a 1D acima da placa de impacto. Para $H / D < 2$ ocorre região sub-atmosférica. Boa previsão do modelo de turbulência. Para $H / D < 1$ o modelo de turbulência não produz resultados aceitáveis.</p>
<p>Yue - Tzu Yang Yong - Xun Wang</p>	<p>Simulação tridimensional, incompressível e de propriedades termofísicas constantes de um escoamento de água na qual o jacto apresenta inclinação de 45°, embatendo numa placa aquecido a norte na presença de fluxo cruzado. D = 6 mm Re = 5000 R = 3, 5, 7</p>	<p>Simulação numérica utilizando o método de diferenças finitas na qual recorre-se ao modelo SIMPLE com modelo de turbulência $k - \epsilon$.</p>	<p>Gráfico Nu vs. 2/D Campo de velocidade horizontais Campo de velocidades verticais Campo de energia cinética turbulenta, k</p>	<p>O impacto do jacto gera 2 vórtices no qual o mais perto da saída (com rotação no sentido dos ponteiros do relógio) apresenta variação consoante a razão de velocidade.</p>

<p>Nicholas A. Worth Zhiyin Yang</p>	<p>Simulação computacional de um escoamento de água onde jactos verticais de impacto possuem velocidade $V_j = 3 \text{ m/s}$ na presença de crossflow de velocidade $U_0 = 0.1 \text{ m/s}$, cuja razão de velocidade é de 30. $Re = 60000$ $D = 0,02 \text{ m}$</p>	<p>Método RANS e RSM ou Reynolds Stress Model.</p>	<p>Perfis de velocidade média vertical e horizontal Perfis tensão normal axial média Distribuição média de tensão de corte Contornos de velocidade média axial (horizontal e vertical)</p>	<p>Da comparação dos dados em LES ou 'large eddy simulation' com modelo turbulento $k - \epsilon$ e dados experimentais revelaram que RSM apresenta melhor capacidade de simulação.</p>
<p>A. Abdel-Fattah</p>	<p>Simulação bidimensional, isotérmico e compressível de escoamento de ar com turbulência estável com dois jactos verticais de ângulo de incidência variável de diâmetro $D = 10 \text{ mm}$ com $Re = [9.5 \times 10^4; 22.4 \times 10^4]$</p>	<p>SIMPLE, CVFDM e TDMA</p>	<p>Gráfico do estudo de malhas. Gráficos de variação de distribuição de pressão na parede consoante ângulo de jacto, espaçamento de bocais, número de espaçamento bocal-placa e espaçamento bocal-bocal. Gráficos de contornos de velocidade axial consoante ângulo de jacto, espaçamento de bocais, número de Reynolds, espaçamento bocal-placa e espaçamento bocal-bocal. Gráficos de contornos de energia cinética turbulenta (níveis)</p>	<p>Região sub-atmosférica é gerada com jactos de número de Reynolds elevados e espaçamento entre bocal-placa baixos. Com aumento do número de Reynolds a pressão aumenta na região atmosférica superior e como consequência a região sub-atmosférica torna-se mais forte. Com o aumento do ângulo do jacto a pressão diminui e o seu valor máximo no ponto de estagnação primário move-se na direcção radial diminuindo a distância através do aumento do espaçamento entre jactos. A diferença de pressões entre ponto de estagnação primário e secundário diminui com o aumento da distância entre bocal e placa e com a diminuição do número de Reynolds. A zona de recirculação torna-se maior e mais larga consoante o aumento do ângulo do jacto, l/d e h/d. O aumento da dispersão do jacto diminui com aumento do espaçamento de bocal-placa e h/d. A energia cinética turbulenta aumenta com cada região de vorticidade no qual este incremento diminui com aumento do ângulo do jacto e/ou espaçamento bocal-placa.</p>

<p>Fang Jing-Yu Zhang Yan Wang Dao-Zeng</p>	<p>Razões de velocidade, $R = V_j/U_0 = 8, 12, 20$</p>	<p>LES RNG com modelo turbulento $k - \epsilon$</p>	<p>Perfis de velocidade Gráfico da trajetória do escoamento visível através de <i>streamlines</i></p>	<p>Resultados computacionais, LES, de acordo com a visualização experimental. As estruturas de vorticidade mudam de forma perto do bocal de saída consoante a razão de velocidades. Variação da vorticidade em água perto da parede com assimetria. Assimetria depende da forma, comprimento da estrutura, originários da saída do bocal e também do fluxo cruzado.</p>
<p>M. F. Koseoglu S. Baskaya</p>	<p>Escoamento de a sendo considerado um fluido estável, laminar e de propriedades constantes. $Re = 250, 500, 1000, 3000, 5000$ $H/D = 2, 4, 8, 12$ $Gr = 22900, 2586000$ $D = 10 \text{ mm}$</p>	<p>LDA CFD (PHOENICS com modelo SIMPLEST)</p>	<p>Gráfico de comparação Nu vs H/D Gráfico de comparação Nu vs X/D para diferentes valores de Re, GR, H/D. Campo de velocidade e distribuição de velocidade.</p>	<p>A biografia indica que se a diferença de temperatura entre jacto e placa é menor que 15°C, então a convecção natural pode ser negligenciada. Devido a correntes “<i>buoyancy</i>” indutores de convecção natural a razão de transferência de calor aumenta 37%.</p>

<p>A Radhouane H. Bournot N Mahjoab Said H Mhiri G Le Palec</p>	<p>Escoamento de ar no qual 2 jactos verticais inclinados na presença de fluxo cruzado de baixa temperatura incidem numa placa de impacto Re = 3,333 D = 10 mm</p>	<p>PIV Equações de Navier - Stokes com modelo RSM utilizando método de volume finito</p>	<p>Visualização do escoamento Perfis de velocidade vertical segundo ciclo longitudinal Segundo plano vertical consoante variações de inclinação α Contornos da velocidade Distribuição das tensões de corte segundo eixo longitudinal</p>	<p>Encontrados 4 tipos de vórtices, respectivamente, HSV ('horseshoe vortices'), WV ('wake vortices'), SLV ('shear layer vortices') e CVP ('contra rotating vortex pair') Quanto maior o impulso do jacto incidentes e maior ângulo melhor a mistura.</p>
<p>Jr-Ming Miao Chen-Yuan Wu Ping-Hei Chen</p>	<p>Escoamento de ar, de ar, de incompressível propriedades constantes. D = 5mm Re = [2440,14640] H/D=1, 3, 6.</p>	<p>Método QUICK para energia, esquema SIMPLEC para pressão e velocidade, método AMG ou "algebraic multi-grid" por forma a acelerar convergência para obter soluções estáveis. A malha é gerada pelo ICEM/CFD, ANSYS Inc.</p>	<p>Gráfico da razão de fluxo de massa local na fila intermédia de jactos ao longo do canal para diferentes configurações e valores. Contorno de velocidade ao longo do canal para diferentes configurações e valores. Distribuição do número de Nusselt ao longo do canal. Distribuição média lateral do número de Nusselt.</p>	<p>Segundo dados computacionais a uma altura de H/D entre 3 e 6 apresenta-se o melhor valor para as diferentes configurações por forma a ter-se uma distribuição mais uniforme da transferência de calor na placa.</p>

Tabela 2. Referências bibliográficas

Leschziner e Ince¹⁶ simularam 3 tipos de escoamento utilizando método de volumes finitos, 3D - BFC, para jactos múltiplos incidentes, incompressíveis e isotrópicos. O jacto múltiplo incidente incompressível múltiplo quando submetido a um escoamento cruzado de baixa velocidade revelou que o modelo de tensão de Reynolds apresenta melhor capacidade de simulação em comparação com modelo de viscosidade $k - \epsilon$, contudo para jactos subexpandidos este modelo apresenta melhor capacidade de simulação na globalidade.

Souris et al¹⁷ apresentaram um estudo com o intuito de melhorar as previsões na zona próxima da parede de impacto utilizando modelo ASM ou modelo algébrico de tensão turbulenta.

Baydar e Ozmen¹⁸ apresentaram um estudo experimental e numérico de jactos incidentes confinados para $Re > 30,000$ no qual a simulação computacional utilizou método de diferenças finitas, modelo SIMPLE^{viii}, utilizando o modelo de turbulência $k - \epsilon$, revelando previsões numéricas abaixo das experimentais tendendo o jacto a deflectir 1D acima da placa para um diâmetro $D = 25$ mm, para diversas alturas $H/D < 4$.

Yue - Tzu Yang e Young - Xun Wang¹⁹ apresentaram um estudo na qual foi simulado computacionalmente um escoamento tridimensional, incompressível de água, para um ângulo de jacto de 45° , tendo-se razões de velocidade de 3, 5 e 7 ($Re = 5,000$) com um diâmetro de 6 mm do bocal do jacto, revelando que o modelo numérico baseado no método SIMPLE com modelo de turbulência $k - \epsilon$ gera 2 vórtices na região de impacto do jacto, no qual o mais perto da saída, isto é o vórtice com rotação no sentido dos ponteiros do relógio, apresentando variação consoante a razão de velocidade.

Worth e Yang²⁰ fizeram um estudo computacional utilizando o programa comercial FLUENT^{ix} 6.1 na qual o método RANS^x fora utilizado com modelo RSM^{xi} e modelo de turbulência $k - \epsilon$ com função de parede de Launder e Spalding foram utilizados para simular jactos incidentes de água na presença de escoamento cruzado por forma a avaliar cada modelo, concluindo que o modelo RSM em relação ao modelo $k - \epsilon$ demonstra melhor capacidade de simulação.

Abdel-Fattah²¹ no seu estudo de 2 jactos incidentes de ar para uma altura de impacto, H/D , entre 3 e 12, de número de Reynolds entre 9.5 e 22.4×10^4 , com variação de ângulo do jacto de 0 a 20° e recorrendo ao método SIMPLE utilizando matriz algorítmica trigonal ou TDMA revelou que a zona de recirculação torna-se maior e mais larga consoante o aumento do ângulo do jacto, diminuindo a dispersão com aumento de H/D e a energia cinética turbulenta aumenta para cada região de

^{viii} 'SIMPLE Consistent' representa uma versão do método SIMPLE na qual o factor de relaxação da pressão corrigida adquire o valor de 1.0 possibilitando convergência mais rápida para alguns casos de escoamentos

^{ix} FLUENT consiste numa companhia pertencente à ANSYS Inc. associada ao software CFD tendo um produto denominado de Fluent, respeitante a um software de dinâmica de fluidos computacionais ou 'computational fluid dynamics' (CFD).

^x Equações que utilizam modelo turbulento para cálculo de tensões de Reynolds

^{xi} 'Reynolds stress model' ou modelo de tensão de Reynolds utilizado no modelo RANS.

vorticidade no qual este incrementa com o aumento do ângulo do jacto e/ou espaçamento bocal-placa.

Jing-Yu, Yan e Dao-Zeng²² apresentaram uma simulação utilizando método LES^{xii} por forma a estudar os mecanismos de mistura do escoamento cruzado na presença de estruturas de vorticidade próximas da parede para razões de velocidade de 8, 12 e 20 revelando que o modelo adoptado está de acordo com medições LIF^{xiii} para a simulação das estruturas de vorticidade em jactos incidentes transversos, contudo estas estruturas mudam de forma perto do bocal de saída consoante a razão de velocidade adoptada.

Koseoglu e Baskaya²³ efectuaram um estudo utilizando o programa comercial PHOENICS^{xiv} com algoritmos SIMPLEST^{xv} com esquema híbrido no qual é simulado jactos confinados que embatem numa placa de secção quadrangular para Re entre 250 e 5,000 e H/D de 2, 4, 8 e 12 com o intuito de estudar o efeito da convecção natural em placa aquecida, revelando que as correntes ‘*buoyancy*’^{xvi} indutoras de convecção natural influenciam a razão de transferência de calor aumentando o seu valor em 37%.

Radhouane et al.²⁴ apresentaram um estudo de jactos incidentes múltiplos com ângulos desde 30° até 90° na presença de escoamento cruzado para Re = 3,333 utilizando algoritmo SIMPLE e modelo de tensões de Reynolds para malhas não uniformes revelando que quanto maior o ângulo do jacto incidente, ou seja, quanto maior a verticalidade do jacto, maior a expansão vertical e maior a mistura vertical uma vez que existem maiores forças de interacção gerando uma melhor mistura. Deste estudo foram reportados 4 tipos de vorticidade de características diferentes, nomeadamente vórtices HSV^{xvii}, WV^{xviii}, SLV^{xix} e CVP^{xx} revelando que quanto maior o ângulo do jacto incidente maior expansão vertical e maior mistura vertical. Revelando também que quanto maior a verticalidade do jacto incidente maior as forças de corte devido á forte interacção gerando uma melhor mistura através de vorticidades mais desenvolvidas.

Ming, Wu e Chen²⁵ simularam utilizando esquema SIMPLEC e método QUICK jactos múltiplos incidentes para $2,000 < Re < 15,000$ com H/D de 1, 3 e 6 na qual foram efectuados teste para

^{xii} ‘*Large Eddy Simulation*’ consiste numa técnica de simulação de escoamentos turbulentos

^{xiii} ‘*Laser induced fluorescence*’ consiste numa técnica de medição óptica utilizada na medição de campos de concentração instantâneos ou mapas de temperatura em escoamentos de líquidos

^{xiv} Representa um software comercial incorporando geração de malha e cálculo/simulação de fluidos bem como cálculo de tensões com utilização principal do código SIMPLEST

^{xv} ‘*SIMPLE ShortTened*’ representa uma versão do método SIMPLE utilizado no software PHOENICS na qual aproxima os coeficientes a_p e a_{nb}

^{xvi} Representa a força exercida no sentido ascendente quando um objecto está submersos segundo Lei de Arquimedes, isto é, “flutuabilidade”.

^{xvii} ‘*Horseshoe vortices*’ ou vórtices tipo cachecol

^{xviii} ‘*Wake vortices*’ ou vórtices de esteira

^{xix} ‘*Shear layer vortices*’ ou vórtices de camada de corte

^{xx} ‘*Contra rotating vortex pair*’ ou par de vórtices com rotações distintas

validar o programa que concluíram que simulava satisfatoriamente. Os dados computacionais sugerem que o coeficiente de transferência de calor na placa de embate apresenta distribuição não uniforme que por sua vez pode ser melhorada através do aumento da altura de impacto ou H/D de 1 para 3.

1.3. Objectivos

Esta dissertação apresenta como objectivos principais a validação dos modelos computacionais utilizados na simulação de escoamentos experimentais publicados. O primeiro modelo computacional simulado com código TEACH tendo modelo de turbulência $k - \varepsilon$, consiste num escoamento bidimensional de jactos para razões de bypass baixas, de configuração confinada e não confinada, constituindo os motores *turbofan* o foco principal de aplicação, centrando-se o estudo na mistura turbulenta e nas camadas de corte formadas entre os jactos.

O segundo modelo computacional teve por base o código PACE sendo utilizado também o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ para simular um escoamento tridimensional de jactos incidentes alinhados com um escoamento cruzado de baixa velocidade representativo de escoamentos gerados durante a operação de aeronaves VSTOL próximos do solo, tendo como foco principal a aeronave F - 35. Dados experimentais permitiram a comparação com os dados numéricos e por conseguinte analisar, com o intuito de validar, o modelo numérico. Numa fase posterior analisa-se as previsões tridimensionais de múltiplos jactos de impacto por forma a melhor compreender os fenómenos associados ao escoamento.

2. Modelo Computacional

2.1. Modelo Matemático

O modelo matemático adoptado é baseado nas equações de continuidade e de quantidade de movimento. O modelo turbulento adoptado para a simulação é o modelo k - ε, onde as equações de governo são constituídas por equações diferenciais parciais que podem ser escritas da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + S_{\phi} \quad (1)$$

Onde φ representa qualquer propriedade desde velocidade, energia cinética turbulenta ou dissipação enquanto S_φ e Γ_φ assumem diferentes valores consoante φ, encontrando-se descrito na tabela 3 as correspondências.

φ	Γ _φ	S _φ
1	0	0
U	μ _T	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_T \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_T \frac{\partial V}{\partial r} \right)$
V	μ _T	$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_T \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_T \frac{\partial V}{\partial r} \right) - 2 \mu_T \frac{V}{r^2}$
k	μ _T / σ _k	Φ - ρε
ε	μ _T / σ _ε	$C_{\epsilon 1} \Phi \frac{\epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$

Tabela 3. Equações diferenciais

Os termos de difusão turbulenta são aproximados através de duas equações do modelo turbulento k - ε, e a tensão de Reynolds está relacionada com a tensão de corte através da seguinte equação:

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = -\mu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad (2)$$

Onde μ_T designa a viscosidade turbulenta derivada do modelo turbulento expresso por:

$$\Phi = \mu_T \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{V}{r} \right)^2 \right] + \left[\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial x} \right]^2 \right\} \quad (3)$$

As constantes do modelo turbulento utilizadas permitem bons resultados para uma variedade de escoamentos e são sumarizadas na tabela 4.

C_μ	C_1	C_2	σ_k	σ_E
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

Tabela 4. Constantes do modelo turbulento

2.2. Modelo Numérico e Condições de Fronteira

Para o estudo computacional bidimensional de camadas de corte para duas configurações, confinado e não confinado com razões de diâmetros inferiores a 2, utilizou-se o código TEACH onde é adoptado como modelo de turbulência o modelo k - ϵ por forma a gerar-se perfis de velocidade bidimensional e campos de energia cinética turbulenta para 2 jactos que interagem ao longo do domínio computacional.

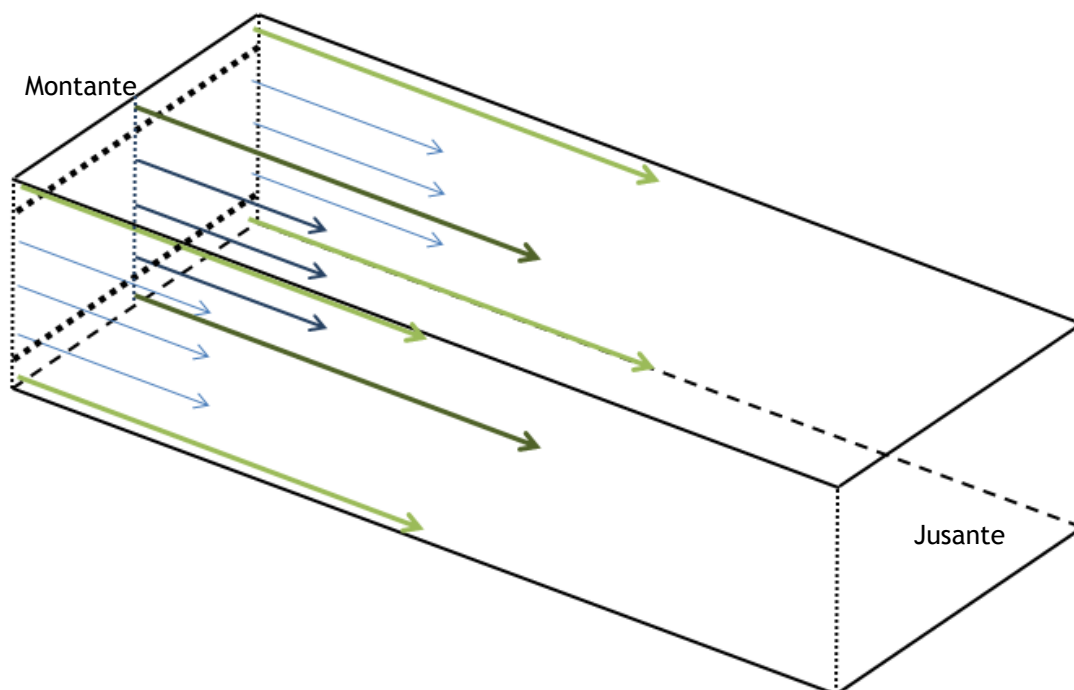


Figura 5. Esquematização da secção de teste

O presente estudo tem por base um trabalho experimental na qual simulou-se três jactos, um central e dois mais pequenos periféricos, sendo que os jactos periféricos, nomeadamente, o superior e inferior apresentam velocidade superior conforme visível na figura 5. Por forma a poupar recursos computacionais simulou-se um domínio bidimensional correspondendo a um corte transversal a meio da secção de teste com metade da altura, sendo considerado um eixo de simetria a meia altura da secção de teste, conforme visível na figura 10. A configuração do escoamento é constituída por 2 jactos, um interior e outro exterior na qual o primeira jacto ou jacto interior possui uma altura de 128 mm encontrando-se o jacto exterior ou segundo jacto acima do primeiro jacto com altura ou diâmetro de 22 mm.

A primeira configuração estudada consiste num domínio computacional bidimensional confinado na qual o domínio computacional possuiu de comprimento 1200 mm por 150 mm de altura como visível na figura 6 a).

Para a configuração não confinada, figura 6 b), o comprimento do domínio computacional é o mesmo, 1200mm, sendo a altura total do domínio computacional de 290 mm, mantendo contudo as mesmas posições dos jactos de 128 mm para jacto interior desde o eixo de simetria a sul e 22 mm para o jacto exterior desde o limite do primeiro jacto.

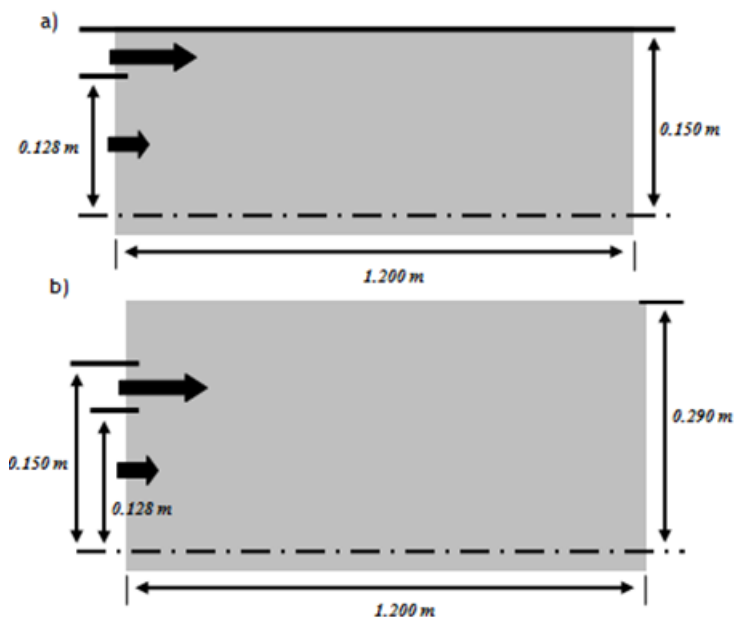


Figura 6. Configuração do escoamento: a) confinado, b) não confinado

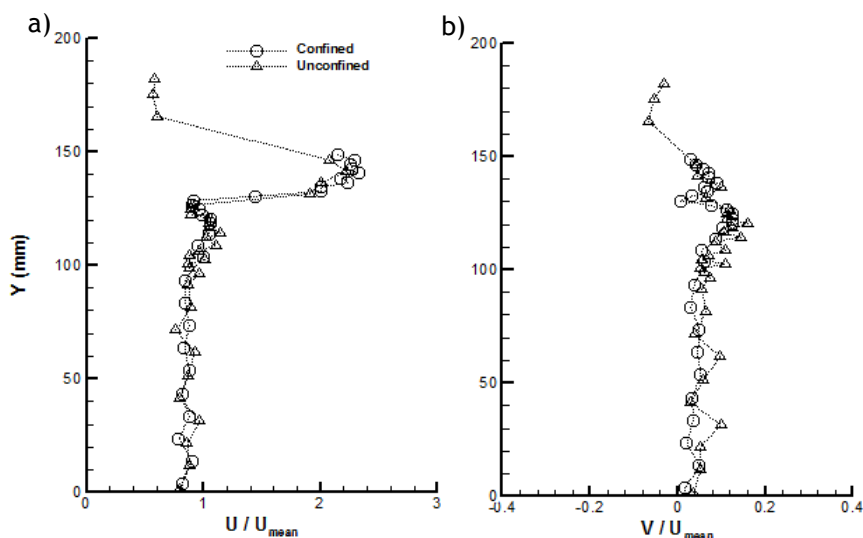


Figura 7. Perfis verticais adimensionais das velocidades á entrada da secção de teste: a) velocidade horizontal, b) velocidade vertical

O domínio é limitado por quatro fronteiras onde as variáveis dependentes são especificadas. A este está presente a zona de entrada dos jactos na qual perfis de velocidade foram “impostos”, denominada zona montante. A oeste está a fronteira correspondente á zona de saída ou zona jusante onde perfis de velocidade são uniformes sendo, portanto, considerado a jusante perfis *self-similar*^{xxi}. A sul está presente o eixo de simetria estando a norte presente uma parede sólida no caso da configuração confinado e uma fronteira livre no caso de configuração não confinado.

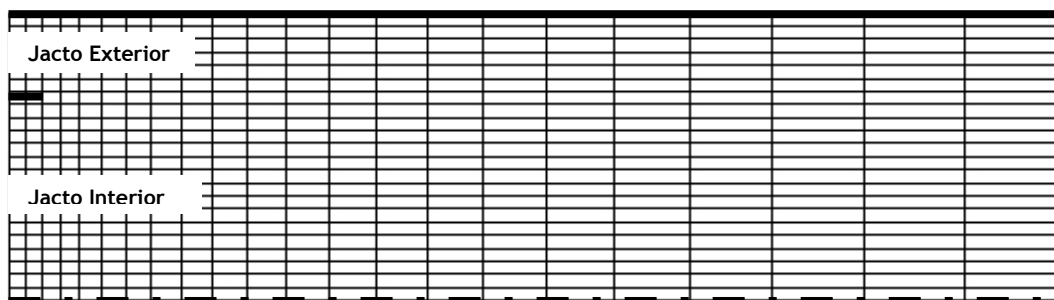


Figura 8. Representação da malha do domínio computacional confinado

A montante, na região de entrada o perfil de velocidade numérico gerou-se consoante dados experimentais. A figura 7 representa o perfil de velocidade experimental utilizado na região de entrada, ou seja, perfil de velocidade experimental á entrada para caso confinado e não confinado, caso a) e b) respectivamente. A velocidade horizontal representado por U e a velocidade vertical, V , foram adimensionalizadas pela velocidade média horizontal, U_{mean} , sendo o seu valor igual a 6.774 m/s, na qual os perfis da razão de velocidades á entrada são ao longo da altura do domínio, Y , em mm. Segundo os perfis é visível que o jacto exterior apresenta maior velocidade que o jacto interior para região montante.

No código utilizado foi introduzido os valores da razão de velocidades de entrada para cada configuração por forma a ter-se na região de entrada do domínio computacional os mesmos perfis de velocidade existentes no experimental com o intuito de simular o escoamento nas mesmas condições existentes experimentalmente simulando-se assim de forma mais fidedignamente possível. A norte, para o caso de configuração confinado, existe uma superfície sólida na qual foi utilizado o método de função de parede segundo Lauder et al. (1972) apresentando-se a norte para o caso não confinado uma superfície livre. A sul está representado o eixo de simetria da secção de teste que por sua vez corresponde á fronteira sul do domínio computacional onde a velocidade vertical é nula, bem como gradiente normal das restantes variáveis.

^{xxi} O termo *self-similar* corresponde a um objecto ou conjunto de objectos com propriedades constantes ao longo de uma escala.

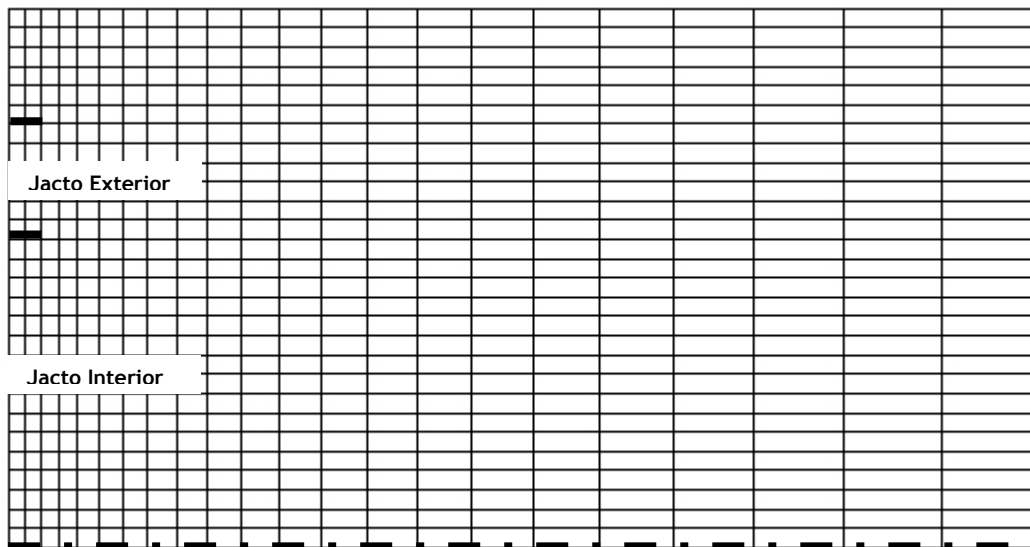


Figura 9. Representação do domínio computacional não confinado

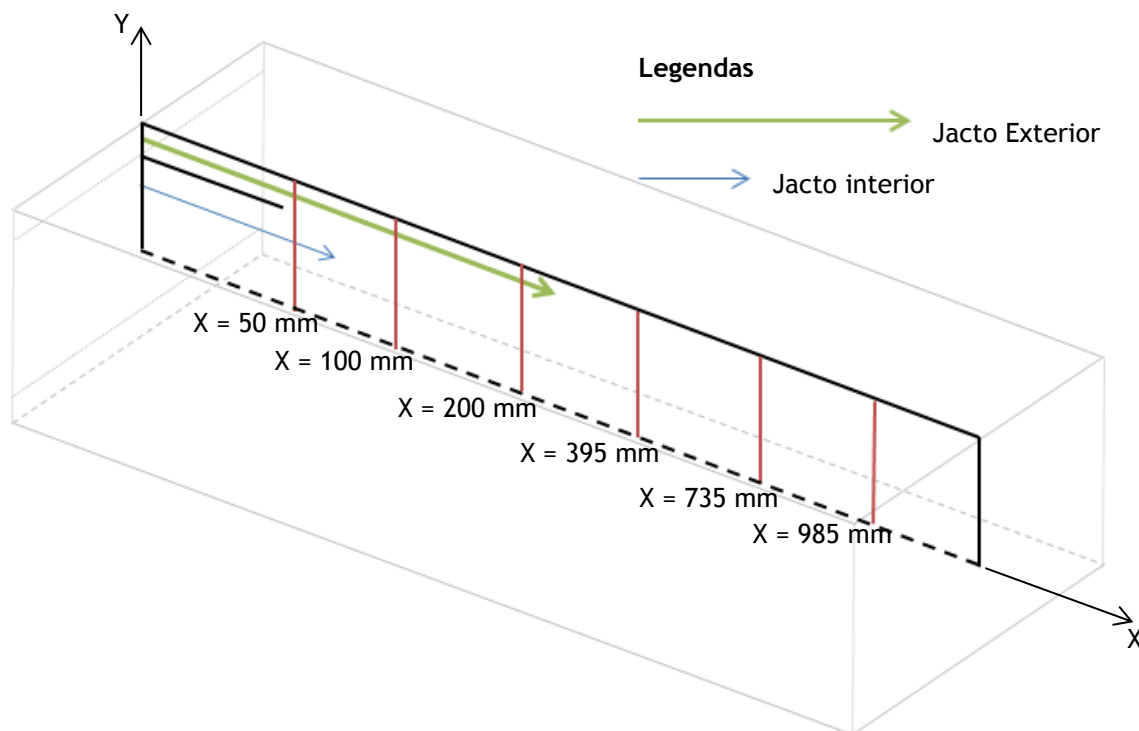


Figura 10. Esquematização de secções de teste

As malhas computacionais utilizadas não são uniformes uma vez que pretendia-se maior número de pontos para a região a montante visto ser onde a interacção entre jactos se inicia, assim sendo, tanto a malha computacional confinada presente na figura 8 e a malha computacional não confinada presente na figura 9 expandem no sentido montante-jusante, sendo uniforme a distribuição dos pontos na direcção vertical. O domínio computacional saliente na secção de teste, como visível na figura 10, é constituído por 6 estações longitudinal ao longo do domínio, estações

estas que permitem avaliar perfis de velocidade ao longo do domínio apresentando-se apenas algumas estações. As estações adoptadas são { 50, 100, 200, 395, 735 e 985 } segundo o eixo longitudinal ou X, medido em mm.

Teste de sensibilidade foi efectuado ao escoamento de configuração não confinado, uma vez que, ao simular-se computacionalmente o escoamento com fronteira livre a norte de altura 150 mm, altura de configuração confinado, é visível um fluxo ascendente que ultrapassa as dimensões do domínio, não sendo portanto representativo. Por esta razão efectuou-se um teste de sensibilidade á fronteira livre a norte do domínio computacional de configuração não confinado, por forma a adoptar uma altura do domínio computacional mais conveniente para a simulação tendo sido adoptado o valor de 290 mm.

Por forma a garantir a validade da malha utilizada foi necessário realizar teste de independência de malha para três malhas diferentes. Para o caso confinado foram adoptados as malhas 16x16, 23x23 e 33x33. A figura 11 representa perfis verticais para velocidade horizontal adimensionalizada pela velocidade média horizontal para duas estações do domínio computacional confinado: X = 100 mm e X = 735 mm, na qual estão presentes dados experimentais e dados numéricos para as três malhas referenciadas. A figura seguinte, figura 12, representa perfis verticais da velocidade horizontal adimensionalizada mas para configuração não confinado, para as mesmas estações longitudinais do domínio computacional, X = 100 mm e X = 735mm para as malhas: 16x21, 23x29 e 33x41. Para ambas as figuras os perfis das malhas numéricas estão sobrepostas com dados experimentais.

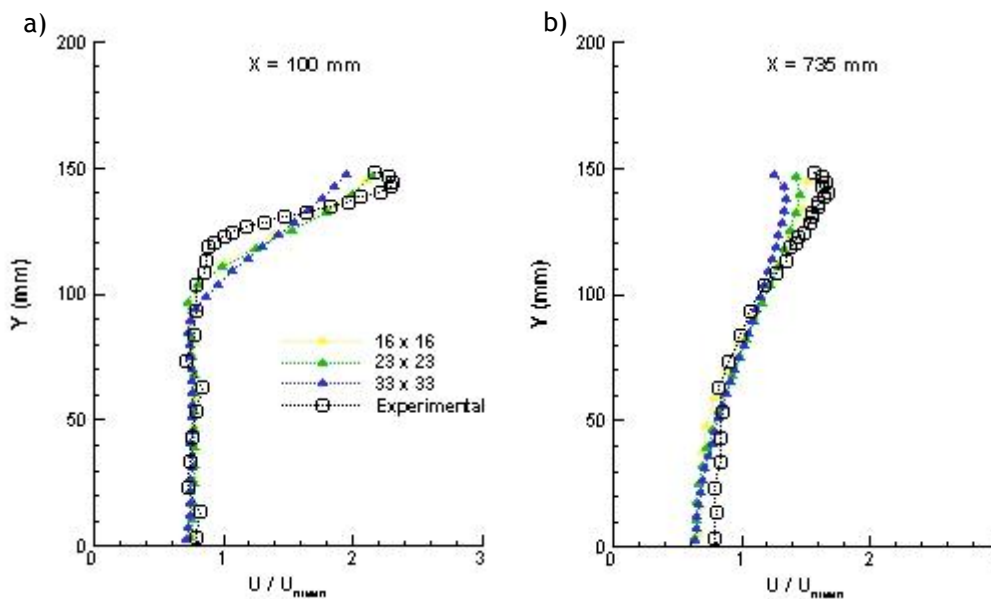


Figura 11. Independência de malha para configuração confinada para as estações:
a) X = 100 mm, b) X = 735 mm

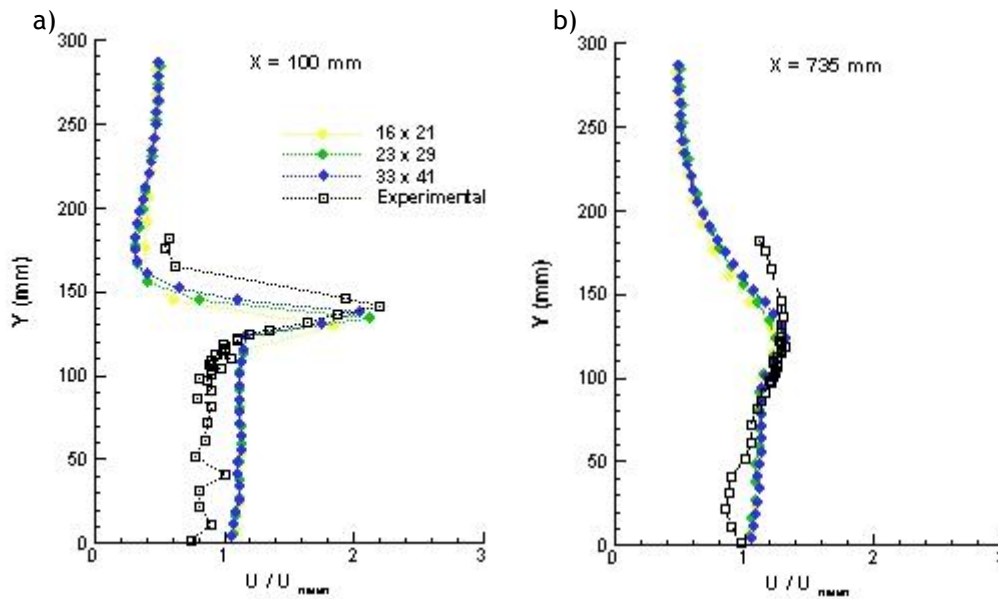


Figura 12. Independência de malha para configuração não confinada para estações:
a) $X = 100$ mm, b) $X = 735$ mm

As malhas adoptadas para o estudo da mistura turbulento de jactos bidimensionais com razão de diâmetro menores que 2, foi a malha 23×23 para configuração confinada e 23×29 para configuração não confinada. Esta escolha deve-se ao facto de pretender-se ter uma malha intermédia que permita visualizar os fenómenos e estruturas presentes no escoamento sem depender demasiados recursos computacionais.

O segundo tema de estudo consiste na simulação computacional tridimensional do impacto de jactos múltiplos alinhados com escoamento cruzado de baixa velocidade na qual a secção de teste consiste numa caixa rectangular onde na parede norte existem dois bocais de jacto alinhados, sobre o mesmo eixo consecutivamente, de diâmetro interno D igual a 15 mm, localizados acima de uma parede sul a $H/D = 20.1$, onde H representa a altura da caixa ou altura de impacto dos jactos verticais. As dimensões totais da secção de teste são 1080 mm de comprimento longitudinal segundo X , 302 mm de altura segundo Y e 402 mm de largura transversal, segundo Z . O espaçamento entre jactos é de 90 mm ou seja, $S/D = 6$. É apresentado na tabela 5 as dimensões correspondente á secção de teste e domínio computacional. A figura 13 representa um esquema da secção de teste apresentando também o eixo de coordenadas localizado entre jactos. O escoamento consiste em dois jactos incidentes descendentes na presença de “crossflow” ou escoamento cruzado (U_0) de baixa velocidade.

O domínio computacional adoptado consiste em meia secção de teste na qual um plano de simetria longitudinal “corta” a meio a secção passando pelo centro dos jactos, por conseguinte, o domínio computacional gerado possuiu 201 mm de largura transversal mantendo os mesmos valores para as restantes dimensões.

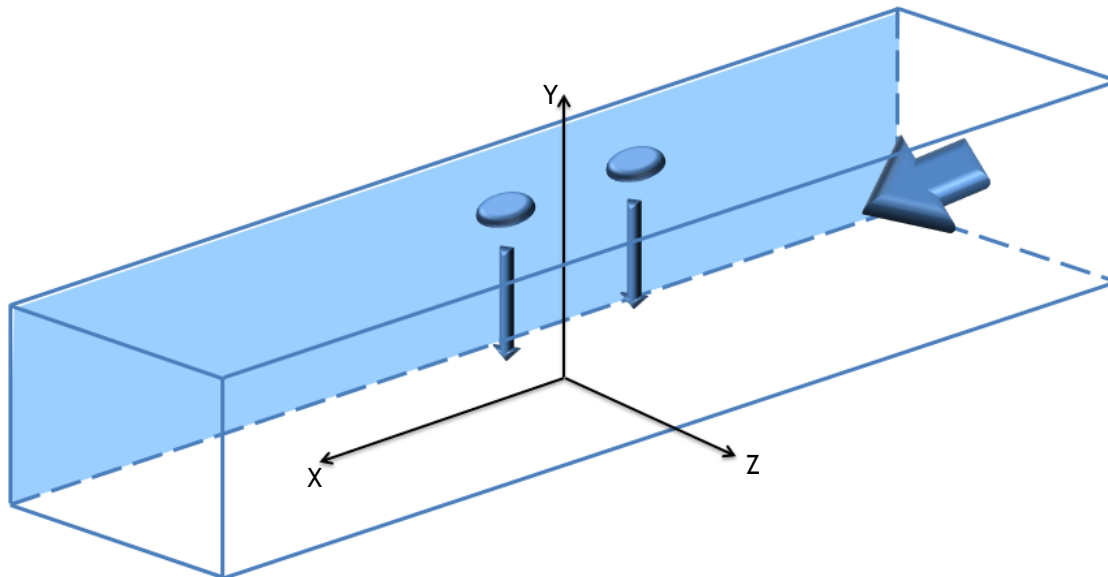


Figura 13. Esquemática da secção teste

A configuração adopta um plano de corte em $Z = 0$ da secção de teste e conseqüentemente um plano de simetria na mesma posição do domínio computacional. A opção de simular apenas meia secção de teste é devido aos menores custos computacionais e menor tempo de simulação necessário para simular o escoamento.

O domínio computacional apresenta na parede norte dois jactos verticais consecutivos, sobre um eixo longitudinal paralelo ao eixo X, localizado acima da parede sul a $H/D = 20.1$. A sul no plano XZ está presente a placa de impacto ou superfície plana de impacto, como visível na figura 14.

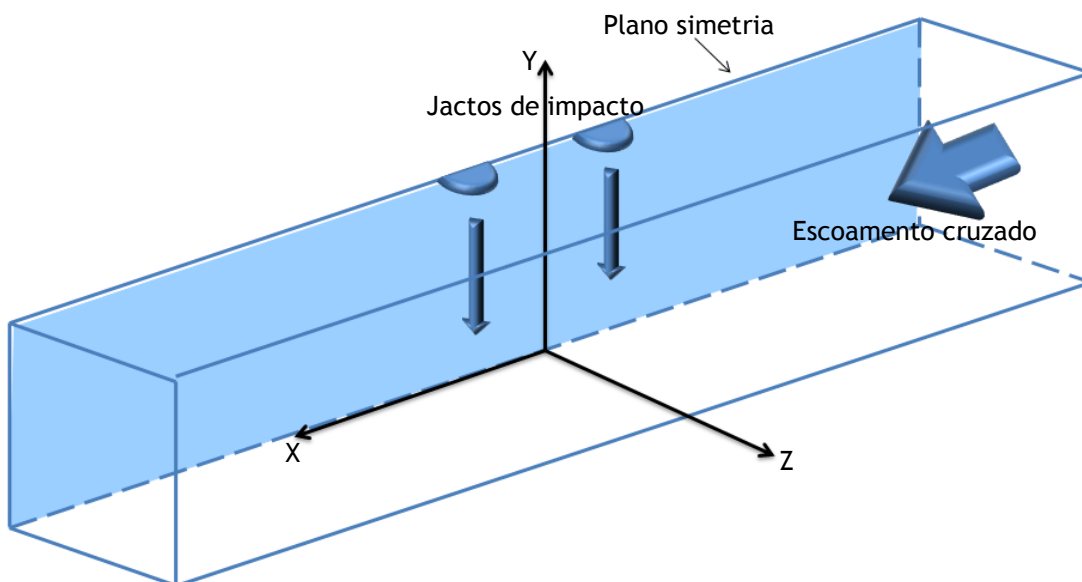


Figura 14. Esquemática do domínio computacional

Na simulação computacional recorreu-se ao programa PACE baseado na solução das equações da massa, quantidade de movimento e energia, modelado pelo modelo turbulência $k - \epsilon$. O escoamento foi simulado para três razões de velocidade na qual a velocidade dos jactos incidentes é constante de valor nominal - 36 m/s. O escoamento cruzado varia a sua velocidade por forma a criar as três razões de velocidade, sendo apresentado na tabela 4 as razões de velocidade bem como os valores da velocidade nominal dos jactos incidentes e escoamento cruzado, na qual V_j representa a velocidade média á saída do bocal do jacto vertical, U_0 representa a velocidade média do escoamento cruzado ou “crossflow” e R representação a razão dada pela equação,

$$R = \frac{|V_j|}{U_0} \quad (4)$$

Na secção dos resultados serão apresentados os 3 tipos gráficos gerados, nomeadamente, os gráficos do campo de velocidades (*fields*), os perfis de velocidades verticais e perfis de velocidades horizontais. Os gráficos apresentados possuem as dimensões segundo os eixos (X, Y e Z) adimensionalizados pelo diâmetro do jacto vertical, D de valor 15 mm, e todas as velocidades apresentadas estão adimensionalizadas pela módulo da velocidade á saída do bocal dos jactos verticais, $V_j = -36 \text{ m/s}$. As simulações ocorreram para as seguintes malhas: 17x53x17, 21x67x21, 27x83x27, 34x105x34, cada uma delas para as três razões de velocidades presentes na tabela 6.

Dimensões	Acrónimo	Dimensões [mm]
Comprimento do domínio / secção de teste	L	1080
Altura do domínio / secção de teste	H	302
Largura da secção	T	402
Largura do domínio	Z_t	201
Diâmetro do jacto	D	15
Distância entre jactos	S	90

Tabela 5. Dimensões da secção de teste e domínio computacional

A malha computacional utilizada não é uniforme assim como as áreas de interesse ao longo do domínio também não o são. Desta forma foram geradas malhas onde pretende-se um número elevado de pontos próximo do jacto e menor número de pontos nas zonas afastadas do jacto na direcção longitudinal. Por conseguinte a malha contrai, aumentando o número de pontos á medida que se aproxima dos jactos verticais e expande com a diminuição do número de pontos á medida que se afasta dos jactos incidentes na direcção longitudinal, ou seja, segundo eixo X. Segundo a

V_j [m/s]	U_0 [m/s]	R
-36	1.6	22.5
-36	1.067	33.7
-35	0.8	43.8

Tabela 6. Razões de velocidades

direcção Y, a malha expande á medida que se aproxima da superfície a norte, uma vez que pretende-se maior número de pontos próximo da superfície de impacto a sul devido aos objectivos do presente teme já referidos. Assim sendo, é visível um corte no plano $Z = 0$ na figura 15 de uma malha bidimensional, 27x83, sendo igual a configuração de malha para todas as dimensões de malhas e todas as razões de velocidade. Assim como a malha se expande e contrai com aumento e diminuição do número de pontos á medida que se aproxima e afasta dos jactos incidentes na direcção longitudinal segundo X, o mesmo se passa ao longo do eixo Z, na direcção transversal, como visível na mesma malha contudo tridimensional da figura 16, na qual existe um maior número de pontos próximo do plano de simetria, isto é, próximo dos jactos, expandido á medida que se aproxima da parede lateral. Contudo existe uma contracção com aumento do número de pontos próximo da parede lateral devido á necessidade de mais pontos por forma a adequar-se á lei de parede. O simbolismo das malhas consiste no número de pontos no eixo Y, Z e X, respectivamente, ou seja, para o caso de 17x53x17 significa que esta malha apresenta 17 pontos segundo eixo Y e X e 53 segundo eixo Z.

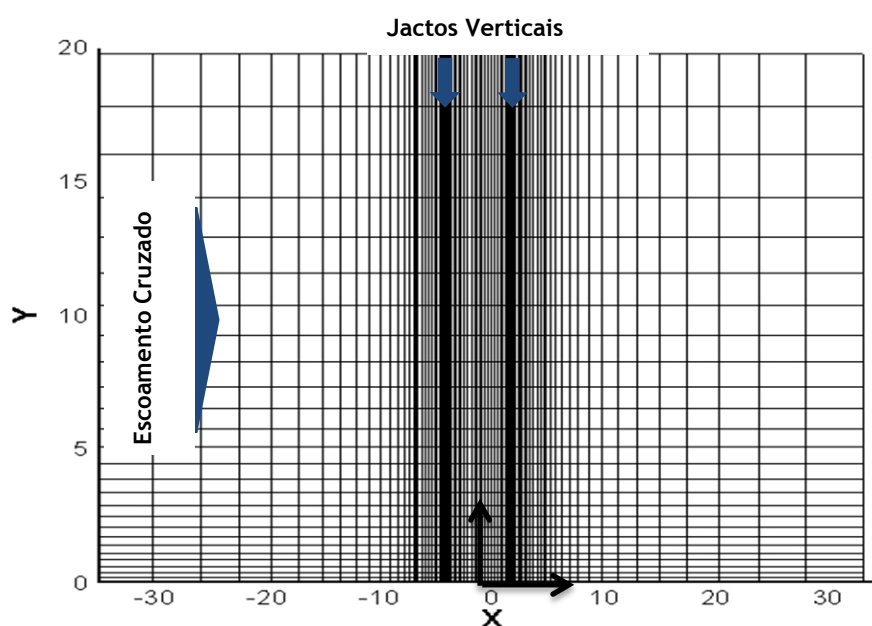


Figura 15. Malha exemplificativa, bidimensional no plano de simetria $Z = 0$

Em seguida apresenta-se na figura 17 quatro campos de velocidades ou *fields* para a mesma razão de velocidade de 22.5 contudo para tamanhos de malhas diferentes, tendo-se no caso a) a malha 17x53x17 com um total de 15317 pontos, no caso b) a malha 21x67x21 com um total de 29547, no caso c) a malha 27x83x27 com 60507 pontos e por fim no caso d) apresenta-se a maior das malhas 34x105x34 com um total de 121380 pontos.

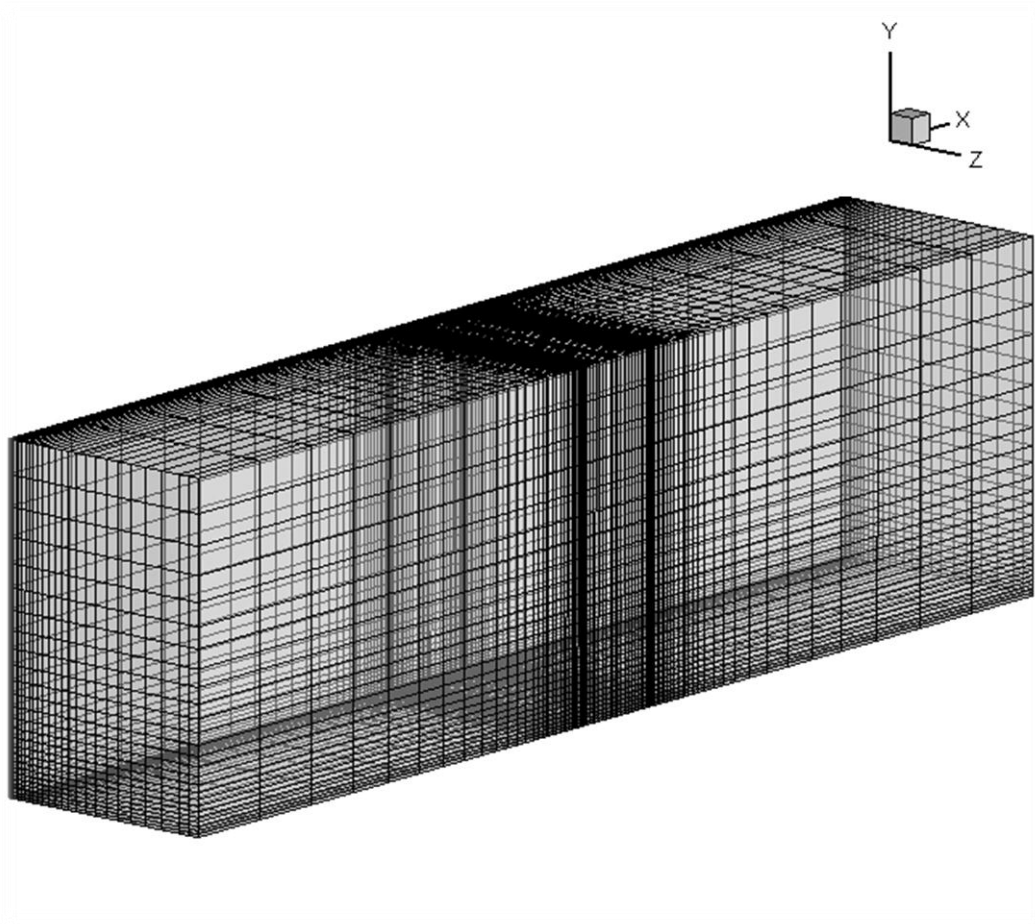


Figura 16. Malha tridimensional

Da figura pode-se concluir que independentemente da malha utilizada os resultados obtidos são semelhantes, logo existe independência de malha, ou seja, qualquer que seja a malha utilizada as conclusões extrapoladas pelos gráficos são as mesmas. Por conseguinte a malha utilizada para a simulação do escoamento acima referido é a malha $27 \times 83 \times 27$ que será utilizada para as comparações com os dados experimentais uma vez que esta malha é uma malha intermédia em relação ao número de pontos, requerendo menores recursos computacionais que sucessivas malhas e ao mesmo tempo apresenta pontos suficientes para uma simulação aceitável.

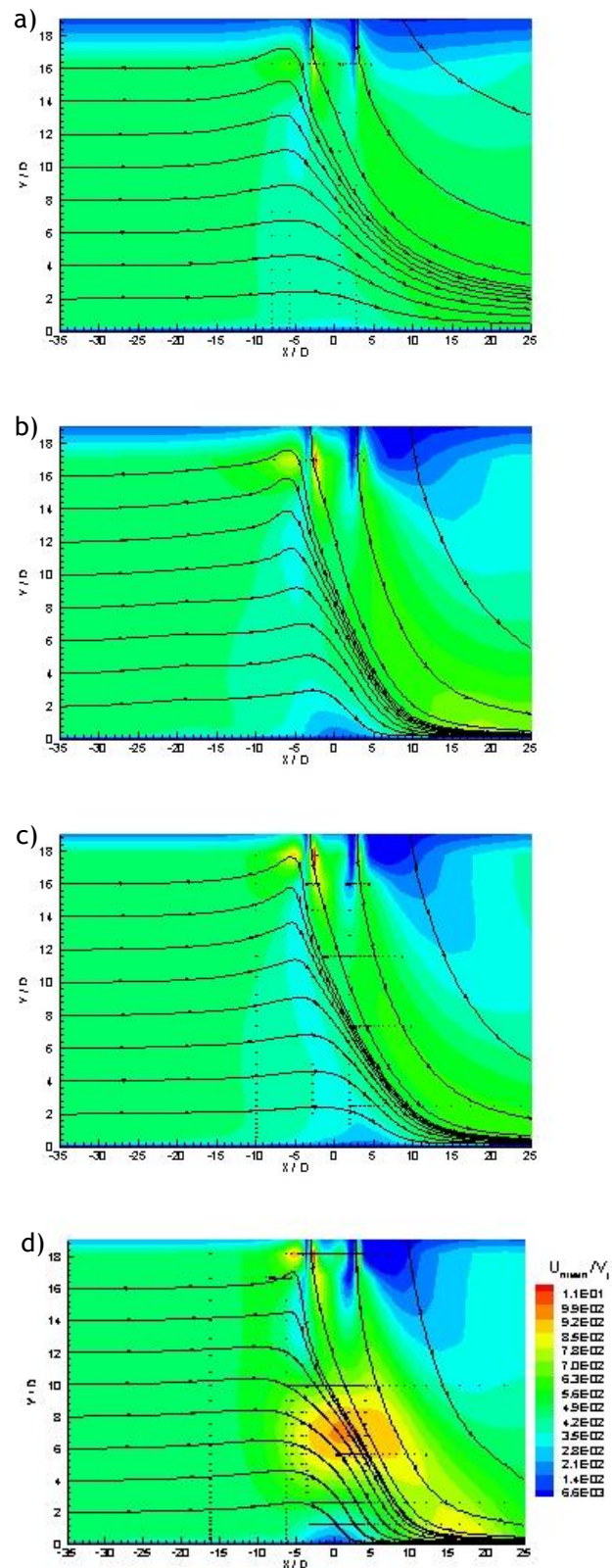


Figura 17. Campos de velocidade U_{mean}/V_i , para $R = 22.5$, para as malhas: a) $17 \times 53 \times 17$, b) $21 \times 67 \times 21$, c) $27 \times 83 \times 27$, d) $34 \times 105 \times 34$

3. Resultados

3.1. Numerical Study of Aerodynamically Enhanced Mixing

Nesta secção serão apresentados os resultados e análise dos dados obtidos através da simulação computacional de camadas de corte bidimensionais para dois tipos de configuração do escoamento, confinado e não confinado, com razões de diâmetros menores de 2, na qual dados numéricos serão comparados com dados experimentais. As figuras 18, 19, 20 e 21 apresentadas correspondem a perfis verticais das velocidades horizontal e vertical para as duas configurações de escoamento, na qual o eixo horizontal representa a componente da velocidade adimensionalizada pela velocidade média horizontal, U/U_{mean} , e o eixo vertical representa a distância vertical, ou seja, a altura do domínio computacional. Nestes gráficos os dados experimentais serão representados por linhas a tracejado pretas e os dados numéricos representados por linhas a verde, para as diversas estações longitudinais do domínio computacional.

Na figura 18, para a estação mais a montante, $X = 50\text{mm}$, o perfil vertical adimensional da componente horizontal de velocidade, U/U_{mean} , ao longo da altura Y (mm), demonstra dois jactos a diferentes velocidades. Até à posição $Y = 128\text{ mm}$, correspondente ao jacto interior, o perfil de velocidade é constante de valor $U/U_{mean} = 0.8$ para os dados experimentais e numéricos. Da posição $Y = 128\text{ mm}$ até 150 mm , correspondente ao jacto exterior, é visível um valor de razão de velocidade superior, sendo o seu valor máximo de $U/U_{mean} = 2.4$. Perto da superfície sólida a norte é visível uma diminuição da razão de velocidade horizontal representativo do efeito da camada limite próximo da superfície sólida onde o fluido encontra-se a menor velocidade gerando-se tensões de corte. Para as sucessivas estações do domínio computacional é visível o efeito da tensão de corte entre os dois jactos a diferentes velocidades, interagindo um com o outro, sendo o jacto interior de menor velocidade causador do abrandamento da velocidade do jacto exterior que por sua vez, através da interacção física das partículas do fluido, causa o jacto interior a acelerar. Como consequência é espectável que ao longo do domínio seja visível uma uniformização do perfil de velocidades, como comprovado pela estação mais a jusante, $X = 985\text{ mm}$, onde é visível um perfil mais uniforme. Contudo também é visível a presença da parede através da camada limite de parede existente na fronteira norte ao longo de todo o comprimento longitudinal do domínio. De forma genérica os perfis de velocidade numéricos e experimentais demonstram a mesma configuração de escoamento.

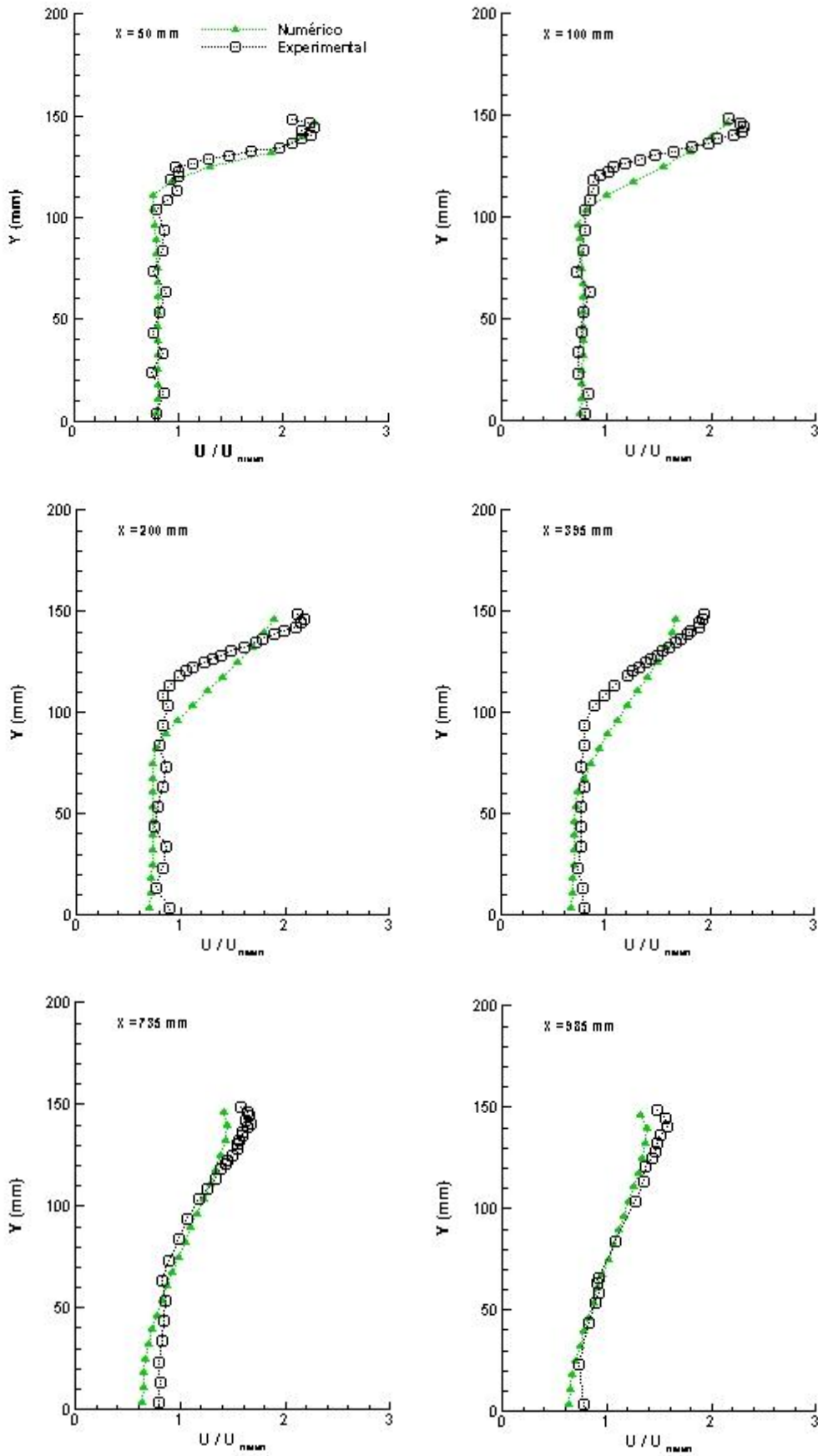


Figura 18. Perfis verticais para razão de velocidade horizontal de configuração confinada

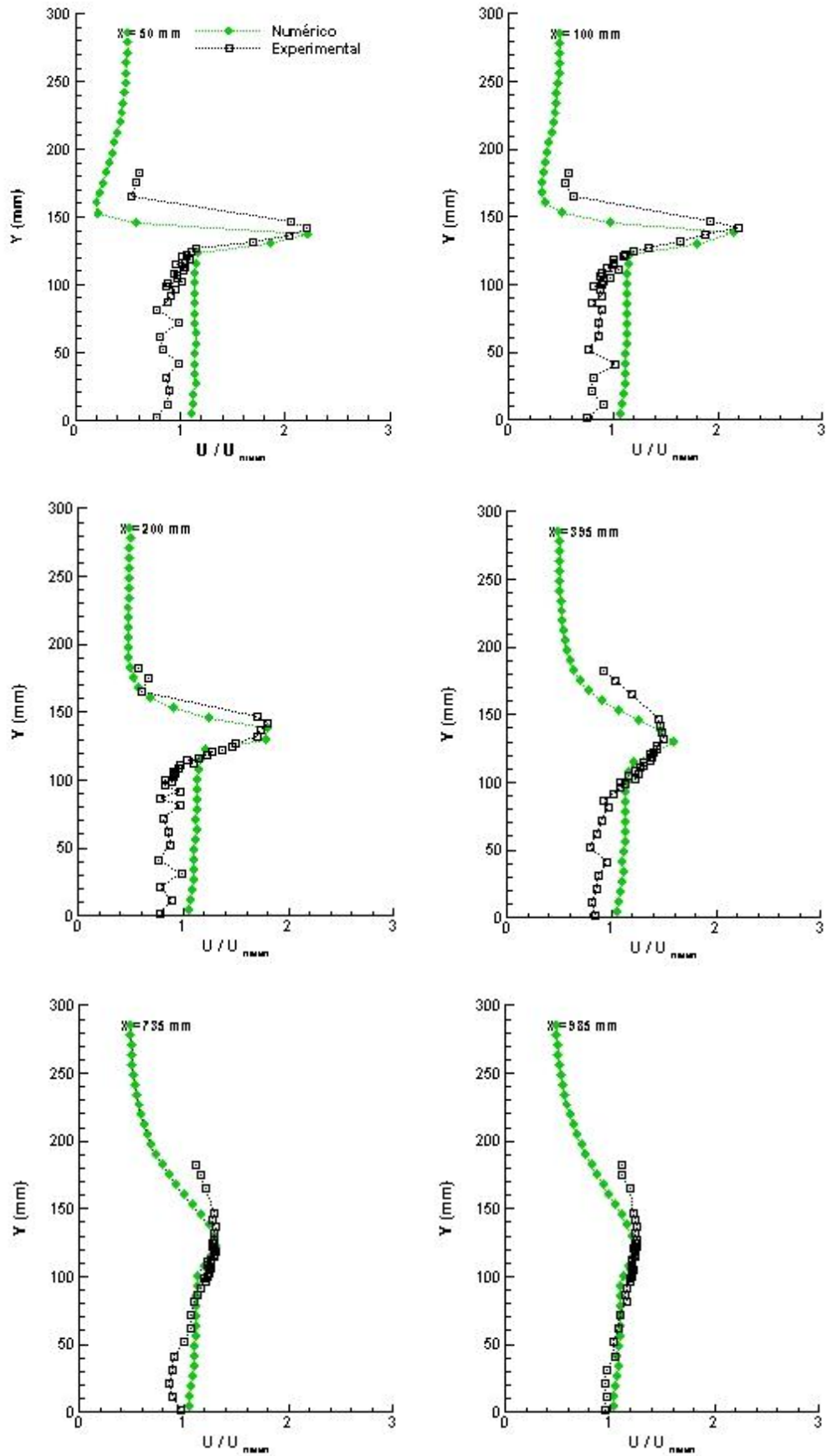


Figura 19. Perfis verticais para razão de velocidade horizontal de configuração não confinada

A figura seguinte, figura 19, mostra perfis verticais da razão de velocidade horizontal para uma configuração não confinada. Como na figura anterior estão presente nos gráficos os dados numéricos e experimentais para 6 estações do domínio computacional. Contudo é necessário mencionar que os dados experimentais não ultrapassam $Y = 185$ mm de altura. A estação mais a montante, $X = 50$ mm, apresenta uma previsão da razão de velocidades horizontal constante de $U/U_{\text{mean}} = 1.1$ para $0 < Y < 128$ correspondente ao primeiro jacto. Da posição $Y = 128$ mm até $Y = 150$ mm é visível o efeito de um jacto externo mais rápido de valor $U/U_{\text{mean}} = 2.2$. Para $Y > 150$ mm existe um decréscimo acentuado da razão de velocidade horizontal associado ao arrastamento de fluido em repouso com uma razão de velocidade de 0.5, sendo que, a zona de separação entre jactos e fluido em repouso, para $Y = 150$ mm, corresponde a uma zona de fortes tensões de corte consequência das diferenças elevadas de velocidade tendo o jacto exterior razão de velocidade 12 vezes superior, entre valores extremos.

As sucessivas estações demonstram a evolução de um escoamento inicialmente com elevadas tensões de corte para um escoamento com perfis de razão de velocidade quase uniformes, sendo que para a estação mais a jusante, $X = 985$ mm, é visível um perfil mais uniforme caracterizado com uma aceleração progressiva da razão de velocidade desde a fronteira sul até ao eixo do segundo jacto correspondente á posição $Y = 128$ mm sendo que para $Y > 128$ mm é visível uma desaceleração da razão de velocidade. Os perfis de velocidade experimentais demonstram um configuração geral semelhante aos dados numéricos sendo visível os mesmos fenómenos descritos acima. As figuras 20 e 21 representam perfis verticais de velocidade vertical adimensionalizada dado por V/U_{mean} , para configuração confinada e não confinada, respectivamente. Na figura 20, a secção a montante, $X = 50$ mm, apresenta para as previsões numéricas uma interacção elevada entre os dois jactos. Nesta região, $120 < Y < 140$ mm, o jacto interior apresenta uma componente vertical positiva, $V > 0$, enquanto o jacto exterior apresenta uma componente vertical negativa, $V < 0$. Os perfis de velocidade vertical demonstram a diminuição da transferência de quantidade movimento entre os dois jactos ao longo da direcção longitudinal, correspondendo a uma evolução do perfil no sentido de uma maior homogeneização do escoamento com respectiva diminuição de tensões de corte entre jactos. Na estação mais a montante é visível que existe aceleração da velocidade desde fronteira sul até posição $Y = 120$ mm sendo que para valores superiores existe um decréscimo acentuado do velocidade atingido valores negativos voltando a acelerar o escoamento para $Y > 130$ mm correspondente á camada limite de parede no sentido de velocidade nula. A estação mais a jusante apresenta perfil uniforme podendo ser traçado uma asymptota vertical na posição de velocidade nula, tanto para dados numéricos como experimentais.

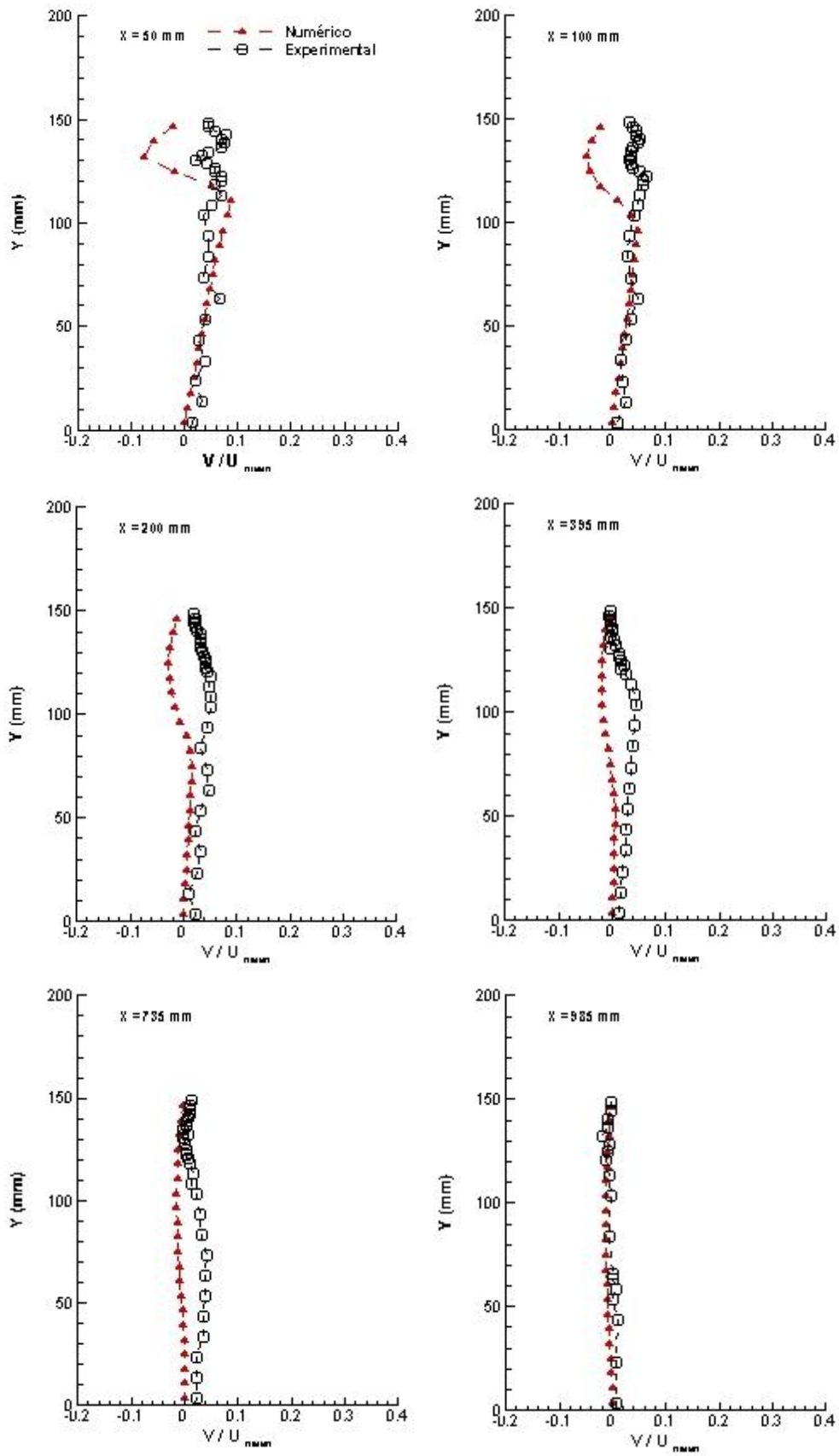


Figura 20. Perfis verticais para razão de velocidade vertical de configuração confinada

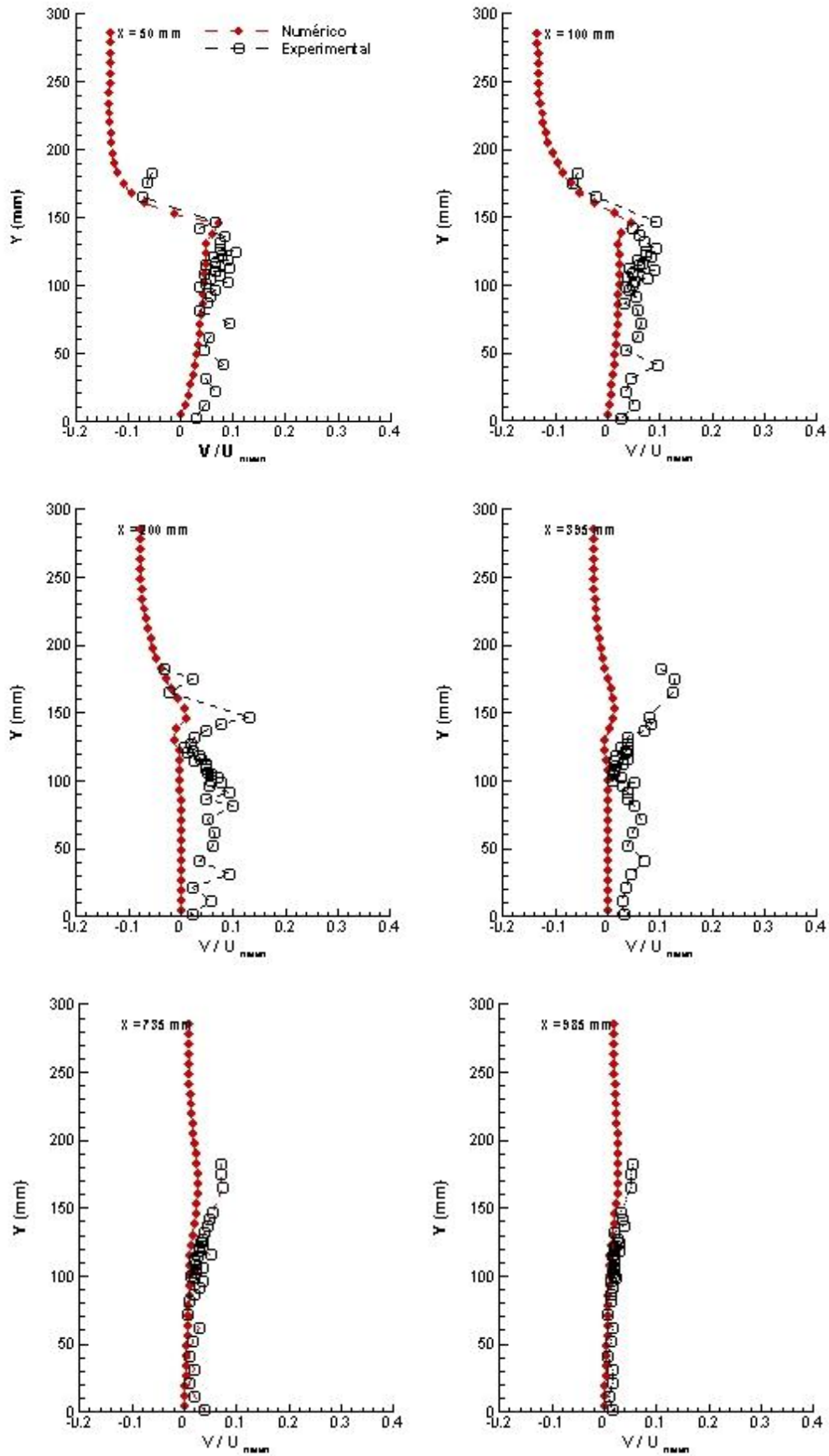


Figura 21. Perfis verticais para razão de velocidade vertical de configuração não confinada

Para a figura 21 de configuração não confinada na estação mais a montante, $X = 50$ mm, o perfil vertical da componente vertical de velocidade adimensionalizada, V/U_{mean} , demonstra um aumento da componente vertical da posição $Y = 0$ mm até à posição $Y = 140$ mm, onde no eixo de simetria apresenta velocidade vertical nula.

Da posição $Y = 140$ mm os dados numéricos demonstram uma acentuada diminuição da componente vertical de velocidade associada á interacção entre jacto exterior e o escoamento exterior de menor velocidade vertical, como explicito na figura 20. Os dados experimentais demonstram comportamento idêntico. Para as sucessivas estações é visível a uniformização do escoamento adquirindo velocidade nula ao longo de todo o domínio para dados experimentais e numéricos.

A figura 22 representa o campo de velocidade e da energia cinética turbulenta para as duas configurações: confinada, caso a) e não confinada, caso b). Os gráficos apresentam no eixo das abcissas a posição longitudinal X pela altura Y em metros.

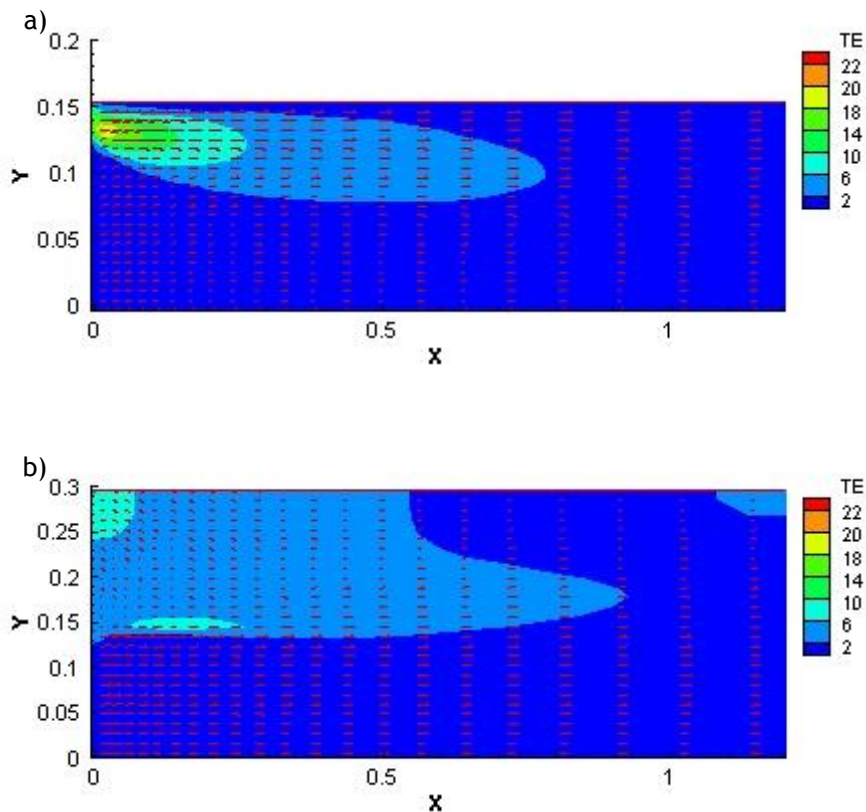


Figura 22. Campos de energia cinética turbulenta para configuração confinada (a) e não confinada (b)

Para a configuração confinada é visível o nível de energia cinética turbulenta elevado na região de interacção entre jactos gerando níveis elevados de energia cinética turbulenta. Tensão de corte é visível entre jacto interno e jacto externo através dos fortes níveis de energia cinética. O gráfico permite visualizar a camada limite próximo da superfície sólida, apresentando valores baixos de energia cinética turbulenta onde o fluido está em repouso ao invés da zona entre jacto exterior e

superfície sólida com camada limite de corte visível devido aos elevados níveis de energia cinética turbulenta presente a vermelho no gráfico. Na região a jusante o escoamento é estável estando os seus níveis de energia cinética turbulenta uniformes. Para a configuração não confinada, figura 22 b), a região de interacção entre os dois jactos na zona a montante apresenta níveis de energia cinética turbulenta elevados, estes níveis de energia cinética turbulenta estendem-se para a região onde jacto exterior entra em contacto com fluido envolvente em repouso a norte. A configuração confinada apresenta valores de energia cinética turbulenta elevados na região de interacção entre o jacto interior e o jacto exterior comparativamente á configuração não confinada.

3.2. Numerical Study of Twin Impinging Jets Aligned with Low Velocity Crossflow

Na figura 23 é apresentado uma imagem tridimensional do domínio computacional em que se seccionou as diversas estações estudadas apresentando-se adimensionalizadas pelo diâmetro do jacto vertical. A estação $X/D = - 2.93$ corresponde á estação do primeiro jacto. A estação $X/D = 0.0$ corresponde à estação entre jactos e consequentemente, a estação $X/D = + 2.93$ corresponde á estação do segundo jacto. Os planos seccionados apresentados na figura representam as estações do domínio computacional organizadas da esquerda para a direita com os seguintes valores, X/D , $\{ - 6.33, - 5.00, - 3.67, - 2.93, - 1.47, 0.0, + 1.47, + 2.93 \}$.

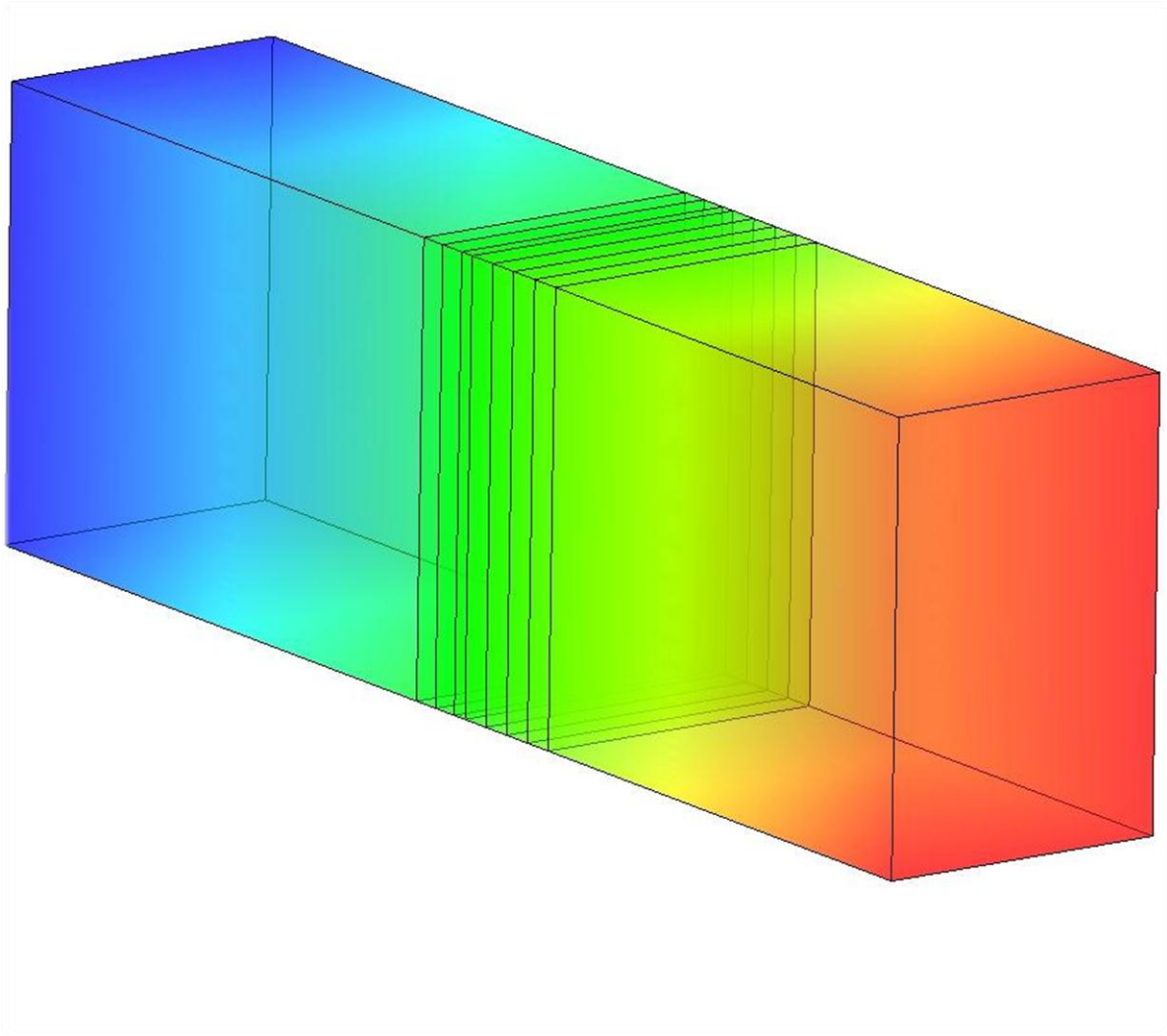


Figura 23. Imagem tridimensional do domínio computacional com representação das estações

3.2.1. Perfis de velocidade para razão de velocidade, $R = 22.5$

Nesta secção iremos apresentar os perfis verticais e horizontais tanto da velocidade média vertical como da velocidade média horizontal adimensionalizados pela velocidade vertical à saída do jacto incidente, V_j , sendo as previsões numéricas comparadas com dados experimentais para razão de velocidade entre o jacto incidente e o escoamento cruzado, R , de 22.5. A simbologia adoptada para os perfis verticais e horizontais da velocidade média horizontal e vertical adimensionalizada é constante ao longo de todas as razões de velocidade, na qual os dados experimentais são representados por triângulos invertidos a preto e os dados numéricos resultantes das simulações são representados por quadrados a azul.

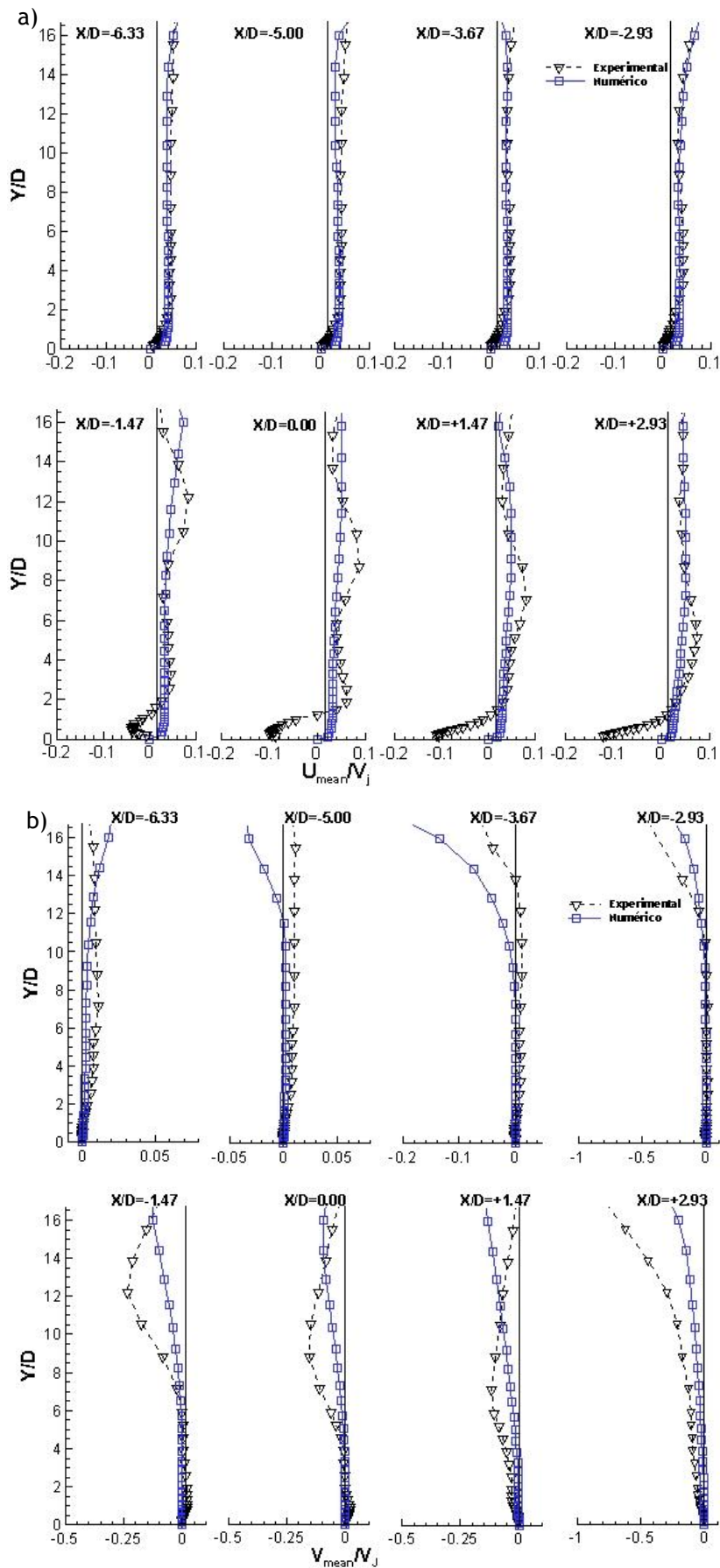


Figura 24. Perfis verticais para razão de velocidade de 22.5 para:
 a) velocidade média horizontal, U_{mean}/V_j
 b) velocidade média vertical, V_{mean}/V_j

A figura 24 representa os perfis verticais para a razão de velocidades de 22.5 onde para o caso a) apresenta-se a velocidade média horizontal (U_{mean}) adimensionalizada por V_j e no caso b) a velocidade média vertical (V_{mean}) adimensionalizada por V_j ao longo da altura do domínio adimensionalizado pelo diâmetro do jacto vertical, D . Para cada componente de velocidade são apresentadas 8 estações longitudinais do domínio computacional, conforme a figura 23, sendo as localizações dos perfis adimensionalizadas pelo diâmetro do jacto vertical D .

Para a figura 24 os perfis $X/D = -6.33, -5.00, -3.67$ e -2.93 da componente horizontal da velocidade apresentam-se quase uniformes com excepção das regiões próximo da parede, $Y/D < 2$, para a qual é visível a influência da presença da parede, quer para dados numéricos, quer para experimentais. Até ao perfil $X/D = -2.93$, isto é, a montante da localização do primeiro jacto, o perfil de velocidade é quase uniforme e positivo, representativo do escoamento cruzado, enquanto que o perfil de velocidade horizontal $X/D = -1.47$ em $Y/D < 2$ apresenta valores negativos representativos do jacto de parede formado devido ao impacto do primeiro jacto vertical. Os dados experimentais mostram ainda a aceleração de escoamento entre $9 < Y/D < 14$ representativo da deflexão do primeiro jacto por acção do escoamento cruzado. Para o perfil vertical localizado a meio dos dois jactos verticais, $X/D = 0.0$, a acção do primeiro jacto faz-se sentir entre $6 < Y/D < 12$, visível apenas nos dados experimentais. Próximo da parede, $Y/D < 2$, o perfil de velocidade apresenta valores negativos representativos do jacto de parede atingido o valor de $U_{\text{mean}}/V_j = -0.1$. Para os perfis a jusante é visível uma uniformização gradual do escoamento, contudo é visível próximo da superfície de impacto a acção do jacto de parede devido ao impacto do jacto vertical que estende-se do perfil $X/D = -1.47$ até ao perfil $X/D = +2.93$. Os dados numéricos permanecem na sua generalidade constante ao longo de todas as estações longitudinais do domínio computacional não sendo visível qualquer efeito dos jactos incidentes, exceptuando entre os perfis $X/D = -1.47$ e $+1.47$ na qual é visível uma ligeira aceleração do escoamento para $Y/D > 12$. A figura 24 b) representa os perfis verticais para razão de velocidade de 22.5 sendo apresentado a velocidade média vertical adimensionalizada pela velocidade á saída do jacto vertical, V_{mean}/V_j . O perfil de velocidade $X/D = -6.33$ apresenta escoamento praticamente uniforme para os dados numéricos e experimentais. O perfil de velocidade $X/D = -5.0$ apresenta-se semelhante ao anterior para os dados experimentais mas para os dados numéricos o perfil de velocidade apresenta na zona superior do domínio computacional, $Y/D > 12$, razões de velocidade negativas indicativo da deflexão do escoamento cruzado devido ao primeiro jacto vertical ou jacto montante, atingido valores de $V_{\text{mean}}/V_j = -0.05$ para $Y/D \approx 16$. Nos dois perfis seguintes, $X/D = -3.67$ e $X/D = -2.93$, as previsões numéricas mostram a influência do primeiro jacto vertical tornando-se mais intensa na região superior do domínio computacional com a razão de velocidade vertical, V_{mean}/V_j , a atingir valores de aproximadamente -0.2 em $Y/D \approx 16$. A influência do primeiro jacto na velocidade vertical desvanece á medida que se aproxima da superfície de impacto, em $Y/D \approx 9$ a velocidade vertical é aproximadamente 0. Em $X/D = -1.47$ o perfil de velocidade experimental demonstra velocidade máxima negativa para $Y/D = 12$, atingido valor de $V_{\text{mean}}/V_j = -0.25$, enquanto para as previsões

numéricas a velocidade é negativa, sendo a velocidade máxima negativa na região $Y/D > 16$, diminuindo gradualmente à medida que se aproxima da superfície impactante. No perfil $X/D = 0.0$ é possível observar que a velocidade máxima negativa do perfil experimental aproxima-se da superfície de impacto, apresentando um valor de $V_{\text{mean}} = -0.25V_j$ em $Y/D = 9.5$. Ainda para este perfil em $Y/D < 2$ é visível um aumento da velocidade atingindo valores positivos sendo indicativo da presença de um *ground vortex*. O perfil de velocidade numérica apresenta a mesma configuração que na estação anterior mas para valores menores de velocidade. O perfil $X/D = +1.47$ acentua a aproximação da velocidade negativa máxima da superfície de impacto do perfil experimental. No perfil mais a jusante, isto é, $X/D = +2.93$ correspondente à posição do segundo jacto, é visível para ambos os perfis numérico e experimental da componente vertical da velocidade um valor máximo negativo em $Y/D > 16$, isto é, próximo do bocal de saída do jacto.

A figura 25 apresenta perfis horizontais da velocidade média horizontal, caso a), e velocidade média vertical, caso b). As componentes de velocidade são adimensionalizadas pela velocidade vertical à saída do jacto incidente, V_j , e as coordenadas do domínio computacional, X e Y , pelo diâmetro à saída do bocal do jacto incidente, D . O perfil horizontal próximo do bocal de saída dos jactos incidentes, $Y/D = 18.6$, da velocidade média horizontal apresenta uma razão de velocidade, U_{mean}/V_j , constante igual a 0.07 desde a entrada do domínio computacional, $X/D = -8$, até $X/D = -4$ para os dados experimentais, aumenta até $U_{\text{mean}}/V_j = -2.93$, na localização exacta do primeiro jacto incidente, sendo que esta aceleração poderá ser devido ao confinamento do escoamento e do *ground vortex*, na qual o escoamento cruzado é bloqueado provocando a sua aceleração na parte superior do escoamento. Em seguida o valor da velocidade horizontal decresce acentuadamente até $X/D = -2.4$ indicando “fim” do primeiro jacto incidente, entre $X/D = -2.4$ e a localização do segundo jacto incidente, $X/D = +2.93$, voltando a componente horizontal da velocidade a aumentar até atingir $U_{\text{mean}} = 0.07V_j$. Os dados numéricos para a estação $Y/D = 18.6$ revelam a presença de jactos caracterizados por uma descida de velocidade com subsequente subida nas posições dos jactos representados por linhas verticais, contudo os valores numéricos estão subdimensionados comparativamente aos experimentais podendo concluir-se um erro na escrita do ficheiro de resultados após a simulação uma vez que para o perfil horizontal seguinte $Y/D = 16.7$, a previsão numérica demonstra claramente o efeito da presença dos jactos incidentes.

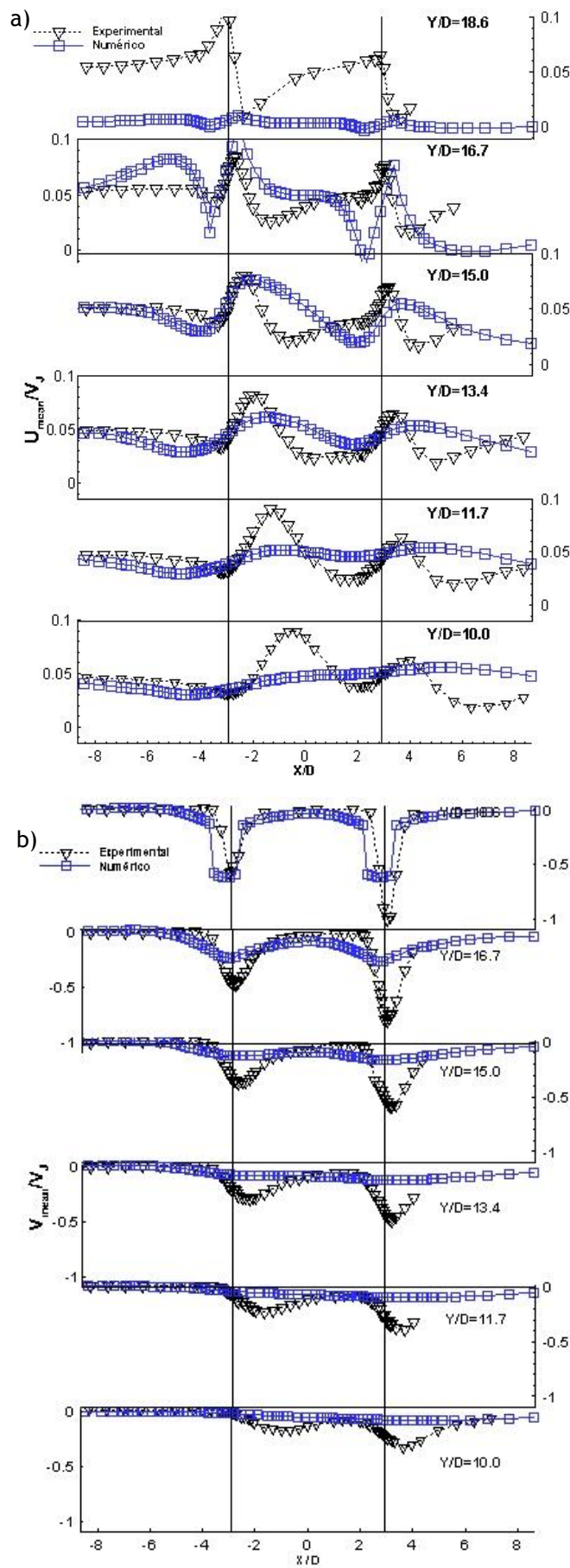


Figura 25. Perfis horizontais de razão de velocidades 22.5 para:
 a) velocidade média horizontal adimensionalizada, U_{mean}/V_j
 b) velocidade média vertical adimensionalizada, V_{mean}/V_j

Os perfis horizontais da componente horizontal da velocidade mostra claramente a deflexão dos jactos incidentes devido ao escoamento cruzado. Na figura 25 b) são apresentados perfis horizontais da velocidade vertical adimensionalizada pela velocidade do jacto incidente, V_{mean}/V_j . O perfil de velocidade horizontal $Y/D = 18.6$ da componente vertical da velocidade mostra claramente, tanto para as previsões numéricas como para os dados experimentais, dois picos de velocidade vertical posicionada sobre a localização dos dois jactos incidentes. Para o primeiro jacto, $X/D = -2.93$, a razão de velocidade vertical é de -0.5 , já para o segundo jacto, $X/D = +2.93$, a razão de velocidade é superior a -1 . Os dados numéricos revelam também a presença dos jactos verticais, apresentando razões de velocidade de -0.6 para ambos os jactos. Nos perfis horizontais da velocidade vertical é visível que os picos de velocidade deslocam-se no sentido jusante, ou seja, no sentido do escoamento sendo que para $Y/D = 10.0$ correspondendo á estação mais próximo da superfície de impacto e relativo aos dados experimentais, o pico do primeiro jacto deslocou-se para a posição $X/D = -1$ com intensidade inferior a -0.2 , enquanto o segundo pico correspondente ao jacto a jusante deslocou-se para a posição $X/D \approx 4$ com intensidade -0.5 , continuando o segundo jacto a apresentar razão de velocidade superior, o segundo jacto de velocidade não sente tanto o efeito provocado pelo *crossflow* no que diz respeito á deflexão, uma vez que se encontra protegido pelo primeiro jacto localizado a montante dele. Os dados numéricos apresentam o efeito de jactos incidentes contudo apresentam maior atenuação da intensidade dos jactos.

A figura 26 representa o último conjunto de gráficos para razão de velocidade de 22.5 na qual estão presentes na figura os gráficos do campo de velocidade onde a coordenada horizontal e vertical estão adimensionalizadas pelo diâmetro do jacto incidente D . Os gráficos 26 a) e b) correspondem ao campo de velocidades da velocidade média horizontal adimensionalizado, U_{mean}/V_j , para os dados experimentais e numéricos, respectivamente. Os gráficos 26 c) e d) representam os campos de velocidade média vertical adimensionalizados, V_{mean}/V_j , para os dados experimentais e numéricos, respectivamente. Os campos de velocidade experimentais têm por base os perfis horizontais apresentados anteriormente. A figura 26 vem corroborar o que foi descrito anteriormente. Tanto para os dados experimentais como para as previsões numéricas é claramente perceptível a localização dos jactos incidentes, também é visível um escoamento cruzado com sentido ascendente até ao primeiro jacto incidente, escoamento do jacto incidente é deflectido devido á presença do escoamento cruzado, sendo que os dados numéricos apresentam menor acentuação dos fenómenos descritos.

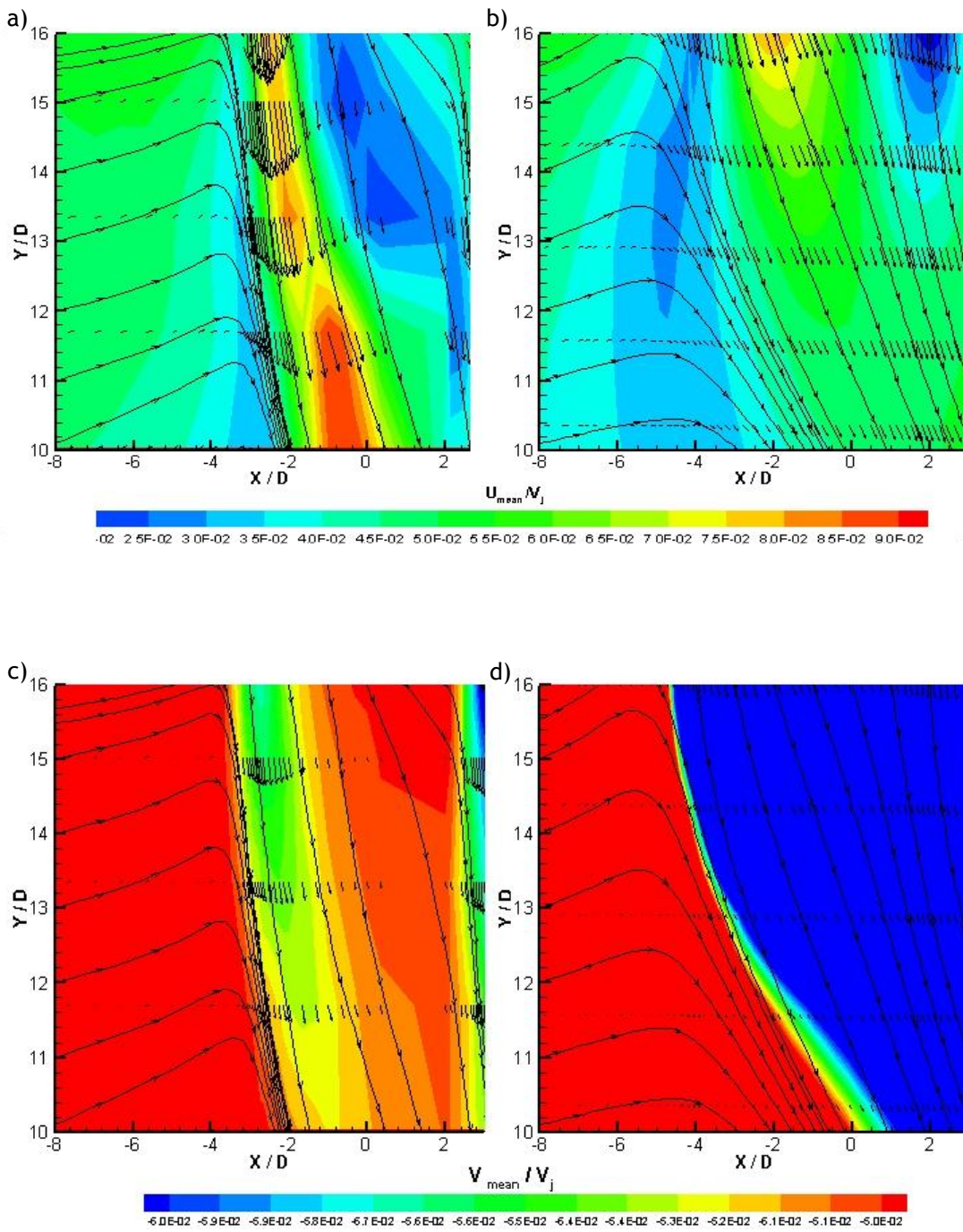


Figura 26. Campos de velocidade de razão de velocidade 22.5 para:
 a) velocidade média horizontal experimental adimensionalizada,
 b) velocidade média horizontal numérica adimensionalizada,
 c) velocidade média vertical experimental adimensionalizada,
 d) velocidade média vertical numérica adimensionalizada

3.2.2. Perfis de velocidade para razão de velocidade, $R = 33.7$

A figura 27 a) representa os perfis de velocidade vertical para velocidade média horizontal e vertical adimensionalizada pela velocidade à saída bocal do jacto incidente, U_{mean}/V_j e V_{mean}/V_j , para a razão de velocidade de 33.7. Como na razão de velocidade anterior a coordenada vertical é adimensionalizada pelo diâmetro do bocal de saída do jacto incidente, D .

O perfil de velocidade experimental para a figura 27, caso a), apresenta-se uniforme e com valores positivos contudo na região próximo da parede para $Y/D < 2$ o perfil apresenta valores negativos de velocidade em todos os perfis verticais consistente com a existência de um jacto de parede na superfície, contudo na previsão numérica só é possível observar a presença do jacto de parede a partir de $X/D = 0$. Para Y/D entre 2 e 6 os perfis verticais $X/D = -5.0, -3.67, -2.93$ da componente de velocidade horizontal experimental apresentam valores positivos, atingido um valor máximo de razão de velocidade de 0.08 em $Y/D = 3$, este aumento da componente horizontal da velocidade poderá dever-se à formação do *ground vortex*, devido ao impacto do jacto de parede com o escoamento cruzado. Na superfície superior é possível detectar um incremento da componente horizontal da velocidade do escoamento, esta aceleração poderá ser devido à localização do primeiro jacto incidente, ao confinamento do escoamento e do *ground vortex*, o escoamento cruzado é bloqueado, provocando a sua aceleração na parte superior do escoamento. No perfil horizontal $X/D = -1.47$ é visível a aceleração do escoamento devido ao jacto incidente de razão de velocidade positiva com máximo para $Y/D = 10$ devido à acção da aceleração do escoamento cruzado com influência do jacto vertical que com a deflexão acelera parcelarmente o escoamento. No perfil horizontal $X/D = -1.47$ é visível a aceleração do escoamento próximo da superfície de impacto estando o valor máximo de velocidade localizado para $Y/D = 7$. No perfil $X/D = +1.47$ a velocidade experimental apresenta aceleração com valores positivos de velocidade com máximo localizado em $Y/D = 5$. Para o perfil $X/D = +2.93$ o escoamento é praticamente uniforme, destacando-se contudo o efeito do jacto de parede na superfície de impacto. Ao longo dos perfis -1.47 até $+2.93$ um efeito semelhante é visível nas previsões numéricas contudo menos acentuados. A figura 27 b) apresenta perfis verticais da componente vertical de velocidade adimensionalizada pela velocidade de saída do bocal do jacto incidente. O perfil de velocidades experimental é uniformemente positivo para $Y/D > 6$, contudo para $Y/D < 6$ o perfil apresenta um aumento da razão de velocidade média vertical possuindo um máximo de V_{mean}/V_j de 0.05 para $Y/D = 2$ representativo do *ground vortex*. No perfil numérico não é visível a influência do jacto incidente sendo que o perfil é praticamente uniforme. Para o perfil vertical seguinte, $X/D = -5.0$, é visível no perfil de velocidade experimental o *ground vortex* sendo que para $Y/D > 5$ o perfil de velocidade é uniforme. O perfil de velocidade numérico apresenta uma configuração consistente com a presença de um jacto de alta velocidade onde a velocidade V_{mean}/V_j possui valores negativos para $Y/D > 10$.

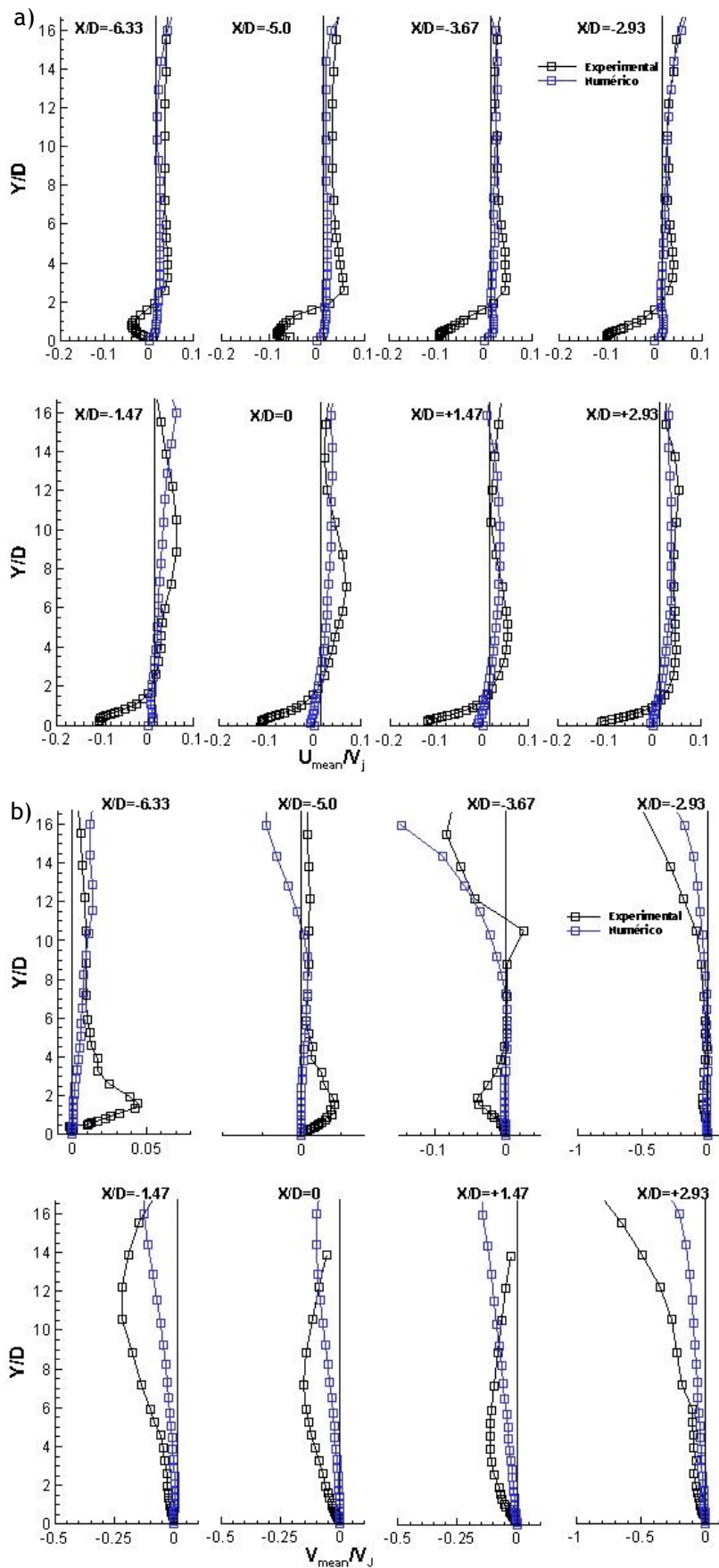


Figura 27. Perfis verticais da razão de velocidades 33.7 para:
 a) velocidade média horizontal adimensionalizada, U_{mean}/V_j
 b) velocidade média vertical adimensionalizada, V_{mean}/V_j

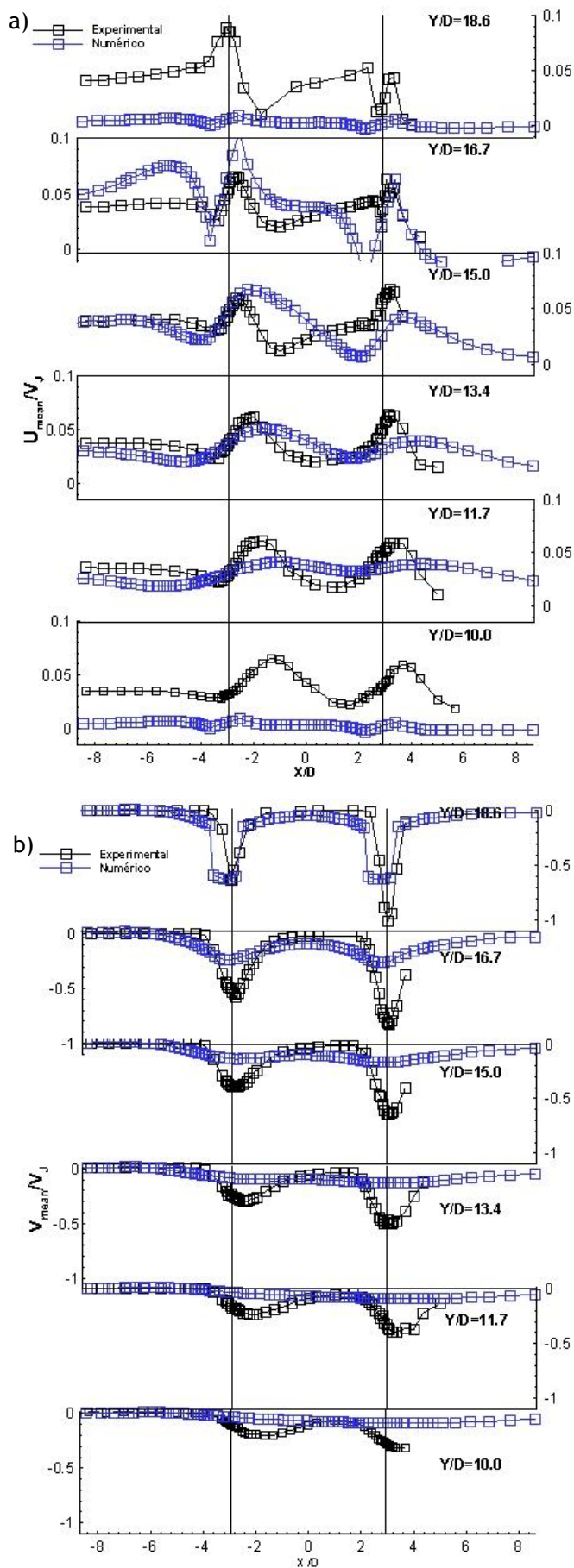


Figura 28. Perfis horizontais da razão de velocidade 33.7 para:
 a) velocidade média horizontal adimensionalizada, U_{mean}/V_j
 b) velocidade média vertical adimensionalizada, V_{mean}/V_j

Para o perfil $X/D = -3.67$, o perfil de velocidade numéricos mantém a mesma configuração que na estação anterior contudo mais acentuado enquanto o perfil experimental de velocidade vertical apresenta para $Y/D < 4$ um efeito contrário ao anterior, ou seja, é visível que para esta região o escoamento apresenta razão de velocidade negativas representativas da zona a jusante do *ground vortex*. Para $Y/D > 10$ é visível o efeito do jacto incidente onde o perfil apresenta inclinação uniforme com razões de velocidade negativas. O perfil $X/D = -2.93$ apresenta perfis uniformes em toda a região para $Y/D < 9$ mas para valores superiores apresenta razão de velocidade negativos associados ao jacto. Para o perfil a jusante o perfil de velocidade vertical experimental apresenta razão de velocidade negativa máxima de $V_{mean}/V_j = -0.25$ em $Y/D = 12$, e no perfil vertical seguinte o pico máximo da razão de velocidade situa-se na posição $Y/D = 6$ aproximando-se da superfície de impacto, sendo visível a deflexão do jacto incidente pelo escoamento cruzado. Para o perfil correspondente à localização do segundo jacto ou $X/D = +2.93$ é visível perfil de velocidade associados á presença de jacto, sendo visíveis valores experimentais $V_{mean}/V_j = -0.8$ próximos da parede superior, valor este superior ao valor correspondente na localização do primeiro jacto. Os dados numéricos apresentam a mesma forma ao longo de todas as secções, apresentando valores de razão de velocidade menos negativas que a dos dados experimentais para a última estação, contudo é visível um incremento de razão de velocidade, mais negativo, entre dados numéricos do primeiro para o segundo jacto incidente.

A figura 28, apresenta perfis de velocidade horizontais da razão de velocidade de 33.7 para velocidade média horizontal adimensionalizada, U_{mean}/V_j e para velocidade média vertical, V_{mean}/V_j , caso a) e b), respectivamente. A figura 28 a) apresenta no perfil mais próximo da superfície superior, $Y/D = 18.6$, um perfil de velocidades experimental com um pico máximo de velocidade média horizontal adimensionalizada localizado no eixo do primeiro jacto. O perfil demonstra, posteriormente queda da velocidade até posição $X/D = -2$ subindo novamente. Na posição do segundo jacto existe uma queda acentuada da razão de velocidade. Nos sucessivos perfis horizontais, no sentido descende, o perfil de velocidade experimental demonstra um harmonização adquirindo forma sinusoidal com dois picos correspondentes aos dois jacto, contudo, como mencionado no perfil de velocidades anterior de 22.5 existe inclinação no sentido jusante devido á influência do escoamento cruzado. No perfil de velocidades numérico para o perfil horizontal mais próximo do bocal dos jactos, $Y/D = 18.6$, o perfil apresenta dois picos máximos nas posições dos jactos incidentes na qual antecedem dois picos negativos de velocidade tal como é visível nos dados experimentais contudo os dados numéricos são muitos atenuados indiciando o mesmo problema referenciado para a razão de velocidade de 22.5. Contudo para o perfil horizontal seguinte o perfil demonstra um mínimo absoluto próximo do jacto com um sucessivo aumento após o mesmo jacto sendo este fenómeno verificável para ambos os jactos. Tal como para a razão de velocidade anterior os perfis numéricos demonstram diminuição abrupta da velocidade a montante dos jactos incidentes com aumentos acentuados a jusante dos mesmos. Os sucessivos perfis no sentido de aproximação da superfície de impacto demonstram atenuação do

efeito da velocidade dos jactos. Em resumo no gráfico 28 b) é apresentado perfis de velocidade média vertical adimensionalizada no qual o perfil de velocidade experimental demonstra claramente dois picos de razão de velocidade negativa localizados na posição entre jactos apresentando razão de velocidade maior para o segundo jacto. Nos sucessivos perfis horizontais, no sentido descendente, o valor mínimo dos jactos diminui apresentado inclinação no sentido jusante como para o caso dos perfis horizontais de razão de velocidade de 22.5. Os dados numéricos demonstram a existência de picos de velocidade associado aos jactos incidentes para o perfil mais a norte, contudo o perfil apresenta picos de velocidade iguais ao contrário do visível nos dados experimentais na qual o segundo jacto apresenta maior razão de velocidade vertical.

A figura 29 apresenta o campo de velocidade para a razão de velocidade de 33.7 onde no caso a) é apresentado a velocidade média horizontal adimensionalizado, U_{mean}/V_j , para os dados experimentais, sendo o caso b) corresponde aos dados numéricos. Os casos c) e d) correspondem aos campos de velocidade média vertical, V_{mean}/V_j , para os dados experimentais e numéricos, respectivamente. O campo de velocidade relativo aos dados experimentais tem por base os perfis horizontais apresentados anteriormente. Os marcadores de escoamento ou *streamtraces* demonstram que o escoamento apresenta tendência a subir até próximo do primeiro jacto que devido á acção deste é deflectido apresentando movimento descendente, contudo devido á acção do escoamento cruzado os jactos incidentes também são deflectidos para jusante. Os dados numéricos comprovam a mesma conclusão no entanto o escoamento cruzado apresenta maior ângulo de inclinação no sentido ascendente. Relativamente aos campos de velocidade média horizontal adimensionalizada a velocidade é máxima na região dos jactos incidentes e sendo visível a mesma configuração tanto para os dados experimentais como para os dados numéricos. As figuras 29 c) e d) apresentam campos de velocidade média vertical adimensionalizadas na qual é visível zonas de maior velocidade vertical correspondentes aos jactos incidentes. Confirmando que com maior razão de velocidade com conseqüente menor velocidade do escoamento cruzado menor a deflexão do jactos incidentes.

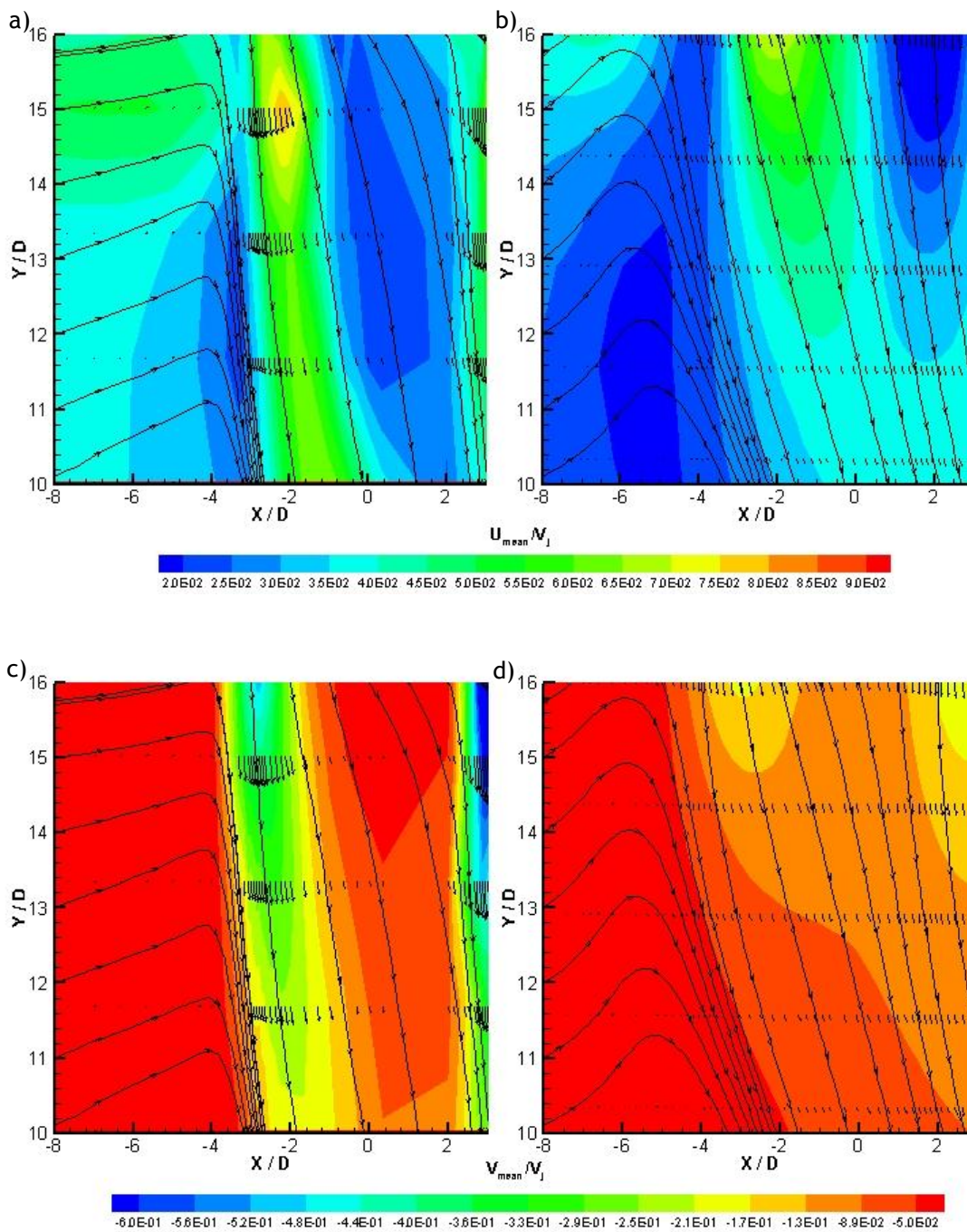


Figura 29. Campo de velocidades para razão de velocidades 33.7 para:
 a) velocidade média horizontal experimental adimensionalizada,
 b) velocidade média horizontal numérica adimensionalizada,
 c) velocidade média vertical experimental adimensionalizada,
 d) velocidade média vertical numérica adimensionalizada

3.2.3. Perfis de velocidade para razão de velocidade, $R = 43.8$

Para esta secção são apresentados gráficos de perfis verticais, horizontais e campo de velocidade para razão de velocidade igual a 43.8 onde, conforme a tabela 6, o escoamento cruzado apresenta valor de velocidade de $U_0 = 0.8$ m/s, mantendo o jacto incidente a mesma velocidade de -36 m/s.

Para o gráfico dos perfis verticais da figura 30 a), o perfil mais a montante de velocidade horizontal adimensionalizada, $X/D = -6.33$, apresenta perfil de velocidade horizontal experimental uniforme para $Y/D > 3$, sendo visível o *ground vortex* para $Y/D < 3$. O perfil vertical da velocidade horizontal permanece com a mesma configuração até à posição $X/D = -2.93$. O perfil vertical $X/D = -1.47$ apresenta aceleração da velocidade horizontal experimental, tendo velocidade máxima centrada na posição $Y/D = 14$ passando a ter-se velocidade máxima horizontal adimensional para a posição $Y/D = 10$ no perfil seguinte devido ao jacto incidente. Nos perfis $X/D = 0.0$ e $+1.47$, a velocidade máxima horizontal varia de $Y/D = 6$ para 4 acabando por desvanecer o efeito de aceleração da velocidade horizontal para o perfil de velocidade mais a jusante. Para o perfil de velocidade mais a jusante é visível um escoamento uniforme, quer para os dados experimentais, quer para os dados numéricos, sendo visível para perfis de velocidade experimentais em $Y/D < 2$ velocidade negativa devido ao jacto de parede. Para a figura 30 b) são apresentados perfis verticais experimentais e numéricos da velocidade média vertical adimensionalizada. Os perfis numéricos de velocidade evidenciam a presença dos jactos incidentes através de valores negativos de V_{mean}/V_j , contudo os dados experimentais não apresentam este fenómeno mas em $Y/D < 4$ é visível a desaceleração da velocidade vertical devido ao *ground vortex*. O perfil vertical $X/D = -3.67$ evidencia a presença de jactos de impacto para dados experimentais e numéricos, sendo no perfil de velocidade seguinte visível de forma mais atenuada o efeito dos jactos incidentes. O perfil vertical experimental $X/D = -1.47$ apresenta desaceleração da velocidade vertical apresentando velocidade máxima negativa em $Y/D = 10$, deslocando-se nos dois perfis seguintes para $Y/D = 5$ e 4. O perfil de velocidade numérico $X/D = -1.47$ apresenta velocidade negativa devido ao jacto incidente. O perfil de velocidade seguinte apresenta desaceleração da velocidade centrado o seu máximo em $Y/D = 14$ tal como no perfil experimental. No perfil de velocidade numérico mais a jusante apenas é visível um perfil de velocidade negativo representativo do jacto incidente.

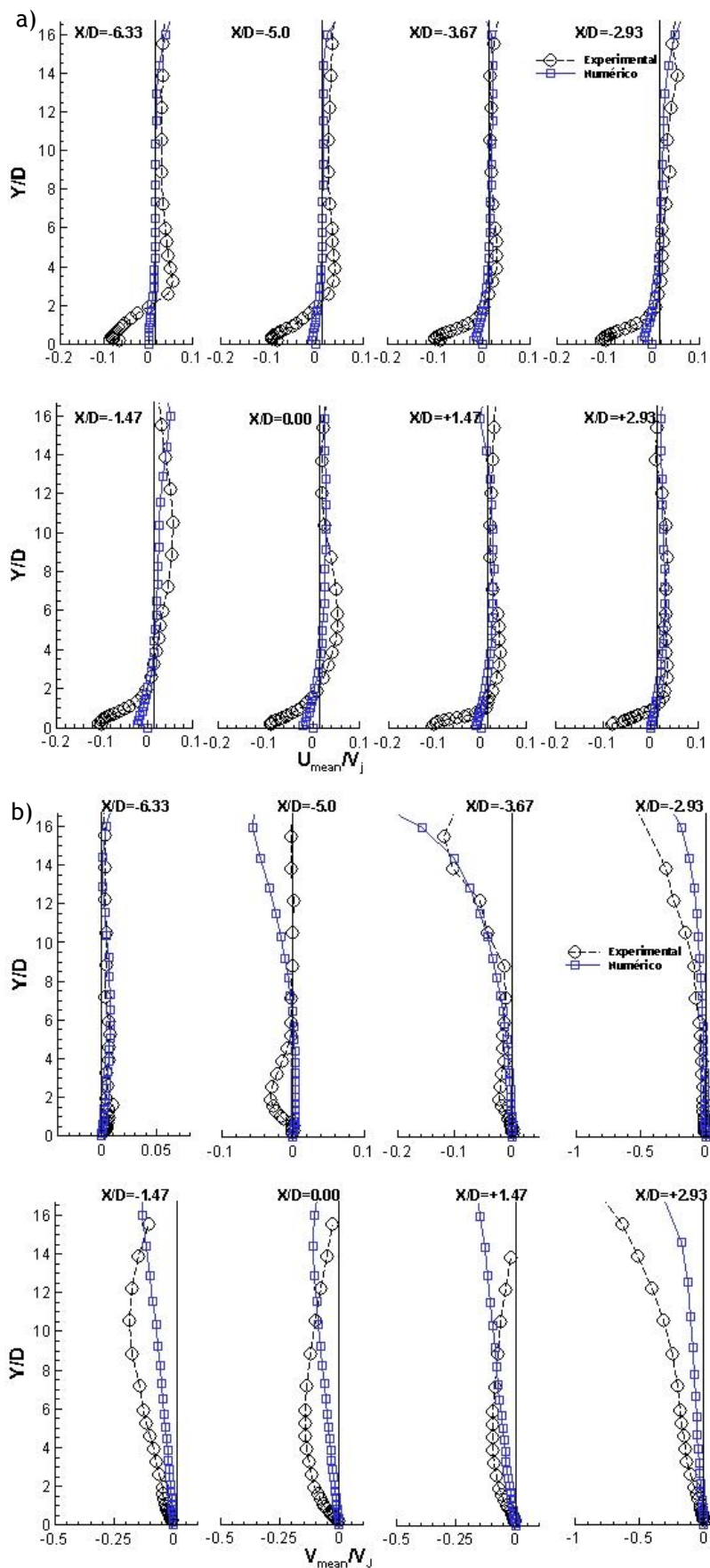


Figura 30. Perfis verticais da razão de velocidades de 43.8 para:
 a) velocidade média horizontal adimensionalizada, U_{mean}/V_j
 b) velocidade média vertical adimensionalizada, V_{mean}/V_j

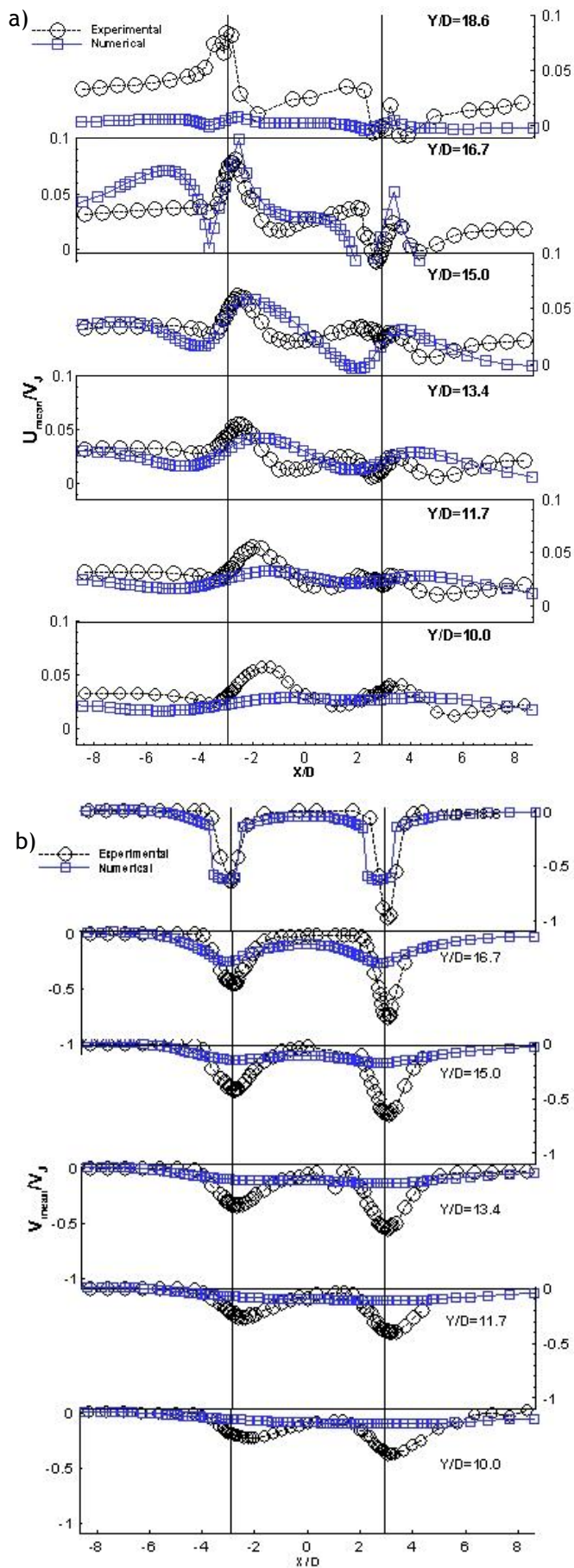


Figura 31. Perfis horizontais da razão de velocidades de 43.8 para:
 a) velocidade média horizontal adimensionalizada, U_{mean}/V_j
 b) velocidade média vertical adimensionalizada, V_{mean}/V_j

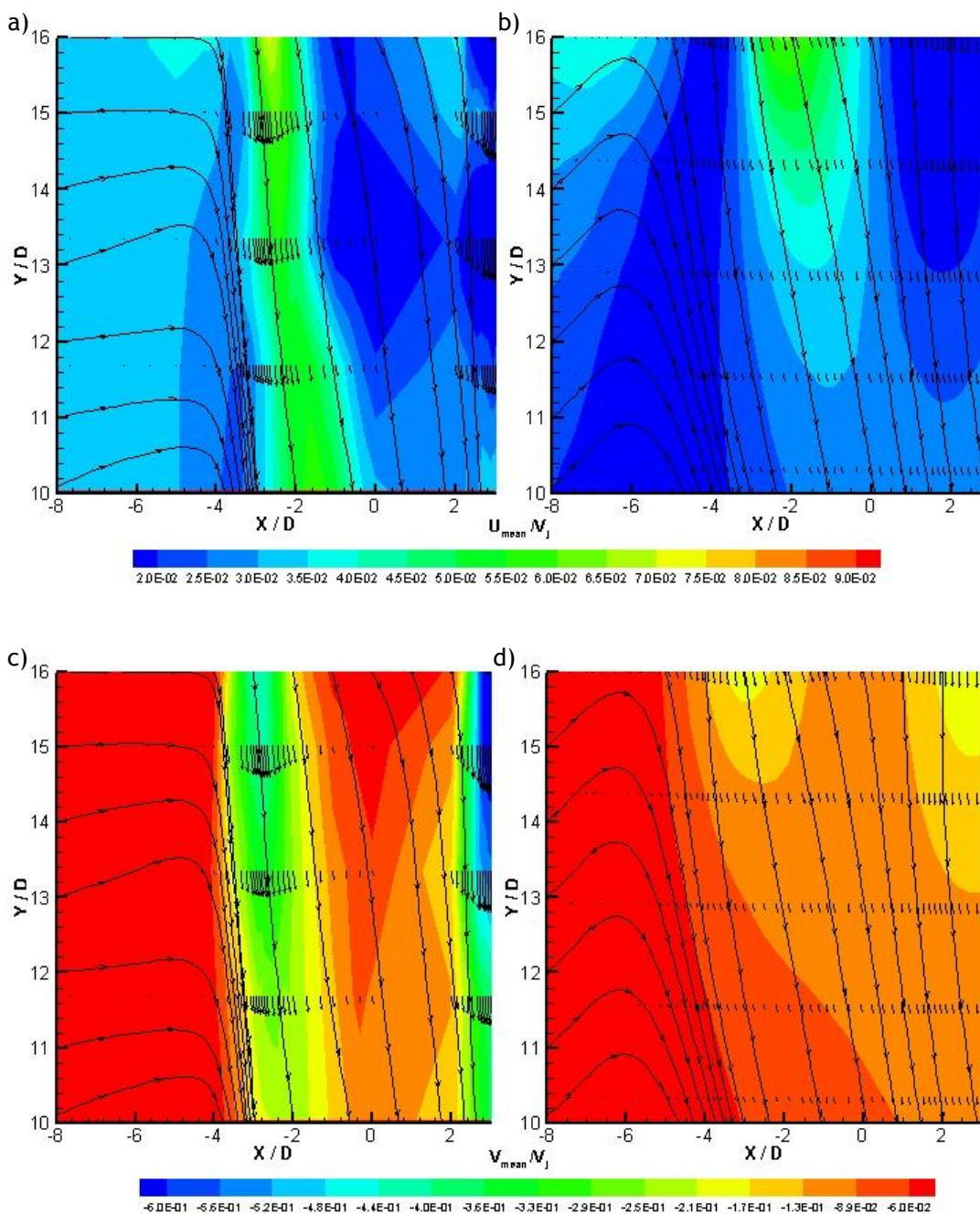


Figura 32. Campos de velocidade de razões de velocidades 43.8 para:
 a) velocidade média horizontal experimental adimensionalizada,
 b) velocidade média horizontal numérica adimensionalizada,
 c) velocidade média vertical experimental adimensionalizada,
 d) velocidade média vertical numérica adimensionalizada

A figura 31 apresenta perfis horizontais para velocidade média horizontal adimensionalizada, U_{mean}/V_j , e velocidade média vertical adimensionalizada, V_{mean}/V_j , respectivamente casos a) e b). Nos perfis horizontais experimentais do caso a) é visível dois picos de velocidade positiva evidenciando os efeitos dos jactos incidentes com aceleração da velocidade média horizontal para todos os perfis verticais, apresentando o jacto incidente a montante maior velocidade vertical que o jacto jusante. Ao longo dos perfis horizontais verticais é visível inclinação da velocidade máxima negativa dos jactos incidentes devido á deflexão provocada pelo escoamento cruzado. De mencionar que para cada pico máximo negativo de velocidade vertical é visível a jusante e montante uma aceleração acentuada do perfil de velocidade. Os perfis horizontais numéricos assemelham-se aos experimentais, na medida em que são visíveis dois picos de velocidade máxima negativa horizontal adimensionalizada nos perfis de velocidade a jusante dos jactos incidentes, contudo e ao contrário dos perfis experimentais, a montante do pico de velocidade máxima negativa existe um aumento da velocidade, conforme descrito para perfis de velocidade anteriores. O perfil de velocidade $Y/D = 16.7$ demonstra uma clara aceleração da velocidade antes da queda de velocidade que antecede o jacto incidente a montante. Como em casos anteriores o declínio da velocidade máxima negativa devido aos jactos verticais incidentes é mais acentuado nos perfis de velocidade horizontais numéricos, comparativamente aos perfis experimentais, levando a supor uma simulação conservadora por parte do código utilizado. Os perfis horizontais da velocidade vertical adimensionalizada presente na figura 31 b) apresentam picos de velocidade máxima negativa localizados nas posições dos jactos incidentes, sendo visível através da velocidade negativa superior para o jacto incidente a jusante. Os perfis de velocidade numéricos apresentam maior atenuação da velocidade máxima negativa ao longo da altura do domínio computacional em direcção á superfície de impacto levando á mesma conclusão tirada para perfis horizontais de velocidade horizontal adimensionalizadas, sendo também válida a conclusão para este caso.

Por fim o gráfico 32 corresponde aos campos de velocidade para razão de velocidade média horizontal experimental e numérico, casos a) e b) e razão de velocidade média vertical experimental e numérico, casos c) e d). Os perfis de velocidade média horizontal e vertical experimental demonstram claramente a presença de jactos incidentes com inclinação no sentido jusante devido ao efeito do escoamento cruzado que os deflecte, sendo também visível nos perfis de velocidade numéricos os jactos incidentes, embora de forma mais atenuada.

3.2.4. Análise 3D do impacto de jacto incidentes alinhados com escoamento cruzado de baixa velocidade

Nesta secção serão apresentados exclusivamente os dados numéricos resultantes da simulação computacional do tema de jactos múltiplos incidentes na presença de escoamento cruzado intitulado '*Numerical Study of Twin Impinging Jets Aligned with Low Velocity Crossflow*'.

Conforme visível na figura 4, dois jactos incidentes, de diâmetro $D = 15$ mm, distanciados 6 diâmetros e alinhados com o escoamento cruzado de baixa velocidade a uma altura de impacto de 20.1 diâmetros, resulta na penetração do primeiro jacto no escoamento cruzado com embate na superfície de impacto fluindo radialmente desde o ponto de impacto gerando-se jactos de parede próximos de solo. O jacto de parede de sentido contrário ao escoamento cruzado ao "embater" com escoamento cruzado gera um *ground vortex* adquirindo sentido do movimento do escoamento cruzado contornando a coluna de ar resultante do jacto incidente envolvendo-o formando uma estrutura tipo cachecol composta por vórtices denominada de scarf vortex. Contudo o segundo jacto é deflectido pelo escoamento cruzado não embatendo no solo para todas as razões de velocidade estudadas. Com o impacto dos jactos no solo é gerada sustentação que permite uma aeronave VSTOL operar nessas condições características, contudo devido à geração do *ground vortex* as pressões exercidas sobre a aeronave são alteradas, alterando as forças e momentos resulta das perdas de potência, consequência da re-ingestão dos gases de escape resultando também em perdas de elevação, instabilidade aerodinâmica e aumentos de temperatura na fuselagem. Por conseguinte existe a necessidade de compreensão destas estruturas, tendo sido estudado experimentalmente este tipo de escoamento no plano longitudinal vertical de simetria.

Tendo por base este conhecimento partiu-se para o estudo numérico através da simulação computacional tridimensional deste escoamento utilizando o código PACE com modelo turbulento $k - \epsilon$.

O primeiro gráfico correspondente à figura 33 consiste na secção de teste tridimensional, ou seja, no domínio computacional simulado e o seu simétrico sendo apresentado o campo de velocidade média horizontal adimensionalizadas para a razão de velocidade mais elevada de 43.8 no plano de simetria ou seja, para $Z = 0$. Através dos níveis da componente horizontal de velocidade U_{mean}/V_j é visível a presença dos jactos incidentes através dos níveis de razão de velocidade negativos sendo também visível o jacto de parede e o *ground vortex* formado a montante do primeiro jacto. Por forma a tornar mais perceptível o escoamento são visíveis linhas marcadoras representativas do percurso de uma partícula do escoamento. No domínio computacional à direita, a montante próximo da parede norte é visível o percurso de uma partícula que inicialmente apresenta movimento ascensional até à posição do jacto vertical a montante sendo deflectida com sentido descendente deslocando-se transversalmente pela acção do jacto de parede, interagindo com a estrutura tipo cachecol composta por vórtices (*scarf vortex*) próximo da superfície de impacto e da parede lateral, voltando a subir enrolando sobre si mesmo a jusante do primeiro jacto devido à

acção da estrutura tipo cachecol. Mais três linhas são visíveis na posição do segundo jacto indicando que o jacto vertical expande radialmente predominantemente no sentido jusante devido á deflexão pelo escoamento cruzado. No domínio computacional á esquerda é visível, como relatado para o domínio simétrico á direita, uma recirculação próximo na superfície de impacto e da parede lateral “alimentada” tanto pelo escoamento cruzado como pelo jacto de parede formado pelo jacto vertical incidente.

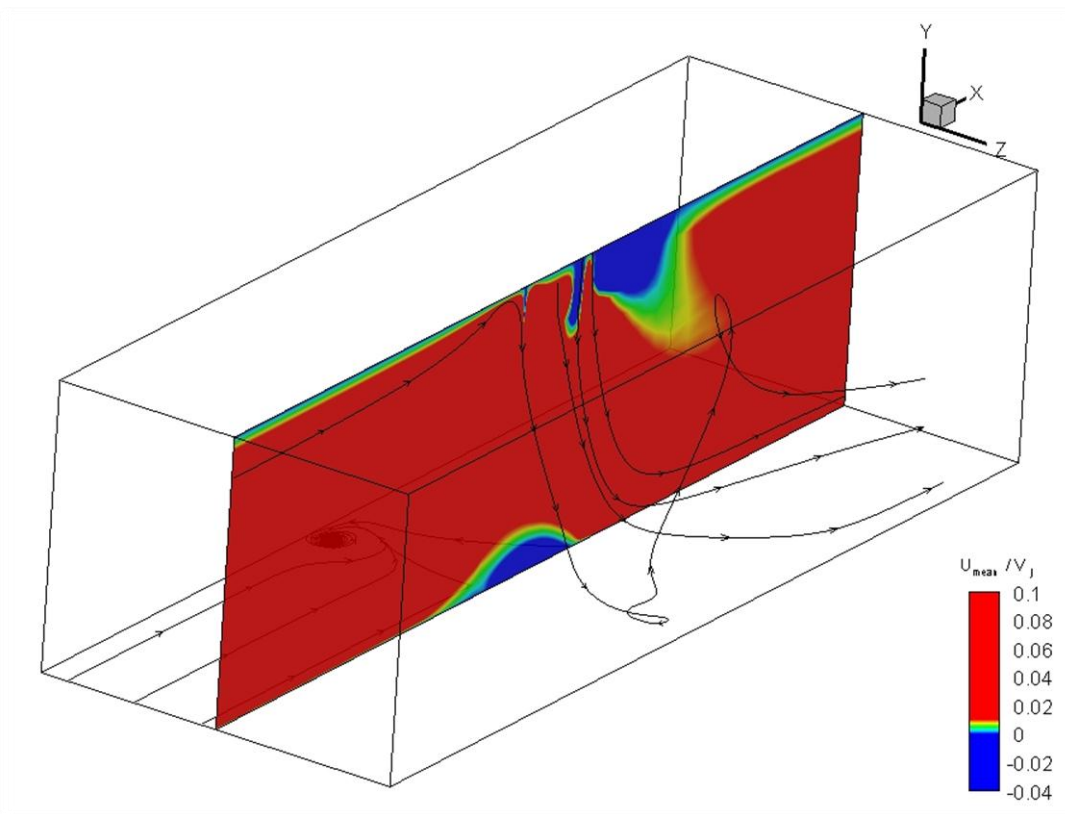


Figura 33. Secção Teste completa (com plano de simetria visível) do campo de velocidades U_{mean}/V_j com marcadores para $R = 43.8$

No próximo gráfico, figura 34, é apresentado o domínio computacional tridimensional para a razão de velocidade mais elevada de 43.8 sendo visível o campo de velocidade da componente de velocidade média horizontal adimensionalizado, U_{mean}/V_j , no plano de simetria $Z = 0$, sendo apresentado marcadores por forma a analisar o percurso do escoamento. Para a razão de velocidade mais elevada já é visível na figura que o primeiro jacto ao embater na superfície de impacto expande radialmente formando-se um jacto de parede que colide com escoamento cruzado deflectindo-se com geração de um *ground vortex* centrado na posição $X/D = -6$. Da figura é possível visualizar que o segundo jacto, a jusante, é menos deflectido pelo escoamento cruzado comparativamente ao primeiro jacto, a montante, e possivelmente devido ao jacto de parede do primeiro jacto, que expande radialmente, não sendo possível identificar o ponto de impacto do segundo jacto na superfície inferior.

Como visível na figura anterior, a recirculação próximo da parede inferior é “alimentada” pelo jacto de parede assim como pelo escoamento cruzado.

A figura 35 apresenta 3 planos verticais da velocidade média horizontal adimensionalizada pela velocidade do jacto incidente no plano de simetria $Z/D = 0$ para três razões de velocidade do domínio computacional, onde para o caso a) a razão de velocidade é $R = 22.5$, sendo $R = 33.7$ para o caso b) e $R = 43.8$ para o caso c). Ao contrário do esperado, para a razão de velocidade menor, 22.5, não é visível jacto de parede, não existindo impacto por qualquer um dos jactos, sendo por conseguinte, ambos os jactos deflectido pelo escoamento cruzado levando a conclusão que segundo as previsões numéricas, os jactos verticais não tem velocidade suficiente para “penetrar” por completo o escoamento cruzado. Esta conclusão não está de acordo com os dados experimentais na qual existe impacto para a menor razão de velocidade com penetração por parte do primeiro jacto e consequentemente, formação de *ground vortex*. Para a segunda razão de velocidade, $R = 33.7$, existe recirculação centrada na posição $X/D = -3$, contudo o seu efeito é muito ligeiro sendo visível apesar da elevada deflexão do primeiro jacto. Para o terceiro caso, ou seja, caso c) onde a razão de velocidade é $R = 43.8$ existe zona de recirculação visível estando o *ground vortex* centrado em $X/D = -6$, conforme esperado, sendo o seu efeito mais forte estando de acordo com dados experimentais. Ou seja, só para as razões de velocidade mais elevadas é que o primeiro jacto consegue penetrar o escoamento cruzado e embater na superfície de impacto com formação de *ground vortex* uma vez que o escoamento cruzado apresenta menor velocidade, sendo o segundo jacto deflectido embora com menor inclinação que nos casos b) e ainda menor inclinação comparativamente ao caso a). Através dos marcadores visíveis na figura 35 é visível que o escoamento cruzado apresenta direcção ascendente antes do primeiro jacto, aumentando este ângulo de subida com aumento da razão de velocidade, sendo que quanto maior o efeito de *ground vortex* maior a inclinação de subida do escoamento cruzado.

A partir do gráfico 36 podemos concluir que o escoamento cruzado apresenta sentido ascendente a montante do primeiro jacto sendo que este sobe até ser “empurrado” no sentido descendente pelo jacto incidente. Quanto maior é a razão de velocidade, isto é, quanto menor é a velocidade do escoamento cruzado em relação aos jactos incidentes, menor é a deflexão dos mesmos por parte do escoamento cruzado e consequentemente maior é o ângulo do escoamento cruzado a montante do primeiro jacto incidente e maior é a intensidade do *ground vortex*. Por conseguinte pode-se verificar que as previsões numéricas apresentam algumas discrepâncias relativamente às medidas experimentais, apesar da existência de *ground vortex* para as razões de velocidade de 33.7 e 43.8 a dimensão do *ground vortex* é menor do que a existente nos dados experimentais. Segundo as figuras 33, 34 e 36 é visível para a razão de velocidade 43.8 uma recirculação na superfície de impacto a sul próximo da parede lateral não esperada uma vez que esta estrutura aerodinâmica não fora reportada na bibliografia. Apesar de este fenómeno ser visível apenas para o caso c) da figura 36 é possível que existe esta estrutura para qualquer razão de velocidade uma vez que, como concluído, o programa utilizado subdimensiona o escoamento.

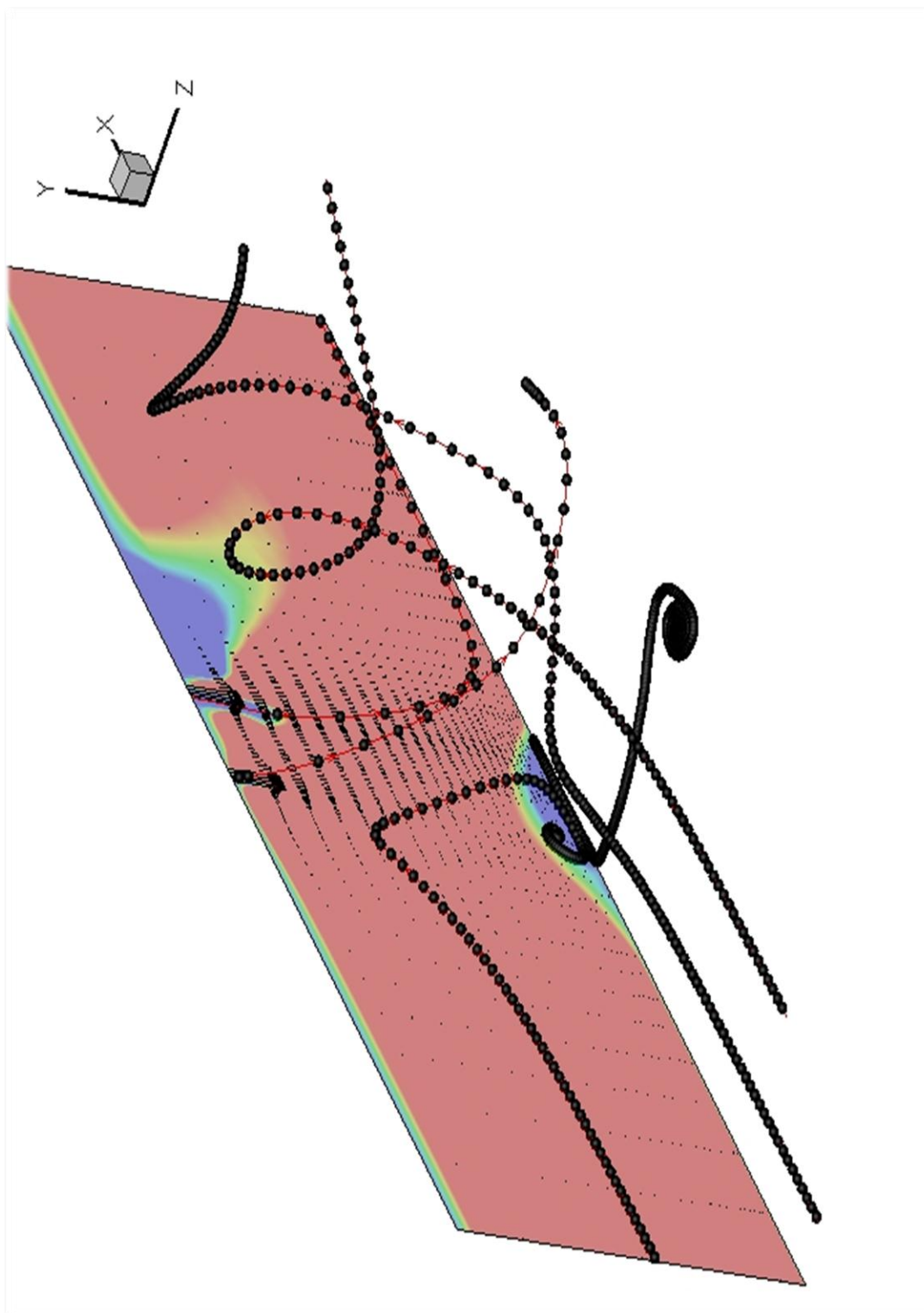


Figura 34. Domínio computacional para razão de velocidade de 43.8 onde é visível campo de velocidade U_{mean}/V_j com marcadores de escoamento.

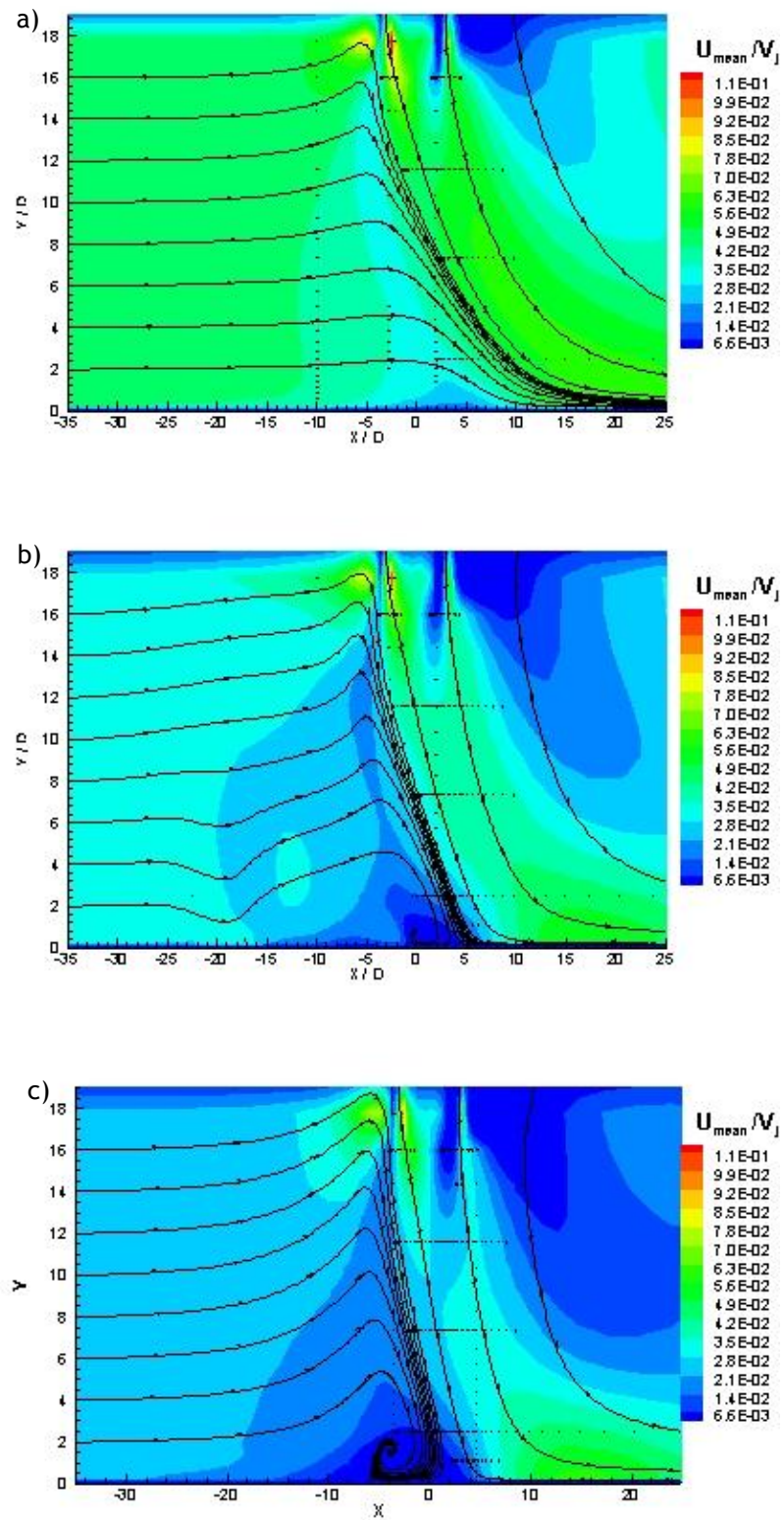


Figura 35. Perfil de velocidade para razão de velocidade: a) 22.5, b) 33.7, c) 43.8

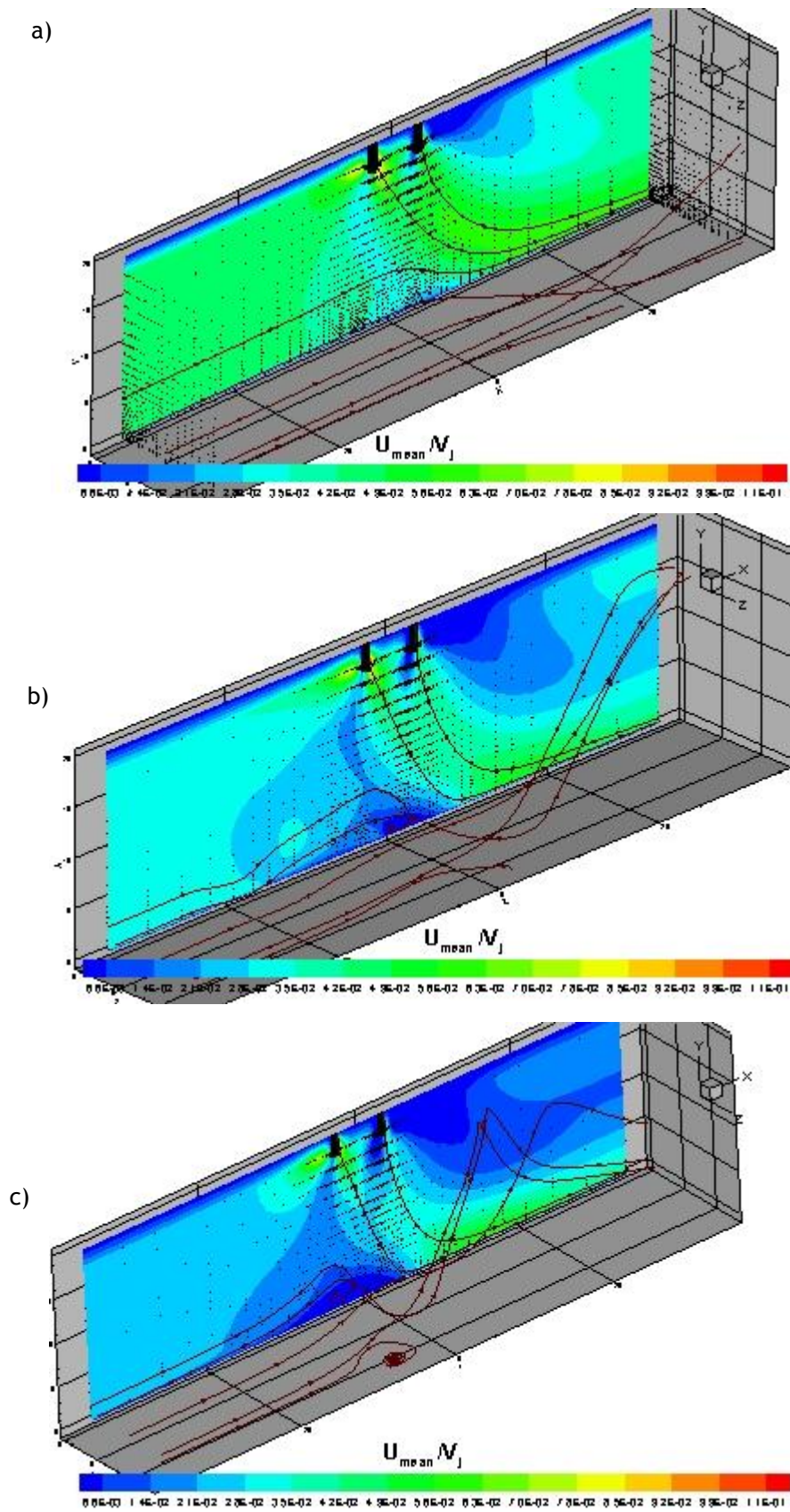


Figura 36. Comparação tridimensional para razões de velocidade: a) 22.5, c) 33.7 e d) 43.8

4. Conclusões

Na análise numérica da simulação bidimensional de camadas de corte para escoamento com duas configurações possíveis, confinado e não confinado com razões de diâmetros inferiores a 2 os resultados deste estudo permitem dar mais alguma informação sobre a mistura turbulenta de jactos coaxiais confinados e não confinados, actor importante para alguns dispositivos, em especial para motores *turbofan* com baixas razões de *bypass*. Para a simulação bidimensional foi utilizado um modelo matemático baseado na solução da equação de conservação de massa e de quantidade de movimento e tendo sido adoptado o modelo de turbulência $k - \epsilon$, na qual o método computacional foi testado utilizando como condições iniciais dados experimentais e revelando boas capacidades de simulação para este tipo de escoamento. Sendo que para o escoamento confinado a simulação revelou fluxo de jacto com tendência a deslocar-se no sentido ascendente em direcção á parede da fronteira sólida enquanto para o caso da simulação não confinado a simulação revelou que a fronteira livre actua na velocidade provocando a deflexão do jacto exterior. Portanto, pode-se concluir que no caso do escoamento confinado, o confinamento provoca com que o jacto exterior deflecta menos mas apresenta maiores níveis de energia cinética turbulenta, contudo para o caso não confinados as conclusões são inversas visto o jacto exterior flectir com direcção ascensional possuindo menor turbulência ao longo do domínio, visível através da energia cinética turbulenta. Não sendo encontrado qualquer tipo de recirculação para ambas as configurações. Foram apresentados diversas figuras onde foi feita análise comparativa entre dados numéricos e dados experimentais revelando concordância entre ambos validando-se desta forma o modelo computacional que apresenta boas capacidades de simulação deste tipo de escoamento.

Da simulação tridimensional de jactos incidentes alinhados com escoamento cruzado para 3 razões de velocidade a uma altura da parede de impacto de $H/D = 20.1$, podemos concluir da simulação computacional utilizando código PACE que o escoamento cruzado inicialmente horizontal apresenta sentido ascendente na direcção da parede superior a montante dos jactos incidentes, sendo que quanto maior é o ângulo de inclinação do escoamento cruzado maior é a penetração dos jactos sendo, por conseguinte, maior a amplitude do *ground vortex*, isto é, a partir de um ângulo de inclinação a presença de *ground vortex* é evidente e visível, sendo que para a primeira razão de velocidade não é visível *ground vortex*, contudo é visível um sentido ascensional do escoamento cruzado. Contudo para a segunda razão de velocidade é visível a presença de um *ground vortex* na sua fase inicial sendo visível uma maior inclinação do escoamento cruzado. Para a maior razão de velocidade, onde o escoamento cruzado possuiu menor velocidade é visível a penetração do jacto montante com embate na superfície de impacto com consequente formação de jactos de parede que ao “embater” com escoamento cruzado enrola sobre si formando um *ground vortex*. A deflexão dos jactos incidentes devido ao escoamento cruzado é muito superior comparativamente com os escoamentos para primeira e segunda razão e velocidade. Fora encontrado nos gráficos numéricos uma estrutura aerodinâmica não referenciada na bibliografia consistindo numa

recirculação tridimensional na parede de impacto próximo da parede lateral do domínio computacional, contudo apenas visível para a maior razão de velocidade. Comparativamente com os dados experimentais, os perfis numéricos apenas apresentam para a segunda e terceira razão de velocidade *ground vortex*, contudo de intensidade inferior em relação aos dados experimentais, sendo que a partir dos perfis de velocidade horizontais, verticais e campos de velocidade podemos concluir que o programa utilizado subdimensiona o escoamento.

Seria interessante num trabalho posterior o estudo do mesmo escoamento de múltiplos jactos incidentes na presença de escoamento cruzado de baixa velocidade mas para alturas de impacto inferiores, assim como um estudo para averiguação das recirculações encontradas na superfície de impacto próximo da parede lateral.

5. Bibliografia

- ¹M. R. Ahmed, M. R. & S. D. Sharma, “*Effect of velocity ratio on the turbulent mixing of confined, co-axial jets*”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 22 (2000) pp. 19-33.
- ²E. Razinsky e J. A. Brighton, “*Confined jet mixing for non-separating conditions*”, *ASME J. Basic Eng.* 93 3, (1971), pp. 333-347.
- ³Y. V. G. Acharya, “*Momentum Transfer and Heat Diffusion in the Mixing of Coaxial Turbulent Jets Surrounded by a Pipe*”, *Vliegtuig bouwku-ndig Ingenieur Geboren Te Mysore, Uitgeverij Excelsior, India, 1954.*
- ⁴S. Mikhail, “*Mixing of co-axial streams inside a closed conduit*”, *J. Mech. Eng. Sci.*, 2 1 (1960), pp. 59-68.
- ⁵K. Albayrak, O. C. Eralp, B. Celen, “*An investigation on the mixing region of coaxial jets. Modelling*”, *Simulation Control, Part B* 33 2 (1990), pp. 49-64.
- ⁶M. M. Gibson, “*Hydrodynamics of confined co-axial jets*”. *Encyclopaedia Fluid Mech.*, 2 (1986), pp. 367-390.
- ⁷M. R. Ahmed, “*Experimental investigation on turbulent mixing in co-axial, confined jets with low annular to core area ratio*”, Ph.D. Thesis, Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Technology, Bombay, 1997.
- ⁸T. S. Zawacki, H. Weinstein, “*Experimental investigation of turbulence in the mixing region between co-axial streams*”, *NASA CR-959* (1968).
- ⁹T. Rozenman, H. Weinstein, “*Recirculation patterns in the initial region of co-axial jets*”, *NASA CR-1595* (1970).
- ¹⁰R. Curtet, F.P. Ricou, “*On the tendency of self-preservation in jets*”, *ASME J. Basic Eng.*, 86 4 (1964), pp. 765-776. 99.
- ¹¹L. E. Fink, “*Influence of external turbulence on mixing of axisymmetric co-axial jets*”, *Proceedings of the First Symposium on Turbulent Shear Flows*, 2.11-2.21 (1977)
- ¹²S. N. Singh, D. P. Agarwal, R. C. Malhotra, “*Mean velocity distribution of contra swirling co-axial confined jets*”, *Exp. Fluids* 7 2 (1989), pp. 501-504.
- ¹³F. M. S. P. Neves, “*Numerical Study of the Mixing of Co-Axial Jets*”, *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, Vol. 5 n. 5, pp. 876-883, 2011 & F. M. S. P. Neves, “*Aerodynamic Control of the Mixing of Confined, Plane and Coaxial Jets*”, tese de doutoramento, 2012, Universidade da Beira Interior.
- ¹⁴J. M. M. Barata, “*Fountain Flows Produced by Multijet Impingement on a Ground Plane*”, *Journal of Aircraft* vol.30 no.1, Jan-Feb, 1993
- ¹⁵J. M. M. Barata, D. F. G. Durão, M. V. Heitor, J. J. McGuirk, “*On the analysis of an impinging jet on ground effects*” *Experimental in Fluids*, 1992
- ¹⁶M. A. Leschziner, N. Z. Ince, “*Computational Modelling of Three-Dimensional Impinging Jets with and Without Cross-flow using Second-moment Closure*”, *Computer & Fluids*, 1995

- ¹⁷H. Souris, H. Liakos, M. Fopunti, J. Palyos, N. Markatos, “*3D-Study of impinging turbulent jet flows using the isotropic low-Reynolds number and the algebraic stress methods*”, Computational Mechanics, 2002
- ¹⁸E. Baydar, Y. Ozmen, “*An Experimental and Numerical Investigation on a Confined Impinging Air Jet at High Reynolds Number*”, Applied Thermal Engineering, 2004
- ¹⁹Yue-Tzu Yang, Young-Xun Wang, “*Three-Dimensional Numerical Simulation of an Inclined Jet with Cross-Flow*” Heat and Mass Transfer, 2005
- ²⁰N. A. Worth, Z. Yang, “*Simulation of an Impinging Jet in a Crossflow using a Reynolds*”, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2006
- ²¹A. Abdel-Fattah, “*Numerical and experimental study of turbulent impinging twin-jet flow*”, Experimental Thermal and Fluid Science, 2006
- ²⁵F. Jing-Yu, Z. Yan, W. Dao-Zeng, “*Large-Eddy Simulation of Three-Dimensional Vortical Structures for an Impinging Transverse Jet in the Near Region*”, Journal of Hydrodynamics, 2008
- ²³M. F. Koseoglu, S. Baskaya, “*Experimental and Numerical investigation of natural convection effects on confined impinging jet heat transfer*”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008
- ²⁴A. Radhouane, H. Bournot, N. Mahjoub Said, H. Mhiri, G. Le Paçec, “*Numerical and Experimental Study of a Double Jet Inclination Variation on its Dynamics Evolution within a Crossflow*”, Heat and Mass Transfer, 2009
- ²⁵Ming, C. Wu, P- Chen, “*Numerical Investigation of Confined Multiple-Jet Impingement cooling over a Flat Plate at Different Crossflow Orientations*”, Numerical Heat Transfer, 2009
- ²⁶D. F. C. Vieira, “*Turbulent Structure of the Impact of a ground vortex Flow*”, Tese de dissertação para obtenção de grau de Mestre, Covilhã, 2012

6. Anexo

6.1. Artigos

NUMERICAL STUDY AERODYNAMICALLY ENHANCED MIXING

Pedro S. D. Carvalho¹, Fernando M. S. P. Neves², André R. R. Silva³ and Jorge M. M. Barata ⁴
Dept. of Aerospace Science, University of Beira Interior, Portugal

This paper subject focus the turbulent mixing of coaxial confined jets which is demonstrate by several studies that there are several parameters (geometrical and operating) that influence the process of turbulent mixing, reason why we have simulated computationally a 2-D shear layer study which by comparison with experimental values will guarantee the reliability of the experimental results. The computational method was tested using the available experimental data, and revealed good capabilities for the simulation of this kind of flows.

Nomenclature

ρ	= density
U	= horizontal velocity component
U_{mean}	= mass averaged velocity
V	= vertical velocity component
X	= axial (streamwise) coordinate
Y	= vertical coordinate
ν	= dynamic viscosity
μ_T	= turbulent viscosity
k	= turbulent kinetic energy
C_{μ}, C_1, C_2	= turbulent model constant
ε	= energy dissipation rate
λ	= velocity ratios

I. Introduction

The turbulent mixing of coaxial confined jets is a complex dynamic process that is applied in a large number of devices such as the engineering ejectors, pumps jet, industrial burners, combustion chambers of jet engines, nuclear rockets gas, mixing chambers of turbfans or afterburners. Previous work indicate that there are various parameters (geometrical and operating) that influence the process of turbulent mixing such as velocity, temperature or density ratios, compressibility effects, levels of turbulence of jets, pressure gradient and shape of the duct. Ahmed and Sharma¹ presented a detailed review of the work done in the field, and have also presented measurements obtained with LDV, and static and total pressures for seven velocity ratios. They concluded that the process of turbulent mixing is strongly dependent on the velocity ratio between the two jets, and found that the total pressure decay is greater when the velocity ratio increases, but is minimal when the velocities of the outer and inner jets are equal. Acharya³ conducted a detailed and quantitative research to study the influence of the velocity and temperature ratios on the mixing with confinement, and concluded that the shear friction between the two turbulent currents is greater in confined jets than in unconfined jets. The experiments conducted by Zawacki and Weinstein⁷ and Rozenman and Weinstein⁸ on a wide range of velocity ratios showed the presence of a vortex near the exit of jets of high velocity ratios, which was attributed to a more effectiveness of the process of turbulent mixing in the shear layer region. The experimental results for velocity ratios, λ , less than 1 also showed that the uniformity of the velocity profile is achieved much more quickly than for the case of higher velocities¹⁻³. A wide range of velocity ratios was studied by those researchers revealing that the velocity ratio is a major factor in the turbulent mixing process. The rate of transfer of momentum between the jets increases when the velocity ratio increases, promoting a faster turbulent mixing, which could be decisive in many practical cases, such as systems for combustion and exhaust

¹ MEng Student, Aerospace Sciences Department, p912629874@hotmail.com.

² PhD Student, Aerospace Sciences Department, fernandomneves@gmail.com.

³ Assistant Professor, Aerospace Sciences Department, andre@ubi.pt.

⁴ Full Professor, Aerospace Sciences Department, jbarata@ubi.pt.

nozzles of the gas turbines. Other studies report the effect of the level of turbulence of the jets^{9,10}, and showed that a higher level of turbulence favors a faster mixture, but did not reveal the presence of any recirculation zone, probably because of the range of velocity ratios used. A similar observation was made about the effect of swirl in the process of turbulent mixing^{11,12}. A wide range of relations between the diameters of jets ($2 < d_{ext}/d_{int} < 38$) with relevance to many applications was also studied¹³. When the ratio of the diameters is high, the transfer of the amount of momentum between the jets increases with $\lambda > 1$ and the uniformity of the axial velocity profile is achieved more rapidly. On the other hand, when the ratio of inner and outer diameters is small, the transfer of momentum between the jets increases when the velocity ratio, λ , is less than 1. Razinsky and Brighton² studied the effect of the ratio of the diameters of the jets (from 3 to 6), and found higher levels of turbulence for the largest ratios. They also concluded that the length required to complete mixing is not affected by the diameter ratio in the range studied. The investigations of the effect of the diameter ratio in the case of the practical application to ejectors showed that the extension of the secondary flow increases linearly with respect to the diameter¹². Neves et al.¹³ study numerically the effect of the turbulence intensity in the turbulent mixing of coaxial jets and the results revealed that for relatively high turbulence intensities of the outer jet a vortex is always present for velocity ratios of 6 or larger, and this is independent of the turbulence intensity ratio. When the turbulence intensity of the inner jet is kept constant and the ratio of turbulence intensities is increased, the recirculation zone decreases in size, its center moves further upstream until it disappears completely. The existence of a favorable pressure gradient as a similar effect, revealing that this is an additional parameter to be taken into consideration together with the velocity ratio and turbulence intensity ratio as far as the recirculation zone is concerned. In the pursuit to a more efficiency mixing of coaxial jets several studies had been done in particular the topic of mixing of turbulent jets, being examples of its real life application the turbofan engines with low bypass ratio. In the sequence of this subject this paper presents a computational study of 2-D shear layers confined and unconfined (see Fig. 1.) with diameter ratios less than 2 were the predictions will be compared with the experimental data.

Next section describes the computational method used and the boundary conditions. The results are presented and discussed in section III, and last section describes the main findings and conclusions of this work.

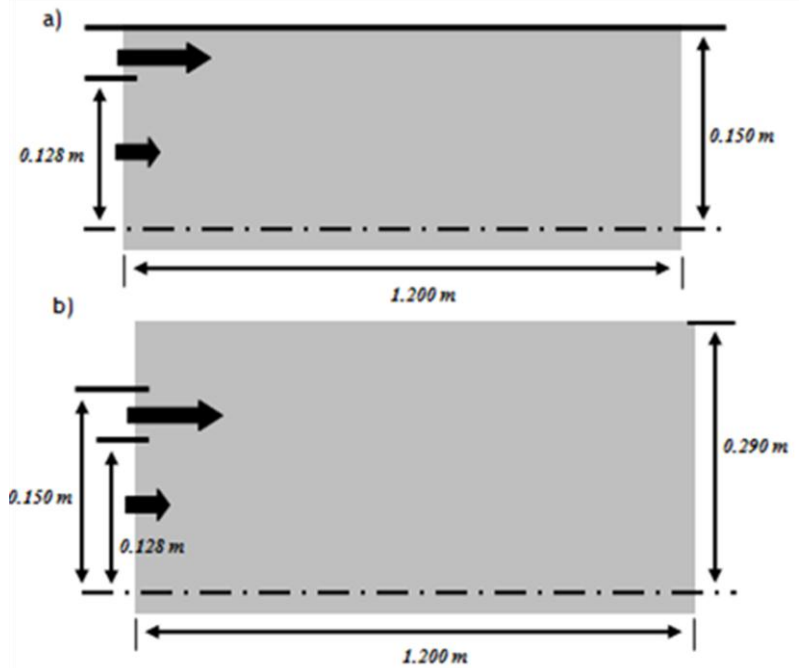


Figure 1. Flow configuration a) confined b) unconfined

II. Computational Method

A. Mathematical Model

The mathematical model is based in equations of continuity and momentum. The turbulent model used is $k - \varepsilon$ model where the governing equations are constitute by a set of coupled of partial differential equations, which can be written in a general form as:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + S_{\phi} \quad (1)$$

where ϕ may represent any of the velocities, turbulent kinetic energy, dissipation, or any scalar property, and S_{ϕ} and Γ_{ϕ} assume different values for each particular ϕ as shown in Table 1.

l	Γ_ϕ	S_ϕ
1	0	0
U	μ_T	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_T \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_T \frac{\partial V}{\partial r} \right)$
V	μ_T	$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_T \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_T \frac{\partial V}{\partial r} \right) - 2 \mu_T \frac{V}{r^2}$
k	μ_T / σ_k	$\Phi - \rho \varepsilon$
ε	$\mu_T / \sigma_\varepsilon$	$C_{\varepsilon 1} \Phi \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$

Table 1. Differential equations

The terms of turbulent diffusion are approximated with the two equations $k - \varepsilon$ turbulence model. The Reynolds stresses are related to the rate of shear strain by the following equation:

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = -\mu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad (2)$$

where μ_T is the turbulent viscosity, which is derived from the turbulence model and expressed by:

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

where

$$\Phi = \mu_T \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{V}{r} \right)^2 \right] + \left[\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial x} \right]^2 \right\} \quad (4)$$

The turbulent model constants that are used have given good results for large number of flows, and are summarized in the next table.

C_μ	C_1	C_2	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

Table 2. Constants of the turbulent model

B. Numerical Model and Boundary Conditions

For the computational study of 2-D shear layers (un)confined, with diameter ratios less than 2, is used the TEACH code in which the turbulent model adopted is $k - \varepsilon$ turbulent model in order to perform an 2D analyses of the velocity profiles and turbulent kinetic energy of two interacting jets in a confined and an unconfined flow configurations. The two flows configurations that is study use are: a flow configurations were the test section is confined (see Fig. 1.a) and an unconfined test section (Fig. 1. b). The computational domain, for both configurations, presents the same horizontal length of 1.200 m. For the confined flow configuration the solution domain present a

height of 0.150 m , therefore we have a solution domain of $1.200 \times 0.150\text{ m}$. This computational domain comprehends two jets, an outer and an inner jet, the inner jet presents a height of 0.128 m , for the outer jet the height is 0.032 m .

For the unconfined flow configuration the total height of the simulation domain is 0.290 m remaining the same positions of the inner and outer jet. The solution domain for both flow configurations are limited by four boundaries where dependent variables are specified: the inlet at west, the outlet at east, an axis of symmetry and a solid wall or a free boundary at north depends of the flow configuration. In the symmetry axis the vertical velocity is null as also the normal derived from others variables, while at the outlet is considered a self similar flow. At west the inlet region where the velocity profile was generated through the experimental set of values and at north the boundary depends of the flow configuration. For the confined flow configuration the north boundary is represented by a solid surface, where typical wall function method is used, while for the unconfined flow configuration is considered a free boundary. Figure 2 presents the experimental velocity profiles that were used at the inlet solution domain for both confined and unconfined cases. The horizontal velocity, U , and vertical velocity, V , was dimensionless by the mass averaged velocity, U_{mean} between the inner and outer jets at the inlet ($X=0$). For the both configurations the mass averaged velocity is U_{mean} equal to 6.774 m/s .

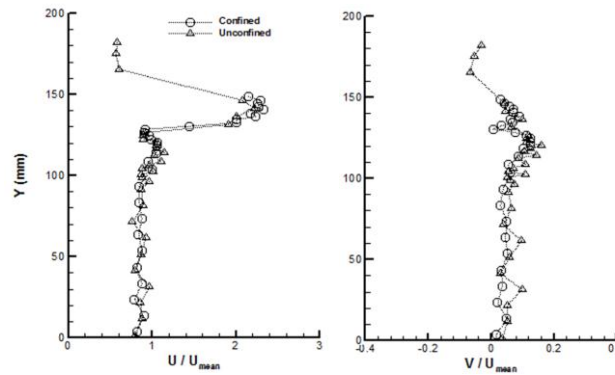


Figure 2. Initial conditions: a) horizontal and b) vertical velocity component.

A sensitive study of the free boundary was also performed for the unconfined flow configuration in order to set the height of the computational domain most convenient to this present study.

In order to guarantee the validation of the grid used an independency grid test was perform for three grids case for both configurations cases. For the confined case the following grids were tested: 16×16 , 23×23 and 33×33 .

Figure 3 represents the vertical profile of dimensionless horizontal velocity for the test section longitudinal length of $X = 100\text{ mm}$ and $X = 735\text{ mm}$.

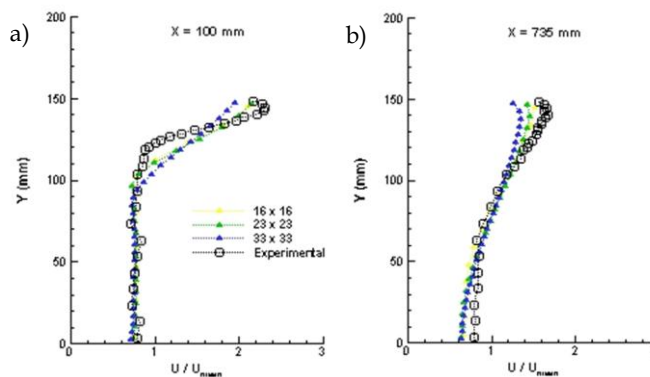


Figure 3. Independency grid for confined case. a) $X = 100\text{ mm}$ b) $X = 735\text{ mm}$

Figure 4 represents the vertical profile of dimensionless horizontal velocity for the test section longitudinal length of $X = 100\text{ mm}$ and $X = 735\text{ mm}$ for the unconfined case were following grids were tested: 16×21 , 23×29 and 33×41 .

For the both configurations, confined and unconfined, the different grids were compared with experimental results and the last Figures shows that the results are already independent of numerical influences for 16×16 and 16×21 for confined and unconfined cases, respectively. Nevertheless, to increase the precision on the evaluation of

mixing of 2-D shear layers confined and unconfined, with diameter ratios less than 2, a finer grid of 23×23 for confined case and 23×29 for unconfined case was adopted.

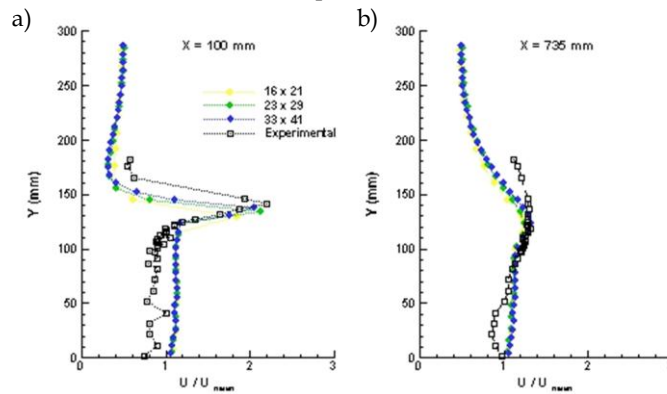


Figure 4. Independence grid for unconfined case. a) X=100mm b) X=735 mm

III. Results

In this section is presented and discussed the results from the computational study of 2-D shear layers confined and unconfined with diameter ratios less than 2 which will be compared with the experimental data done in order to guarantee the experimental data validation. This subject presents a greatly importance since the turbulent mixing of coaxial confined jets is an important factor in turbofan engines with low bypass ratio.

The Figures 5, 6, 7 and 8 presents the vertical profiles of horizontal and vertical velocities for a confined and unconfined configuration where the horizontal axis represents the velocity component dimensionless by mass averaged velocity and the vertical axis represents the vertical distance of the duct/test domain. The experimental data (black dashed line) are presented with the numerical data (green dashed line) for several sections in the longitudinal length (in mm) of the duct, namely 50, 100, 200, 395, 735, 985 mm.

The Figures 5 and 6 shows the vertical profile for horizontal velocity for the confined and unconfined configuration, respectively.

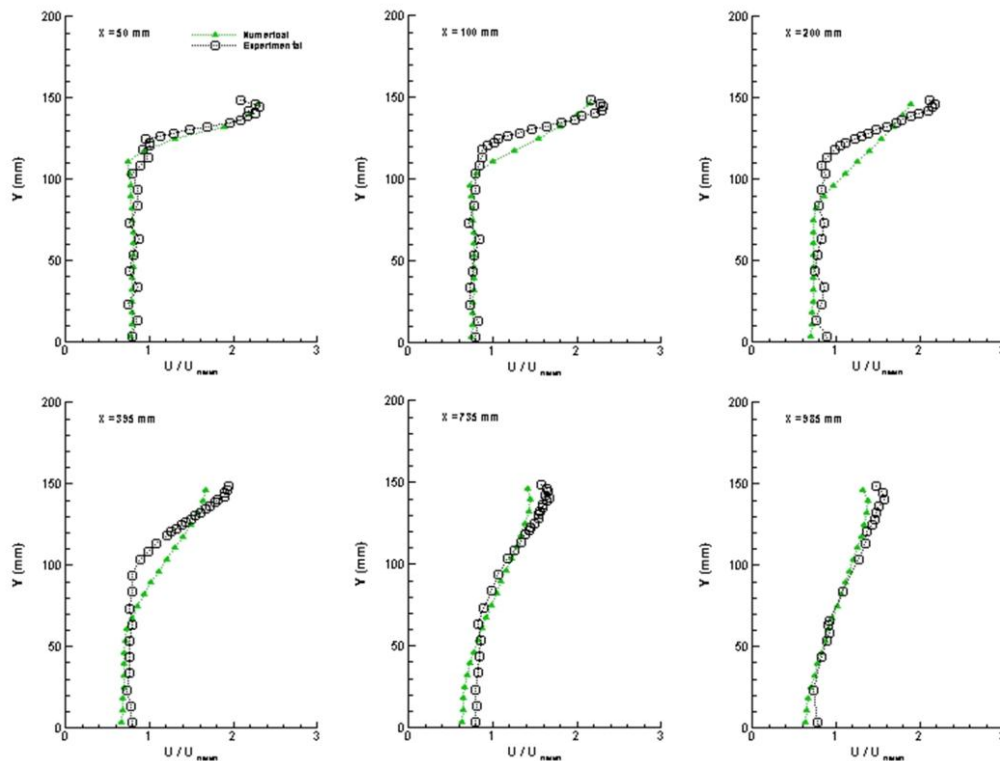


Figure 4. Vertical profile of horizontal velocity for confined configuration.

In the Figure 5 for $X = 50 \text{ mm}$ downstream of the inlet the numerical and experimental values are very similar until $Y = 110 \text{ mm}$, where a peak discrepancy zone appears. The initial value for numerical and experimental is $\frac{U}{U_{mean}} = 0.8$ and until $Y = 110 \text{ mm}$ the two sets of values are described as almost vertical. For higher values of Y , an inflection point is present and the pattern change abruptly. Further downstream of the computation domain, at $X = 100 \text{ mm}$, the velocity profile remain similar as previously for $Y < 100 \text{ mm}$. Although at higher values of Y the discrepancy describe behind are more pronounce, where the numerical values present a linear shape with constant slope and the experimental values present fluctuations nevertheless they follow the numerical set of data pattern being the velocity peak of $\frac{U}{U_{mean}} = 1.2$. For $X = 200 \text{ mm}$ the overall pattern remain similar with retreat in X initial values ($Y = 0 \text{ mm}$) where the numerical and experimental initial values, for $Y = 0 \text{ mm}$, indent to 0.7 and 0.9 respectively. For the case of $X = 395 \text{ mm}$ the inflection point is progressively moving further down in Y axis and the transition zone are increasable becoming smoother. The inflection point is now at $Y = 70 \text{ mm}$. The experimental values follow the pattern of the numerical ones though with a wave like pattern. As concern the initial values they continue to retreat in the X axis. For test section length of $X = 735 \text{ mm}$ the numerical line is smother presenting a much more soft inclination with a descent of the inflection point, situate now at $Y = 50 \text{ mm}$. The numerical initial value is now 0.65. Another interesting feature is that the velocity profile at the north boundary is constantly decreasing the velocity as moving further downstream of the test section. The experimental values follow the pattern line of the numerical ones and are increasable more similar with lower discrepancy between them. At $X = 735 \text{ mm}$ of the test section the northern point of the velocity profile present no longer the fastest velocity.

Finally at the last position of the test section, $X = 985 \text{ mm}$, the numerical line pattern is smoother, the initial value retreat more, now at 0.6, the point near the wall (north boundary) is showing lower velocity and the experimental set of values is more uniform and similar with the numerical data.

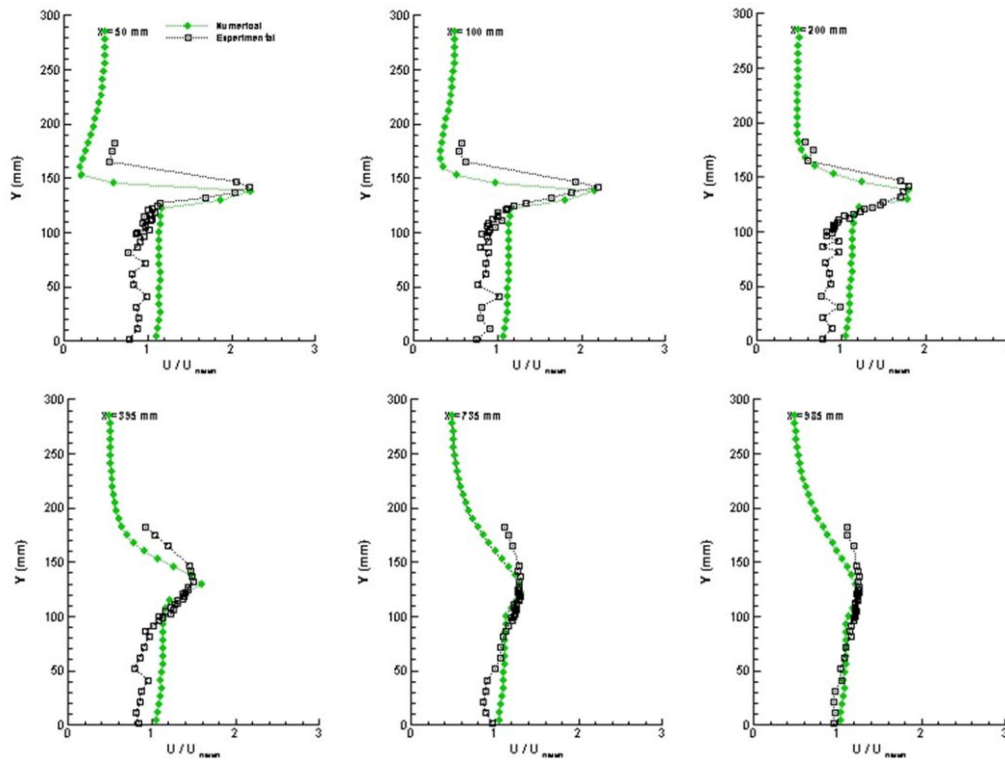


Figure 6. Vertical profile of horizontal velocity for unconfined configuration.

Figure 6 shows the vertical profiles of horizontal velocity for the unconfined flow configuration. For the first case, $X = 50 \text{ mm}$, the numerical set of values present a straight line, vertical in the position $\frac{U}{U_{mean}} = 1.1$ and continue until reach $Y = 123 \text{ mm}$. From this position until $Y = 139 \text{ mm}$ the numerical line presents exponential increases in velocity. For the interval $[139 \text{ mm}; 162 \text{ mm}]$ the numerical data retreats and decreases, also abruptly, the velocity. Above 162 mm in the Y axis, the numerical line starts to increase lightly the horizontal velocity with smooth curvature. The experimental values present some discrepancies, until position $Y = 83 \text{ mm}$ the pattern mean line move away from the

numerical vertical line, although for higher values, $Y > 83 \text{ mm}$, the experimental set of values converges to the numerical ones.

Downstream from $X = 100 \text{ mm}$ of the test section until $X = 985 \text{ mm}$, the computational velocity profile move in the direction of a uniformity in velocity profile, this means that in the section $X = 985 \text{ mm}$ the profile presents less emphasize extreme, peak values of velocity, following an almost constant path and increase lightly the velocity in the interval $[0 \text{ mm}; 137 \text{ mm}]$ of the Y axis and decreases until $Y = 300 \text{ mm}$. The initial values of experimental data, for $Y = 0 \text{ mm}$ is $\frac{U}{U_{mean}} = 1.1$ and as moves downstream of the test section the initial values decreases to $\frac{U}{U_{mean}} = 1.0$ as we reach $X = 985 \text{ mm}$. As far as concern the peak values of velocity and inflection points, namely 1.15, 2.2, 0.2 in the X axis, they become less pronounced. In the last section $X = 985 \text{ mmm}$, only two inflection points exist: one at 80mm and the other 123 mm in the Y axis. As concert to peak points the highest and lowest velocities are: 1.19 and 0.49, respectively.

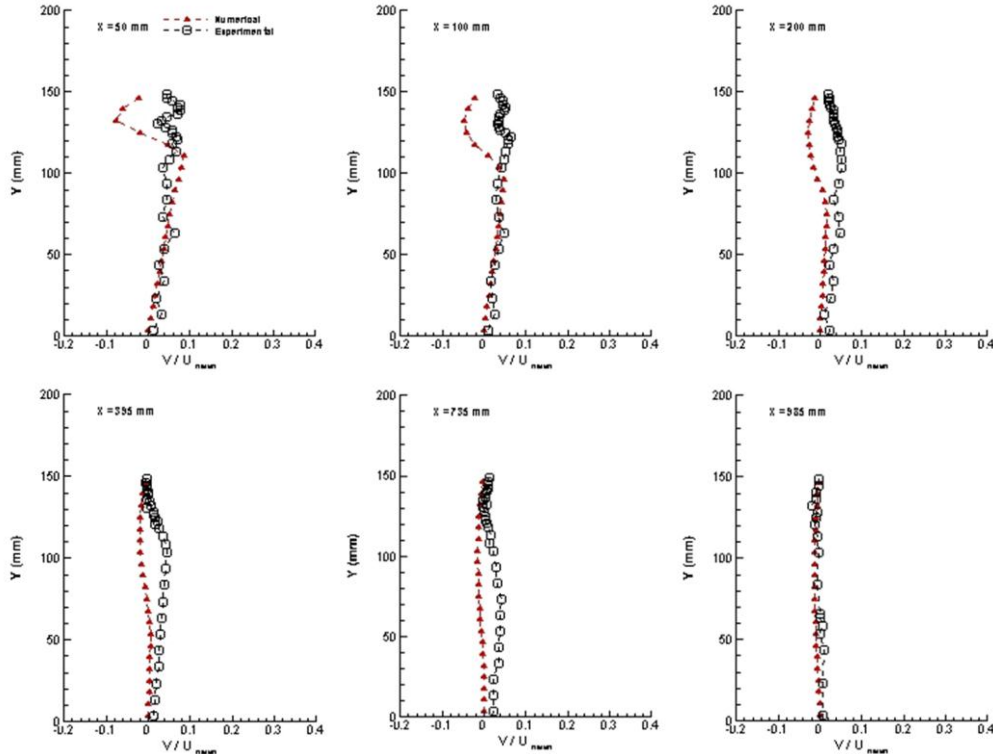


Figure 7. Vertical profile of vertical velocity for confined configuration.

Figure 7 shows the vertical profiles of vertical velocity component for confined configuration. At 50 mm downstream at the inlet present a oblique's line correspondent to the numerical set of values starting with null vertical velocity component until position $Y = 111 \text{ mm}$ where exist an inflection point. In the following interval $[111; 132]$ of the Y axis the has a behavior correspondent to a decrease of velocity until the next inflection point, $Y = 132 \text{ mm}$. Further up the velocity returns to increase. In this test section the numerical data seems to follow the same pattern as the experimental with a difference in the upper part of the test section, there, on the contrary of the numerical data, is visible a decrease in velocity. As we move downstream of the test section the numerical and experimental vertical velocity profiles are becoming more uniform which correspond to a disappearing of the inflections points. The velocities profiles are almost identical at this point, reaching almost the configurations of a vertical line for a null value of velocity ratio.

Figure 8 represents the vertical velocity profile for unconfined flow configuration. In the inlet of the test section the numerical velocity profile for $Y = 0 \text{ mm}$ present a zero vertical velocity, increasing slightly until $Y = 131 \text{ mm}$ which correspond to a velocity ratio of 0.04. Then with an increase reaches the maximum peak in velocity ratio of 0.07. From $Y = 145 \text{ mm}$ the ratio of velocity start to decrease, firstly abruptly and them with a more constant smooth curve until reaches a constant value, $\frac{U}{U_{mean}} = -0.1$. The experimental curve follows the overhaul pattern with some differences. As we move further downstream of the test section the vertical numerical velocity profile is becoming more uniform until reaches $X = 985 \text{ mm}$ where presents almost a vertical line. The point near the axis of symmetry ($Y = 0 \text{ mm}$) presents null vertical velocity in contrast with the top point near the north boundary which present a

value of 0.02. The inflections points and peak points at middle height disappear. As concern of the experimental values, they follow the same pattern as the numerical set of values.

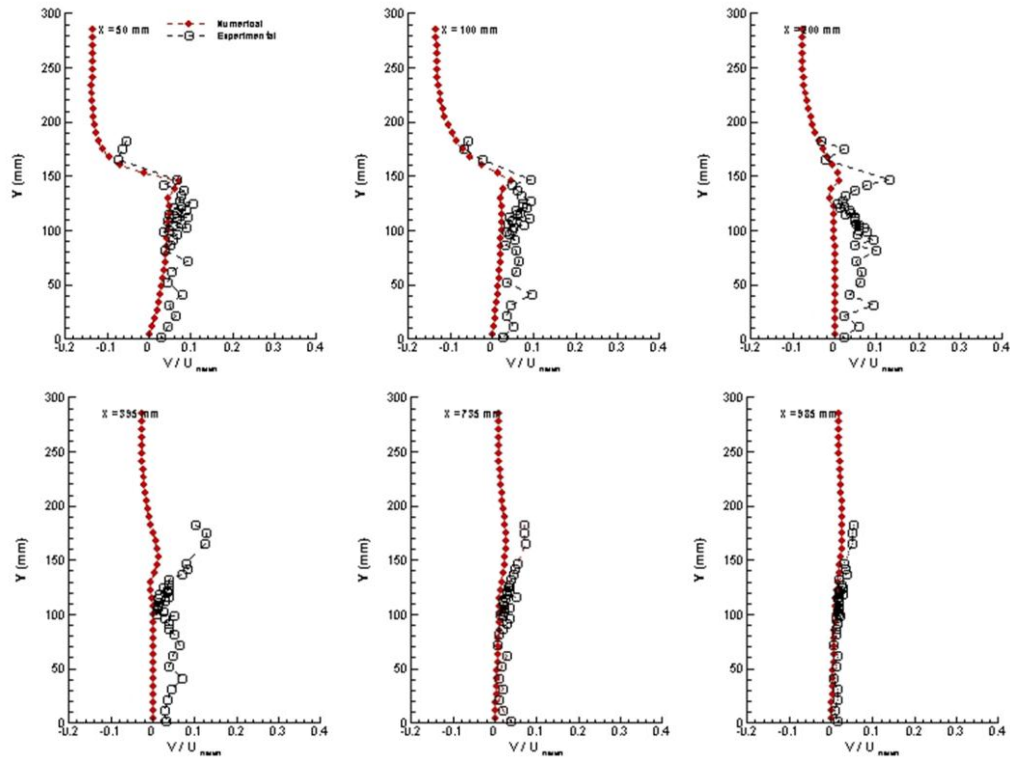


Figure 8. Vertical profile of vertical velocity for unconfined configuration.

Figure 9 shows the turbulent kinetic energy flow field for two flow configuration, confined and unconfined. The graphics present in the X axis the length of the test section and in the Y axis is height. The confined case the flow is confined by a solid wall at $Y = 150 \text{ mm}$. In the confined case the zone which presents high values of turbulence kinetic energy is located near at the inlet between the inner and outer jet. Further downstream the flow is uniform, as concerns the turbulent kinetic energy levels. For the unconfined configuration is present also a stronger level of kinetic energy near in the same region of the confined configuration but with lower levels of kinetic intensities. Despite the fact the area of influence is much greater reaching almost 0.9m of length.

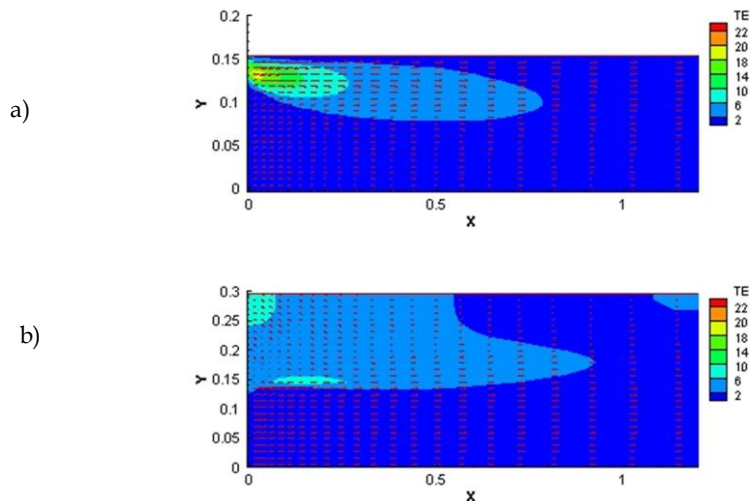


Figure 5. Turbulent kinetic energy levels a) confined b) unconfined. flow configurations

IV. Conclusions

In conclusion the present paper presented the analyses of the numerical simulation of 2-D shear layer for confined and unconfined flow configuration with diameter ratio less than 2. This subject contribute to the global knowledge of turbulent mixing of coaxial confined jets which is an important factor in some devices like turbofan engines with low bypass ratio.

The computational method was tested using the available experimental data, and revealed good capabilities for the simulation of this kind of flows. The confined test cases reveal a jet flow attraction tendency to a nearby wall surface, while for the unconfined test cases the wall confinement removal acted on the velocities and provoked an outer jet deflection. It looks like in the confined test cases the confinement of the outer flow retards the deflection due to the wall presence. For the both configurations no recirculation was found.

V. References

- ¹M. R. Ahmed, M.R. & S. D. Sharma, "Effect of velocity ratio on the turbulent mixing of confined, co-axial jets" *Experimental Thermal and Fluid Science*, 22 (2000) pp. 19-33.
- ²E. Razinsky and J.A. Brighton, "Confined jet mixing for non-separating conditions", *ASME J. Basic Eng.* 93 3, (1971), pp. 333-347.
- ³Y.V.G. Acharya, "Momentum Transfer and Heat Diffusion in the Mixing of Coaxial Turbulent Jets Surrounded by a Pipe", *Vliegtuig bouwuku-ndig Ingenieur Geboren Te Mysore*, Uitgeverij Excelsior, India, 1954.
- ⁴S. Mikhail, "Mixing of co-axial streams inside a closed conduit", *J. Mech. Eng. Sci.*, 2 1 (1960), pp. 59-68.
- ⁵K. Albayrak, O.C. Eralp and B. Celen, "An investigation on the mixing region of coaxial jets. Modelling", *Simulation Control*, Part B 33 2 (1990), pp. 49-64.
- ⁶M.M. Gibson, "Hydrodynamics of confined co-axial jets". *Encyclopedia Fluid Mech.*, 2 (1986), pp. 367-390.
- ⁷M.R. Ahmed, "Experimental investigation on turbulent mixing in co-axial, confined jets with low annular to core area ratio", *Ph.D. Thesis*, Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Technology, Bombay, 1997.
- ⁸T.S. Zawacki, H. Weinstein, "Experimental investigation of turbulence in the mixing region between co-axial streams", NASA CR-959 (1968).
- ⁹T. Rozenman, H. Weinstein, "Recirculation patterns in the initial region of co-axial jets", NASA CR-1595 (1970).
- ¹⁰R. Curtet and F.P. Ricou, "On the tendency of self-preservation in jets", *ASME J. Basic Eng.*, 86 4 (1964), pp. 765-776. 99.
- ¹¹L.E. Fink, "Influence of external turbulence on mixing of axisymmetric co-axial jets", in: *Proceedings of the First Symposium on Turbulent Shear Flows*, 2.11-2.21 (1977)
- ¹²S.N. Singh, D.P. Agarwal and R.C. Malhotra, Mean velocity distribution of contraswirling co-axial confined jets. *Exp. Fluids* 7 2 (1989), pp. 501-504.
- ¹³F.M.S.P. Neves, J.M.M. Barata, A.R.R. Silva, "Numerical Study of the Mixing of Co-Axial Jets", *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, Vol. 5 n. 5, pp. 876-883, 2011.

Laser Doppler Measurements of Twin Impinging Jets Aligned With a Crossflow

Jorge M. M. Barata^{1,*}, Pedro S. D. Carvalho¹, Diamantino F. G. Durão²,
Fernando M. S. P. Neves¹, André R. R. Silva¹, Diana F. C. Vieira¹

1: Aerospace Sciences Department, Universidade Beira Interior, Covilhã, 6200-358, Portugal

2: Universidade Lusíada, Lisbon, Portugal

*Corresponding author: jbarata@ubi.pt

Abstract This paper presents a detailed analysis of the complex flow beneath two impinging jets aligned with a low-velocity crossflow which is relevant for the future F-35 VSTOL configuration, and provides a quantitative picture of the main features of interest for impingement type of flows. The experiments were carried out for a Reynolds number based on the jet exit conditions of $Re_j=4.3 \times 10^4$, an impingement height of 20.1 jet diameters and for a velocity ratio between the jet exit and the crossflow $V_R=V_j/U_o$ of 22.5. The rear jet is located at $S=6D$ downstream of the first jet. The results show a large penetration of the first (upstream) jet that is deflected by the crossflow and impinges on the ground, giving rise to a ground vortex due to the collision of the radial wall and the crossflow that wraps around the impinging point like a scarf. The rear jet (located downstream) it is not so affected by the crossflow in terms of deflection, but due to the downstream wall jet that flows radially from the impinging point of the first jet it does not reach the ground. The results indicate a new flow pattern not yet reported so far, that for a VSTOL aircraft operating in ground vicinity with front wind or small forward movement may result in enhanced under pressures in the aft part of the aircraft causing a suction down force and a change of the pitching moment towards the ground.

Nomenclature

D	= diameter of the jet
H	= impinging height
k	= turbulent kinetic energy
Re	= Reynolds number
S	= spacing of the jets axis in the wind direction
U	= horizontal velocity, $\bar{U} + u'$
V	= vertical velocity, $\bar{V} + v'$
W	= transverse $\bar{W} + w'$
X	= horizontal coordinate
Y	= vertical coordinate
Z	= transverse coordinate

Subscripts

j	= jet-exit value
o	= crossflow value

1. Introduction

Turbulent jets impinging on flat surfaces through a low-velocity crossflow are typical in impinging cooling applications in industry¹ as well as of the flow beneath a short/vertical take-off aircraft which is

lifting off or landing with zero or small forward momentum^{2,3}. Ground effect may occur and change the lift forces on the aircraft, cause reingestion of exhaust gases into the engine intake and raise fuselage skin temperatures. In this latter application the impingement of each downward-directed jet on the ground results in the formation of a wall jet which flows radially from the impinging point along the ground surface. The interaction of this wall jet with the free stream results in the formation of a ground vortex far upstream of the impinging jet, which has profound implications on the aircraft design. In addition the collision of the wall jets originates a fountain upwash flow, affecting the forces and moments induced in the aircraft when operating in ground effect. Improved knowledge of impinging flows is therefore necessary to avoid these effects and to be able to model a range of jet-impingement type of applications with practical interest.

Earlier published work has been concentrated on 1, 2, and 3 jets configurations relevant to the Harrier / AV-8B aircraft (e.g. Ref. 2 and 3). In this case when the aircraft is operating with small forward movement the configuration of interest is 2 impinging jets with the direction of the crossflow perpendicular to the line containing their centres, because each impinging jet is located on the sides of the fuselage.

If attention is concentrated on the next generation of VSTOL aircrafts (X-35/F-35/JSF-Joint Strike Fighter) then no relevant studies can be found, because the impinging jets are aligned with the crossflow, and this geometry has not been considered. In this case a vertically oriented lift fan (SDLF) generates a column of cool air that produces nearly 20,000 pounds of lifting power, along with an equivalent amount of thrust from the vectored rear exhaust (3BSM-Three Bearing Swivel Module). The lift system was successfully demonstrated during a flight testing of the X-35B during the summer of 2001. The complexity of the new VSTOL configuration together with the very stringent requirements has required an enormous amount of R&D in the last decade. On 12th May 2012 the 200th test flight of the F-35B (BF-3) measured stresses on the aircraft during supersonic manoeuvres. So, most of the published work reported so far has therefore only peripheral relevance to the F35-B/JSF ground effect problem.

Ref. 4 reports a study of multijet impinging configurations producing upwash fountain flows, which are the heart of the complicated effects by VSTOL aircraft when they operate in ground proximity, but as far as twin jets are concerned only the geometry with the jets side by side was considered. This paper presents a detailed analysis of the complex flow field beneath 2 impinging jets aligned with low-velocity crossflow relevant for the new F-35 VSTOL configuration, and provides a quantitative picture of the main features of interest of impingement type of flows.

The remainder of this paper is presented in four sections. Section II describes the experimental configuration and measurement procedure, gives details of the laser-Doppler velocimeter and provides assessments of accuracy. The arguments associated with these assessments are based on previous experiments and are presented in condensed form. Section III presents the experimental results obtained in the vertical plane of symmetry containing the axis of both jets and quantifies the mean and turbulent velocity characteristics of the flow. The final section summarizes the main findings and conclusions of this work

2. Experimental Method

The wind tunnel facility designed and constructed for the present work is schematically shown in Fig. 1. A fan with 15kW nominal power drives a maximum flow of 3000m³/h through the boundary layer wind tunnel of 300x302mm exit section. Each jet unit of 15mm inner diameter is mounted vertically in the top of the test section with the axis contained in the vertical plane of symmetry parallel to the crossflow.

The origin of the horizontal, X , and vertical, Y , coordinates is taken at the midpoint between the centres of the jets exit. The X coordinate is positive in the direction of the wind tunnel exit and Y is positive upwards.

The present results were obtained at the vertical plane of symmetry for jet mean velocities of $V_j=36\text{m/s}$ and mean crossflow velocity of $U_o=1.6\text{m/s}$, corresponding to a velocity ratio, $V_R=V_j/U_o$ of 22.5. The rear jet is located at $S=6D$ downstream of the first jet (see Fig. 2).

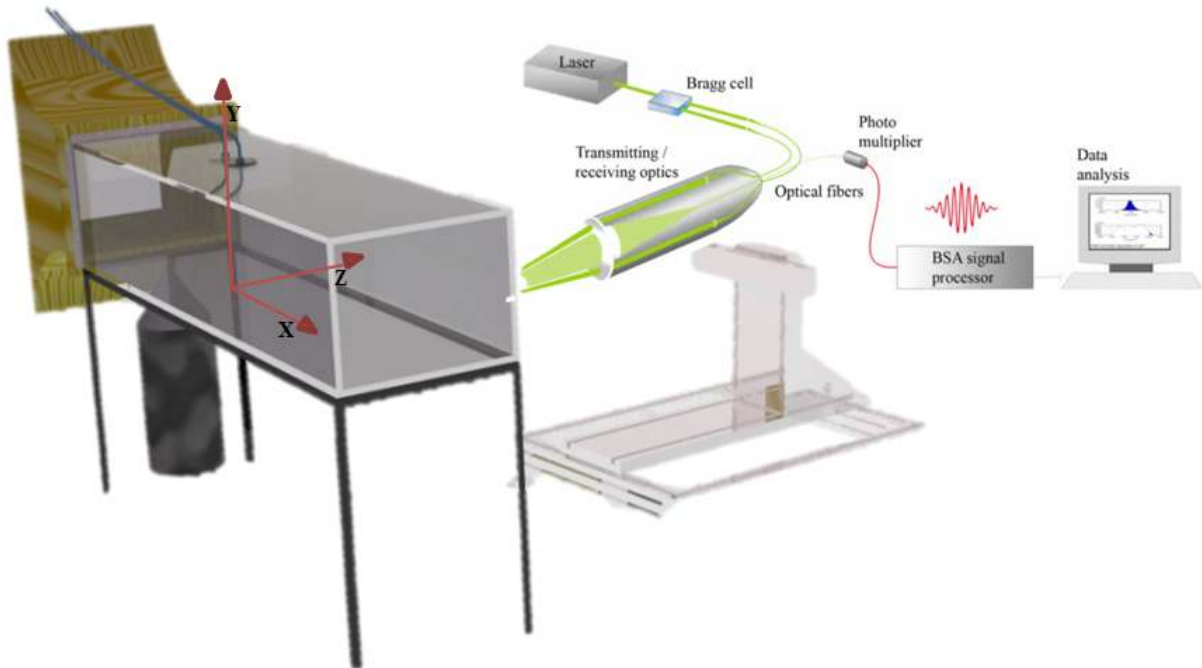


Figure 1. Experimental set-up.

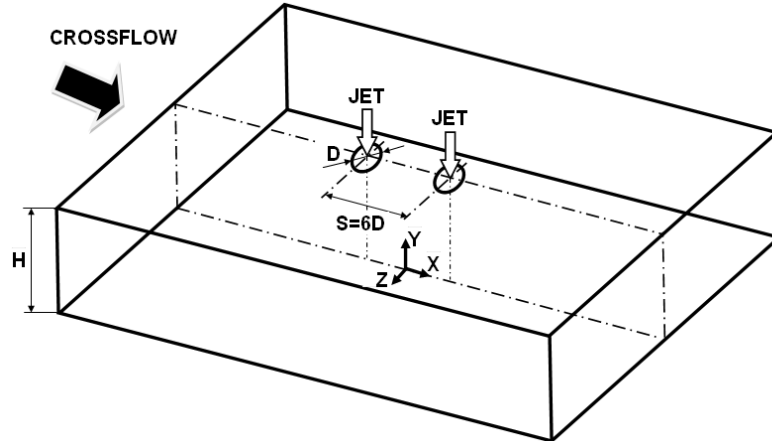


Figure 2. Geometrical arrangement of the jets.

The velocity field was measured with a two-colour (two-component) Laser-Doppler velocimeter (Dantec Flowlite 2D), which comprised a 10mW He-Ne and a 25mW diode-pumped frequency doubled Nd:YAG lasers, sensitivity to the flow direction provided by frequency shifting from a Bragg cell at $f_0=40\text{MHz}$, a transmission and backward-scattered light collection focal lens of 400mm. The half-angle between the beams was 2.8° and the calculated dimensions of the axis of the measuring ellipsoid volume at the e^{-2} intensity locations were $135 \times 6.54 \times 6.53 \mu\text{m}$ and $112 \times 5.46 \times 5.45 \mu\text{m}$ respectively (see Table 1 for details). The horizontal, U , and vertical V , mean and turbulent velocities were determined by a two-velocity channel Dantec BSA F60 processor. The seeding of the flow with glycerine particles of $0.1\text{--}5 \mu\text{m}$ was produced by a smoke generator. The transmitting and collecting optics is mounted on a three-

dimensional transversing unit, allowing the positioning of the centre of the control volume within ± 0.1 mm.

In order to measure the vertical components in near wall regions, the transmitting optics were inclined by half angle of beam intersection and the scattered light was collected off-axis. Measurements could then be obtained up to 0.5mm from the ground plate without a significant deterioration of the Doppler signals. Results obtained 20mm above the ground plate with both the on-axis and the off-axis arrangements have shown a close agreement, within the precision of the equipment.

Errors incurred in the measurement of velocity by displacement and distortion of the measuring volume due to refraction on the duct walls and change in the refractive index were found to be negligibly small and within the accuracy of the measuring equipment. Non-turbulent Doppler broadening errors due to gradients of mean velocity across the measuring volume may affect essentially the variance of the velocity fluctuations⁵, but for the present experimental conditions are of the order of $10^{-4}V_j^2$ and, therefore, sufficiently small for their effect to be neglected. The largest statistical (random) errors derived from populations of, at least, 10000 velocity values were of 0.5 and 3%, respectively for the mean and the variance values, according to the analysis recommended by Ref. 6 for a 95% confidence interval. No corrections were made for sampling bias, but no correlations were found between Doppler frequencies and time interval between consecutive bursts even in the zones of the flow characterized by the lowest particle arrival rates, suggesting that those effects are unimportant for the present flow conditions.

Table 1. Principal characteristics of the 2D Laser-Doppler velocimeter.

	He-Ne laser	Diode Laser
- Wave length, λ [nm]	633	532
- Focal length of focusing lens, f [mm]	400	400
- Beam diameter at e-2 intensity [mm]	1.35	1.35
- Beam spacing, s [mm]	38.87	39.13
- Calculated half-angle of beam intersection, θ	2.78°	2.8°
- Fringe spacing, δ_f [μm]	6.53	5.45
- Velocimeter transfer constant, K [MHz/ms ⁻¹]	0.153	0.183

Systematic errors incurred in the measurements of Reynolds shear stresses can arise from lack of accuracy in the orientation angle on the normal to the anemometer fringe pattern, as shown by Ref. 7, and can be particularly large in the vicinity of the zones characterized by zero shear stress: for the present experimental conditions the largest errors are expected to be smaller than -2.5%.

3. Results

In this chapter, experimental data obtained will be presented and discussed under two headings. First, flow visualization is presented, and then mean and turbulent velocity profiles are presented and discussed for the velocity ratios V_R of 22.5.

A. Visualization

Flow visualization was performed using digital direct photography to guide the choice of the measurement locations and to provide a qualitative picture of the flow. The longitudinal vertical plane of

symmetry was illuminated with a sheet of light. The photos were taken perpendicular to the vertical plane of symmetry. For all the flows studied, the results have shown (for each jet) a pattern similar to that of a single impinging jet. Fig. 3 identifies the flow development along the vertical plane of symmetry, i.e. $Z=0$. Each jet has an initial potential-core jet region, where the flow characteristics are identical to those of a free jet, and near the horizontal plate the impingement region, characterized by considerable deflection of the jet. It was not possible to identify all the regions simultaneously in the same photo, neither a deflection of each jet by the crossflow. The selected picture shows the wall jet corresponding to the upstream impinging jet which is almost parallel to the ground plate and exhibits behaviour similar to that of a radial wall jet where the upstream effects of interaction due to impingement are no longer important. The upstream wall jet interacts with the crossflow and forms a horseshoe vortex close to the ground plate, which wraps around both impinging jets. As a result, two streamwise counter-rotating vortices develop side-to-side and decay further downstream of each impinging zone forming a ground vortex. The nature of each ground vortex is similar to the horseshoe structure known to be generated by the deflection of a boundary layer by a solid obstacle⁸, but is different from the vortex pair known to exist in a “bent-over” jet in a crossflow far from the ground⁹. No evidence of a ground vortex corresponding to the downstream impinging jet could be confirmed, which is an indication that the upstream impinging jet and its ground vortex are blocking the crossflow and provoking an alteration to the flow pattern. If the jets were positioned side by side in front of the crossflow two ground vortexes would appear as well as a fountain flow in the vertical plane of symmetry due to the collision of the two individual radial wall jets (e.g., Refs. 10-11). In the present case for a velocity ratio between the jet and the crossflow of $V_R = 22.5$ no fountain flow could be detected.

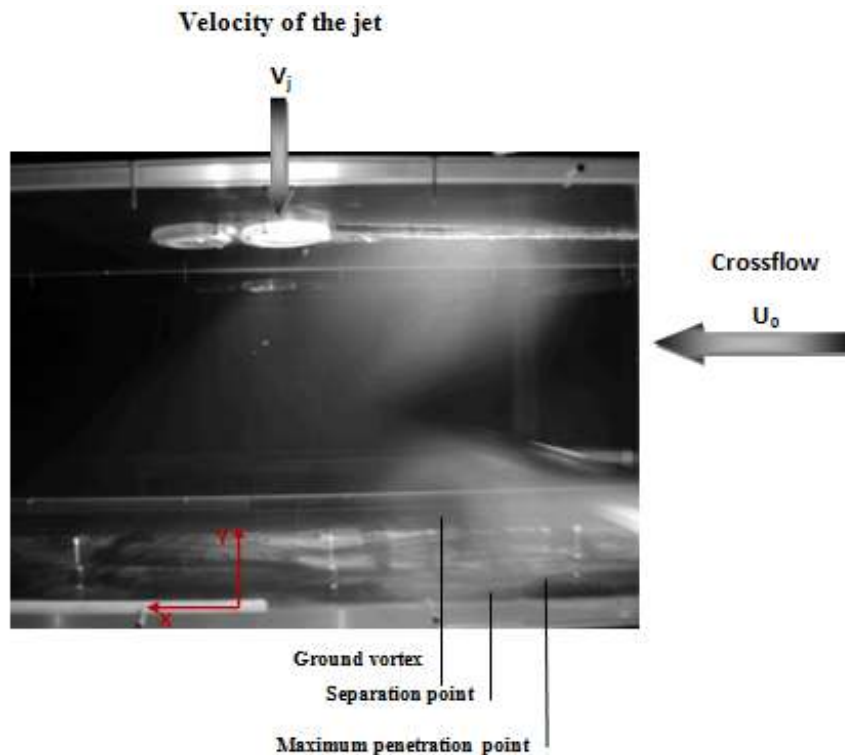


Figure 3. Visualization of the twin jet flow in the vertical plane of symmetry for $Re_j=4.3 \times 10^4$, $V_j/U_0=22.5$, $H/D=20.1$, and $S/D=6$.

Analysis of Fig. 3 also suggests that the crossflow is deflected sideways by the penetration of the jet and may cause a recirculation region just downstream of the discharge, away from the ground plate, but cannot be clearly identified. These features of the flow are quantified in figures 4 to 6 through a detailed set of mean and turbulent velocity measurements obtained in the vertical plane of symmetry ($Z=0$) for a

Reynolds number based on the jet-exit conditions of 4.3×10^4 , a free stream to jet velocity ratio, $V_R = V_j/U_o$ of 22.5, a jet height to jet diameter ratio, H/D , of 20.1, and a spacing between the jets in the wind direction, S/D , of 6.

B. Measurements

Figure 4 shows vertical profiles of the mean horizontal velocity component, \bar{U} , along the vertical plane of symmetry ($Z=0$).

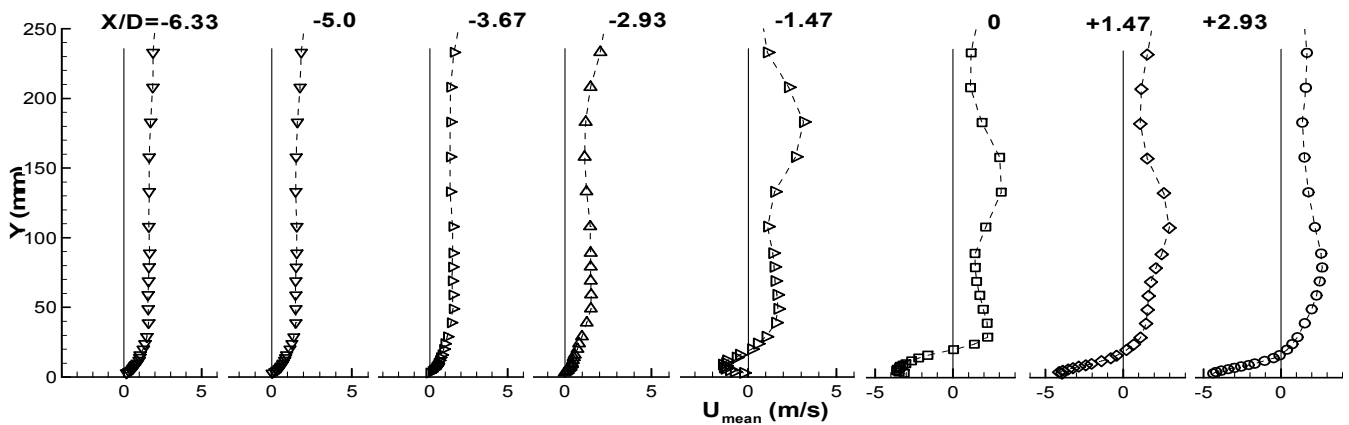


Figure 4. Vertical profiles of the mean horizontal velocity component, \bar{U} , along the longitudinal (symmetry) plane crossing the center of the twin jets. $Re_j=4.3 \times 10^4$, $V_j/U_o=22.5$, $H/D=20.1$, and $S/D=6$.

The mean horizontal velocity profiles at $X/D=-2.93$, -1.47 , 0 and $+1.47$ show negative values near the ground ($Y=0$) that correspond to the upstream wall jet, revealing that the first impinging jet was deflected by the crossflow. The impinging point of the first jet is located at about $X/D=+2.93$ in a position that is vertically near the axis of the rear jet exit ($X/D=+3$), which is more strongly deflected due to this interference. As a consequence, the downstream wall jet of the first jet and the rear jet seems to merge rapidly in a single flow in the crossflow direction. These profiles exhibit maximum positive (downstream) values of the mean horizontal velocity component between $Y=100\text{mm}$ and 150mm that reach twice the crossflow velocity. This means that no upstream wall jet resulting from the rear jet exists, but the complete jet is deflected by the crossflow. This result is consistent with the conclusions of Ref. 4 that found for a single impinging jet flow that the ground vortex blocks the passage of the confined crossflow increasing the velocity of the crossflow that passes over. So, for this configuration the final result is that the rear jet “feels” a smaller jet-to-crossflow velocity ratio and no impingement occurs. In the practical situation of a VSTOL aircraft this may result in a different pressure distribution in the under surface of the aircraft, that with front wind or small forward movement may result in enhanced under pressures in the aft part of the aircraft causing a suction down force and a change of the pitching moment towards the ground.

Figures 5 (a) and (b) show horizontal profiles of horizontal, \bar{U} , and vertical, \bar{V} , mean velocity components, quantify the development of the impinging jets and confirm the above description of the flow. The measurements, and particularly those of the vertical velocity component, do not identify a centrally located fountain rising from the ground plate without interference from the main jets, as it occurs in practical VSTOL applications¹¹.

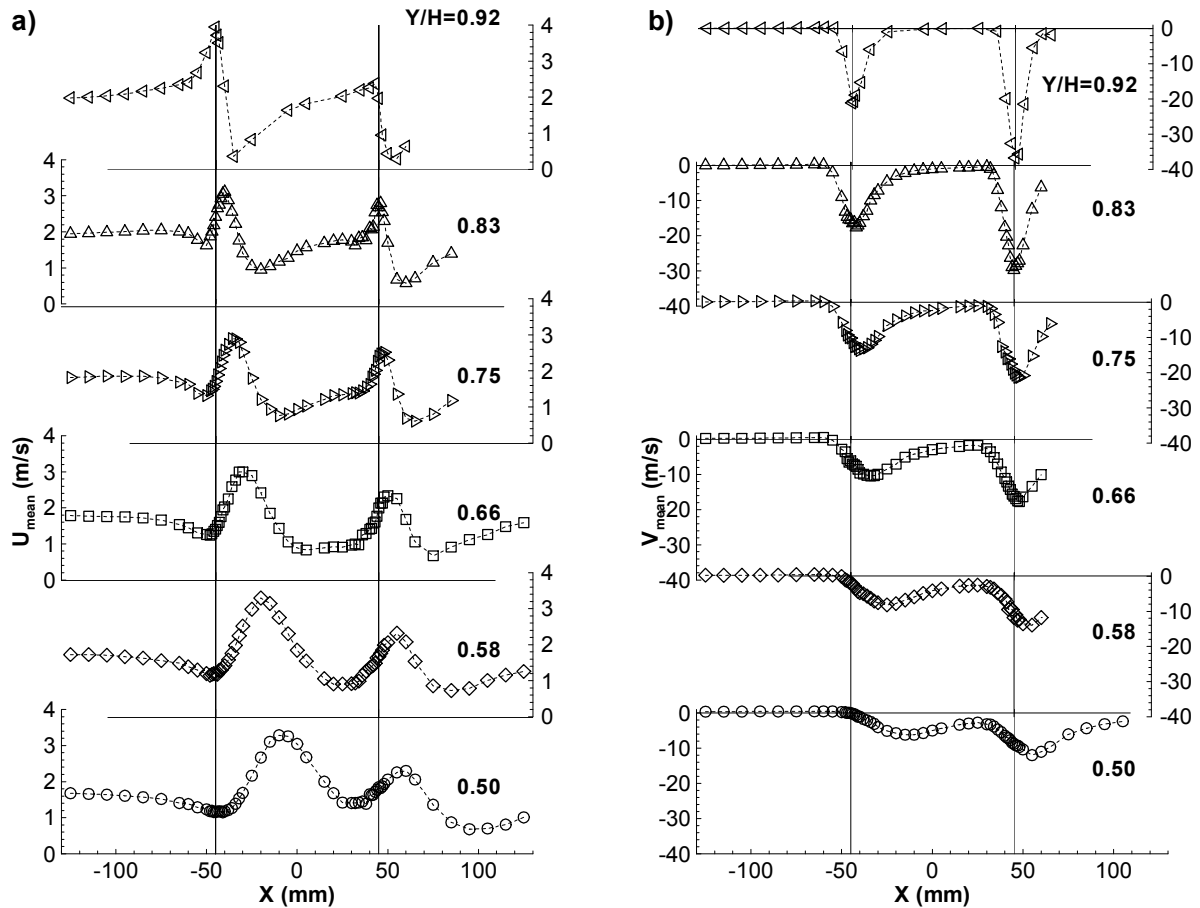


Figure 5. Horizontal profiles of the mean velocity characteristics along the longitudinal (symmetry) plane crossing the center of the twin jets. $Re_j=4.3 \times 10^4$, $V_i/U_o=22.5$, $H/D=20.1$, and $S/D=6$. (a) Horizontal velocity, \bar{U} . (b) Vertical velocity, \bar{V} .

This result confirms our hypothesis that the alignment of the twin jets with the crossflow would create a special flow pattern not yet reported before. The wall jet resulting from the first jet flows underneath the rear one, but the ground vortex formed upstream is only interfering away from the vertical symmetry plane.

The mean vertical velocity component is always positive from the upper wall ($Y/H=1$) up to the middle of the crossflow ($Y/H=0.5$), confirming the conclusions drawn from the vertical velocity profiles in the lower part of the crossflow and discussed in the previous paragraphs.

The asymmetry of the flow can be confirmed from the horizontal profiles of the mean vertical velocity component with higher peaks up to 10% of the vertical velocity in the upstream side ($X < -50$ mm or $3.33D$). The middle value between the maximum and the minimum of the mean horizontal velocity component or the mean vertical velocity components can be used to indicate the centre of the jet, and in the upstream side it moves in the crossflow direction from -43.02 mm at $Y/H=0.92$ to 10.47 mm at $Y/H=0.5$ corresponding to a deflection angle of 21.9 degrees. The downstream jet is protected from the action of the crossflow by the first jet and as a consequence it is less deflected: the centre of the jet is almost coincident with the geometrical axis of the exit, and for $Y/H=0.5$ it is located at $X/D=+4.0$ corresponding to an inclination angle of 12.3 degrees. However, considering the maximum of the mean vertical velocity component the calculated inclination angle is only 4.8 degrees which reinforces the conclusion, and the difference is probably associated with an enhanced entrainment of the rear jet due to its smaller angle with the surrounding flow.

Figure 6 shows horizontal profiles of the normal stresses, $\overline{u'^2}$ and $\overline{v'^2}$, in a *rms* form, and show results that are somewhat surprising at first sight, because it seems that it is not possible to identify completely the shear layer surrounding the impinging jets.

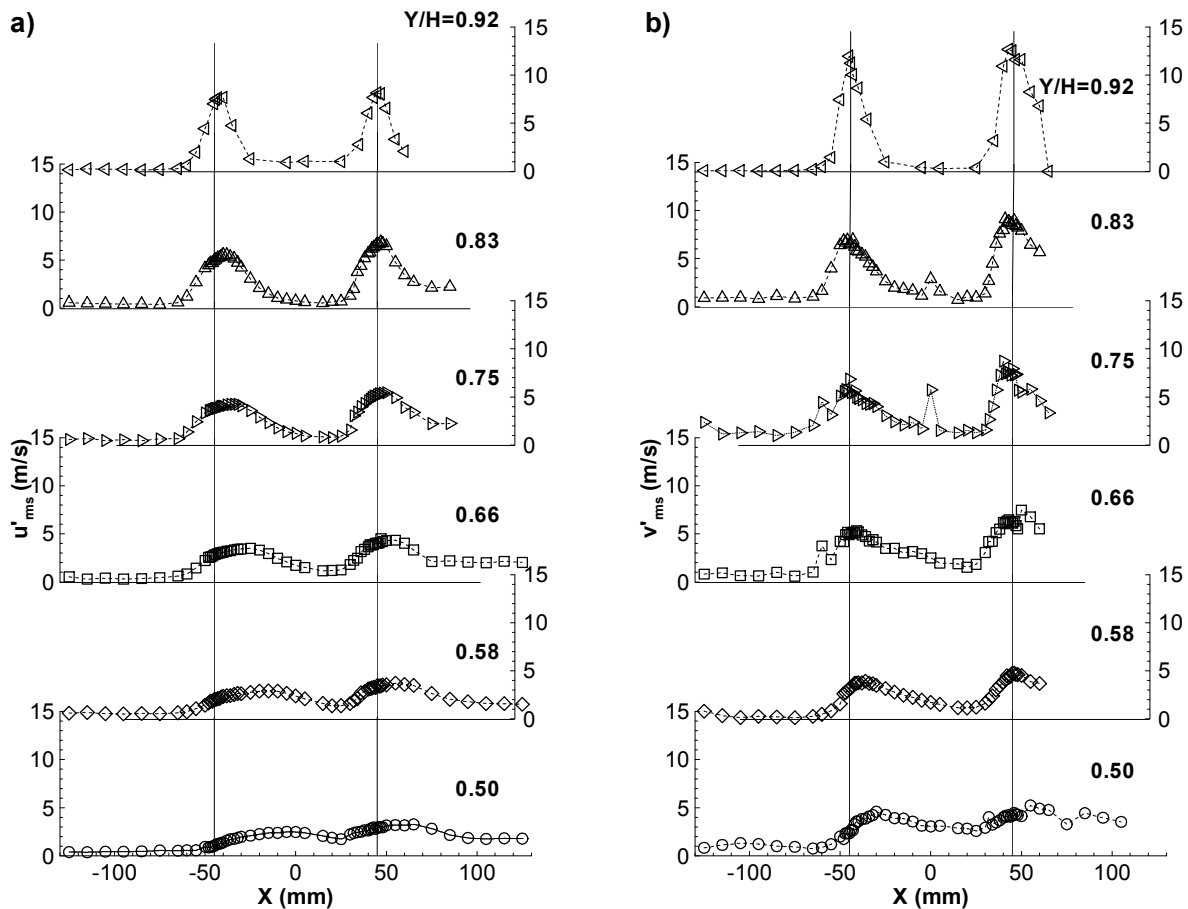


Figure 6. Horizontal profiles of the mean velocity characteristics along the longitudinal (symmetry) plane crossing the center of the twin jets. $Re_j=4.3 \times 10^4$, $V_i/U_o=22.5$, $H/D=20.1$, and $S/D=6$. (a) Horizontal rms velocity, $\sqrt{u'^2}$. (b) Vertical rms velocity, $\sqrt{v'^2}$.

The peaks in the fluctuating vertical velocity components occur in the upstream side of the first jet as expected, because in this region the higher velocity gradients occur. Other peaks were observed near $X=0$ for the $X/H=0.83$ and 0.75 profiles that correspond to the downstream side of the first impinging jet. For the $X/H=0.66$ profile the peak is very weak, and for the lower profiles they cannot be pointedly identified, confirming the rapid mixing between the jets as already detected from the lower part of the flow through the vertical velocity profiles.

For the second (downstream) impinging jet the shear layer surrounding the jet cannot be clearly identified. However, for the $Y/H=0.66$ profile a small decrease in the normal vertical stress is noted near the centre of the jet, but the peaks around the jet are so close that the minimum value is somewhat masked.

4. Conclusions

A laser Doppler velocimeter was used to provide information on the flowfield created by twin impinging jets aligned with a low velocity crossflow. The experiments were carried out for a Reynolds number

based on the jet exit conditions of $Re_j=4.3 \times 10^4$, an impingement height of 20.1 jet diameters and for a velocity ratio between the jet exit and the crossflow $V_R=V_j/U_o$ of 22.5. The rear jet is located at $S=6D$ downstream of the first jet.

The results show a large penetration of the first (upstream) jet, which is deflected by the crossflow and impinges on the ground, giving rise to a ground vortex due to the collision of the radial wall and the crossflow that wraps around the impinging point like a scarf. The rear jet it is not so affected by the crossflow in terms of deflection because it is protected by the upstream jet, but due to the downstream wall jet that flows radially from the impinging point the first jet does not reach the ground. Also, due to the confinement and the ground vortex, the crossflow is blocked and accelerates in the upper part and also contributes to an enhanced mixing of each secondary flow. As consequence, no upstream wall jet or ground vortex resulting from the second (downstream) jet was detected. The result of the rear jet impinging on the downstream wall jet resulting from the first jet had not been reported so far and requires further investigation.

The shear layers surrounding the jet cannot be clearly identified from the fluctuating velocities that do not exhibit clear peaks in the edges, and the values in the centre are also high.

Acknowledgments

The financial support of FCT-Fundação para a Ciência e Tecnologia under contract PTDC/EME-MFE/102190/2008 is gratefully acknowledged.

The present work was done in the scope of the activities of LAETA-Associated Laboratory of Energy, Transports and Aeronautics/AEROG.

References

- ¹Bernhard, W., and Sebastian, S., "Multiple Jet Impingement – A Review", *Heat Transfer Research*, Vol. 42, Issue 2, Special Issue 5, 2011, pp. 101-142.
- ²Barata, J.M.M., Durão, D.F.G., and McGuirk, J.J., "Numerical Study of Single Impinging Jets Through a Crossflow", *Journal of Aircraft*, Vol.26, No.11, 1989, pp. 1002-1008.
- ³Knowles, K., and Bray, D., "The Ground Vortex Formed by Impinging Jets in Crossflow", AIAA 29th Aerospace Sciences Meeting, AIAA Paper 91-0768, Reno, NV, Jan. 7-10, 1991.
- ⁴Barata, J.M.M., "Fountain Flows Produced by Multiple Impinging Jets in a Crossflow". *AIAA Journal*, Vol. 34, No.12, Dez. 1996, pp. 2523-2530 e *AIAA Journal on Disc*, Vol. 2, No.1, 1996.
- ⁵Durst, F., Melling, A., and Whitelaw, J.H., "*Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry*", 2nd ed., New York, Academic Press.
- ⁶Yanta, W.J. and Smith, R.A., "Measurements of Turbulent Transport Properties with a Laser-Doppler Velocimeter", 11th Aerospace Sciences Meeting, AIAA Paper 73-0169, Washington, 1978.
- ⁷Melling, A., and Whitelaw, J.H., "Turbulent Flow in a Rectangular Duct", *J. Fluid Mechanics*, Vol. 78, 1975, pp.285-315.
- ⁸Baker, O.J., "The Turbulent Horseshoe Vortex", *J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 6, 1981, pp. 9.
- ⁹Andreopoulos, J. and Rodi, W., "Experimental Investigation of Jets in a Crossflow", *J. Fluid Mechanics*, Vol. 138, 1984, pp. 127.
- ¹⁰Siclari, M.J., Migdal, D., Luzzi, T.W., Jr., Barche, J., and Palcza, J.L., "Development of Theoretical Models of Jet-Induced Effects on V/STOL Aircraft", *Journal of Aircraft*, Vol. 13, No. 12, 1976, pp.938-944.
- ¹¹Kotansky, D.R., "The Modelling and Prediction of Multiple VTOL Aircraft Flow Fields in Ground Effect", AGARD CP-308, Paper 16.

Numerical and Experimental Study of Two Impinging Jets in a Row through a Crossflow

Diana F.C. Vieira¹, André R.R. Silva², Fernando M.S.P. Neves³, Pedro S.D. Carvalho¹, Jorge M.M. Barata⁴
Universidade Beira Interior, Covilhã, 6200-358, Portugal

Abstract

TURBULENT jets impinging on flat surfaces through a low-velocity crossflow are typical of the flow beneath a short/vertical take-off aircraft which is lifting off or landing with zero or small forward momentum. Ground effect may occur and change the lift forces on the aircraft, cause reingestion of exhaust gases into the engine intake and raise fuselage skin temperatures. In this latter application the impingement of each downward-directed jet on the ground results in the formation of a wall jet which flows radially from the impinging point along the ground surface. The interaction of this wall jet with the free stream results in the formation of a ground vortex far upstream of the impinging jet, which has profound implications on the aircraft design. In addition the collision of the wall jets originates a fountain upwash flow, affecting the forces and moments induced in the aircraft when operating in ground effect.

Earlier published work has been concentrated on 1, 2, and 3 jets configurations relevant to the Harrier / AV-8B aircraft. In this case when the aircraft is operating with small forward movement the configuration of interest is 2 impinging jets with the direction of the crossflow perpendicular to the line containing their centers.

If attention is concentrated on the next generation of VSTOL aircrafts (X-35/F-35/JSF-Joint Strike Fighter) then no relevant studies can be found, because the impinging jets are aligned with the crossflow, and this geometry has not been considered. In this case a vertically oriented lift fan (SDLF) generates a column of cool air that produces the nearly 20,000 pounds of lifting power, along with an equivalent amount of thrust from the vectored rear exhaust (3BSM-Three Bearing Swivel Module). The lift system was successfully demonstrated during a flight testing of the X-35B during the summer of 2001. The complexity of the new VSTOL configuration together with the very stringent requirements has required an enormous amount of R&D in the last decade. So, most of the published work reported so far has therefore only peripheral relevance to the F35-B/JSF ground effect problem.

This paper presents a detailed analysis of the complex flow field beneath 2 impinging jets aligned with a low-velocity crossflow relevant for the future F-35 VSTOL configuration (Fig. 1), and provides a quantitative picture of the main features of interest for impingement type of flows.

The present results were obtained at the vertical plane of symmetry for jet mean velocities of $V_j=36\text{m/s}$ and mean crossflow velocity of $U_o=1.6\text{m/s}$, corresponding to a velocity ratio, $V_R=V_j/U_o$ of 22.5. The rear jet is located at $S=6D$ downstream of the first jet (Fig. 2).

The velocity field was measured with a two-color (two-component) Laser-Doppler velocimeter (Dantec Flowlite 2D). The horizontal, U , and vertical V , mean and turbulent velocities were determined by a two-velocity channel Dantec BSA F60 processor. The seeding of the flow with glycerin particles of $0.1\text{-}5\mu\text{m}$ was produced by a smoke generator. The transmitting and collecting optics is mounted on a three-dimensional transversing unit, allowing the positioning of the centre of the control volume within $\pm 0.1\text{mm}$.

Flow visualization was performed using digital direct photography to guide the choice of the measurement locations and to provide a qualitative picture of the flow. The longitudinal vertical plane of symmetry was illuminated and photos were taken perpendicularly. For all the flows studied, the results have shown a pattern similar to that of a single impinging jet. Each jet has an initial potential-core jet region, where the flow characteristics are identical to those of a free jet, and near the horizontal plate the impingement region, characterized by considerable deflection of the jet. The upstream wall jet interacts with the crossflow and forms a horseshoe vortex close to the ground plate, which wraps around both impinging jets. No evidence of a ground vortex corresponding to the downstream impinging jet could be confirmed, which is an indication that the upstream impinging jet and its ground vortex are blocking the crossflow and provoking an alteration to the flow pattern. If the

¹ M.Eng. Student, Aerospace Sciences Department.

² Assistant Professor, Aerospace Sciences Department, Member of AIAA.

³ Ph. D. Student, Aerospace Sciences Department, Student Member of AIAA.

⁴ Full Professor, Aerospace Sciences Department, Associate Fellow of AIAA. Corresponding author.

jets were positioned side by side in front of the crossflow two ground vortices would appear as well as a fountain flow in the vertical plane of symmetry due to the collision of the two individual radial wall jets. In the present case for a velocity ratio between the jet and the crossflow of $V_R = 22.5$ no fountain flow could be detected.

The mean horizontal velocity profiles at $X/D = -2.93, -1.47, 0$ and $+1.47$ show negative values near the ground ($Y=0$) that correspond to the upstream wall jet, revealing that the first impinging jet was deflected by the crossflow (Fig. 3). The impinging point of the first jet is located at about $X/D = +2.93$ in a position that is vertically near the axis of the second jet exit ($X/D = +3$), which is more strongly deflected due to this interference. As a consequence, the downstream wall jet of the first jet and the second jet seems to merge rapidly in a single flow in the crossflow direction. No upstream wall jet resulting from the second jet could be detected, but the complete “merged jet” is deflected by the crossflow. So, for the present configuration the rear jet seems to “feel” a smaller jet-to-crossflow velocity ratio and no impingement occurs. In the practical situation of a VSTOL aircraft this may result in a different pressure distribution in the under surface of the aircraft, that with front wind or small forward movement may result in enhanced under pressures in the forward part of the aircraft causing a suction down force and a change of the pitching moment towards the ground.



Figure 1. Representation of the ground vortex flow phenomena adapted to the JSF F-35 Variant B.

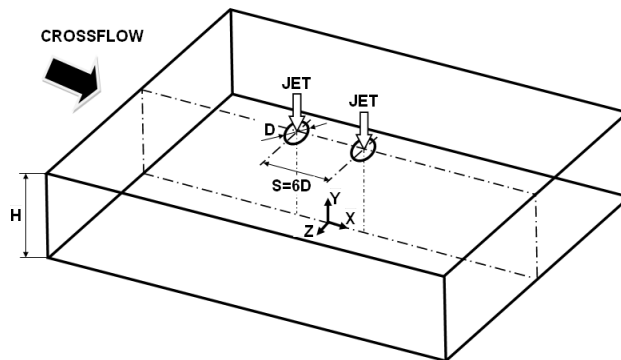


Figure 2. Geometrical arrangement of the jets.

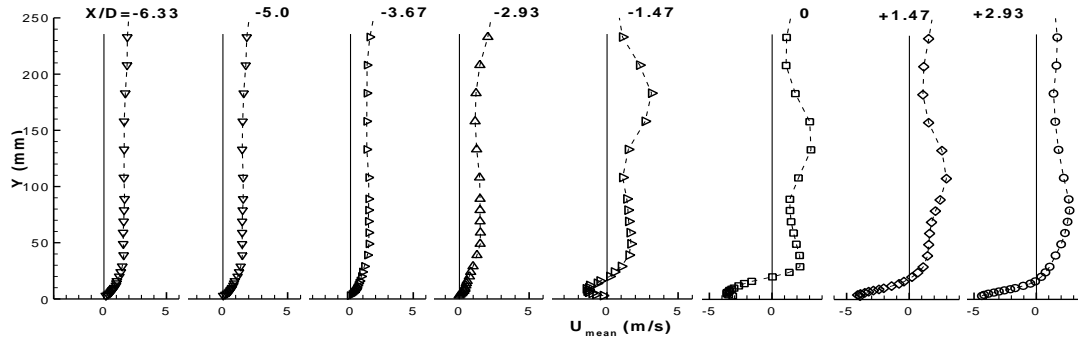


Figure 3. Vertical profiles of the mean horizontal velocity component, \bar{U} , along the longitudinal (symmetry) plane crossing the center of the twin jets. $Re_j=4.3 \times 10^4$, $V_j/U_0=22.5$, $H/D=20.1$, and $S/D=6$.

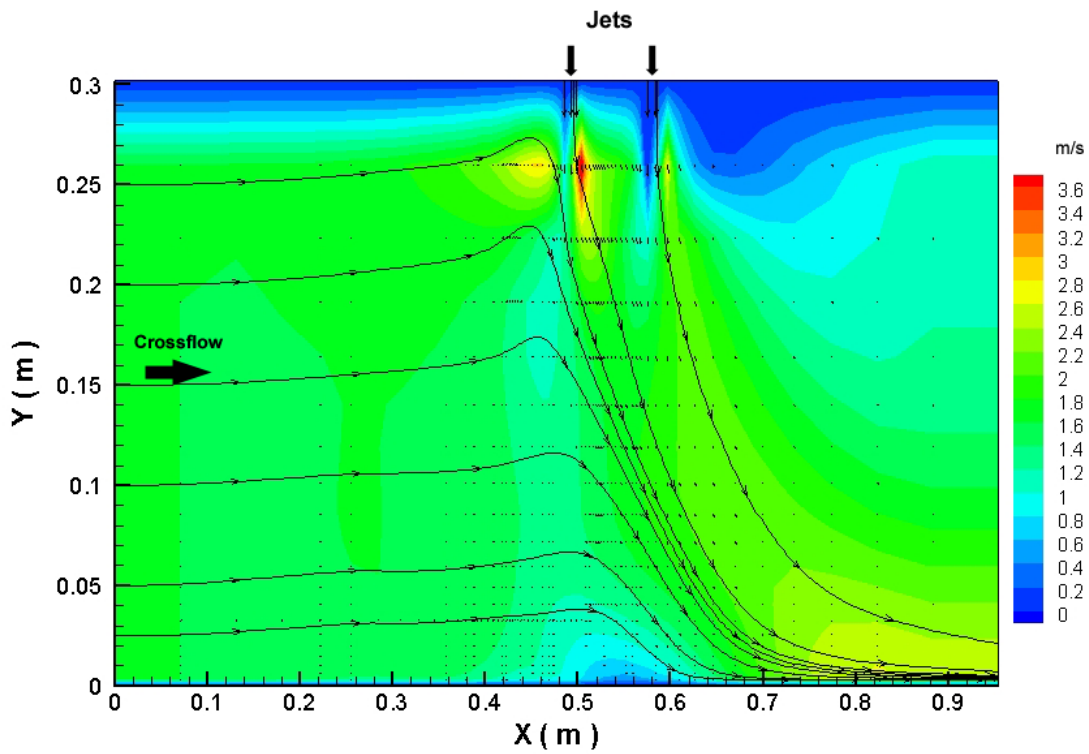


Figure 4. Calculated streaklines and isolines of the mean horizontal velocity component, \bar{U} , along the longitudinal (symmetry) plane crossing the center of the two jets. $Re_j=4.3 \times 10^4$, $V_j/U_0=22.5$, $H/D=20.1$, and $S/D=6$.