



**NOVA**  
NOVA SCHOOL OF  
SCIENCE & TECHNOLOGY

**DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL**

**GONÇALO ANTÓNIO VERÍSSIMO MARTINS**

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INTERAÇÃO DE UM JATO  
COM UM ESCOAMENTO CRUZADO PARA  
DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE BOCAL**

**MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Universidade NOVA de Lisboa  
setembro, 2022



# SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INTERAÇÃO DE UM JATO COM UM ESCOAMENTO CRUZADO PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE BOCAL

**GONÇALO ANTÓNIO VERÍSSIMO MARTINS**

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Orientadora:** Diana Filipa da Conceição Vieira  
Professora Auxiliar Convidada, FCT, Universidade Nova de Lisboa

**Júri:**

**Presidente:** José Fernando de Almeida Dias  
Professor Associado, FCT, Universidade Nova de Lisboa

**Arguentes:** José Manuel Paixão Conde  
Professor Auxiliar, FCT, Universidade Nova de Lisboa

**Vogais:** Diana Filipa da Conceição Vieira  
Professora Auxiliar Convidada, FCT, Universidade Nova de Lisboa

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa  
setembro, 2022



**[Simulação Numérica da Interação de um Jato com um Escoamento Cruzado para Diferentes Configurações de Bocal]**

Copyright © [Gonçalo António Veríssimo Martins], Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*Dedico este trabalho a todos aqueles  
que me apoiaram incondicionalmente.  
Um bem-haja!*





## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, quero agradecer, do fundo do meu coração, à minha orientadora, a Professora Diana Vieira, por ter estado sempre presente na partilha de ideias e discussões e não menos importante, por me ter tranquilizado em momentos de maior aflição.

Expresso o meu agradecimento aos meus pais e restantes familiares pelo apoio e por me terem dado a oportunidade de seguir este caminho.

Por fim, quero agradecer à minha noiva Isis Botelho pelo apoio e carinho transmitido de forma incondicional, que certamente me ajudaram a ultrapassar os obstáculos encontrados.



*"I must change my life so that I can live it, not wait for it."  
(Susan Sontag)*



## Resumo

Nesta dissertação irá ser apresentado um estudo computacional de um jato de bocal circular e quadrado através de um escoamento cruzado para três razões de velocidade. Este estudo é o primeiro estudo que se foca na configuração do bocal recorrendo ao modelo RANS, pretendendo-se avaliar o impacto que a forma do bocal tem num jato através de um escoamento cruzado, nomeadamente na mistura entre os dois fluidos e na penetração do jato no escoamento cruzado. Assim, pode-se entender alguns dos processos existentes num jato através de um escoamento cruzado que estão presentes em situações reais, tais como no arrefecimento de pás de turbinas, na injeção de combustível em queimadores, na descarga de efluentes em rios, etc.

O estudo numérico foi realizado recorrendo ao software *ANSYS Fluent*. Este baseia-se na utilização da técnica de volumes finitos para a solução das equações de conservação de um fluido, utilizando um acoplamento entre a pressão e a velocidade. Para este estudo foi utilizado o modelo de turbulência *k-ε Realizable* e o algoritmo SIMPLE.

A abordagem inicial para este estudo consistiu na criação de um domínio computacional semelhante ao presente em Salewski et al. (2008) com o objetivo de validar a malha gerada para o problema. Para as simulações serem realizadas com um menor esforço computacional, modelou-se apenas metade do domínio, em que este foi cortado ao meio pelo plano de simetria. Em seguida, realizou-se a independência das malhas, e simulou-se para cada razão de velocidade o caso de estudo em cada bocal. No total foram simulados seis casos, com três razões de velocidade para cada bocal, e analisaram-se os campos de velocidade, de pressão, de escoamento através das linhas de corrente, e a trajetória.

Com os resultados obtidos, concluiu-se que a penetração do jato no escoamento cruzado aumenta com o aumento da razão de velocidades, e que para uma mesma razão de velocidades é maior para o bocal circular. É verificado também que a distância entre os vórtices do CVP (Counter-Rotating Vortex Pair) é menor no bocal circular do que no bocal quadrado. Para cada configuração de bocal verifica-se que a distância entre os vórtices do CVP aumenta à medida que a razão de velocidades cresce. No que toca ao enrolamento dos vórtices do CVP, denota-se um maior enrolamento para os vórtices criados a partir do bocal circular.

**Palavras-chave:** CFD, ANSYS Fluent, bocal circular, bocal quadrado, escoamento cruzado, modelo de turbulência *k-ε Realizable*, CVP.



## Abstract

In this dissertation, a computational study of a circular and square nozzle jet through a crossflow for three velocity ratios will be presented. This study is the first study that focuses on the nozzle configuration using the RANS model, aiming to evaluate the impact that the shape of the nozzle has on a jet through a crossflow, namely on the mixing of jets and the penetration of the jet in the crossflow. Thus, it is possible to understand the existing processes in a jet through a crossflow that are presented in real situations, such as in the cooling of turbine blades, in the injection of fuel in burners, in the discharge of effluents in rivers, etc.

The numerical study was performed using the *ANSYS Fluent software*. This is based on the use of the finite volume technique for the solution of the conservation equations of a fluid, using a coupling between pressure and velocity. For this study the *k- $\epsilon$  Realizable* turbulence model and the SIMPLE algorithm were used.

The initial approach for this study consisted in the creation of a computational domain similar to one presented by Salewski et al. (2008) in order to validate the mesh generated for the problem. For the simulations to be performed with less computational effort, only half of the domain was modeled, in which it was cut in half by the symmetry plane. Then, the mesh independence was performed, and the case study was simulated for each velocity ratio in each nozzle. In total, six cases were simulated, with three velocity ratios for each nozzle, and the fields of velocity, pressure, flow through the streamlines, and the trajectory were analyzed.

With the results obtained, it was concluded that the penetration of the jet in the crossflow increases with the increase of the velocity ratio, and that for the same velocity ratio it is greater for the circular nozzle. It is also verified that the distance between the vortices of the CVP (Counter-Rotating Vortex Pair) is smaller in the circular nozzle than in the square nozzle. For each nozzle configuration it is verified that the distance between the CVP vortices increases as the velocity ratio increases. Regarding the winding of the CVP vortices, there is a greater winding for the vortices created from the circular nozzle.

**Keywords:** CFD, ANSYS Fluent, circular nozzle, square nozzle, crossflow, *k- $\epsilon$  Realizable* turbulence model, CVP





# Índice

<b>Índice de Figuras .....</b>	<b>xix</b>
<b>Índice de Tabelas .....</b>	<b>xxi</b>
<b>Simbologia.....</b>	<b>xxiii</b>
<b>Siglas e Acrónimos.....</b>	<b>xxv</b>
<b>1 Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto e Motivação .....	1
1.2. Objetivos .....	1
1.3. Organização da Dissertação.....	2
<b>2 Jato através de um Escoamento Cruzado.....</b>	<b>3</b>
2.1. Introdução .....	3
2.2. Estado de Arte.....	6
2.2.1. Estudos Experimentais.....	6
2.2.2. Estudos Numéricos .....	14
2.2.3. Estudos Experimentais e Numéricos .....	19
<b>3 Modelo Computacional.....</b>	<b>27</b>
3.1. Introdução .....	27
3.1.1. Pré-Processamento.....	27
3.1.2. Solver .....	28
3.1.3. Pós- Processamento.....	28
3.2. Malha.....	29
3.2.1. Tipos de Malha.....	29
3.2.2. Qualidade da Malha .....	30
3.3. Tratamento da Malha Junto de Paredes.....	31
3.4. Equações Fundamentais .....	33
3.4.1. Equação da Conservação da Massa .....	33
3.4.2. Equação da Conservação da Quantidade de Movimento .....	34
3.5. Modelo de Turbulência.....	35
3.6. Solver .....	36
3.6.1. <i>Pressure-based Solver</i> .....	37
3.6.2. Discretização.....	37
<b>4 Caso de estudo.....</b>	<b>39</b>
4.1. Domínio de Integração .....	39
4.2. Condições de Fronteira.....	40

4.3.	Parâmetros de Simulação.....	41
4.4.	Geração de Malhas.....	42
<b>5</b>	<b>Análise e Discussão de Resultados.....</b>	<b>45</b>
5.1.	Validação dos Resultados.....	45
5.2.	Independência de Malha.....	46
5.3.	Qualidade da Malha.....	47
5.4.	Campos de Velocidade e de Pressão.....	48
5.4.1.	Bocal Circular.....	48
5.4.2.	Bocal Quadrado.....	52
5.5.	Campo de escoamento.....	56
5.5.1.	Bocal Circular.....	57
5.5.2.	Bocal Quadrado.....	60
5.6.	Trajelórias.....	63
<b>6</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>65</b>
6.1.	Limitações e Perspetivas de Trabalhos Futuros.....	66
	<b>Bibliografia.....</b>	<b>67</b>
	<b>Anexos.....</b>	<b>71</b>
	I-Descrição do Domínio computacional.....	71
	II- Construção da Malha.....	73

# Índice de Figuras

Figura 2.1: Representação esquemática das estruturas vorticiosas de um jato com um escoamento cruzado (Fric e Roshko (1994)) .....	3
Figura 2.2: Vórtices na camada de corte do jato (Kelso et al.(1996)) .....	4
Figura 2.3: Vórtices em ferradura (Fric e Roshko (1994)) .....	4
Figura 2.4: Vórtices de esteira visualizados num plano paralelo à parede (Fric e Roshko (1994)) .....	5
Figura 2.5: Inclinação e dobragem da camada de corte que contribui para a formação e alimentação dos vórtices em contra -rotação (Kelso et al. (1996)) .....	5
Figura 2.6: Evolução da formação do CVP (Re=10000) (adaptado de Muppidi e Mahesh (2006)) .....	6
Figura 2.7: Reorientação da vorticidade da camada de corte levando à dobragem dos vórtices (Kelso et al. (1996)) .....	7
Figura 3.1: Geometrias primitivas .....	29
Figura 3.2: Tipos de Malha .....	30
Figura 3.3: Divisão do escoamento perto da parede .....	31
Figura 3.4: Lei de Parede .....	33
Figura 4.1: Geometria do problema (Salewski et al. (2008)) .....	39
Figura 4.2: Domínio Computacional do caso de estudo .....	40
Figura 4.3: Representação das condições de fronteira do caso de estudo .....	41
Figura 4.4 : Malha final: (a) vista geral; (b) Vista em planta do detalhe da construção na zona do bocal circular; (c) Vista em planta do detalhe da construção na zona do bocal quadrado; (d) Vista ampliada segundo X .....	42
Figura 5.1: Perfil de velocidades $w$ para os bocais circular e quadrado adimensionalizado pela velocidade de escoamento cruzado em $Z/D=8$ .....	46
Figura 5.2: Perfil de velocidades $w$ para os vários bocais adimensionalizado pela velocidade de escoamento cruzado em $Z/D=8$ (Salewski et al. (2006)) .....	46
Figura 5.3: Perfil de velocidades $w$ para o bocal circular adimensionalizado pela velocidade de escoamento cruzado em $Z/D=8$ . Independência de Malha .....	47
Figura 5.4: Contornos de velocidade e de pressão para o bocal circular para uma razão de velocidades de $V_j/U_0 = 2$ : (a) Contorno $W$ ; (b) Contorno $V$ ; (c) Contorno geral da velocidade; (d) - Contorno de pressão .....	49
Figura 5.5: Contornos de velocidade e de pressão para o bocal circular para uma razão de velocidades de $V_j/U_0 = 4$ : (a) Contorno $W$ ; (b) Contorno $V$ ; (c) Contorno geral da velocidade; (d) Contorno de pressão .....	50
Figura 5.6: Contornos de velocidade e de pressão para o bocal circular para uma razão de velocidades de $V_j/U_0 = 8$ : (a) Contorno $W$ ; (b) Contorno $V$ ; (c) Contorno geral da velocidade; (d) Contorno de pressão .....	51

Figura 5.7: Contornos de velocidade e de pressão para o bocal circular para uma razão de velocidades de $V_j/U_0 = 2$ : (a) Contorno W; (b) Contorno V; (c) Contorno geral da velocidade; (d) Contorno de pressão.....	53
Figura 5.8: Contornos de velocidade e de pressão para o bocal circular para uma razão de velocidades de $V_j/U_0 = 4$ : (a) Contorno W; (b) Contorno V; (c) Contorno geral da velocidade; (d) Contorno de pressão.....	54
Figura 5.9: Contornos de velocidade e de pressão para o bocal circular para uma razão de velocidades de $V_j/U_0 = 8$ : (a) Contorno W; (b) Contorno V; (c) Contorno geral da velocidade; (d) Contorno de pressão.....	55
Figura 5.10: Campo de escoamento através das linhas de corrente para o bocal circular para $V_j/U_0 = 2$ : (a)- Vista frontal do plano de simetria; (b)- Vista lateral.....	57
Figura 5.11: Campo de escoamento através das linhas de corrente para o bocal circular para $V_j/U_0 = 4$ : (a)- Vista frontal do plano de simetria; (b)- Vista lateral.....	58
Figura 5.12: Campo de escoamento através das linhas de corrente para o bocal circular para $V_j/U_0 = 8$ : (a)- Vista frontal do plano de simetria; (b)- Vista lateral.....	59
Figura 5.13: Campo de escoamento através das linhas de corrente para o bocal quadrado para $V_j/U_0 = 2$ : (a)- Vista frontal do plano de simetria; (b)- Vista lateral.....	60
Figura 5.14: Campo de escoamento através das linhas de corrente para o bocal quadrado para $V_j/U_0 = 4$ : (a)- Vista frontal do plano de simetria; (b)- Vista lateral.....	61
Figura 5.15: Campo de escoamento através das linhas de corrente para o bocal quadrado para $V_j/U_0 = 8$ : (a)- Vista frontal do plano de simetria; (b)- Vista lateral.....	62
Figura 5.16: Trajetória para o bocal circular para $V_j/U_0=4$ .....	63
Figura 5.17: Trajetória para o bocal quadrado para $V_j/U_0=4$ .....	63
Figura 5.18: Trajetória para vários tipos de bocal de jato. (Salewski et al .(2006)).....	63
Figura I.1: Domínio computacional: (a)- vista frontal; (b)- vista em planta.....	71
Figura I.2: Detalhe de construção do bocal: (a)- Bocal Circular; (b)- Bocal quadrado.....	72
Figura II.1- Discretização da malha na direção Z longe do bocal.....	73
Figura II.2- Discretização da malha na direção Y.....	74
Figura II.3- Discretização da malha na direção X longe do bocal.....	74
Figura II.4- Discretização da malha em redor do bocal circular.....	75

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Resumo dos estudos experimentais relativos a jatos com um escoamento cruzado .....	8
Tabela 2.2 : Resumo dos estudos numéricos relativos a um jato com um escoamento cruzado.....	15
Tabela 2.3 : Resumo dos estudos experimentais e numéricos relativos a um jato com um escoamento cruzado .....	20
Tabela 3.1 : Comparação entre CFD e Métodos Experimentais .....	27
Tabela 4.1 : Condições de fronteira .....	40
Tabela 4.2: Parâmetros utilizados na definição do escoamento .....	41
Tabela 5.1: Qualidade da malha intermédia de 570000 elementos .....	47



## Simbologia

$X, Y, Z$	Eixos coordenados do referencial ortonormado
$A_i$	Área da célula $i$ [ $m^2$ ]
$c_i$	Vetor que vai desde o centroide da célula ao centroide da célula $i$ vizinha.
$D$	Diâmetro do bocal do jato [m]
$f_i$	Vetor que vai desde o centroide da célula ao centro da aresta da célula $i$ vizinha
$i$	Direção genérica $i$
$u_i$	Componente da velocidade na direção $i$
$\theta_{max}$	Maior ângulo interno de uma célula [°]
$\theta_{min}$	Menor ângulo interno de uma célula [°]
$\theta_e$	Ângulo de uma célula equiangular [°]
$J$	Razão de quantidade de movimento
$y^+$	Distância à parede adimensional
$\nu$	Viscosidade cinemática [ $m^2/s$ ]
$u_\tau$	Velocidade de atrito ou de fricção [m/s]
$\tau_\omega$	Tensão de corte na parede [Pa]
$\kappa$	Constante de von Kármán
$t$	Tempo [s]
$k$	Energia cinética turbulenta [J/kg]
$\varepsilon$	Taxa de dissipação de energia cinética turbulenta [ $m^2/s^3$ ]
$G_k$	Geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade média
$G_b$	Geração de energia cinética turbulenta devido à flutuabilidade
$Y_M$	Contribuição da dilatação de flutuabilidade na turbulência compressível para a taxa de dissipação geral
$\sigma_k$ e $\sigma_\varepsilon$	Números de Prandtl turbulentos para $k$ e $\varepsilon$
$S_k$ e $S_\varepsilon$	Termos fonte definidos pelo utilizador
$\mu_t$	Viscosidade turbulenta [kg/m.s]
$C_{1\varepsilon}, C_2, \sigma_k$ e $\sigma_\varepsilon$	Constantes do modelo de turbulência
$V_j$	Velocidade do jato [m/s]
$U_0$	Velocidade do escoamento cruzado [m/s]
$\rho$	Massa volúmica [ $kg/m^3$ ]
$\mu$	Viscosidade dinâmica [kg/m.s]
$\delta_{ij}$	Tensor delta de Kronecker
$Re$	Número de Reynolds
$V_j/U_0$	Razão de velocidades
$RA$	Razão de aspeto
$T$	Temperatura [K]
$\beta$	Ângulo de inclinação do jato [°]
$S$	Distância entre os jatos [m]

$Pr$	Número de Prandtl
$Sc$	Número de Schmidt
$St$	Número de Strouhal
$\bar{\Omega}$	Tensor da taxa média de rotação
$\omega_k$	Velocidade angular [rad/s]
$V$	Volume de controlo arbitrário [m <sup>3</sup> ]
$\vec{v}$	Vetor de velocidade
$\vec{A}$	Vetor da área de superfície no volume de controlo
$\Gamma_\phi$	Coeficiente de difusão para $\phi$
$\nabla\phi$	Gradiente de $\phi$
$S_\phi$	Termo fonte de $\phi$ por unidade de volume
$\phi$	Grandeza escalar genérica



## Siglas e Acrónimos

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
CFD	Computacional Fluid Dynamics
CVP	Counter-Rotating Vortex Pair
DPIV	Digital Particle Image Velocimetry
DNS	Direct Numerical Simulation
JICF	Jet In Crossflow
LDA	Laser Doppler Anemometry
LDV	Laser Doppler Velocimetry
LES	Large Eddy Simulation
LIF	Laser Induced Fluorescence
PISO	Pressure-Implicit with Splitting of Operators
PIV	Particle Image Velocimetry
PLIF	Planar Laser Induced Fluorescence
PSV	Particle Streak Velocimetry
QUICK	Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
RSTM	Reynolds Stress Transport Model
RSM	Reynolds Stress Model
SAS	Scale-Adaptive Simulation
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
SIMPLEC	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Corrected
SST	Shear Stress Transport
URANS	Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes
WALE	Wall-Adapting Local Eddy-viscosity



# 1 Introdução

## 1.1. Contexto e Motivação

O estudo de um jato através de um escoamento cruzado tem inúmeras aplicações na engenharia. É de salientar os seguintes casos: arrefecimento de pás de turbinas, injeção de combustível em queimadores, inversores de impulso para sistemas propulsivos, emissão de poluentes de chaminés e a descarga de efluentes em rios. Em tais aplicações, a extensão da penetração do jato e as características de mistura entre os dois escoamentos são de uma importância extrema.

Devido à sua grande relevância na engenharia e em aplicações ambientais, a interação de um jato com um escoamento cruzado tem sido alvo de estudo ao longo do tempo. Uma excelente revisão deste foi reportada por Margason (1983). Os investigadores têm considerado aspetos diferentes aquando do estudo de um jato com um escoamento cruzado, tais como: campos de velocidade e de vorticidade, a trajetória do jato e a propagação de estruturas de escoamento de grande escala (Andreopoulos e Rodi (1984); Fric e Roshko (1994) e Kamotani e Greber (1972)), campos de concentração e de mistura de escalares passivos (Smith e Mungal (1998); Su e Mungal (2004)), e efeitos de temperatura na estrutura do jato. No passado recente, para investigar propriedades adicionais do jato com um escoamento cruzado, os investigadores têm recorrido a simulações numéricas (Muppidi e Mahesh (2007); Wegner et al. (2004) e Wu et al. (2017)). Estas, fornecem explicações adicionais da fenomenologia complexa adjacente ao estudo da interação de um jato com um escoamento cruzado, que pode ser encontrada em estudos experimentais.

Existem parâmetros que são frequentemente estudados num jato através de um escoamento cruzado, e um dos mais importantes e que carece de uma maior análise é a forma do bocal do jato. Uma vez que os estudos existentes do impacto que a forma do bocal do jato tem num JICF são através de análise experimental ou através dos modelos LES e DNS, torna-se necessário recorrer ao modelo RANS, que tem um custo computacional muito menor do que os outros dois modelos numéricos.

## 1.2. Objetivos

O objetivo da presente dissertação consiste no estudo numérico, através de RANS, de um jato com um escoamento cruzado para diferentes configurações de bocal (circular e quadrado) sujeito a razões de velocidades (razão entre a velocidade do jato e a velocidade do escoamento cruzado),  $V_j/U_0$  iguais a 2, 4 e 8, de forma a compreender o mecanismo de mistura entre o jato e o escoamento cruzado. Com isto, pretende-se avaliar a influência de parâmetros extremamente importantes para este tipo de escoamento, tais como: a forma do bocal e a razão de velocidades  $V_j/U_0$ .

Um outro objetivo do trabalho é também reforçar a aprendizagem de uma ferramenta numérica bastante útil na simulação de escoamentos, o *ANSYS Fluent*, possibilitando de uma maneira rápida a alteração de parâmetros para posterior análise.

### **1.3. Organização da Dissertação**

No primeiro capítulo, faz-se uma introdução ao trabalho, onde se apresenta o enquadramento deste e os objetivos a serem alcançados.

No segundo capítulo, é introduzido o tema de jatos através de um escoamento cruzado apresentando-se o estado de arte, com estudos relativos a escoamentos de jatos através de um escoamento cruzado, com o intuito de se definir a contribuição do tema.

No terceiro capítulo apresenta-se o modelo computacional com as respetivas equações que traduzem as leis fundamentais do problema existente, é descrita a metodologia, o modelo de turbulência utilizado, o respetivo algoritmo de resolução, bem como o tratamento dado à malha para a realização das simulações numéricas.

No quarto capítulo, encontra-se o caso de estudo, onde é feita a descrição dos domínios utilizados neste trabalho, as malhas associadas a cada geometria e também os parâmetros de escoamento.

No quinto capítulo, apresentam-se e analisam-se os resultados numéricos obtidos, validando-se esses mesmos resultados com resultados experimentais e numéricos da bibliografia, e é realizado um teste de independência das malhas criadas, com o objetivo de se escolher a malha apropriada para o caso de estudo.

Por fim, no sexto e último capítulo, indicam-se as principais conclusões a retirar deste trabalho, as limitações deste, assim como algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Jato através de um Escoamento Cruzado

### 2.1.Introdução

Um escoamento de um jato através de um escoamento cruzado descreve um jato que é defletido por um fluido ambiente em movimento ou corrente livre, perfazendo um ângulo com este. A interação que ocorre entre o jato e o escoamento cruzado é complexa e instável e quatro estruturas diferentes num campo de escoamento próximo ao jato podem ser distinguidas, onde a interação tridimensional entre o jato e o escoamento cruzado é mais intensa. Essas estruturas são: (1) os vórtices na camada de corte do jato (do inglês, jet shear-layer vortices); (2) os vórtices em ferradura (do inglês, horseshoe vortices); (3) o par de vórtice em contra-rotação (do inglês, counter-rotating vortex pair); (4) os vórtices de esteira (do inglês, wake vortices). Estas estruturas encontram-se representadas na Figura 2.1.

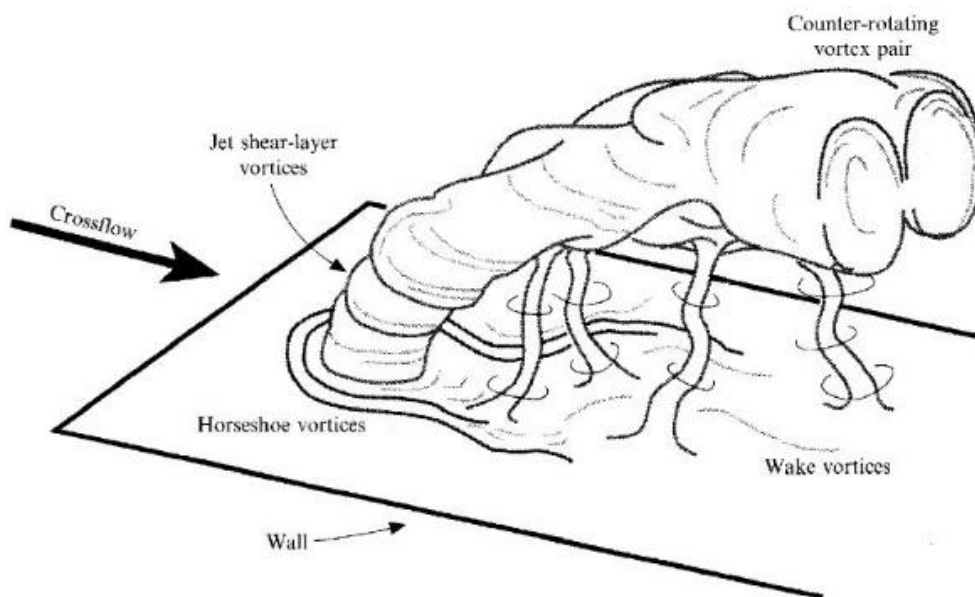


Figura 2.1: Representação esquemática das estruturas vorticiosas de um jato com um escoamento cruzado (Fric e Roshko (1994))

Entender a fonte de vorticidade para cada sistema de vórtices, resultante da interação de um jato com um escoamento cruzado, é um passo fundamental para a compreensão dos mecanismos deste tipo de escoamento. Como tal, é descrito, em seguida, a origem de formação deste tipo de estruturas.

As camadas de mistura que se formam entre o jato e o escoamento cruzado são sujeitas à instabilidade de Kelvin-Helmholtz a barlavento e a sotavento do jato, levando assim à formação de vórtices na camada de corte do jato, como representado na Figura 2.2. Estes são intrinsecamente transientes e dominam a parte inicial do jato.

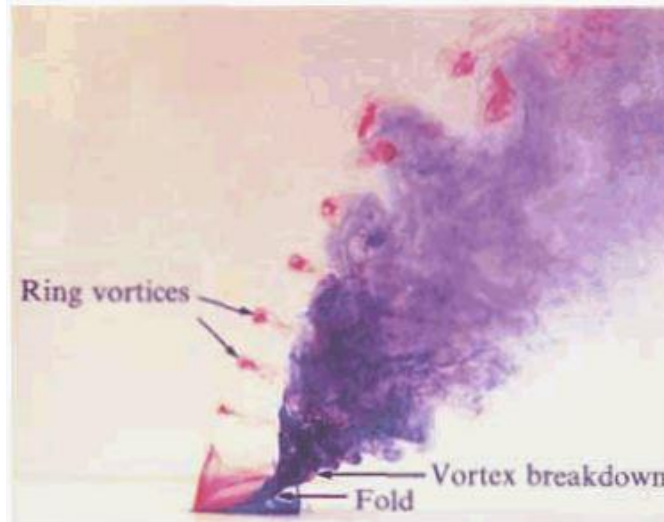


Figura 2.2: Vórtices na camada de corte do jato (Kelso et al.(1996))

Os vórtices em ferradura são vórtices com a forma em U e formam-se a montante da borda de ataque do jato, persistindo a jusante. Estes vórtices formam-se, pois, a camada limite do escoamento cruzado encontra um gradiente de pressão adverso a montante do jato, separa e forma vórtices que se movem ao redor do jato, tal como se pode ver na Figura 2.3.

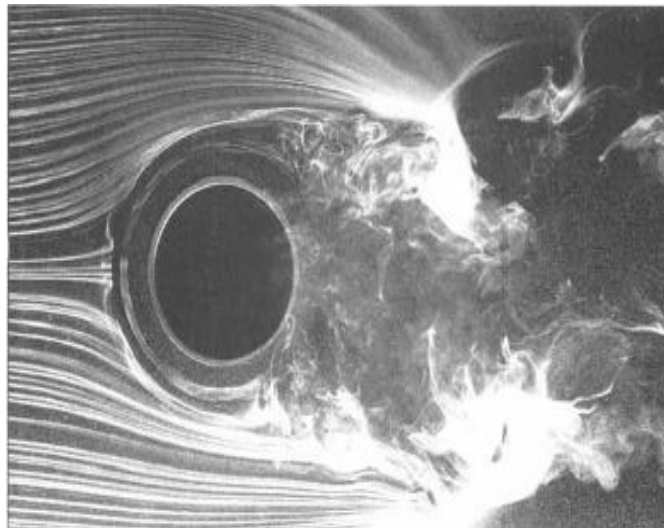


Figura 2.3: Vórtices em ferradura (Fric e Roshko (1994))

Os vórtices de esteira são os vórtices verticais observados a jusante do jato, estendendo-se da parede até ao lado a jusante do jato. Estes têm algumas características que são semelhantes aos vórtices de esteira para cilindros sólidos, mas obviamente têm diferenças, uma vez que o cilindro constitui um obstáculo sólido, existindo diferenças na forma como os vórtices de esteira são formados.

Neste caso, o jato defletido segue o arrasto a jusante, estando continuamente a alargar a sua expansão. Em planos paralelos à parede, estes assemelham-se a uma estrada de vórtice atrás de cilindros sólidos (ver Figura 2.4).

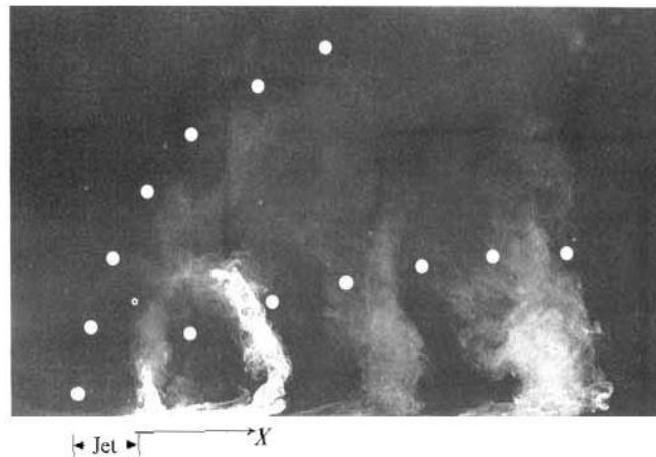


Figura 2.4: Vórtices de esteira visualizados num plano paralelo à parede (Fric e Roshko (1994))

Por último, o par de vórtices em contra- rotação que é há muito tempo considerado uma estrutura da assinatura de jatos em escoamento cruzado e que persiste a jusante destes, é induzido no campo médio de escoamento por um impulso do jato normal inicial, uma vez que os anéis de vórtice gerados próximos à saída do jato são empurrados na direção do escoamento, alinhando a vorticidade na direção do escoamento cruzado. Ou seja, o par de vórtices em contra- rotação resulta da modificação da vorticidade do jato pelo escoamento cruzado, tal como representado na Figura 2.5 e Figura 2.6.

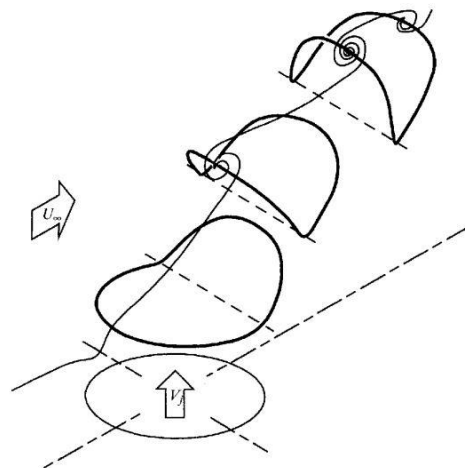


Figura 2.5: Inclinação e dobragem da camada de corte que contribui para a formação e alimentação dos vórtices em contra -rotação (Kelso et al. (1996))

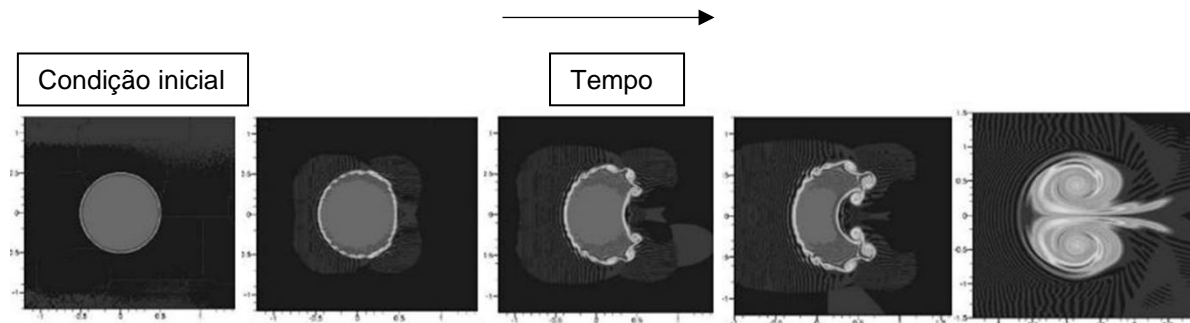


Figura 2.6: Evolução da formação do CVP ( $Re=10000$ ) (adaptado de Muppidi e Mahesh (2006))

## 2.2. Estado de Arte

Nesta secção apresenta-se uma revisão bibliográfica de alguns dos estudos experimentais e numéricos realizados de jatos com um escoamento cruzado. Para tal, subdivide-se esta secção em três partes de acordo com o estudo realizado, sendo que a primeira parte diz respeito aos estudos experimentais, a segunda parte retrata os estudos numéricos e a terceira parte é referente aos estudos experimentais e numéricos

### 2.2.1. Estudos Experimentais

Na Tabela 2.1 encontram-se alguns estudos experimentais, no que diz respeito ao estudo de jatos com um escoamento cruzado. As aplicações e os objetivos de cada estudo são diferentes, de acordo com a geometria do bocal dos jatos, o fluido utilizado e as razões de velocidade entre o jato e o escoamento cruzado consideradas.

Andreopoulos e Rodi (1984) mediram as componentes médias da velocidade e as suas flutuações para um jato com um escoamento cruzado para diferentes razões de velocidade ( $V_j/U_0=0.5, 1.0$  e  $2.0$ ) através de anemometria de fio quente. Estes autores verificaram que a baixas razões de velocidade, o jato dobra-se abruptamente em direção ao lado de onde provém o escoamento cruzado e que a altas razões de velocidade, o jato penetra mais no escoamento cruzado e o efeito de dobragem ocorre de uma forma mais gradual. Estes autores concluíram que, quanto maior for a razão de velocidades, maior é a distorção do jato pelo escoamento cruzado.

Os autores Fric e Roshko (1994) investigaram as estruturas vorticiosas na esteira de um jato com um escoamento cruzado para razões de velocidade jato-escoamento cruzado entre 2 e 10 e números de Reynolds do escoamento cruzado de 3800 a 11400. Os autores observaram que as estruturas vorticiosas na esteira do jato com um escoamento cruzado não provém da estrutura do jato, mas são formadas da vorticidade que se origina na camada limite do escoamento cruzado. Neste estudo verificou-se também que o mecanismo de formação dos vórtices de esteira, de um jato através de um escoamento cruzado, é diferente do fenómeno de desprendimento da vorticidade que ocorre nos corpos rombudos.



Kelso et al. (1996) através de visualizações do escoamento em canal de água, técnicas de fumo em túnel de vento e por meio de anemometria de fio quente, investigaram a interação jato-escoamento cruzado para razões de velocidade entre 2 e 6 e números de Reynolds, baseados no diâmetro do jato e no escoamento cruzado, entre 440 e 6200. Os autores verificaram que os vórtices em anel na camada de corte do jato parecem enrolar e dobrar, de tal forma que têm uma contribuição para a vorticidade do CVP, isto é, demonstraram a reorientação da vorticidade da camada de corte que forma o CVP (ver Figura 2.5 e Figura 2.7), o que está de acordo com o estudo de Andreopoulos (1985).

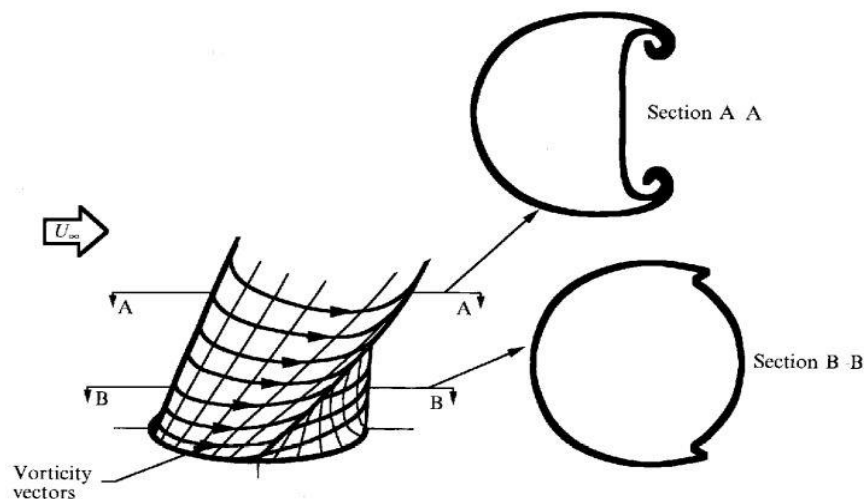


Figura 2.7: Reorientação da vorticidade da camada de corte levando à dobragem dos vórtices (Kelso et al. (1996))

O trabalho de Liscinsky et al. (1996) consistiu num estudo experimental da mistura isotérmica de um jato turbulento injetado perpendicularmente a um escoamento cruzado uniforme através de diferentes tipos de bocal. Para tal, utilizou-se a técnica *Planar Mie Scattering* para estudar a penetração do jato e medir a distribuição da fração de mistura média de bocais circulares, quadrados, elípticos e retangulares. Também se utilizou a técnica de anemometria de fio quente para medir a distribuição da intensidade turbulenta em vários planos a jusante do jato. Os resultados apresentados permitiram concluir que a mistura turbulenta não é significativamente afetada pela forma do bocal, as trajetórias de concentração média são independentes da forma do bocal, as distribuições da concentração para os vários bocais são iguais e as medições da intensidade turbulenta indicam que a distribuição e o nível das flutuações são iguais para cada bocal.

Haven e Kurosaka (1997), estudaram o efeito da geometria do bocal de saída do jato com um escoamento cruzado num túnel de água, utilizando-se os bocais circular, elíptico, quadrado e retangular, tendo todos eles uma área de secção reta igual. Recorrendo-se às técnicas *Laser Induced Fluorescence* (LIF) e *Particle Image Velocimetry* (PIV), foi possível concluir que a geometria do bocal tem uma forte influência no campo de escoamento próximo aos vórtices do tipo rim (*kidney vortices*). A proximidade entre estes vórtices contra-rotativos afeta o descolar do jato (do inglês, *lift-off*) e o arrastamento do fluido em repouso (do inglês, *entrainment*), em direção à superfície da placa. Os resultados demonstraram que para um bocal de um jato com uma alta razão de aspeito (RA), com o aumento da distância de separação entre os vórtices de parede, este permanece junto à superfície, enquanto para bocais com uma baixa razão de aspeito (RA), este tende a se afastar desta.

Tabela 2.1: Resumo dos estudos experimentais relativos a jatos com um escoamento cruzado

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Andreopoulos e Rodi (1984)	<p>Jato de ar através de escoamento cruzado não confinado</p> <p><math>D = 50 \text{ mm}</math>  <math>U_0 = 13.9 \text{ m/s}</math>  <math>V_j/U_0 = 0.5, 1.0 \text{ e } 2.0</math>  <math>Re = 20500, 41000, 82000</math></p>	Anemometria de Fio quente	$\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}, \overline{u'^2}, \overline{v'^2}, \overline{w'^2}, \overline{u'v'}, \overline{v'w'}, \overline{u'w'}$ no plano de simetria	<p>A baixas razões de velocidade (<math>V_j/U_0=0.5</math>) o jato dobra-se abruptamente em direção ao lado de onde provém o escoamento cruzado.</p> <p>A altas razões de velocidade, o jato penetra mais no escoamento cruzado e o efeito de dobragem ocorre de uma forma mais gradual.</p> <p>A energia cinética turbulenta e a tensão de corte <math>\overline{u'v'}</math> estão diretamente relacionadas com o gradiente <math>\partial U/\partial y</math> de tal forma que <math>\overline{u'v'}</math> pode ser descrita por um modelo de viscosidade efetiva.</p> <p>Quando a camada limite se aproxima do jato gera um vórtice em contra-rotação com a forma de uma ferradura.</p> <p>Em algumas regiões com grande divergência ou convergência de linhas de corrente, o gradiente <math>\partial W/\partial z</math> também contribui para a produção de energia cinética turbulenta e de <math>\overline{u'v'}</math>.</p>
Fric e Roshko (1994)	<p>Jato com um escoamento cruzado.</p> <p><math>2 \leq V_j/U_0 \leq 10</math>  <math>3800 \leq Re_0 \leq 11400</math></p>	Anemometria de Fio quente	<p>Visualização do escoamento</p> <p>Número de Strouhal na esteira, <math>St_w</math></p> <p>Perfis de velocidade e de pressão total na esteira</p> <p>Trajetórias do jato para diferentes razões de velocidade</p>	<p>Os autores observaram que as estruturas vorticosas na esteira do jato com um escoamento cruzado não provém da estrutura do jato, mas são formadas da vorticidade que se origina na camada limite do escoamento cruzado.</p> <p>Neste estudo verificou-se também que o mecanismo de formação dos vórtices de esteira de um jato através de um escoamento cruzado é diferente do fenômeno de desprendimento da vorticidade que ocorre nos corpos rombudos.</p>

Tabela 2.1: Resumo dos estudos experimentais relativos a jatos com um escoamento cruzado (continuação)

<p>Kelso, Lim e Perry (1996)</p>	<p>Jatos circulares com um escoamento cruzado</p> $2 \leq V_j/U_0 \leq 6$ $440 \leq Re \leq 6200$ baseado em $U_0$ e D	<p>Anemometria de Fio quente</p>	<p>Campos de velocidade Contornos de vorticidade Visualização do escoamento</p>	<p>Os vórtices em anel na camada de corte do jato parecem enrolar e dobrar, de tal forma que têm uma contribuição para a vorticidade do CVP, isto é, demonstraram a reorientação da vorticidade da camada de corte que forma o CVP. Para razões de velocidade entre 4 e 6, os vórtices de esteira podem formar-se através de diferentes mecanismos, dependendo do número de Reynolds. Para números de Reynolds elevados, a orientação dos vórtices verticais na zona de esteira pode mudar de forma intermitente.</p>
<p>Liscinsky, True e Holdeman (1996)</p>	<p>Jato de ar turbulento injetado perpendicularmente a um escoamento cruzado através de diferentes tipos de bocal (circular, quadrado, elíptico e retangular)</p> $A = 2.86 \text{ cm}^2$ $U_0 = 6.6 \text{ m/s}$ $V_j = 19 \text{ m/s}$ $Re_j = 2.4 \times 10^4$ $J = \rho_j V_j^2 / \rho_0 V_0^2 = 8.2$	<p>Planar Mie Scattering Anemometria de Fio quente</p>	<p>Distribuições da intensidade turbulenta para os vários tipos de bocal (circular, quadrado, elíptico e slot). Distribuição da fração de mistura média para os diferentes tipos de bocal (circular, quadrado, elíptico e slot).</p>	<p>A mistura turbulenta não é significativamente afetada pela forma do bocal. As trajetórias de concentração média são independentes da forma do bocal. As distribuições da concentração para os vários bocais são iguais. As medições da intensidade turbulenta indicam que a distribuição e o nível das flutuações são iguais para cada bocal.</p>

Tabela 2.1: Resumo dos estudos experimentais relativos a jatos com um escoamento cruzado (continuação)

<p>Haven e Kurosaka (1997)</p>	<p>Jato em túnel de água com diferentes configurações de bocal (circular, quadrado, elíptico e retangular) com um escoamento cruzado</p> <p><math>U_0 = 8 \text{ cm/s}</math> para os bocais de 1 a 6  <math>U_0 = 5.4 \text{ cm/s}</math> para os bocais 1a e 6a  <math>0.4 \leq V_j/U_0 \leq 2</math>  <math>1040 \leq Re \leq 2900</math></p>	<p>LIF PIV</p>	<p>Visualização do escoamento Trajetória do jato Campos de velocidade Campos de vorticidade</p>	<p>A geometria do bocal tem uma forte influência no campo de escoamento próximo aos vórtices do tipo rim (<i>kidney vortices</i>). A proximidade entre os vórtices contra-rotativos afeta o descolar do jato (do inglês, <i>lift-off</i>) e o arrastamento do fluido em repouso (do inglês, <i>entrainment</i>) em direção à superfície da placa. Para um bocal de um jato com uma alta razão de aspeto (RA), com o aumento da distância de separação entre os vórtices de parede, este permanece junto à superfície, enquanto para bocais com uma baixa razão de aspeto (RA), este tende a se afastar desta.</p>
<p>Blanchard, Brunet e Merlen (1999)</p>	<p>Jato em túnel de água com um escoamento cruzado a baixas velocidades</p> <p>Escoamento isotérmico (<math>T=293 \text{ K}</math>)  <math>100 \leq Re = U_0 \times D/\nu \leq 600</math>  <math>1.5 \leq \alpha = V_j/U_0 \leq 6.5</math></p>	<p>LIF PSV</p>	<p>Visualização do escoamento Evolução do comprimento de onda Evolução da velocidade adimensional longitudinal Evolução da velocidade média de rotação</p>	<p>As visualizações do escoamento permitiram medir a velocidade de rotação característica de CVP, que é o sistema que prevalece neste tipo de escoamento complexo. As estruturas longitudinais têm de ser tidas em conta no mecanismo de estabilidade de um jato com um escoamento cruzado para baixos números de Reynolds (<math>Re &lt; 1000</math>). As instabilidades no campo próximo ao jato não são do tipo Kelvin-Helmholtz, mas sim do tipo elíptico.</p>
<p>Camussi, Guj e Stella (2002)</p>	<p>Jato com um escoamento cruzado para um baixo número de Reynolds num túnel de água por gravidade</p> <p><math>D = 5 \text{ mm}</math>  <math>U_0 = 0.02 \text{ m/s}</math>  <math>1.5 \leq V_j/U_0 \leq 4.5</math>  <math>Re_j \approx 100</math></p>	<p>PIV LIF</p>	<p>Visualização do escoamento Contorno da velocidade média Contorno da vorticidade média</p>	<p>Detetou-se dois regimes de escoamento diferentes que dependem da razão de velocidades. O número de Reynolds do jato desempenha um papel fundamental nos mecanismos de destabilização que levam à formação das estruturas dos jatos na camada de corte.</p>

Tabela 2.1: Resumo dos estudos experimentais relativos a jatos com um escoamento cruzado (continuação)

<p>Özcan e Larsen (2003)</p>	<p>Jato com baixa velocidade em túnel de vento</p> <p><math>D = 24 \text{ mm}</math>  <math>U_0 = 1.5 \text{ m/s}</math>  <math>V_j/U_0 = 1.3 \text{ e } 3.3</math>  <math>Re_0 = 2.4 \times 10^3</math> baseado em <math>U_0</math> e <math>D</math></p>	<p>LDA</p>	<p>Distribuições da velocidade média          Linhas de corrente          Distribuição do coeficiente de fricção</p>	<p>O escoamento de jato entra no plano de simetria a cerca de dois diâmetros de jato a jusante do eixo deste e em seguida dispersa-se em todas as direções.</p>
<p>Gopalan, Abraham e Katz (2004)</p>	<p>Jato circular turbulento numa camada limite turbulenta em túnel de água em anel fechado</p> <p><math>D = 9.5 \text{ mm}</math>  <math>U_0 = 1.96 \text{ m/s}</math>  <math>0.5 \leq V_j/U_0 \leq 2.5</math>  <math>Re_0 = 1.9 \times 10^4</math> baseado em <math>U_0</math> e <math>D</math></p>	<p>PIV</p>	<p>Visualização do escoamento          Distribuições da velocidade média          Distribuições da vorticidade média          Linhas de corrente          Medições de pressão</p>	<p>Os autores concluíram que a estrutura de escoamento depende da razão de velocidades e existem duas regiões distintas. Para uma baixa razão de velocidades (<math>V_j/U_0 &lt; 2</math>), forma-se uma camada vorticiosa semicilíndrica na esteira do jato e para uma alta razão de velocidades (<math>V_j/U_0 &gt; 2</math>), a vorticidade do jato é afastada da parede e permanece principalmente confinada ao jato.</p>

Tabela 2.1: Resumo dos estudos experimentais relativos a jatos com um escoamento cruzado (continuação)

<p>Su e Mungal (2004)</p>	<p>Medições do campo bidimensional de velocidade e de concentração para duas configurações de jatos turbulentos</p> <p><math>D_{\text{interno}} = 4.53 \text{ mm}</math>  <math>D_{\text{externo}} = 6.35 \text{ mm}</math>  <math>V_j = 16.9 \text{ m/s}</math>  <math>U_0 = 2.95 \text{ m/s}</math>  <math>V_j/U_0 = 5.7</math>  <math>Re_j \approx 5000</math>  <math>Sc_{\text{sistema}} = 1.49</math></p>	<p>PIV PLIF</p>	<p>Perfis da variância média escalar <math>\langle C'^2 \rangle</math>  Componentes de fluxo escalar <math>\langle u_i' C' \rangle</math>  Tensões normais turbulentas <math>\langle u'^2 \rangle</math> e <math>\langle v'^2 \rangle</math>  Tensões de corte turbulentas <math>\langle u'v' \rangle</math>  Trajetória do jato</p>	<p>Os perfis de escoamento cruzado da concentração escalar e da magnitude da velocidade demonstram que o escoamento se torna assimétrico próximo à saída do bocal.</p> <p>A intensidade da mistura, quantificada pela variância escalar e a magnitude do fluxo escalar turbulento, é inicialmente maior a barlavento, mas eventualmente torna-se maior do lado da esteira.</p>
<p>New, Lim e Luo (2006)</p>	<p>Estudo de um jato circular com um escoamento cruzado em túnel de água com recirculação para o perfil de velocidade parabólico e “em cartola”</p> <p><math>D = 13.5 \text{ mm}</math>  <math>\delta = 2.4D = 32 \text{ mm}</math>  <math>U_0 = 20 \text{ mm/s}</math>  <math>625 \leq Re \leq 1645</math>  <math>J = 2.3 \text{ a } 5.8</math></p>	<p>DPIV LIF</p>	<p>Perfis de velocidade <math>(\bar{u} \text{ e } \bar{v})</math>  Distribuições da velocidade média  Campos de vorticidade instantâneos  Campos de vorticidade médios  Linhas de corrente  Trajetórias do jato</p>	<p>A formação dos vórtices a barlavento e a sotavento do jato é bastante afetada pela forma do perfil de velocidades utilizado.</p> <p>Para o perfil parabólico, a formação dos vórtices demora mais tempo, uma vez que as camadas de corte têm uma maior espessura, para uma mesma razão de quantidade de movimento.</p> <p>Este facto torna evidente que para o caso do jato parabólico, em comparação com o perfil “em cartola”, há um aumento da penetração do jato no escoamento cruzado e uma diminuição do arrastamento no campo próximo ao escoamento cruzado.</p>

Utilizando métodos óticos não intrusivos, através das técnicas *Laser Induced Fluorescence* (LIF) e *Particle Streak Velocimetry* (PSV), Blanchard et al. (1999) estudaram o comportamento de jatos transientes com escoamento cruzado. As visualizações do escoamento permitiram medir a velocidade de rotação característica de CVP, que é o sistema que prevalece neste tipo de escoamento complexo. Estes concluíram que as estruturas longitudinais têm de ser tidas em conta no mecanismo de estabilidade de um jato com um escoamento cruzado para baixos números de Reynolds ( $Re < 1000$ ).

Camussi et al. (2002), utilizando-se as técnicas PIV e LIF, realizaram um estudo de um jato com um escoamento cruzado para um baixo número de Reynolds num túnel de água por gravidade. Considerou-se razões de velocidades entre 1.5 e 4.5 e foi assumido como valor constante a velocidade do escoamento cruzado, permitindo mudar a razão de velocidades apenas pela mudança da velocidade do jato. Estes observaram dois regimes de escoamento diferentes para razões de velocidade diferentes e puderam verificar que o número de Reynolds do jato desempenha um papel fundamental nos mecanismos de destabilização que levam à formação das estruturas dos jatos na camada de corte.

Özcan e Larsen (2003) estudaram o arrastamento de um fluido em repouso de um jato com baixa velocidade em túnel de vento utilizando a técnica *Laser Doppler Anemometry* (LDA). Através desta técnica, mediu-se a velocidade média em três planos perpendiculares ao campo de escoamento próximo à saída do bocal do jato para razões de velocidade de 1.3 e 3.3. Baseado nos dados de velocidade obtidos, os autores concluíram que o escoamento de jato entra no plano de simetria a cerca de dois diâmetros de jato a jusante do eixo deste e em seguida dispersa-se em todas as direções. Esta hipótese foi suportada por estudos óticos de escoamento de Lim et al. (2001).

Utilizando a técnica PIV, a estrutura de escoamento, as distribuições da velocidade média, vorticidade, intensidade turbulenta, e a pressão de parede, foram medidas, por Gopalan et al. (2004), num túnel de água em circuito fechado. Consideraram razões de velocidade baixas, entre 0.5 e 2.5 e um número de Reynolds, baseado na velocidade do escoamento cruzado e no diâmetro do jato, elevado. Os autores concluíram que a estrutura de escoamento depende da razão de velocidades e existem duas regiões distintas. Para uma baixa razão de velocidades ( $V_j/U_0 < 2$ ), forma-se uma camada vorticiosa semicilíndrica na esteira do jato e para uma alta razão de velocidades ( $V_j/U_0 > 2$ ), a vorticidade do jato é afastada da parede e permanece principalmente confinada ao jato.

Su e Mungal (2004), recorrendo as técnicas *Planar Laser Induced Fluorescence* (PLIF) e *Particle Image Velocimetry* (PIV), mediram a mistura escalar e os campos de velocidade bidimensionais de um jato com um escoamento cruzado, em túnel de vento, para duas configurações de escoamento diferentes, uma no qual o bocal do jato está adjacente com a parede do túnel e outra com o bocal projetado na região uniforme do escoamento no túnel. Considerando uma razão de velocidades de 5.7 e um número de Reynolds de 5000, os autores puderam concluir que a intensidade da mistura, quantificada pela variância escalar e a magnitude do fluxo escalar turbulento, é inicialmente maior a barlavento, mas eventualmente torna-se maior do lado da esteira.

New et al. (2006), realizaram uma investigação experimental de um jato circular utilizando-se as técnicas *Digital Particle Image Velocimetry* (DPIV) e *Laser Induced Fluorescence* (LIF). Os perfis de velocidade considerados pelos autores são o perfil parabólico e o “em cartola” para uma razão de quantidade de movimento entre 2.3 e 5.8 e para um número de Reynolds entre 625 e 1645. Estes descobriram que a formação dos vórtices a barlavento e a sotavento do jato é bastante afetada pela forma do perfil de velocidades utilizado. Para o perfil parabólico, a formação dos vórtices demora mais tempo, uma vez que as camadas de corte têm uma maior espessura, para uma mesma razão de quantidade de movimento. Este facto torna evidente que para o caso do jato parabólico, em comparação com o perfil “em cartola”, há um aumento da penetração do jato no escoamento cruzado e uma diminuição do arrastamento no campo próximo ao escoamento cruzado.

## 2.2.2. Estudos Numéricos

Uma vez que esta dissertação é referente a um estudo numérico, esta secção é a de maior relevância, no que diz respeito à evolução temporal dos vários estudos de um jato com um escoamento cruzado, encontrando-se estes sumariados na Tabela 2.2.

Rodi e Srivatsa (1980) estudaram um jato com um escoamento cruzado através do método das diferenças finitas para razões de velocidade pequenas ( $V_j/U_0 = 0.1$  e  $0.3$ ). Os resultados produzidos estão de acordo com os resultados experimentais obtidos por outros autores para  $V_j/U_0 = 0.1$ , no entanto, existem discrepâncias para  $V_j/U_0 = 0.3$ , devido ao método de simplificação do transporte turbulento pelo modelo de viscosidade/difusividade utilizado.

Sykes et al. (1986) compararam trajetórias, campos de vorticidade e de velocidade, e energia cinética turbulenta com os resultados experimentais de outros autores para um jato circular turbulento emitido perpendicularmente a um escoamento cruzado para diferentes razões de velocidade ( $V_j/U_0 = 2, 4$  e  $8$ ). Estes concluíram que, para elevadas razões de velocidade, os anéis de vórtice iniciais são distorcidos num aparente par de vórtices em linha horizontal e para baixas razões de velocidade ( $V_j/U_0 \leq 4$ ), a componente vertical da vorticidade na fonte é importante. É também verificado que, devido a uma dominância dos termos difusivos sobre os termos de produção na equação de vorticidade, o escoamento pode ser representado por uma série de anéis de vórtice emitidos da fonte do jato.

Os autores Yuan et al. (1999) realizaram o primeiro estudo numérico tridimensional com *Large Eddy Simulation* (LES) de um jato perpendicular relativamente a um escoamento cruzado. As simulações foram realizadas para duas razões de velocidade ( $V_j/U_0 = 2.0$  e  $3.3$ ) e para dois números de Reynolds diferentes ( $Re = 1050$  e  $2100$ ). Os resultados das simulações foram comparados com os resultados experimentais de outros autores e a sua comparação revelou discrepâncias que podem ser atribuídas às diferenças no número de Reynolds e às condições de escoamento do jato. Estes descobriram que pequenas mudanças na condição a montante do escoamento de jato nas investigações experimentais podem ter efeitos significativos no escoamento médio. Também foram reveladas novas estruturas no escoamento num campo próximo ao jato.

Sau et al. (2004), fizeram uma investigação do desenvolvimento do escoamento de um jato com um bocal quadrado injetado perpendicularmente a um escoamento cruzado. Para tal, utilizou-se o método *Direct Numerical Simulation* (DNS) e foi possível observar que, para um jato com um bocal quadrado através de um escoamento cruzado, as instabilidades de Kelvin-Helmholtz não formam anéis de vórtice circunferenciais fechados, como acontece para o bocal circular.

Wegner et al. (2004), utilizaram LES para efetuar uma análise do efeito da inclinação do jato relativamente ao escoamento cruzado na mistura turbulenta. Investigaram-se três casos para uma razão de velocidades de  $0.5$  e para um número de Reynolds de  $20500$ : um jato injetado perpendicularmente ao escoamento cruzado e dois casos onde os jatos estão com uma inclinação de  $\pm 30^\circ$ . Através dos resultados numéricos obtidos, concluiu-se que a inclinação influencia o escoamento secundário, que por sua vez tem um efeito no processo de mistura. Verificou-se que no jato inclinado a  $120^\circ$ , ou seja, contra o escoamento cruzado, existe um alastramento da mistura mais rápido, e no jato inclinado a  $60^\circ$ , o processo de mistura é mais lento.



Tabela 2.2 : Resumo dos estudos numéricos relativos a um jato com um escoamento cruzado

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Rodi e Srivatsa (1980)	Escoamento de um jato através de um escoamento cruzado $V_j/U_0 = 0.1$ e $0.3$	Método das diferenças finitas Modelo de turbulência k- $\epsilon$	Distribuições da pressão total Pressão na parede	Para $V_j/U_0 = 0.1$ , os resultados obtidos estão de acordo com os resultados experimentais obtidos previamente por outros autores. Para $V_j/U_0 = 0.3$ , existem discrepâncias entre os resultados numéricos obtidos e os resultados experimentais de outros autores devido ao método de simplificação do transporte turbulento do modelo de viscosidade/difusividade utilizado.
Sykes, Parker e Lewellen (1986)	Estudo comparativo com resultados experimentais de outros autores de um jato circular emitido perpendicularmente a um escoamento cruzado $V_j/U_0 = 2, 4$ e $8$	Equações de Navier Stokes (incompressível)	Perfis de velocidade Distribuições de velocidade Campos de vorticidade	Para elevadas razões de velocidade, os anéis de vórtice iniciais são distorcidos num aparente par de vórtices em linha horizontal. Para baixas razões de velocidade ( $V_j/U_0 \leq 4$ ), a componente vertical da vorticidade na fonte é importante. Devido a uma dominância dos termos difusivos sobre os termos de produção na equação de vorticidade, o escoamento pode ser representado por uma série de anéis de vórtice emitidos da fonte do jato.
Yuan, Street e Ferziger (1999)	Escoamento de um jato circular perpendicular a um escoamento cruzado $V_j/U_0 = 2.0$ e $3.3$ $Re = 1050$ e $2100$ baseado em $U_0$ e $D$	LES	Contornos de vorticidade Contornos de velocidade Contornos da energia cinética turbulenta Tensões de Reynolds	Os resultados das simulações foram comparados com os resultados experimentais de outros autores e a sua comparação revelou discrepâncias que podem ser atribuídas às diferenças no número de Reynolds e às condições internas de escoamento do jato. Identificaram novas estruturas num campo próximo do JICF, tais como os vórtices na camada de corte, o par de vórtices em contra-rotação e os vórtices de esteira.

Tabela 2.2: Resumo dos estudos numéricos relativos a um jato com um escoamento cruzado (continuação)

<p>Sau e Sheu (2004)</p>	<p>Escoamento de um jato com um bocal quadrado injetado perpendicularmente a um escoamento cruzado.</p> <p><math>V_j/U_0 = 2.5</math> e <math>3.5</math>  <math>Re = 225</math> e <math>300</math> baseado em <math>U_0</math> e <math>D</math></p>	<p>DNS</p>	<p>Linhas de corrente          Contornos de vorticidade          Vetores de velocidade          Contornos de pressão dinâmica          Perfis de velocidade</p>	<p>As instabilidades de Kelvin-Helmholtz não formam anéis de vórtice circunferenciais fechados, como acontece para o bocal circular.</p>
<p>Wegner, Huai e Sadiki (2004)</p>	<p>Estudo do efeito da inclinação do jato relativamente ao escoamento cruzado na mistura turbulenta</p> <p><math>D = 50</math> mm  <math>V_j = 6.95</math> m/s  <math>U_0 = 13.9</math> m/s  <math>V_j/U_0 = 0.5</math>  <math>Re = 20500</math> baseado em <math>V_j</math> e <math>D</math>  <math>\beta = 60^\circ, 90^\circ</math> e <math>120^\circ</math></p>	<p>LES</p>	<p>Perfis de velocidade média          Perfil da energia cinética turbulenta          Perfil da fração média de mistura e suas flutuações          Fração de mistura média</p>	<p>A inclinação influencia o escoamento secundário, que por sua vez tem um efeito no processo de mistura.          No jato inclinado a <math>120^\circ</math>, ou seja, contra o escoamento cruzado, existe um alastramento da mistura mais rápido, e no jato inclinado a <math>60^\circ</math>, o processo de mistura é mais lento. Assim, do ponto de vista da engenharia, é benéfico injetar um jato inclinado contra a direção do escoamento cruzado.</p>
<p>Muppidi e Mahesh (2005)</p>	<p>Estudo das trajetórias de um jato circular injetado perpendicularmente num escoamento cruzado para dois perfis de velocidade diferentes</p> <p><math>V_j/U_0 = 1.52</math> e <math>5.7</math>  <math>Re = 1500</math>, para <math>V_j/U_0 = 1.52</math> baseado em <math>V_j</math> e <math>D</math>  <math>Re = 5000</math>, para <math>V_j/U_0 = 5.7</math> baseado em <math>V_j</math> e <math>D</math>          Consideram-se duas espessuras de camada limite para o escoamento cruzado:  <math>\delta_{80\%} = 1.32d</math> e <math>\delta_{80\%} = 0.44d</math></p>	<p>DNS</p>	<p>Contornos da velocidade          Trajetória do jato          Linhas de corrente          Contornos do coeficiente de pressão</p>	<p>A trajetória depende do perfil de velocidades do jato e da espessura da camada limite do escoamento cruzado.          Existe uma maior penetração do jato com o aumento da espessura da camada limite do escoamento cruzado.</p>

Tabela 2.2: Resumo dos estudos numéricos relativos a um jato com um escoamento cruzado (continuação)

<p>Li, Zhu, Yuan, Guo e Liu (2007)</p>	<p>Escoamento de um, de dois e de quatro jatos tandem com um escoamento cruzado</p> <p><math>D = 10 \text{ mm}</math>  <math>S/D = 5</math>  <math>U_0 = 2 \text{ m/s}</math>  <math>V_j/U_0 = 4 \text{ e } 6</math></p>	<p>Modelo de turbulência k-<math>\epsilon</math> Realizable</p>	<p>Contornos de vorticidade</p>	<p>A posição onde ocorrem os vórtices na camada de corte é superior com o aumento da razão de velocidades.</p> <p>No esquema de múltiplos jatos não existe a forma de vórtice em ferradura, e à medida que existe a quebra dos vórtices na camada de corte, há a formação do CVP.</p>
<p>Xiao, Tang, Liang e Zhang (2011)</p>	<p>Escoamento de um jato e de quatro jatos "tandem" com um escoamento cruzado</p> <p><math>D = 10 \text{ mm}</math>  <math>S/D = 5</math>  <math>2.38 \leq V_j/U_0 \leq 17.88</math></p>	<p>Modelo de turbulência k-<math>\epsilon</math> Realizable</p>	<p>Trajetória do jato          Decaimento da velocidade média na trajetória do jato          Campos da velocidade          Energia cinética turbulenta</p>	<p>As trajetórias para um jato singular são superiores às trajetórias para o primeiro jato do conjunto dos quatro jatos tandem para a mesma razão de velocidades.</p> <p>O decaimento da velocidade para o jato singular é similar ao decaimento para o primeiro jato do conjunto dos quatro jatos tandem.</p> <p>A energia cinética turbulenta para o jato singular tem uma distribuição idêntica à distribuição do primeiro jato do conjunto dos quatro jatos tandem.</p>

Tabela 2.2: Resumo dos estudos numéricos relativos a um jato com um escoamento cruzado (continuação)

<p>Radhouane, Mahjoub, Mhiri, Paiec e Bournot (2011)</p>	<p>Escoamento de dois jatos de fumo tandem, elípticos, inclinados, não reativos e para alturas, dos jatos relativamente ao solo, diferentes através de um escoamento cruzado.</p> <p><math>D = 10 \text{ mm}</math>  <math>S/D = 3</math>  <math>T_j = 403.15 \text{ K}</math>  <math>T_0 = 303.15 \text{ K}</math>  <math>\theta = 60^\circ</math>  <math>h</math> (altura do jato relativamente ao solo) = 0, 1, 2, 3 e 5 cm</p>	<p>Método dos volumes finitos</p>	<p>Distribuição da fração de massa de <math>\text{CO}_2</math> entre os bocais dos jatos</p>	<p>A observação da distribuição da fração de massa de <math>\text{CO}_2</math>, demonstra que quanto maior for a altura com que o jato é descarregado, menor é a mistura deste com o escoamento cruzado.</p>
<p>Prause, Emmi, Noll e Aigner (2016)</p>	<p>Modelação da mistura turbulenta para um jato através de um escoamento cruzado com baixas razões de velocidade para validar o modelo SAS</p> <p><math>D = 50 \text{ mm}</math>  <math>V_j = 27.8 \text{ m/s}</math>  <math>V_j / U_0 = 0.5</math> e 2  <math>Re = 20500</math>, para <math>V_j / U_0 = 0.5</math> baseado em <math>D</math> e <math>V_j</math>  <math>Re = 82000</math>, para <math>V_j / U_0 = 2</math>  <math>\delta_0 = 0.278D</math></p>	<p>RANS, URANS, SAS com modelo de turbulência <math>k-\omega</math> SST          LES - WALE          Cold-wire probe para medir flutuações da temperatura e cross-wire probe para medir campos de velocidade</p>	<p>Fração média de mistura          Fração de mistura instantânea          Perfis da velocidade média          Perfis da fração média de mistura          Perfis da energia cinética turbulenta média</p>	<p>O modelo LES consegue captar eficazmente os campos de mistura, e os resultados obtidos estão em concordância com os resultados experimentais obtidos de outros autores.</p> <p>A abordagem RANS subdimensiona a mistura turbulenta nos vórtices tridimensionais da camada de corte e na zona de recirculação. Na zona de recirculação, o modelo SAS segue o modelo de RANS para a razão de velocidades de 0.5. Para uma razão de velocidades de 2, o modelo SAS segue o modelo LES e constitui uma alternativa para prever a estabilização da chama.</p>

Muppidi e Mahesh (2005), realizaram um estudo da trajetória e dos campos de escoamento de jatos circulares com a presença de um escoamento cruzado através de DNS. As simulações foram efetuadas para razões de velocidade de 1.52 e 5.7, razões essas observadas no arrefecimento por filme e nos jatos de diluição na câmara de combustão de uma turbina a gás, para números de Reynolds de 1500 e 5000, respetivamente, recorrendo a dois perfis de velocidade do jato diferentes (parabólico e médio-turbulento) e para duas espessuras de camada limite do escoamento cruzado diferentes. Através das simulações, verificou-se que a trajetória depende do perfil de velocidades do jato e da espessura da camada limite do escoamento cruzado.

S. H. Li et al. (2007) investigaram os campos de vórtices para um jato, dois jatos em configuração tandem e quatro jatos em configuração tandem, com um escoamento cruzado para razões de velocidade de 4 e 6. Recorrendo ao modelo de turbulência  $k-\epsilon$  Realizable e ao algoritmo SIMPLEC, os autores puderam concluir que: a posição, onde ocorrem os vórtices na camada de corte, é superior com o aumento da razão de velocidades, no esquema de múltiplos jatos não existe a forma de vórtice em ferradura e que há medida que existe a quebra dos vórtices na camada de corte, há a formação do CVP.

Os autores Xiao et al. (2011) estudaram o escoamento de um e de quatro jatos em configuração tandem com um escoamento cruzado para diferentes razões de velocidade ( $2.38 \leq V_j/U_0 \leq 17.88$ ). Para tal, utilizou-se o modelo de turbulência  $k-\epsilon$  Realizable com o algoritmo SIMPLEC. Neste estudo concluiu-se que para uma mesma razão de velocidades, as trajetórias para um jato singular são superiores às trajetórias para o primeiro jato do conjunto dos quatro jatos tandem, o decaimento da velocidade para o jato singular é similar ao decaimento para o primeiro jato do conjunto dos quatro jatos tandem e a energia cinética turbulenta para o jato singular tem uma distribuição idêntica à distribuição do primeiro jato do conjunto dos quatro jatos tandem.

Utilizando o método dos volumes finitos, em conjunto com um sistema de malha não uniforme, os autores Radhouane et al. (2011) simularam dois jatos de fumo tandem, elípticos, inclinados, não reativos, e para alturas, dos jatos relativamente ao solo, diferentes, através de um escoamento cruzado, para se estudar o processo de dispersão. Com este estudo, os autores puderam concluir, que quanto maior for a altura com que um jato é descarregado, menor é a mistura deste com o escoamento cruzado.

Mais recentemente, Prause et al. (2016), utilizando *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS), *Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes* (URANS), *Large Eddy Simulation* (LES) e os resultados experimentais de Andreopoulos e Rodi (1984) e Andreopoulos (1983) fez-se uma validação do modelo *Scale-Adaptive Simulation* (SAS) para um jato com um escoamento cruzado para razões de velocidade de 0.5 e 2, que visava avaliar a aplicação da pré-mistura de combustível em sistemas de combustão. Para ambas as razões de velocidade, o modelo SAS segue o modelo RANS na camada de corte a montante, bem como na zona de recirculação para a razão de velocidades de 0.5. Para a razão de velocidades de 2, o modelo SAS reproduz a zona de recirculação com a qualidade do modelo LES.

### 2.2.3. Estudos Experimentais e Numéricos

Na Tabela 2.3, encontram-se sumariados alguns dos trabalhos experimentais e numéricos relativos a jatos com a presença de um escoamento cruzado.

Tabela 2.3 : Resumo dos estudos experimentais e numéricos relativos a um jato com um escoamento cruzado

Autores	Experiências	Técnicas	Resultados	Comentários
Chochua (2000)	<p>Escoamento de um jato circular injetado perpendicularmente a um escoamento cruzado</p> <p><math>D = 8.38 \text{ mm}</math>  <math>U_0 = 10.67 \text{ m/s}</math>  <math>J = 34.2 \text{ e } 42.2</math></p>	<p>Experimental:</p> <p>Numérico: modelo de turbulência k-<math>\epsilon</math></p>	<p>Trajatórias do jato</p> <p>Perfis de velocidade</p> <p>Contornos de velocidade e suas flutuações</p>	<p>A trajetória do jato e a velocidade média de saída deste são razoavelmente bem capturadas pelo modelo de turbulência k-<math>\epsilon</math>, no entanto, sobredimensiona a intensidade turbulenta à saída do jato.</p> <p>O esquema <i>Second-Order Upwind</i> fornece melhores resultados do que o esquema <i>First-Order Upwind</i> a prever o perfil de velocidades à saída do jato.</p>
Jia, Sundén, Miron e Léger (2005)	<p>Investigação do arrefecimento por filme de um jato com um escoamento cruzado sujeito a vários ângulos de inclinação diferentes</p> <p><math>1.5 \leq V_j \leq 13</math>  <math>1 \leq U_0 \leq 3</math>  <math>\beta = 30^\circ, 60^\circ \text{ e } 90^\circ</math>  <math>2 \leq M \leq 9</math></p>	<p>Experimental:</p> <p>LDV</p> <p>Numérico: k-<math>\omega</math> (SST) RSTM k-<math>\epsilon</math> V2F</p>	<p>Distribuições da velocidade e suas flutuações</p> <p>Distribuição das tensões de Reynolds</p> <p>Distribuição da energia cinética</p> <p>Distribuição da temperatura</p> <p>Distribuição das tensões de corte turbulentas</p>	<p>O modelo numérico RSTM fornece uma melhor previsão das distribuições da velocidade e suas flutuações. O modelo V2F e o modelo SST fornecem essencialmente os mesmos resultados. O modelo V2F fornece uma boa previsão das componentes da velocidade média. Existe uma boa concordância para as tensões de corte turbulentas entre este modelo e LDV, excepto o perfil da energia cinética turbulenta que não foi fielmente captado com este modelo.</p> <p>Existe uma bolha de recirculação a jusante do jato para ângulos de inclinação superiores a <math>40^\circ</math>, mas quando o ângulo de inclinação é de <math>30^\circ</math>, a bolha desaparece, o que está de acordo com os resultados experimentais.</p> <p>A razão de injeção tem um grande impacto na dimensão da bolha de recirculação e consequente na eficácia do arrefecimento por filme.</p>

Tabela 2.3: Resumo dos estudos experimentais e numéricos relativos a um jato com um escoamento cruzado (continuação)

<p>Li, Murugap-pan, Gut-mark e Vallet (2006)</p>	<p>Escoamento de um jato circular turbulento através de um escoamento cruzado para seis casos diferentes de bocais circulares</p> <p>Bocal 1:  <math>D = 10.922 \text{ mm}</math>  <math>V_j = 84.46 \text{ m/s}</math>  <math>Re = 63165</math>                  Caso 1:  <math>U_0 = 10 \text{ m/s}</math>, <math>M = 8.45</math></p> <p>Caso 2:  <math>U_0 = 17 \text{ m/s}</math>, <math>M = 4.97</math></p> <p>Bocal 2:  <math>D = 9.398 \text{ mm}</math>  <math>V_j = 114.89 \text{ m/s}</math>  <math>Re = 73917</math>                  Caso 3:  <math>U_0 = 13.6 \text{ m/s}</math>, <math>M = 8.38</math></p> <p>Caso 4:  <math>U_0 = 23 \text{ m/s}</math>, <math>M = 4.96</math></p> <p>Bocal 3:  <math>D = 4.648 \text{ mm}</math>  <math>V_j = 188.09 \text{ m/s}</math>  <math>Re = 59849</math>                  Caso 5:  <math>U_0 = 22 \text{ m/s}</math>, <math>M = 8.55</math></p> <p>Caso 6:  <math>U_0 = 35 \text{ m/s}</math>, <math>M = 5.37</math></p>	<p>Experimental:                  2D PIV</p> <p>Numérico:                  Modelo k-<math>\epsilon</math> para as iterações iniciais e k-<math>\epsilon</math> RNG para as sucessivas iterações</p>	<p>Contornos da velocidade média                  Trajetórias do jato                  Perfis de velocidade                  Decaimento da velocidade ao longo da trajetória                  Contornos de energia cinética turbulenta                  Contorno de pressão estática</p>	<p>Com a existência de um escoamento cruzado, um jato circular tem um maior decaimento do que um jato livre. O declive desse decaimento é 44% maior para <math>M \approx 8.5</math>, quando comparado com <math>M \approx 5</math>.</p> <p>A bolha de recirculação, que se forma a jusante do jato, aumenta de volume com o aumento do diâmetro do bocal do jato e diminui com o aumento da razão de injeção.</p> <p>O escoamento livre perto da parede é arrastado para cima pelo CVP e o escoamento acima da camada limite de parede segue a trajetória do jato e envolve-se em redor do jato. Pela análise das secções de corte ao longo da trajetória do jato, observa-se que o CVP vai crescendo em dimensão, aumentando o contacto entre o jato e o escoamento livre, o que faz aumentar a mistura entre os dois escoamentos.</p>
--	--	---	--	---

Tabela 2.3: Resumo dos estudos experimentais e numéricos relativos a um jato com um escoamento cruzado (continuação)

<p>Salewski, Stankovic, Fuchs e Gutmark (2006)</p>	<p>Estudo das estruturas de escoamento e o mecanismo de mistura de um jato com um escoamento cruzado</p> <p><math>D = 5 \text{ mm}</math>  <math>L/D = 20</math>  <math>V_j / U_0 = 4</math>  <math>U_0 = 0.1 \text{ m/s}</math>  <math>Re = 10000</math></p>	<p>Experimental: PIV</p> <p>Numérico: LES</p>	<p>Trajatórias</p> <p>Perfis de velocidade e suas flutuações</p> <p>Perfis das tensões de corte turbulentas</p>	<p>Os bocais com uma maior RA, têm uma trajetória inferior e CVP's médios mais fracos comparado com os bocais circulares. Este facto pode ser explicado por uma maior ondulação do CVP, uma vez que existem flutuações mais intensas para este tipo de bocais. Assim, bocais com uma menor RA têm trajetórias superiores e CVP's médios mais intensos, uma vez que as flutuações na esteira e a ondulação do CVP é menos intensa.</p> <p>A introdução de vórtices de pequena escala leva a que haja CVP's médios mais fracos devido a flutuações intensas na esteira do bocal.</p> <p>A turbulência perto da parede é maior para o bocal quadrado orientado a <math>90^\circ</math> relativamente ao escoamento cruzado.</p>
<p>Salewski, Stankovic e Fuchs (2008)</p>	<p>Estudo das estruturas de escoamento e o mecanismo de mistura de um jato com um escoamento cruzado</p> <p><math>D = 5 \text{ mm}</math>  <math>L/D = 20</math>  <math>V_j / U_0 = 4</math>  <math>U_0 = 0.1 \text{ m/s}</math>  <math>Re = 10000</math></p>	<p>Experimental: PIV LIF</p> <p>Numérico: LES</p>	<p>Trajatórias</p> <p>Perfis de velocidade</p> <p>Distribuições do escalar passivo</p> <p>Fluxo escalar turbulento</p> <p>Perfil do escalar médio e suas flutuações</p> <p>Parâmetro de mistura</p>	<p>A forma do bocal tem um impacto profundo na distribuição do escalar passivo, podendo esta distribuição ter um ou dois máximos nos planos de secção reta.</p> <p>A performance de mistura é melhorada para bocais com uma alta RA, rombudos e que introduzem vórtices de pequena escala no escoamento. Os bocais com um máximo na distribuição escalar, como o bocal elíptico com uma alta RA e o bocal quadrado, têm uma melhor mistura. Regiões de transporte contra gradiente estão contidas no campo de escoamento.</p>



Tabela 2.3: Resumo dos estudos experimentais e numéricos relativos a um jato com um escoamento cruzado (continuação)

<p>Radhouane, Bournot, Mahjoub, Mhiri e Palec (2009)</p>	<p>Estudo do campo de escoamento de dois jatos gêmeos elípticos e inclinados com um escoamento cruzado</p> <p><math>D = 10 \text{ mm}</math>  <math>\beta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ \text{ e } 90^\circ</math>  <math>U_0 = 2.5 \text{ m/s}</math>  <math>Re = 3333</math>  <math>Pr = 0.69</math>  <math>Sc = 0.74</math>  <math>T_j = 403.15 \text{ K}</math>  <math>T_0 = 303.15 \text{ K}</math></p>	<p>Experimental: PIV</p> <p>Numérico: Equações de Navier-Stokes com o método dos volumes finitos e recorrendo ao modelo RSM</p>	<p>Visualizações do escoamento Distribuições da velocidade Contornos de velocidade Distribuições de tensões de corte</p>	<p>Os autores comprovaram a eficácia do modelo RSM em prever as tensões de corte que são fundamentais na melhoria da mistura. Com o aumento do ângulo de inclinação dos jatos, estes têm um maior impulso inicial para se expandirem e misturarem com o escoamento ambiente, resultando numa melhoria na mistura. Por sua vez, diminuindo o ângulo de inclinação faz com que os jatos tenham uma expansão horizontal, uma vez que estes são rapidamente defletidos pelo escoamento cruzado, o que causa o aprisionamento destes perto do local de injeção.</p>
<p>Kalifa. Habli, Saïd, Bournot e Palec (2014)</p>	<p>Escoamento gerado pela interação de um jato circular com um escoamento cruzado</p> <p><math>D = 10 \text{ mm}</math>  <math>V_j = 7 \text{ e } 9 \text{ m/s}</math>, sendo respetivamente  <math>Re = 4487 \text{ e } 5769</math>  <math>V_j/U_0 = 1.4, 1 \text{ e } 0.7</math></p>	<p>Experimental: PIV Anemometria de fio quente para medir o perfil de velocidades do escoamento cruzado e o perfil da camada limite</p> <p>Numérico: RSM</p>	<p>Visualização do escoamento Perfis de velocidade Linhas de corrente</p>	<p>Para uma razão de velocidades superior à unidade, o escoamento do jato tem uma maior penetração no escoamento cruzado. Para uma razão de velocidades inferior à unidade, as estruturas de escoamento de jato são erodidas pela camada limite, antes da interação ser possível. Os autores também demonstraram que a estrutura de escoamento entre um jato e um escoamento cruzado é bastante complexa. Esta complexidade é expressa por três estruturas dominantes: os vórtices em ferradura, localizado nas proximidades da saída do jato, os vórtices de esteira que se desenvolvem entre a parede e o lado a jusante do jato e o par de vórtices em contra-rotação, que é criado na camada limite superior do jato.</p>

Chochua et al. (2000), estudaram o campo de escoamento de um jato circular injetado perpendicularmente a um escoamento cruzado e o regime de escoamento estudado corresponde ao encontrado num queimador de uma turbina a gás. Para tal, utilizou-se o modelo de turbulência  $k-\epsilon$  para capturar o campo de escoamento de um jato circular injetado perpendicularmente a um escoamento cruzado. Os autores verificaram que a trajetória do jato e a velocidade média de saída deste são razoavelmente bem capturadas por este modelo, no entanto, sobredimensiona a intensidade turbulenta à saída do jato. Também verificaram que o esquema *Second-Order Upwind* fornece melhores resultados do que o esquema *First-Order Upwind* a prever o perfil de velocidades à saída do jato.

Os autores Jia et al. (2005) investigaram um jato com um bocal em slot através de um escoamento cruzado, que é relevante no arrefecimento por filme nos sistemas de combustão das turbinas a gás. Neste estudo, utilizando-se três modelos de turbulência, nomeadamente o modelo  $k-\omega$  *Shear Stress Transport* (SST), o modelo  $k-\epsilon$  V2F e o modelo *Reynolds Stress Transport Model* (RSTM), comparou-se o campo de escoamento e as tensões de Reynolds com a técnica experimental *Laser Doppler Velocimetry* (LDV) para três inclinações de jato diferentes, 30°, 60° e 90°, e para uma razão de injeção entre 2 e 9. Os resultados obtidos demonstraram que existe uma bolha de recirculação a jusante do jato para ângulos de inclinação superiores a 40°, mas para ângulos de inclinação inferiores a 30°, a bolha desaparece, o que está de acordo com os resultados experimentais. Foi verificado também que a razão de injeção tem um grande impacto na dimensão da bolha de recirculação e na eficácia do arrefecimento por filme.

Z. Li et al. (2006) estudaram a penetração, mistura e estruturas turbulentas de um jato circular injetado perpendicularmente a um escoamento cruzado para seis casos diferentes de bocais circulares, incluindo três diâmetros de jato diferentes e duas razões de injeção distintas. Os autores estudaram o efeito da razão de injeção na trajetória do jato e avaliaram a energia cinética turbulenta e o decaimento da velocidade na linha central do jato. O estudo foi feito recorrendo ao modelo  $k-\epsilon$  standard para as iterações iniciais e ao modelo  $k-\epsilon$  RNG para as sucessivas iterações, sendo os resultados numéricos validados com resultados experimentais obtidos pela técnica PIV. Dos resultados obtidos, foi possível verificar que a bolha de recirculação, que se forma a jusante do jato, aumenta de volume com o aumento do diâmetro do bocal do jato e diminui com o aumento da razão de injeção. Também se verificou que o escoamento livre perto da parede é arrastado para cima pelo CVP e o escoamento acima da camada limite de parede segue a trajetória do jato e envolve-se em redor do jato. Pela análise das secções de corte ao longo da trajetória do jato, observa-se que o CVP vai crescendo em dimensão, aumentando o contacto entre o jato e o escoamento livre, o que faz aumentar a mistura entre os dois escoamentos.

Salewski et al. (2006) e Salewski et al. (2008) estudaram as estruturas de escoamento e o mecanismo de mistura de um JICF através de uma dupla abordagem: experimental e numérica. Para tal, utilizou-se as técnicas PIV e LIF e na parte numérica utilizou-se o LES. O estudo focou-se na possibilidade de influenciar o escoamento pela forma do bocal do jato, sendo estudadas cinco formas de bocal (circular, elíptico com baixa RA, elíptico com alta RA, quadrado e diamante). Na referência Salewski et al. (2006), observou-se que os bocais com uma maior RA têm uma trajetória inferior e CVP's mais ondulatórios, consequência de maiores níveis de turbulência do que os bocais com uma menor RA. No estudo de Salewski et al. (2008), verificou-se que a mistura é melhorada para bocais com uma alta RA, sendo que a forma do bocal tem um impacto profundo na distribuição do escalar passivo, podendo esta distribuição ter um ou dois máximos nos planos de secção reta. Também se demonstrou que as regiões de transporte contra gradiente estão contidas no campo de escoamento.

No trabalho de Radhouane et al. (2009), recorrendo ao modelo *Reynolds Stress Model* (RSM) e à técnica experimental PIV, estudou-se o campo de escoamento resultante da interação de dois jatos

gêmeos elípticos e inclinados com um escoamento cruzado e demonstrou-se o papel extremamente importante do ângulo inicial de inclinação dos jatos e a sua interação, bem como a mistura com o escoamento cruzado. Os autores comprovaram a eficácia do modelo RSM em prever as tensões de corte, que são fundamentais na melhoria da mistura e verificaram que com o aumento do ângulo de inclinação dos jatos, estes têm um maior impulso inicial para expandirem e misturarem-se com o escoamento ambiente. Por sua vez, diminuindo o ângulo de inclinação, faz com que os jatos tenham uma expansão horizontal, uma vez que estes são rapidamente defletidos pelo escoamento cruzado, o que causa o aprisionamento destes perto do local de injeção.

Mais recentemente, Kalifa et al. (2014) estudaram o escoamento gerado pela interação de um jato circular e o escoamento cruzado para diferentes razões de velocidade recorrendo às técnicas PIV e ao modelo numérico RSM. Verificaram que para uma razão de velocidades superior à unidade, o escoamento do jato tem uma maior penetração no escoamento cruzado. Contudo, quando a razão de velocidades é inferior à unidade, as estruturas de escoamento de jato são erodidas pela camada limite antes da interação ser possível. Os autores também demonstraram que a estrutura de escoamento entre um jato e um escoamento cruzado é bastante complexa. Esta complexidade é expressa por três estruturas dominantes: os vórtices em ferradura, localizado nas proximidades da saída do jato, os vórtices de esteira que se desenvolvem entre a parede e o lado a jusante do jato e o par de vórtices em contra-rotação que é criado na camada limite superior do jato.



## 3 Modelo Computacional

### 3.1. Introdução

A evolução contínua da tecnologia tem tido um forte impacto na modelação numérica na dinâmica dos fluidos, com uma crescente utilização da Dinâmica dos Fluidos Computacional, ou CFD (do inglês, *Computational Fluid Dynamics*). Esta permite prever e analisar sistemas que englobam escoamentos de fluidos, transferências de calor e de massa ou fenómenos associados, como reações químicas, através da resolução numérica das equações que regem esses fenómenos, reproduzindo trabalho experimental numericamente através de um ambiente virtual de escoamento. Assim, com o uso do poder computacional, consegue-se estudar situações perigosas na vida real, com um menor custo na fase de projeto e com um menor tempo de operação, oferecendo diversas vantagens em comparação à análise e investigação experimental, como é apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 : Comparação entre CFD e Métodos Experimentais

	<b>Simulação Numérica (CFD)</b>	<b>Métodos Experimentais</b>
Custo	Baixo	Normalmente alto
Perigo	Nenhum	Possibilidade de haver perigo
Adaptabilidade ao mudar as condições teste	Fácil	Normalmente difícil
Tempo de obtenção de resultados	Rápido	Normalmente lento
Repetição	Permite	Por vezes não permite

Todos os códigos CFD são estruturados em torno de algoritmos numéricos para lidar com problemas de escoamento de fluidos. Estes algoritmos contêm três elementos principais, entre os quais: (i) Pré-Processamento, (ii) Solver e (iii) Pós-Processamento. Em seguida, examina-se a função de cada um destes elementos no contexto de código CFD.

#### 3.1.1. Pré-Processamento

O Pré-Processamento consiste no input de um problema de escoamento para o programa de CFD por meio de uma interface gráfica de fácil utilização e a transformação desse input numa forma adequada para ser utilizada pelo solver. Esta fase envolve as ações seguintes:

- Definição da geometria da região de interesse: o domínio computacional;
- Geração da malha;
- Seleção dos fenómenos físicos e químicos que necessitam de ser modelados;
- Definição das propriedades do fluido;

- Definição adequada das condições de fronteira nas células que coincidem com os limites do domínio.

A criação da geometria e do respetivo domínio computacional, a geração da malha e a atribuição das condições de fronteira é realizada recorrendo ao software *ANSYS Fluent*.

Segundo Versteeg et al. (1995), mais de 50% do tempo de um projeto CFD é gasto na definição do domínio computacional e na geração da malha. Uma vez criado o modelo sem lacunas, procede-se à criação da malha respetiva, subdividindo-se o domínio em volumes de controlo ou elementos, sendo esta a fase mais crítica do projeto. A forma como a malha deve ser refinada depende do problema em causa, sendo que, em geral, quanto maior for o número de células, maior é a precisão na solução obtida. Tanto a precisão de uma solução, como o custo da mesma e o seu tempo de cálculo, dependem do grau de refinamento da malha. Como tal, deve-se efetuar um equilíbrio entre o número de elementos da malha e o tempo de cálculo da solução.

A atribuição das condições de fronteira, a definição das propriedades do fluido e das condições iniciais são de uma importância extrema na simulação numérica, uma vez que as equações diferenciais que são resolvidas para se obter a solução, dependem do acerto destas.

### 3.1.2. Solver

Existem três métodos distintos de implementação de soluções numéricas: método das diferenças finitas, método dos elementos finitos e método espectral. Para a maior parte dos códigos CFD bem estabelecidos, no qual se insere o *ANSYS Fluent*, utiliza-se o método dos volumes finitos. De acordo com Versteeg et al. (1995), os métodos numéricos que estão na base do solver consistem nos passos seguintes:

- Integração das equações que governam o escoamento em todos os volumes de controlo (finitos) do domínio;
- Discretização - conversão das equações integrais resultantes num sistema de equações algébricas;
- Solução das equações algébricas através de um método iterativo.

### 3.1.3. Pós- Processamento

No pós-processamento realiza-se uma das partes principais da simulação numérica, que é a interpretação dos resultados obtidos. Para isso, o *ANSYS Fluent* está munido de uma panóplia de ferramentas de visualização de dados, que incluem:

- Visualização da geometria e da malha;
- Gráficos de vetores;
- Linhas e gráficos de contornos;
- Gráficos de superfície 2D e 3D;
- Visualização de trajetória de partículas;
- Manipulação das imagens (translação, rotação, escala, etc).

## 3.2. Malha

A construção da malha é a fase mais crítica de um projeto de CFD e que consome a maior parte do tempo. A sua correta ou incorreta construção influencia por completo os resultados de uma simulação numérica, pelo que deve ser elaborada criteriosamente.

### 3.2.1. Tipos de Malha

As malhas podem ser classificadas quanto à sua dimensão e ao tipo de elementos presente. Como na natureza os escoamentos são complexos, os domínios de fluxo de escoamento são subdivididos em domínios menores como triângulos e quadriláteros, que são utilizados para problemas 2D e hexaedros e tetraedros para problemas 3D (ver Figura 3.1), sendo que as equações são resolvidas para cada uma das células.

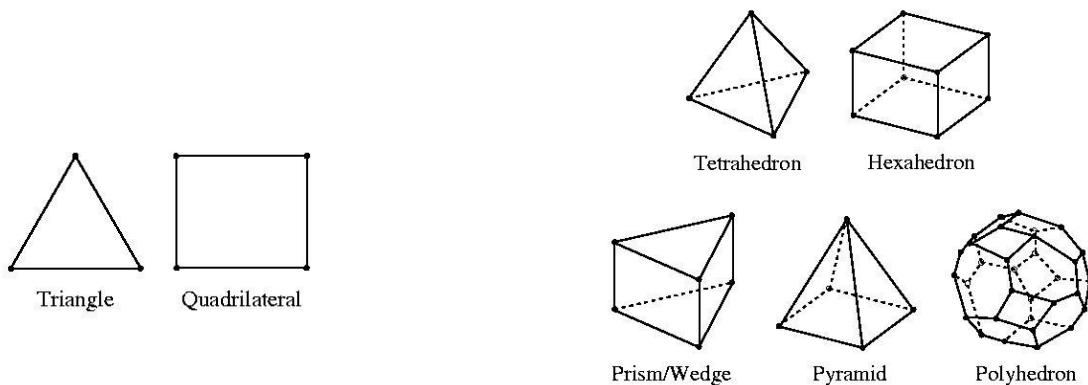


Figura 3.1: Geometrias primitivas

A geração da malha a partir destas geometrias pode ser de três tipos diferentes: malha estruturada, malha não-estruturada e malha híbrida (ver Figura 3.2). A malha estruturada é caracterizada por uma conectividade regular que pode ser expressa por um arranjo bi ou tridimensional, por um elevado controlo e qualidade, por reduzir o tempo de simulação e o poder computacional necessário. No entanto, esta malha é difícil de obter para geometrias complexas e depende muito da capacidade do utilizador em criá-la.

A malha não-estruturada é caracterizada por uma conectividade irregular e não é expressa por um arranjo bi ou tridimensional na memória do computador. Isto faz com que o solver possa utilizar qualquer elemento, uma vez que os elementos do domínio de cálculo têm uma forma arbitrária e a ordem dos elementos não tem um padrão fixo. Comparando com as malhas estruturadas, é necessário um maior poder computacional, mas é bem-adaptada para geometrias complexas.

A malha híbrida, como o próprio nome indica, é uma malha que contém partes do domínio estruturadas e não-estruturadas.



Figura 3.2: Tipos de Malha

### 3.2.2. Qualidade da Malha

A qualidade da malha desempenha um papel extremamente importante na estabilidade e qualidade dos resultados. Uma solução é tanto mais precisa, quanto maior for o refinamento da malha, mas isso acarreta um maior custo computacional e um maior tempo de simulação. Como referido anteriormente, a sua correta construção influencia os resultados de uma simulação, pelo que deve ser elaborada com critério.

Independentemente do tipo de malha utilizada no domínio de cálculo, verificar a qualidade da malha é essencial. De acordo com o Ansys Fluent Theory Guide (2021), esta pode ser avaliada pelos seguintes parâmetros:

- *Skewness* – Parâmetro adimensional que mede a distorção de um elemento e demonstra o quão aproximado a estrutura da malha é da sua forma ideal. Este parâmetro varia entre 0 e 1, sendo que valores próximos de 0 são excelentes e próximos de 1 são péssimos.

$$Skewness = \max \left[ \frac{\theta_{\max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{\min}}{\theta_e} \right] \quad (3.1)$$

Onde  $\theta_{\max}$  é o maior ângulo interno da célula,  $\theta_{\min}$  é o menor ângulo interno da célula e  $\theta_e$  é o ângulo de uma célula equiangular

- *Orthogonality* – Parâmetro adimensional que avalia a qualidade ortogonal de um elemento e relaciona o quão próximo estão os ângulos entre as células vizinhas de serem equiangulares. Este parâmetro varia entre 0 e 1, onde 1 corresponde ao ótimo e 0 corresponde ao péssimo.

$$Orthogonality = \min \left[ \frac{A_i f_i}{|A_i| |f_i|}, \frac{A_i c_i}{|A_i| |c_i|} \right] \quad (3.2)$$

Onde  $A_i$  é a área da célula  $i$ ,  $f_i$  é o vetor que vai desde o centróide da célula ao centro da aresta da célula  $i$  vizinha e  $c_i$  é o vetor que vai desde o centroide da célula ao centróide da célula  $i$  vizinha.

- *Aspect Ratio* – Parâmetro adimensional que é definido pela razão entre a distância maior e a distância menor da célula.



$$RA = \frac{A}{B} \quad (3.3)$$

Onde A é a distância maior da célula e B é a distância menor da célula.

### 3.3. Tratamento da Malha Junto de Paredes

Escoamentos turbulentos são significativamente afetados pela presença de paredes, onde as regiões afetadas pela viscosidade têm grandes gradientes nas soluções variáveis. Uma representação correta da região de parede, através de uma função de parede, permite prever com precisão o escoamento próximo da parede na camada limite, que é uma região fina próxima à parede, onde o gradiente de velocidade na direção normal à parede é alto.

De acordo com Yunus A. Çengel e Cimbala (2013), o escoamento turbulento ao longo de uma parede, consiste em três regiões distintas, que são caracterizadas pela sua distância à parede, tal como representado na Figura 3.3. A camada muito fina perto da parede onde os efeitos viscosos são dominantes, é a chamada subcamada viscosa. Adjacente à subcamada viscosa encontra-se a buffer layer, em que os efeitos turbulentos tornam-se significativos, no entanto, o escoamento é ainda dominado pelo efeito viscoso. Acima da buffer layer, encontra-se a overlap layer, também chamada transition layer, em que os efeitos turbulentos são ainda mais significativos, mas ainda não dominantes. Por fim, a turbulente layer é a parte remanescente do escoamento, em que os efeitos turbulentos são dominantes face aos efeitos viscosos.

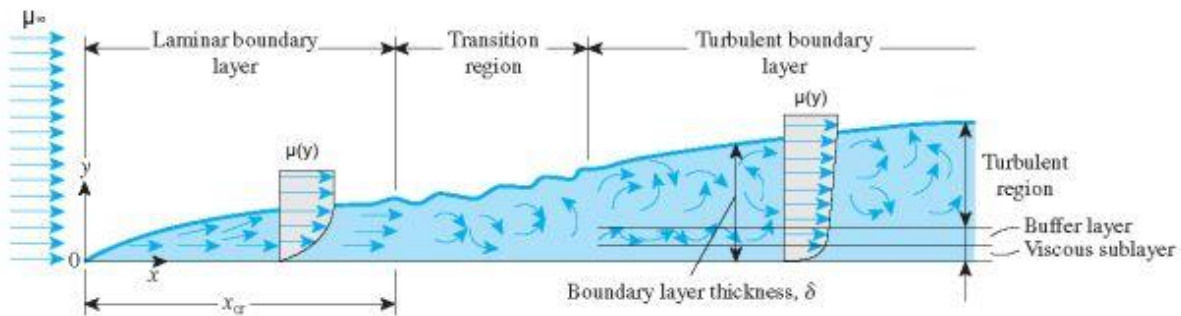


Figura 3.3: Divisão do escoamento perto da parede

Para caracterizar as várias regiões da camada limite, no que diz respeito à predominância dos efeitos viscosos ou turbulentos, recorre-se ao parâmetro  $y^+$ , que é a distância à parede adimensional, dado pela equação seguinte:

$$y^+ = \frac{y \times u_\tau}{\nu} \quad (3.4)$$

Onde  $u_\tau$  é a velocidade de atrito,  $y$  é a distância absoluta da parede e  $\nu$  é a viscosidade cinemática.

Por sua vez, a velocidade de atrito é dada por:

$$u_{\tau} = \sqrt{\frac{\tau_{\omega}}{\rho}} \quad (3.5)$$

Onde  $\tau_{\omega}$  é a tensão de corte na parede e  $\rho$  é a massa volúmica.

Com

$$\tau_{\omega} = \rho \nu \frac{du}{dy} \quad (3.6)$$

Como dito anteriormente, o desenvolvimento da camada limite junto à parede consiste em três regiões distintas:

Subcamada viscosa ( $y^+ < 5$ )

Na subcamada viscosa, os efeitos viscosos são dominantes, sendo as tensões de Reynolds negligenciáveis. O perfil de velocidades nesta camada é aproximadamente linear:

$$u^+ = y^+ \quad (3.7)$$

Zona de Transição ( $5 < y^+ < 30$ )

Nesta região, há simultaneamente efeitos viscosos e efeitos turbulentos no escoamento. As tensões de corte viscosas e turbulentas têm uma magnitude similar e sendo ambas complexas, o perfil de velocidades não é bem definido e as funções de parede evitam o primeiro centro da célula localizado nesta região.

Região logarítmica ( $y^+ > 30$ )

Na região logarítmica, os efeitos turbulentos são predominantes no escoamento e o perfil de velocidades é proporcional ao logaritmo da distância  $y$ . Isto é expresso através da Equação 3.8:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B \quad (3.8)$$

Sendo a constante de Kármán  $\kappa \approx 0.41$  e a constante  $B \approx 5.1$

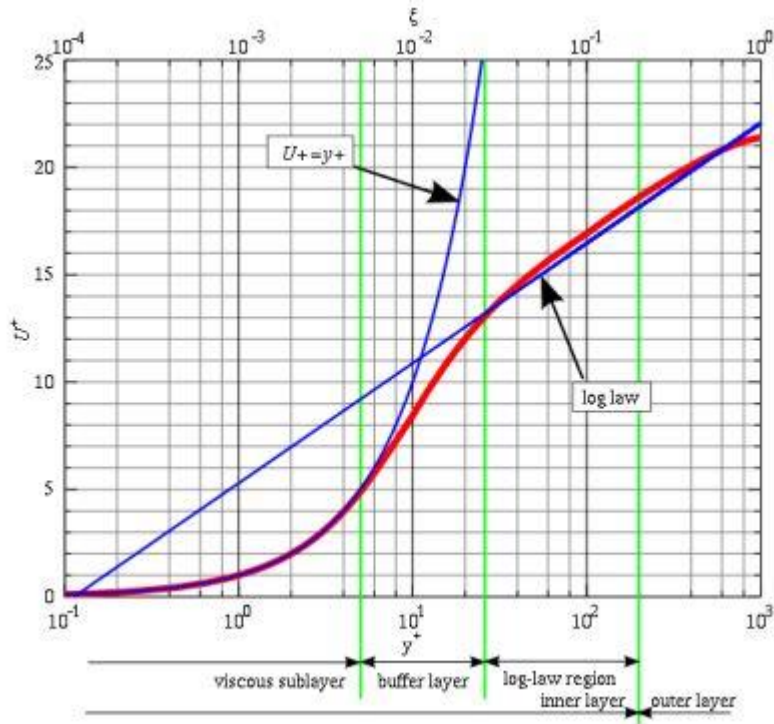


Figura 3.4: Lei de Parede

### 3.4. Equações Fundamentais

Neste capítulo são apresentadas as equações fundamentais que regem o comportamento dos fluidos. Essas equações são a equação da conservação da massa, de movimento e de energia. Para escoamentos em que exista permuta de calor ou efeitos de compressibilidade são resolvidas as três equações. No entanto, se não houver essa permuta nem efeitos de compressibilidade, como é o caso, são apenas resolvidas as equações de conservação de massa e de movimento.

#### 3.4.1. Equação da Conservação da Massa

Todas as equações diferenciais básicas podem ser deduzidas considerando-se um volume de controlo elementar ou um sistema elementar. Escolhendo um volume de controlo infinitesimal fixo ( $dx, dy, dz$ ), a lei da conservação da massa no volume de controlo expressa que o fluxo líquido de massa que atravessa a superfície de controlo é igual à taxa de variação de massa no interior do volume de controlo. Este balanço é expresso através da equação 3.9.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \tag{3.9}$$

Ou na forma mais compacta

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.10)$$

Como o fluido de estudo é considerado incompressível, a equação pode ser reescrita como

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.11)$$

### 3.4.2. Equação da Conservação da Quantidade de Movimento

A equação do balanço da quantidade de movimento é obtida aplicando a segunda lei de Newton a uma partícula de fluido de massa  $dm$ . De acordo com a segunda lei de Newton, a taxa de variação da quantidade de movimento de uma partícula de fluido é igual ao somatório das forças que atuam sobre a partícula de fluido. Isto é traduzido pela equação 3.12.

$$dm \frac{D\vec{V}}{Dt} = \sum d\vec{F} \quad (3.12)$$

Por sua vez, as forças externas que atuam sobre uma partícula de fluido podem ser de dois tipos: forças de superfície e forças de campo. As forças de superfície, ou de contacto  $\vec{f}_s$  podem ser decompostas em duas componentes: forças de pressão e forças viscosas. As forças de campo,  $\vec{f}_c$  podem ser descritas como forças aplicadas num corpo por outro à distância, sem a necessidade de contacto, como no caso das forças de superfície. Nestas incluem-se a força gravítica, a força eletromagnética e a força nuclear.

O estado de tensão num elemento de fluido é definido em função da pressão e de 9 tensões viscosas. Considerando um elemento de fluido e fazendo um balanço da quantidade de movimento para fluidos incompressíveis, resulta para a direção genérica  $i$ , o seguinte:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{u_k}{x_k} \delta_{ij} \right) \right] \quad (3.13)$$

Onde  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido,  $u_i$  é a componente da velocidade na direção  $i$ ,  $u_j$  é a componente da velocidade na direção  $j$ ,  $u_k$  é a componente da velocidade na direção  $k$ , e  $\delta_{ij}$  é o delta de Kronecker.

### 3.5. Modelo de Turbulência

A turbulência é um fenómeno extremamente importante, em que os escoamentos são caracterizados por oscilações dos campos de velocidade. Essas oscilações ao transportar quantidades de momento e energia, fazem com que essas quantidades flutuem também. Uma vez que as oscilações podem ser de pequena escala e de alta frequência, simular todas as flutuações para efetuar cálculos práticos na engenharia é muito dispendioso computacionalmente, pelo que as equações são alteradas, retirando as pequenas escalas destas, tornando-as menos dispendiosas de resolver. Contudo, nas equações modificadas introduzem-se variáveis adicionais desconhecidas, pelo que são necessários modelos de turbulência para determinar essas variáveis.

No presente estudo é utilizado o modelo de turbulência  $k$ - $\varepsilon$  Realizable, que é um desenvolvimento relativamente recente, proposto por Shih et al. (1995). Este modelo é um modelo de duas equações baseado na viscosidade turbulenta.

A energia cinética turbulenta ( $k$ ) e a taxa de dissipação turbulenta ( $\varepsilon$ ) são obtidas a partir das equações de transporte 3.14 e 3.15, respetivamente:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.14)$$

e

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + \\ & C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\text{Onde } C_1 = \max \left[ 0.43; \frac{\eta}{\eta + 5} \right]; \eta = S \frac{k}{\varepsilon}; S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

Nestas equações,  $G_k$  representa a geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade média,  $G_b$  é a geração de energia cinética turbulenta devido à flutuabilidade,  $Y_M$  representa a contribuição da dilatação de flutuabilidade na turbulência compressível para a taxa de dissipação geral,  $C_2$  e  $C_1$  são constantes,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  são os números de Prandtl turbulentos para  $k$  e  $\varepsilon$ , respetivamente e  $S_k$  e  $S_\varepsilon$  são os termos fonte definidos pelo utilizador.

Como noutros modelos  $k$ - $\varepsilon$ , a viscosidade turbulenta  $\mu_t$ , é obtida a partir da equação seguinte:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.16)$$

Onde

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k U^*}{\varepsilon}} \quad (3.17)$$

Com

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}} \quad (3.18)$$

e

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (3.19)$$

$$\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (3.20)$$

Onde  $\bar{\Omega}_{ij}$  é o tensor da taxa média de rotação visualizado num referencial móvel com velocidade angular  $\omega_k$ . As constantes  $A_0$  e  $A_s$  tomam os seguintes valores:

$$A_0 = 4.04, A_s = \sqrt{6} \cos \varphi$$

Onde,

$$\varphi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W), \quad W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\bar{s}^3}, \quad \bar{s} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

As constantes do modelo  $C_2$ ,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  foram estabelecidas para garantir que o modelo tem um bom desempenho para determinados escoamentos canónicos. As constantes do modelo são:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2$$

Em suma, o modelo  $k$ - $\varepsilon$  Realizable tem melhores resultados para escoamentos que envolvam rotação, camadas limite com gradientes de pressão adversos, separação e recirculação.

### 3.6. Solver

De acordo com o Ansys Fluent Theory Guide (2021), o *ANSYS Fluent* dispõe de dois métodos numéricos para resolver as equações integrais governantes para a conservação de massa e momento, e quando apropriado para a energia, e outros escalares como a turbulência e espécies químicas. Esses métodos numéricos são o *pressure-based solver* e o *density-based solver*. Em ambos os casos, é utilizado uma técnica baseada no volume de controlo, que consiste no seguinte:

- Divisão do domínio em volumes de controlo discretos, utilizando uma malha computacional;
- Integração das equações governantes nos volumes de controlo individuais para construir as equações algébricas para as variáveis dependentes discretas (desconhecidas), como a velocidade, pressão, temperatura e escalares conservativos;
- Linearização das equações discretizadas e solução do sistema de equação linear para se conseguir atualizar os valores das variáveis dependentes.

Os dois métodos numéricos empregam um processo de discretização semelhante (volume-finito), mas a abordagem utilizada para linearizar e resolver as equações discretizadas é diferente.

Como o caso de estudo é em regime de escoamento incompressível, é utilizado o *pressure-based solver*, dado que a densidade é constante.

### 3.6.1. Pressure-based Solver

O *pressure-based solver* permite a resolução dos problemas de escoamento através de um algoritmo segregado ou acoplado. No algoritmo segregado as equações são resolvidas sequencialmente, segregadas umas das outras, enquanto no algoritmo acoplado as equações são resolvidas de uma forma acoplada. Em geral, o algoritmo acoplado acelera o tempo de convergência, mas requer mais memória em relação ao algoritmo segregado.

Através do acoplamento pressão-velocidade é possível obter uma equação que nos permita conhecer a pressão, reformatando a equação da continuidade. Através do *ANSYS Fluent* (Ansys Fluent Theory Guide (2021)), é possível a escolha de quatro algoritmos de acoplamento pressão-velocidade: SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*), SIMPLEC (*SIMPLE-Consistent*), PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*) e *Coupled*. Todos os algoritmos aqui presentes, com exceção do *Coupled*, são baseados numa correção da pressão. Para problemas estacionários são geralmente utilizados os algoritmos SIMPLE e SIMPLEC, enquanto o PISO é recomendado para problemas transientes.

Dos algoritmos disponíveis, utilizou-se o SIMPLE, que é dos mais utilizados e é o algoritmo padrão do *ANSYS Fluent*. Este algoritmo utiliza uma relação entre as correções da velocidade e da pressão que força a conservação da massa para obter o campo de pressões.

### 3.6.2. Discretização

Por defeito, o *ANSYS Fluent* guarda o valor discreto de cada escalar  $\phi$  nos centros das células. No entanto, os valores da face  $\phi_f$  são necessários para os termos convectivos da equação 3.21 e têm de ser interpolados do centro das células, acompanhados utilizando um esquema “*upwind*”.

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi \cdot dV \quad (3.21)$$

Onde  $V$  é um volume de controlo arbitrário,  $\rho$  é a massa volúmica,  $\vec{v}$  é o vetor velocidade,  $\vec{A}$  é o vetor da área de superfície,  $\Gamma_\phi$  é o coeficiente de difusão para  $\phi$ ,  $\nabla \phi$  é o gradiente de  $\phi$  e  $S_\phi$  é o termo fonte para  $\phi$  por unidade de volume.

“*Upwinding*” significa que o valor da face  $\phi_f$  é derivado de quantidades a montante da célula ou relativamente à direção da velocidade normal  $v_n$ . No *ANSYS Fluent*, pode-se escolher diversos esquemas numéricos, nomeadamente o *First-Order Upwind*, *Second-order upwind*, *Power law* e *QUICK*.





## 4 Caso de estudo

Neste capítulo apresenta-se o domínio de integração do escoamento, as condições de fronteira, a malha criada, bem como os parâmetros de escoamento deste caso estudo.

### 4.1. Domínio de Integração

Nesta secção faz-se uma descrição do domínio de integração do escoamento, que para efeitos de validação tem de ser coerente com as condições de teste apresentadas em Salewski et al. (2008). Para se ter uma menor exigência de recursos computacionais, só foi modelada metade do domínio mostrado na Figura 4.1, uma vez que esta geometria apresenta um plano vertical de simetria ao longo de todo o seu comprimento. Por sua vez, o domínio de integração resultante encontra-se representado na Figura 4.2.

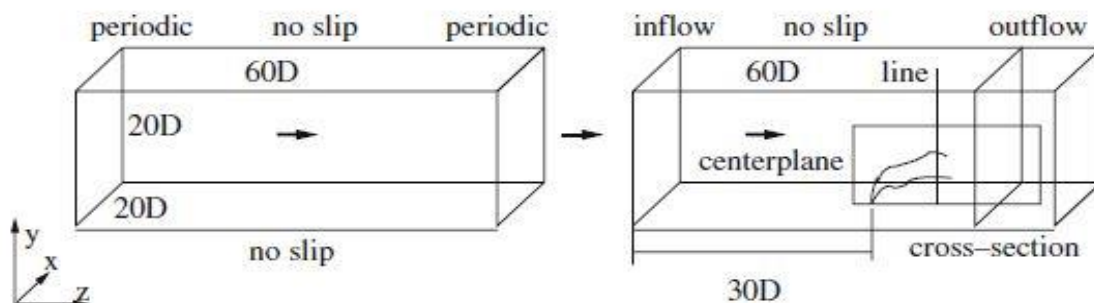


Figura 4.1: Geometria do problema (Salewski et al. (2008))

Como dito anteriormente, os bocais utilizados neste caso de estudo são o bocal circular e o bocal quadrado, tendo o bocal circular um diâmetro de 5 mm e o bocal quadrado um lado de 4.43 mm. Os bocais são adjacentes ao plano do chão e têm a mesma área.

As dimensões utilizadas para a construção do domínio computacional podem ser consultadas no anexo I.

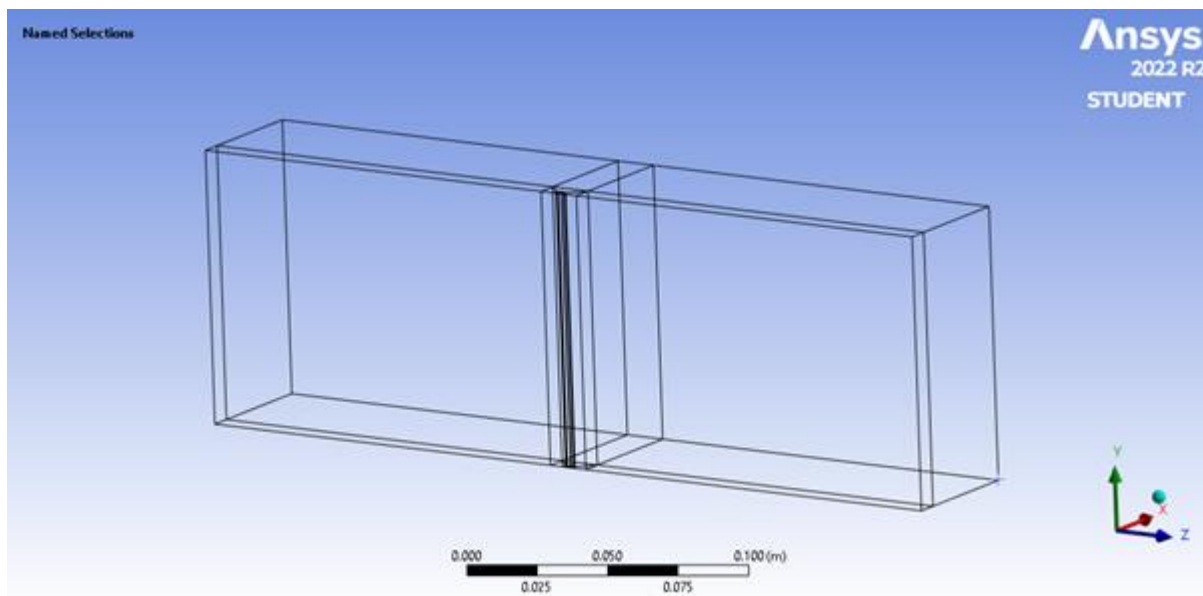


Figura 4.2: Domínio Computacional do caso de estudo

## 4.2. Condições de Fronteira

Para se representar as condições de teste presentes em Salewski et al. (2008), as condições de fronteira do caso de estudo têm de ser idênticas. As paredes inferior, superior e lateral têm atribuída uma condição de fronteira do tipo parede sem escorregamento (do inglês, *Wall no-slip*) que delimita a região de fluido do domínio e a velocidade tangencial numa partícula de fluido adjacente a esta é zero. Para além destas, existe uma fronteira lateral com a condição de simetria, uma vez que se cortou o domínio pelo plano de simetria para uma maior poupança computacional. A entrada do domínio e a entrada do jato têm a condição de *velocity-inlet*, com um perfil de velocidades uniforme na zona de *inlet* e a saída do domínio tem a condição de *outflow*. Estas condições de fronteira estão representadas na Tabela 4.1 e ilustradas na Figura 4.3.

Tabela 4.1 : Condições de fronteira

Localização	Condição de Fronteira
Entrada do canal de água ( <i>inlet</i> )	<i>Velocity inlet</i>
Saída do canal de água ( <i>outflow</i> )	<i>Outflow</i>
Entrada do jato	<i>Velocity inlet</i>
Parede inferior	<i>Wall (no-slip)</i>
Parede superior	<i>Wall (no-slip)</i>
Parede lateral	<i>Wall (no-slip)</i>
Fronteira lateral	<i>Symmetry</i>

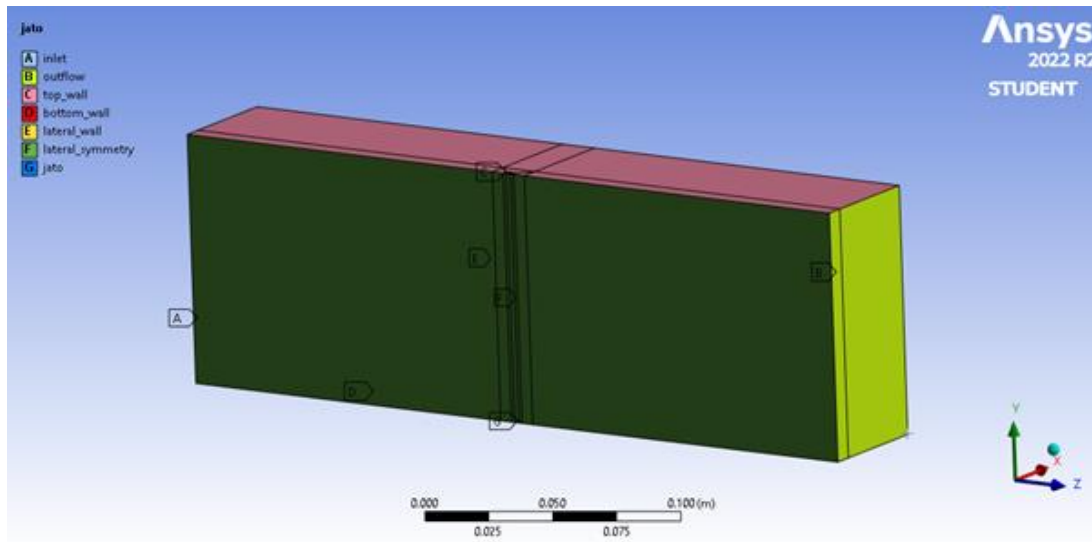


Figura 4.3: Representação das condições de fronteira do caso de estudo

### 4.3. Parâmetros de Simulação

Os parâmetros de simulação utilizados no *ANSYS Fluent* são iguais para o bocal circular e bocal quadrado.

O fluido utilizado é a água, estando indicado na Tabela 4.2 as suas características, bem como alguns parâmetros de simulação utilizados.

Tabela 4.2: Parâmetros utilizados na definição do escoamento

Massa volúmica [ $\text{kg/m}^3$ ]	998.2
Viscosidade Dinâmica [ $\text{kg/m.s}$ ]	0.001
Velocidade do jato [ $\text{m/s}$ ]	0.2, 0.4 e 0.8
Velocidade do escoamento cruzado [ $\text{m/s}$ ]	0.1
Intensidade de Turbulência (%)	5
Acoplamento Pressão Velocidade	SIMPLE
<b>Discretização espacial</b>	
Gradiente	Least Squares Cell Based
Pressão	Second Order
Momento	Second Order Upwind
Energia cinética turbulenta	First Order Upwind
Taxa de dissipação turbulenta	First Order Upwind

As razões de velocidade empregues neste caso de estudo são de  $V_j/U_0 = 2, 4$  e  $8$ , mantendo fixa a velocidade de escoamento cruzado ( $U_0 = 0.1 \text{ m/s}$ ) alterando-se apenas a velocidade do jato.

## 4.4. Geração de Malhas

Para cada geometria do bocal do jato, criou-se uma malha. Cada malha gerada tem de ter o melhor equilíbrio entre a estabilidade e o poder computacional necessário para simulá-la. Assim, adotou-se uma estruturação das malhas geradas, com um maior refinamento perto do bocal do jato (zona de interesse), visto que é onde existe a maior interação deste com o escoamento cruzado, tendo uma progressão suave a partir dessa zona, com o intuito de não haver grandes discontinuidades na malha gerada. Longe da zona de interesse, o refinamento é menor, dado que a interação do jato com o escoamento cruzado é menor, como se pode observar na Figura 4.4.

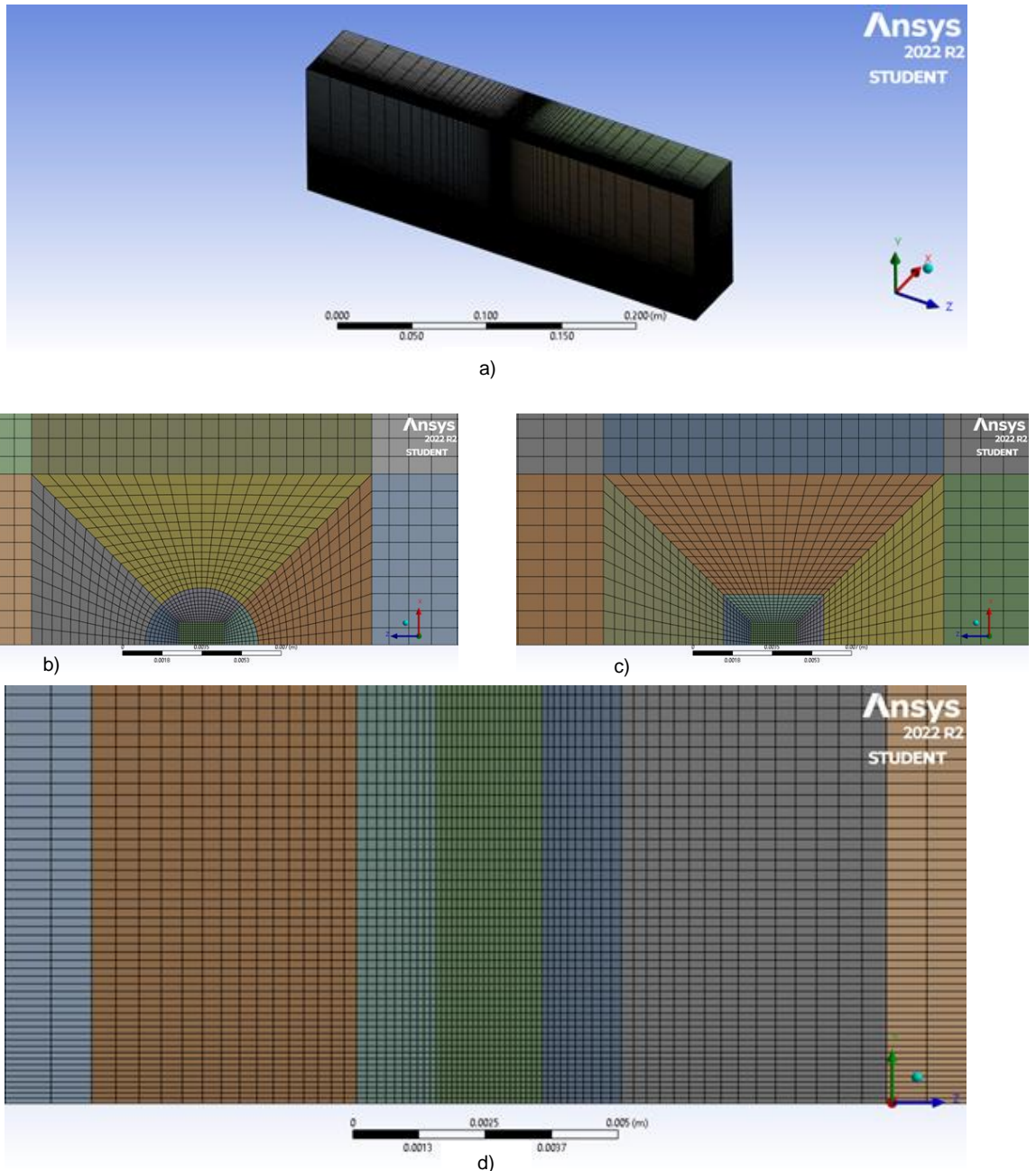


Figura 4.4 : Malha final: (a) vista geral; (b) Vista em planta do detalhe da construção na zona do bocal circular; (c) Vista em planta do detalhe da construção na zona do bocal quadrado; (d) Vista ampliada segundo X

Existindo diversas estratégias diferentes de discretização da malha no *ANSYS Fluent*, utilizou-se a ferramenta *sizing*, com a estratégia do número de divisões das arestas, consoante o número de elementos pretendido, com o tipo de *bias* e o *bias factor* associado. Essa estratégia de criação das malhas para os vários bocais pode ser consultada no anexo II.

Após a geração da malha, é necessário avaliá-la quanto à qualidade dos seus elementos, proceder à sua validação com resultados da bibliografia, e por fim proceder à sua independência, pelo que será analisado no capítulo seguinte.



## 5 Análise e Discussão de Resultados

Neste capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos nas simulações numéricas para três razões de velocidade distintas ( $V_j/U_0 = 2$ ,  $V_j/U_0 = 4$  e  $V_j/U_0 = 8$ ) e comparam-se, para efeitos de validação, com os resultados existentes na literatura (Salewski et al. (2006)). No estudo de Salewski et al. (2006), só é utilizada a razão de velocidade de  $V_j/U_0 = 4$ , pelo que a validação dos resultados numéricos será apenas para esta razão de velocidade.

### 5.1. Validação dos Resultados

A validação dos resultados é um passo fulcral em CFD e pode ser atingida comparando os resultados obtidos com os resultados existentes na literatura. Assim, consegue-se averiguar se a malha criada é a correta para o respetivo caso de estudo e se a estratégia de simulação empregue está devidamente bem trabalhada. Para a realização deste trabalho, retiraram-se os perfis de velocidade, para uma razão de velocidade de  $V_j/U_0 = 4$ , para o bocal circular e para o bocal quadrado, localizados no plano de simetria, em  $Z/D = 8$ , a jusante do jato, e em  $0 \leq Y/D \leq 10$ , e comparou-se com o perfil de velocidades, na mesma localização, em Salewski et al. (2006).

Relativamente ao bocal circular (ver Figura 5.1) constata-se que o primeiro máximo é em  $Y/D \approx 3$ , sendo de  $W/U_0 \approx 0.9$ , coincidindo com o método LES, sendo que no método experimental é de  $W/U_0 \approx 1.0$  (ver Figura 5.2). Também se verifica que o perfil de velocidades tem o mínimo em  $Y/D \approx 6$ , sendo de  $W/U_0 \approx 0.8$ , o que coincide com a análise experimental, apresentando diferenças para o método LES, pois o perfil de velocidades tem o mínimo em  $Y/D \approx 7$  e os valores são diferentes ( $W/U_0 \approx 0.6$ ). Por último, em  $Y/D = 10$ , há uma ligeira diferença para o método LES e uma maior diferença para o método experimental. Relativamente ao bocal quadrado, este tem uma análise bastante idêntica ao bocal circular, com exceção de que o mínimo no método experimental em Salewski et al. (2006) está localizado em  $Y/D \approx 6$ . Desta forma pode-se afirmar que os resultados obtidos neste caso de estudo estão validados.

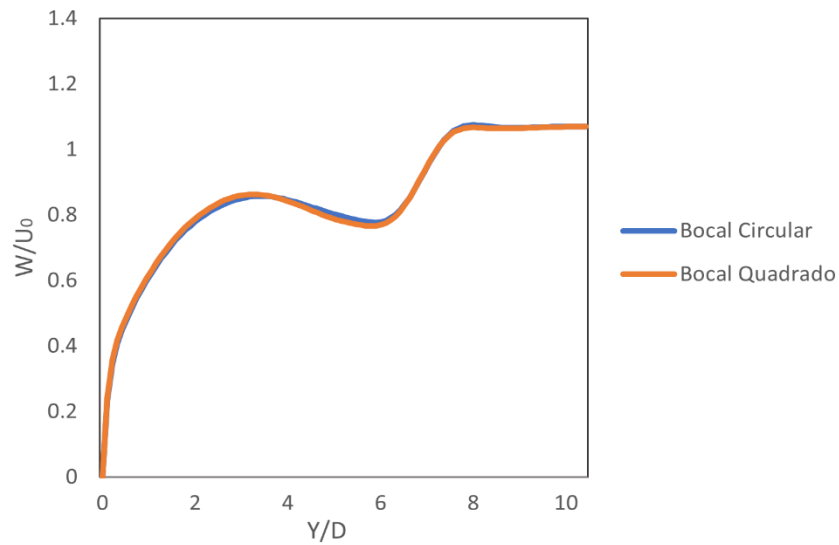


Figura 5.1: Perfil de velocidades  $w$  para os bocais circular e quadrado adimensionalizado pela velocidade de escoamento cruzado em  $Z/D=8$

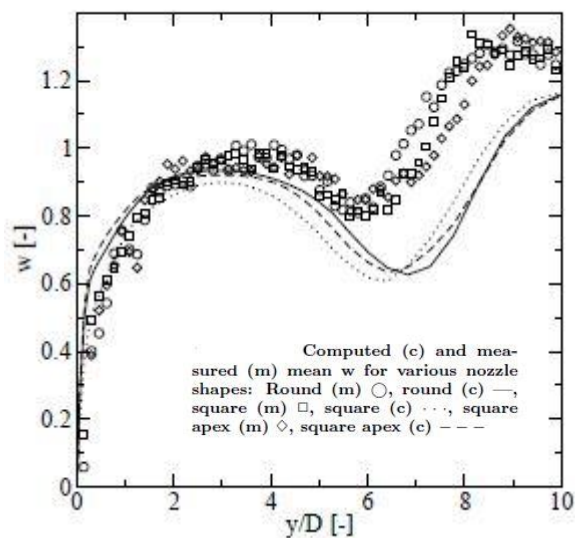


Figura 5.2: Perfil de velocidades  $w$  para os vários bocais adimensionalizado pela velocidade de escoamento cruzado em  $Z/D=8$  (Salewski et al. (2006))

## 5.2. Independência de Malha

Para que a solução seja independente da malha a utilizar, é necessário efetuar o teste de independência de malha. Para tal, procedeu-se à estratégia efetuada na validação dos resultados e retiraram-se os perfis de velocidade, para uma razão de velocidade de  $V_j/U_0 = 4$ , para o bocal circular, localizados no plano de simetria, em  $Z/D = 8$ , a jusante do jato, e em  $0 \leq Y/D \leq 10$ . Para a execução do teste,



recorreu-se a três malhas com um número de elementos crescente: malha grosseira, malha intermédia e malha refinada. Na Figura 5.3, é possível verificar que as três malhas escolhidas apresentam um comportamento semelhante ao longo de  $Y$ , excepto em  $Y/D \approx 7-8$ , em que a malha grosseira de 228000 elementos não consegue corresponder com os valores de  $w/U_0$  que as restantes apresentam. Posto isto, escolheu-se a malha intermédia de 570000 elementos, visto que tem uma boa concordância do valor da velocidade relativamente à malha refinada de 970000 elementos, para que haja precisão suficiente nos resultados obtidos, não necessitando de um poder computacional excessivo, o que resultou num tempo de simulação de aproximadamente 2 horas.

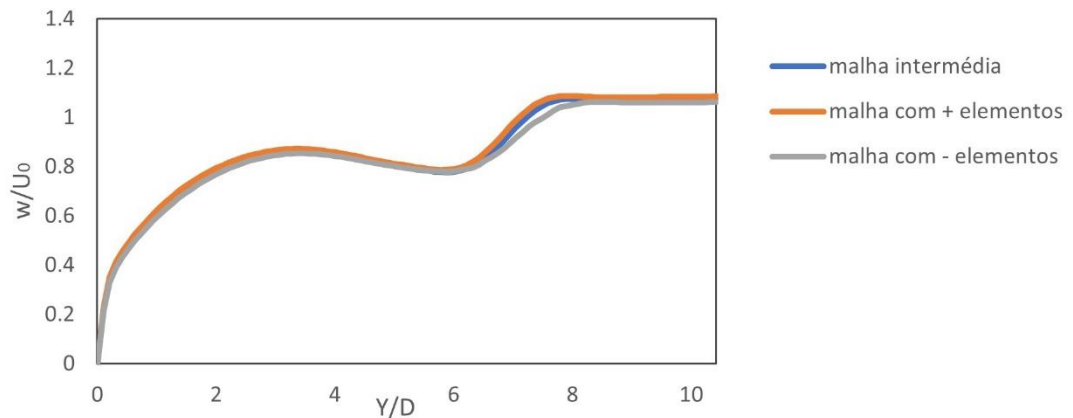


Figura 5.3: Perfil de velocidades  $w$  para o bocal circular adimensionalizado pela velocidade de escoamento cruzado em  $Z/D=8$ . Independência de Malha

### 5.3. Qualidade da Malha

Como dito anteriormente, analisar a malha relativamente à qualidade dos seus elementos é essencial, pelo que se apresenta na Tabela 5.1 os parâmetros mais importantes que a caracterizam. Analisando a Tabela 5.1, verifica-se que a malha é de excelente qualidade, uma vez que a *orthogonal quality* tem uma média próxima de 1 e a *skewness* tem uma média próxima de 0. No entanto, o parâmetro *aspect ratio* é o mais crítico, com uma média de 12.1, o que idealmente devia ser 1 para haver uma melhor qualidade nos elementos da malha.

Tabela 5.1: Qualidade da malha intermédia de 570000 elementos

	Min	Máx	Média	Standard deviation
<b>Orthogonal quality</b>	0.7183	1	0.9845	0.0427
<b>Skewness</b>	0	0.5	0.0506	0.1064
<b>Aspect Ratio</b>	1.0028	187.8	12.062	20.003

## 5.4. Campos de Velocidade e de Pressão

O estudo de outros autores como Liscinsky et al. (1996), Haven e Kurosaka (1997), Salewski et al. (2006) e Salewski et al. (2008) permitiu concluir que a forma do bocal de um jato tem um impacto na mistura deste com o escoamento cruzado, pelo que a utilização de bocais circulares ou não circulares, influencia a penetração do jato no escoamento cruzado, e assim a mistura dos dois fluidos. Deste modo, apresentam-se neste subcapítulo os campos de velocidade e de pressão para o bocal circular e para o bocal quadrado, para se poder efetuar uma análise qualitativa do escoamento de um JICF.

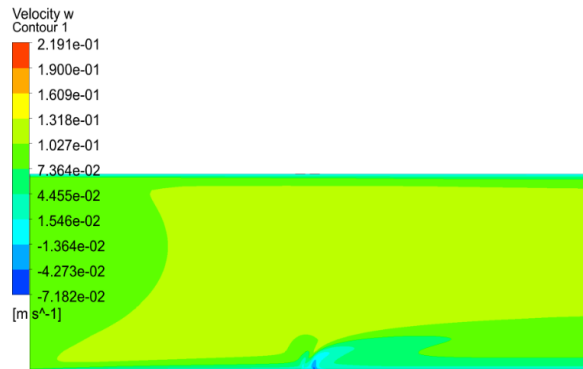
No presente estudo, de um jato através de um escoamento cruzado, é de se esperar que devido à pressão de estagnação exercida pela corrente livre, o jato seja desviado e aumente de largura à medida que se mova para jusante, havendo a montante deste uma região de alta pressão e baixa velocidade. Como o jato atua como se fosse um obstáculo relativamente ao escoamento cruzado, é expectável uma zona de recirculação a jusante deste, devido à existência de velocidades negativas, sendo esta análise verificada nas figuras que se seguem.

### 5.4.1. Bocal Circular

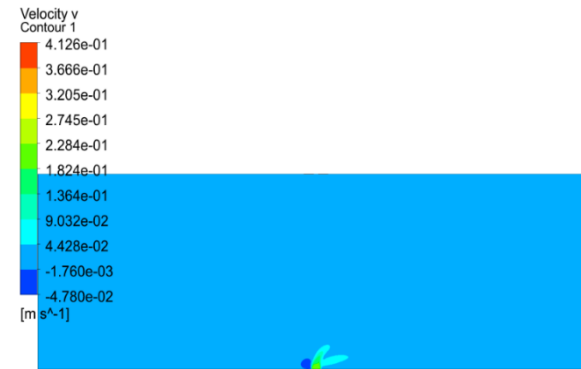
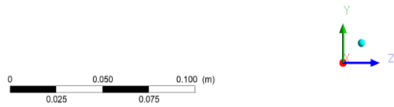
Analisando os campos de velocidade da Figura 5.4 à Figura 5.6, verifica-se que no contorno da velocidade  $W$  existem velocidades negativas à saída do jato, o que evidencia que este constitui um obstáculo ao escoamento cruzado. No contorno da velocidade  $V$ , observa-se velocidades negativas a montante do jato, dada a alta pressão existente devido ao ponto de estagnação, o que é traduzido pela existência de uma zona de recirculação. No contorno da velocidade geral, verifica-se a existência, a jusante do jato, de velocidades perto de zero, dado que o escoamento cruzado tem de contornar o jato e este é delimitado por efeitos de parede, onde a velocidade é nula.

Analisando os campos de pressão da Figura 5.4 à Figura 5.6, verifica-se claramente a existência de um ponto de estagnação a montante do jato. Também se verifica que quanto maior é a razão de velocidades, maior é a região de alta pressão a montante do jato e maior é a região de pressão negativa imediatamente a jusante do jato, gerando um escoamento reverso na esteira deste.

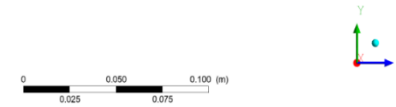
### 5.4.1.1. $V_j/U_0=2$



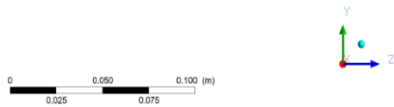
a)



b)



c)



d)

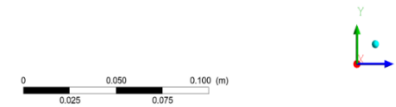
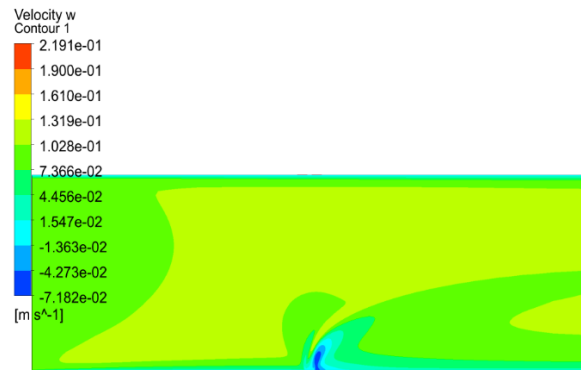
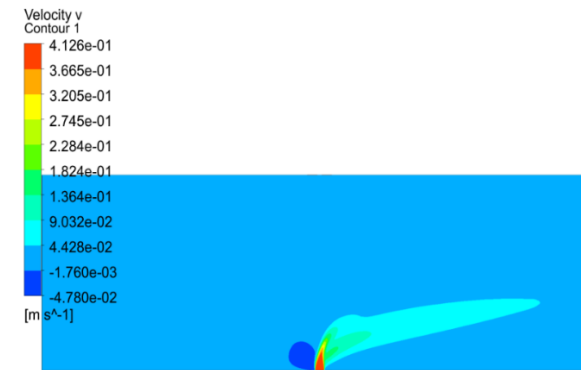
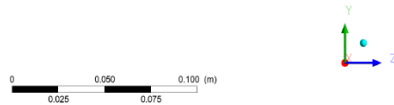


Figura 5.4: Contornos de velocidade e de pressão para o bocal circular para uma razão de velocidades de  $V_j/U_0 = 2$ : (a) Contorno W; (b) Contorno V; (c) Contorno geral da velocidade; (d) - Contorno de pressão

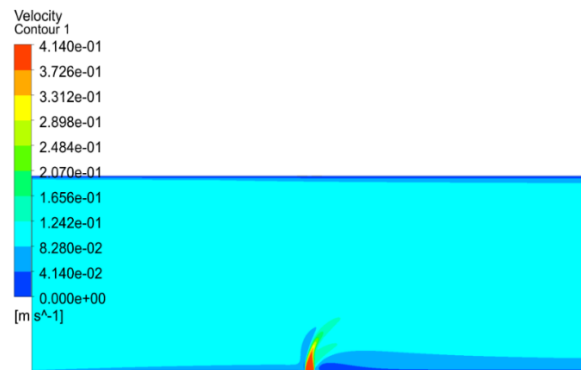
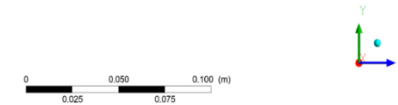
### 5.4.1.2. $V_j/U_0=4$



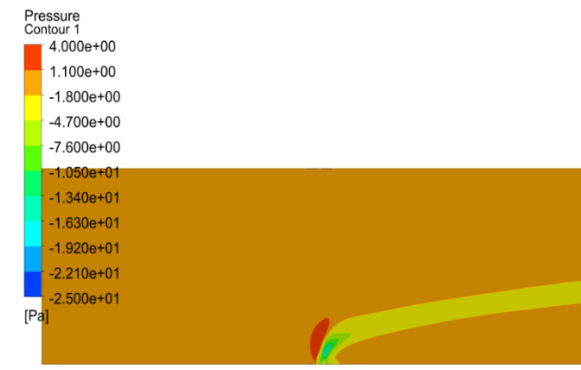
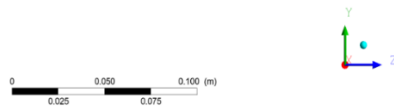
a)



b)



c)



d)

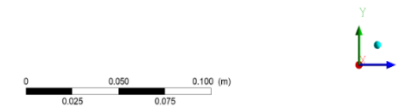
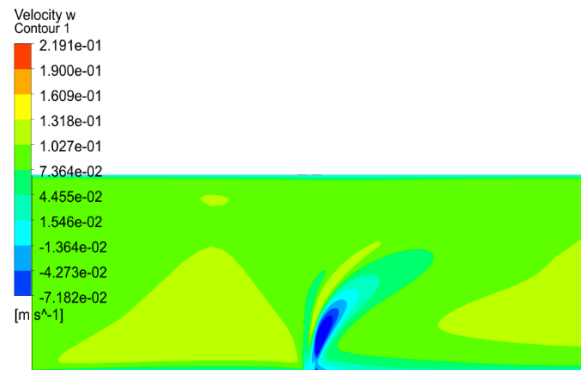
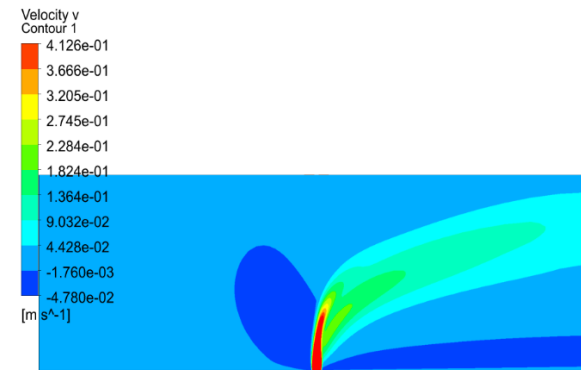
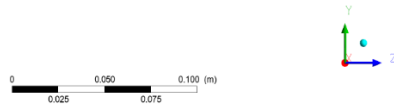


Figura 5.5: Contornos de velocidade e de pressão para o bocal circular para uma razão de velocidades de  $V_j/U_0 = 4$ : (a) Contorno W; (b) Contorno V; (c) Contorno geral da velocidade; (d) Contorno de pressão

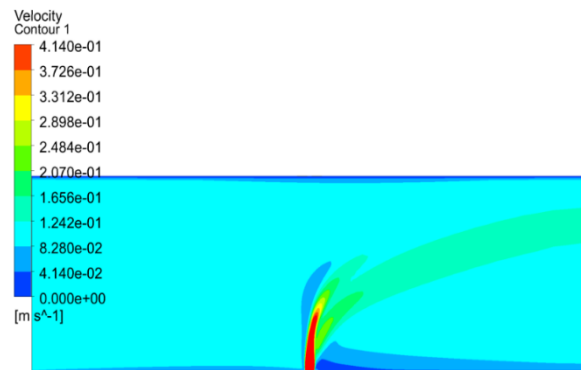
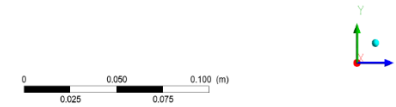
### 5.4.1.3. $V_j/U_0=8$



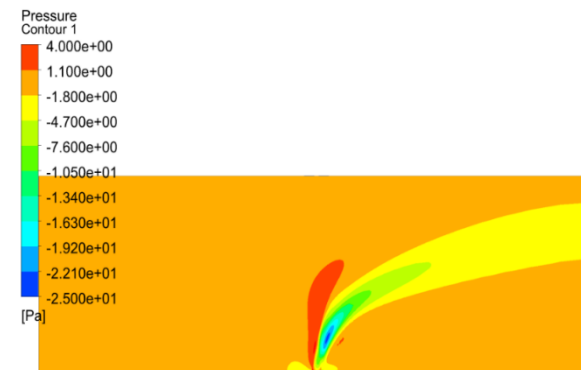
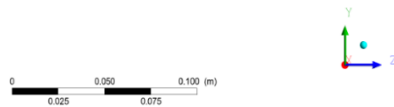
a)



b)



c)



d)

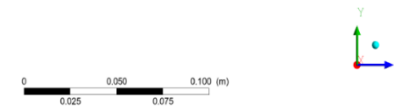


Figura 5.6: Contornos de velocidade e de pressão para o bocal circular para uma razão de velocidades de  $V_j/U_0=8$ : (a) Contorno W; (b) Contorno V; (c) Contorno geral da velocidade; (d) Contorno de pressão

## 5.4.2. Bocal Quadrado

Dada a existência de arestas vivas para este tipo de bocal, é de se esperar um maior nível de turbulência perto do bocal com a formação de maiores zonas de recirculação, e um maior arrastamento do jato pelo escoamento cruzado no campo próximo. Segundo Salewski et al. (2006), bocais com arestas vivas levam a uma melhor mistura no campo próximo ao jato, devido à introdução de vórtices de pequena escala no escoamento, mas também a uma perda mais rápida de momento do jato injetado.

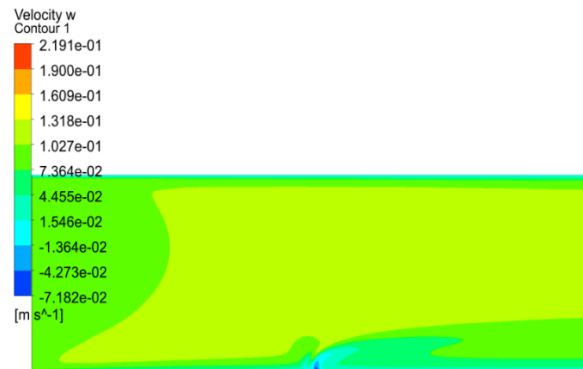
Comparando os campos de velocidade e de pressão do bocal circular e do bocal quadrado, verifica-se que para  $V_j/U_0 = 2$ , no bocal quadrado, o contorno da velocidade  $W$  tem uma maior região de velocidades negativas à saída do bocal, que se traduz pela existência de uma recirculação à saída deste. No contorno da velocidade  $V$  não se verificam grandes diferenças para esta razão de velocidade. No contorno geral da velocidade, observa-se que no bocal quadrado existem regiões de maior dimensão com a velocidade perto de zero, o que se traduz numa maior obstrução do jato ao escoamento cruzado. Por último, para o contorno da pressão, não são visíveis quaisquer diferenças.

Para  $V_j/U_0 = 4$ , no contorno da velocidade  $W$  para o bocal quadrado, verifica-se a existência de recirculações mais intensas à saída do jato, uma vez que existem velocidades negativas neste bocal que não estão presentes no bocal circular para uma mesma escala. Para o contorno da velocidade  $V$ , observa-se uma região de recirculação a jusante do jato, que não é visível para o bocal circular à mesma escala. No contorno geral da velocidade, observa-se uma maior inclinação do jato para o bocal quadrado.

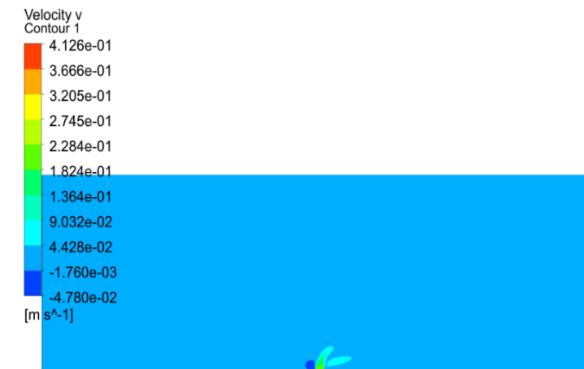
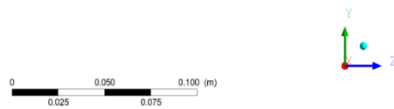
Para  $V_j/U_0 = 8$ , o contorno da velocidade  $W$  para o bocal quadrado, apresenta um maior espalhamento de velocidades negativas do que o bocal circular. No contorno da velocidade  $V$ , observa-se que o jato, no bocal quadrado, tem uma menor penetração no escoamento cruzado. Para o contorno da velocidade geral, verifica-se que o jato no bocal quadrado tem uma trajetória superior à do jato no bocal circular para distâncias afastadas deste, no entanto, próximo ao jato nota-se uma trajetória superior para o bocal circular. Por fim, para o contorno da pressão, verifica-se uma maior região de pressão negativa para o bocal quadrado.

Realizada esta análise, é possível concluir que com o aumento da razão de velocidades há uma maior penetração do jato no escoamento cruzado, e no bocal quadrado, o nível de interação entre o jato e o escoamento cruzado é superior ao existente no bocal circular.

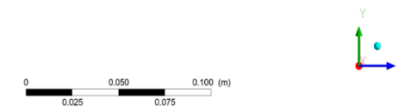
### 5.4.2.1. $V_j/U_0 = 2$



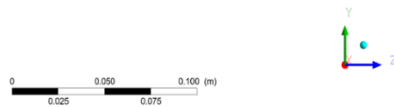
a)



b)



c)



d)

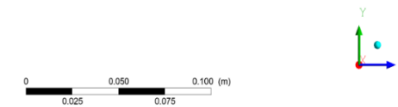
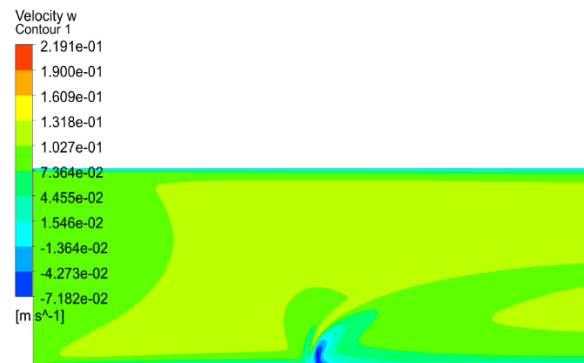
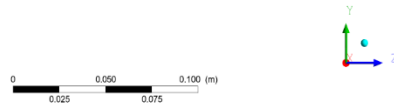


Figura 5.7: Contornos de velocidade e de pressão para o bocal circular para uma razão de velocidades de  $V_j/U_0 = 2$ : (a) Contorno W; (b) Contorno V; (c) Contorno geral da velocidade; (d) Contorno de pressão

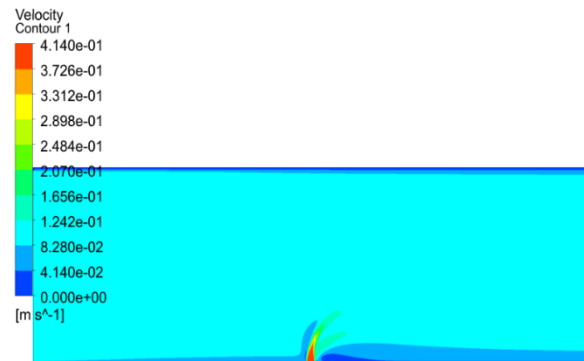
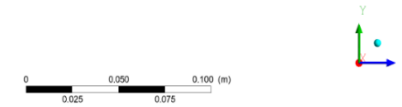
### 5.4.2.2. $V_j/U_0 = 4$



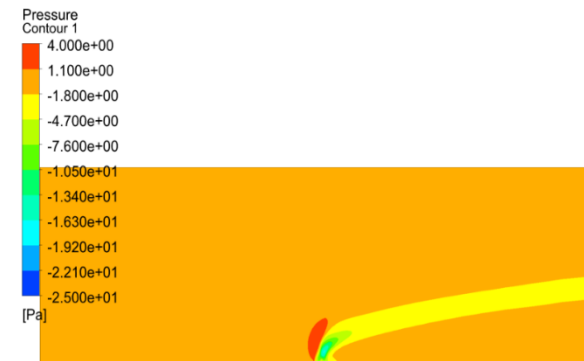
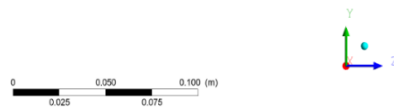
a)



b)



c)



d)

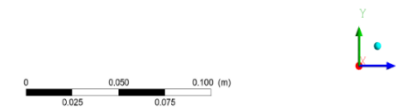
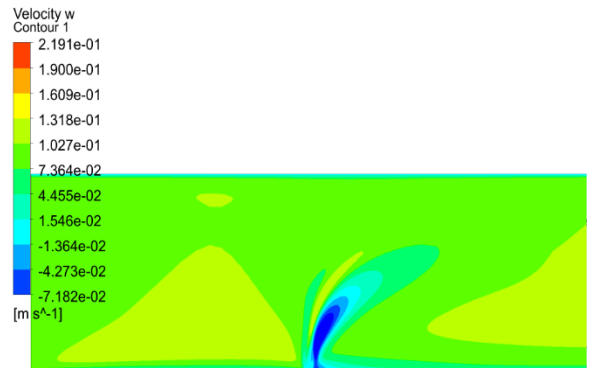


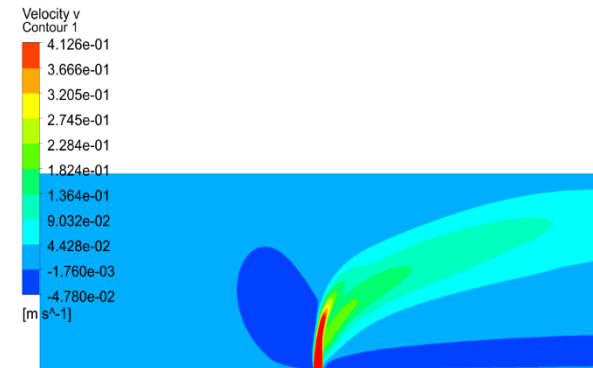
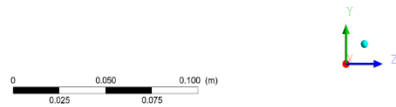
Figura 5.8: Contornos de velocidade e de pressão para o bocal circular para uma razão de velocidades de  $V_j/U_0 = 4$ : (a) Contorno W; (b) Contorno V; (c) Contorno geral da velocidade; (d) Contorno de pressão



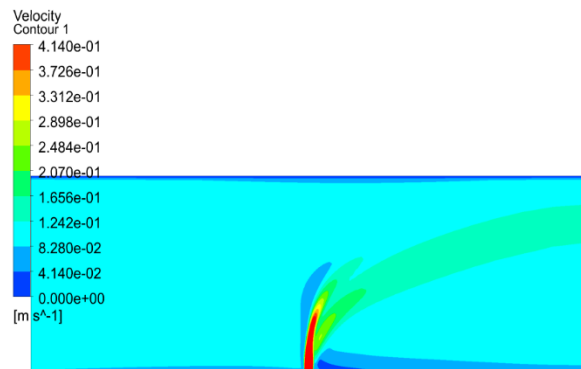
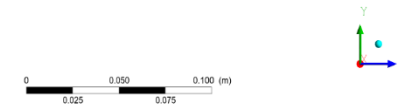
### 5.4.2.3. $V_j/U_0 = 8$



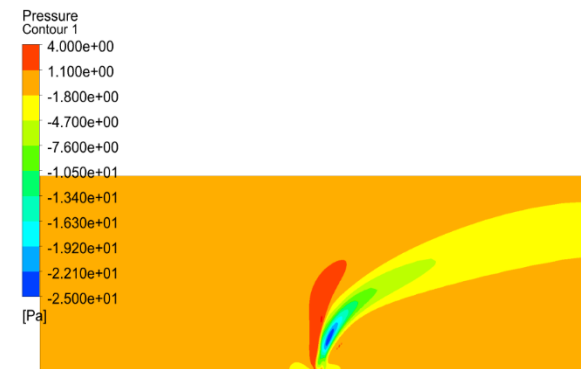
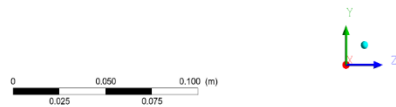
a)



b)



c)



d)

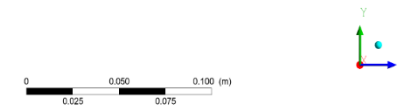


Figura 5.9: Contornos de velocidade e de pressão para o bocal circular para uma razão de velocidades de  $V_j/U_0 = 8$ : (a) Contorno W; (b) Contorno V; (c) Contorno geral da velocidade; (d) Contorno de pressão

## 5.5. Campo de escoamento

Na sequência do subcapítulo 5.4, para se poder efetuar uma análise qualitativa de um jato através de um escoamento cruzado, apresenta-se na Figura 5.10 à Figura 5.15, o escoamento a partir do jato, através das suas linhas de corrente, e avalia-se o comprimento da região do núcleo potencial, que é a região de estabilização do escoamento com uma velocidade de centralização média constante. Analisando as linhas de corrente para o bocal circular e para o bocal quadrado, observa-se claramente a evolução do jato para formar o par de vórtices em contra-rotação. Nestas figuras pode-se também verificar que, com o aumento da razão de velocidades, as linhas de corrente sobem mais antes de serem desviadas para jusante, o que indica que com o aumento da razão de velocidades, existe uma maior penetração do jato no escoamento cruzado.

Para  $V_j/U_0 = 2$ , verifica-se para o bocal circular a existência de um vórtice bem definido (ver Figura 5.10) e para o bocal quadrado a existência de dois vórtices bem definidos (ver Figura 5.13). Para esta razão de velocidades, o comprimento da região do núcleo potencial é igual para ambos os bocais.

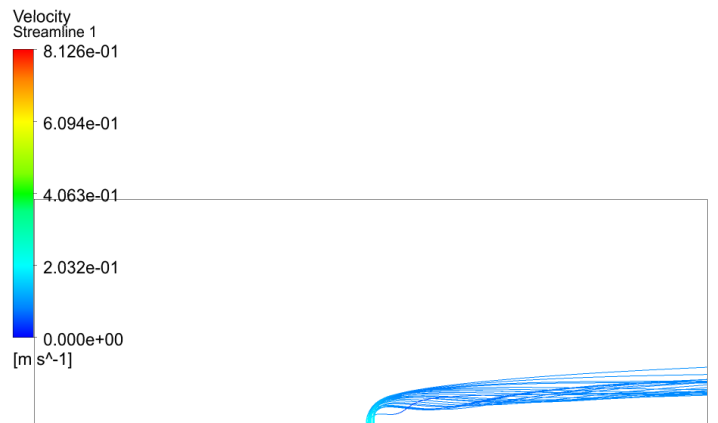
Para  $V_j/U_0 = 4$ , é possível observar para o bocal circular uma estrutura de vórtices com uma distância menor entre estes do que a existente no bocal quadrado (ver Figura 5.11), sendo que no bocal quadrado os vórtices estão mais espaçados e a uma maior altura do chão (ver Figura 5.14). Também se verifica que o comprimento do núcleo potencial para o bocal circular é de 267% superior do que o comprimento do núcleo potencial para  $V_j/U_0 = 2$ , embora a razão de velocidades tenha apenas duplicado. Para o bocal quadrado, o comprimento do núcleo potencial aumentou 261% face ao registado para  $V_j/U_0 = 2$  e é de cerca de 98% do comprimento do núcleo potencial para o bocal circular.

Por fim, para  $V_j/U_0 = 8$ , a estrutura de vórtices encontra-se muito menos compactada relativamente ao que se verifica para as outras razões de velocidade. Para o bocal circular, verifica-se que o comprimento do núcleo potencial é de 204% superior ao comprimento do núcleo potencial para  $V_j/U_0 = 4$  e de 544% superior ao comprimento do núcleo potencial para  $V_j/U_0 = 2$ . Para o bocal quadrado, o comprimento do núcleo potencial aumentou em 204%, em comparação a  $V_j/U_0 = 4$ , e de cerca de 533% em relação a  $V_j/U_0 = 2$ . Embora a razão de velocidades tenha quadruplicado, o comprimento do núcleo potencial é de cerca de cinco vezes superior para ambos os casos, sendo que ligeiramente superior para o bocal circular.

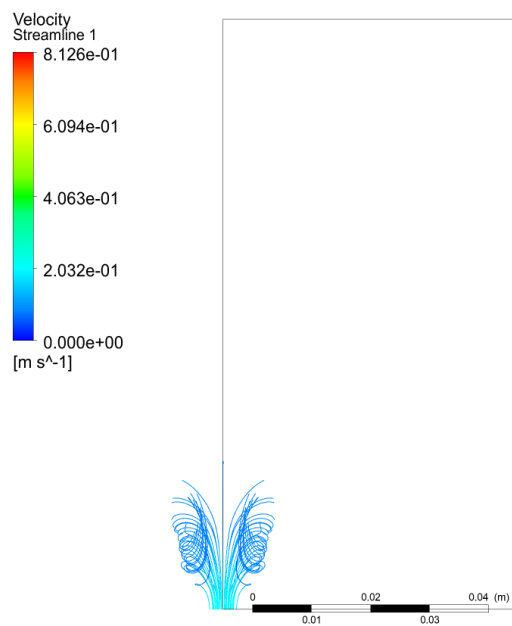
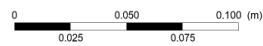
Os resultados mostram que o comprimento do núcleo potencial aumenta com o aumento da razão de velocidades e para um jato com um bocal circular este é superior ao que se verifica num jato com um bocal quadrado, o que reforça a hipótese de que o bocal circular tem uma maior penetração no escoamento cruzado do que o bocal quadrado, tendo uma melhor mistura entre os dois fluidos utilizados. Também se verifica que no bocal circular, a distância entre os vórtices é menor do que no bocal quadrado, e essa distância aumenta há medida que aumenta a razão de velocidades, fazendo com que no bocal circular haja um maior enrolamento dos vórtices.

## 5.5.1. Bocal Circular

### 5.5.1.1. $V_j/U_0 = 2$



a)



b)

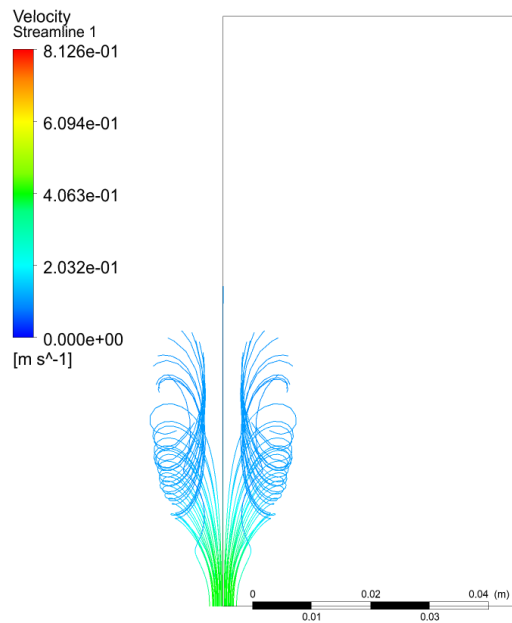
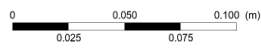


Figura 5.10: Campo de escoamento através das linhas de corrente para o bocal circular para  $V_j/U_0 = 2$ : (a)- Vista frontal do plano de simetria; (b)- Vista lateral.

### 5.5.1.2. $V_j/U_0=4$



a)

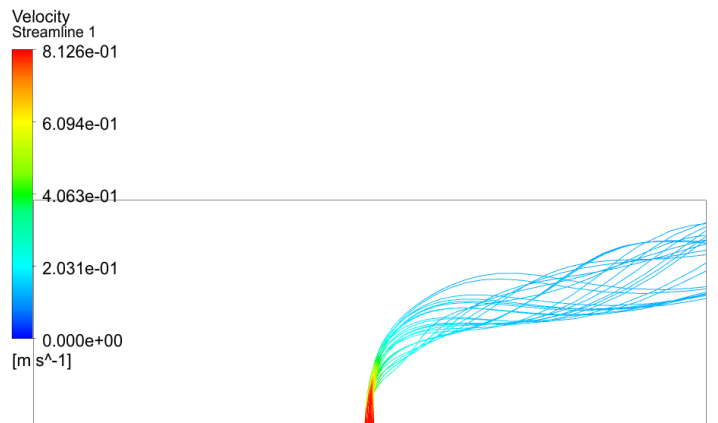


b)

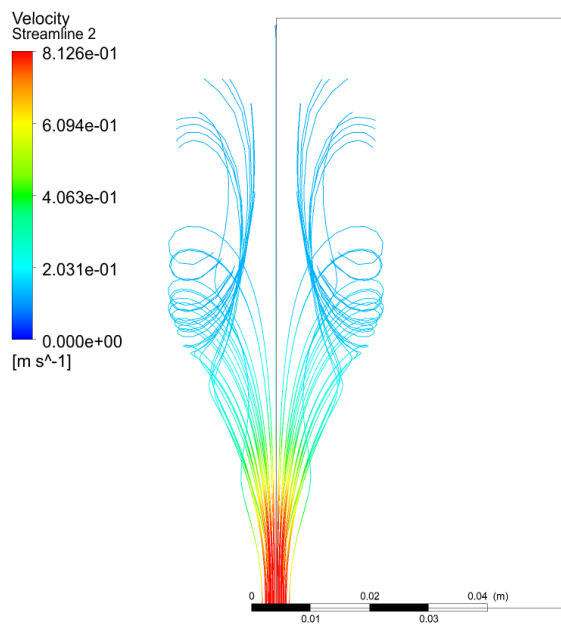
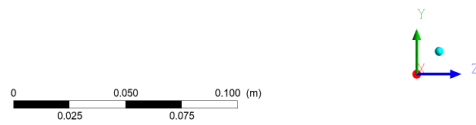


Figura 5.11: Campo de escoamento através das linhas de corrente para o bocal circular para  $V_j/U_0 = 4$ : (a)- Vista frontal do plano de simetria; (b)- Vista lateral.

### 5.5.1.3. $V_j/U_0 = 8$



a)

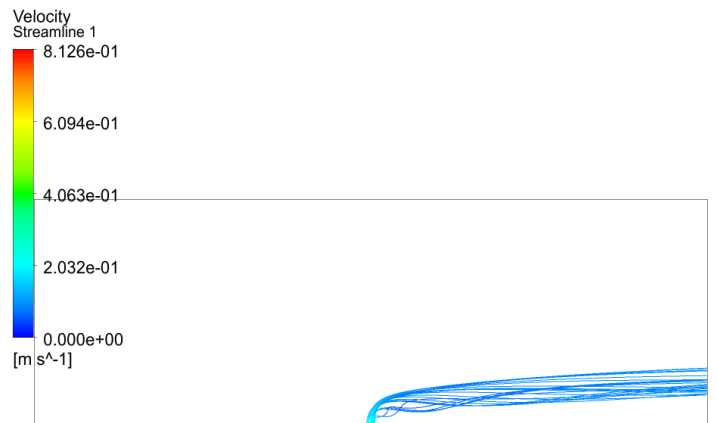


b)

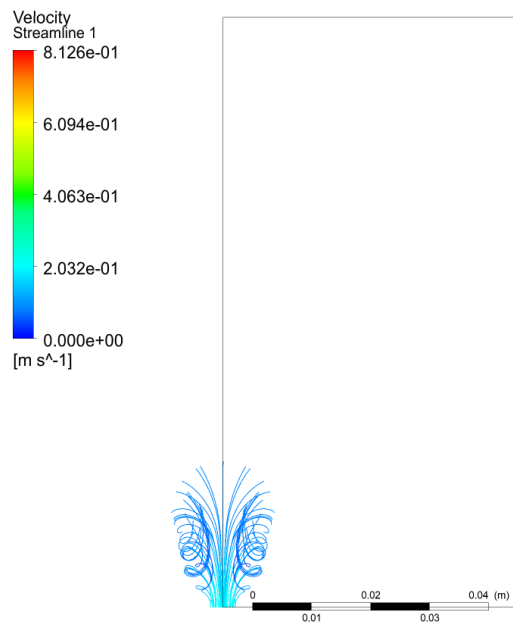
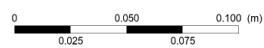
Figura 5.12: Campo de escoamento através das linhas de corrente para o bocal circular para  $V_j/U_0 = 8$ : (a)- Vista frontal do plano de simetria; (b)- Vista lateral.

## 5.5.2. Bocal Quadrado

### 5.5.2.1. $V_j/U_0 = 2$



a)

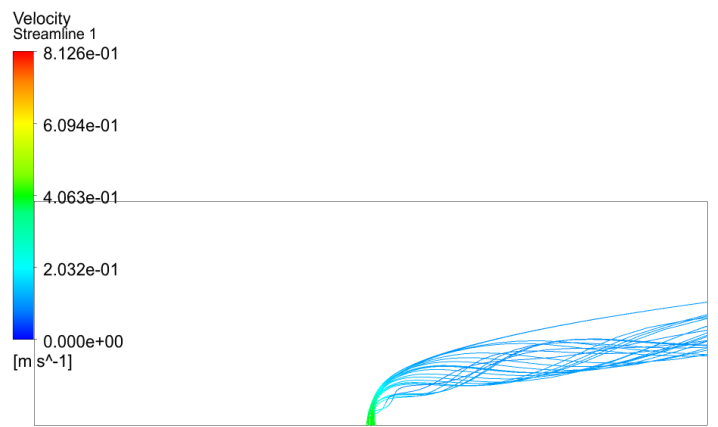


b)

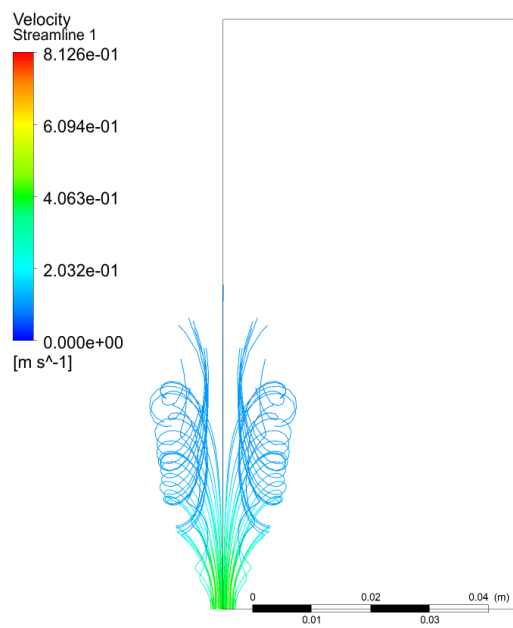
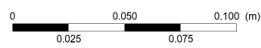


Figura 5.13: Campo de escoamento através das linhas de corrente para o bocal quadrado para  $V_j/U_0 = 2$ : (a)- Vista frontal do plano de simetria; (b)- Vista lateral.

### 5.5.2.2. $V_j/U_0 = 4$



a)

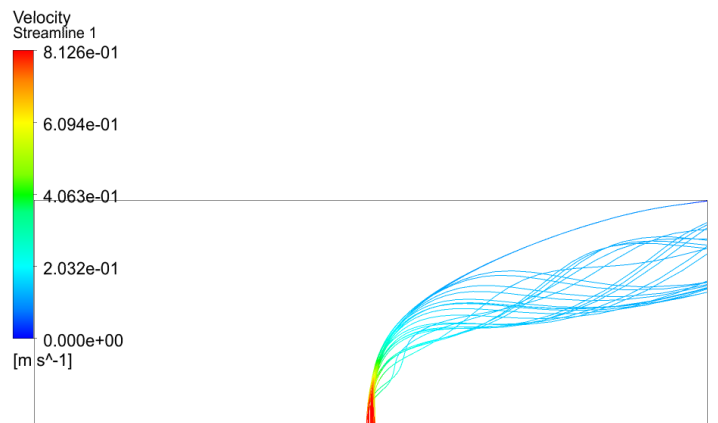


b)

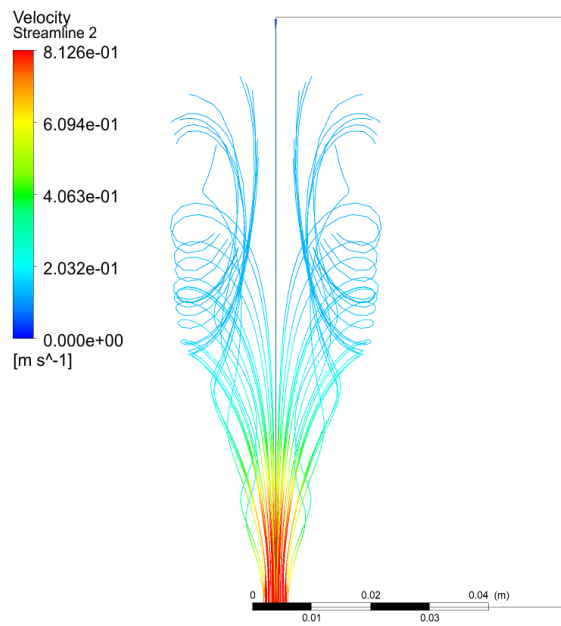


Figura 5.14: Campo de escoamento através das linhas de corrente para o bocal quadrado para  $V_j/U_0 = 4$ : (a)- Vista frontal do plano de simetria; (b)- Vista lateral.

### 5.5.2.3. $V_j/U_0=8$



a)



b)

Figura 5.15: Campo de escoamento através das linhas de corrente para o bocal quadrado para  $V_j/U_0 = 8$ : (a)- Vista frontal do plano de simetria; (b)- Vista lateral.



## 5.6. Trajetórias

A trajetória de um jato através de um escoamento cruzado é um dos parâmetros mais estudados neste tipo de temática. A definição da trajetória varia de autor para autor, podendo ser baseada na linha de corrente originária da linha central do jato no plano de simetria, na máxima concentração escalar e no local dos pontos de máxima velocidade em várias secções do jato defletido. Neste estudo, definiu-se a trajetória com base na linha de corrente originária da linha central do jato no plano de simetria, como no estudo de Yuan et al. (1999) e Muppidi e Mahesh (2005), uma vez que a velocidade máxima e a concentração escalar têm os seus máximos à saída do jato.

Analisando os resultados obtidos previamente por outros autores, é possível aferir que existem resultados contraditórios na trajetória para o bocal circular e para o bocal quadrado. Os autores Haven e Kurosaka (1997) referem que existe uma trajetória superior para o bocal circular, enquanto Liscinsky et al. (1996), demonstram o contrário.

Como termo de comparação dos resultados de Salewski et al. (2006), a trajetória foi obtida para  $V_j/U_0=4$ , localizado em  $Z/D=8$ , a jusante do jato. Observando a Figura 5.16 e Figura 5.17, é possível verificar que a trajetória do bocal circular é superior à trajetória do bocal quadrado, o que está de acordo com os resultados de Haven e Kurosaka (1997) e Salewski et al. (2006) (ver Figura 5.18)

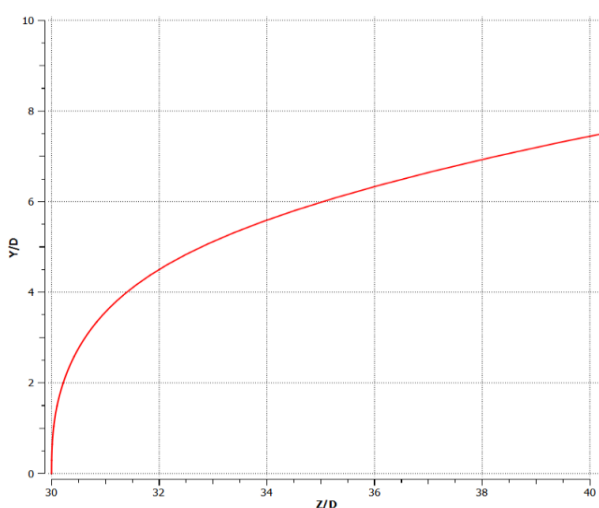


Figura 5.16: Trajetória para o bocal circular para  $V_j/U_0=4$

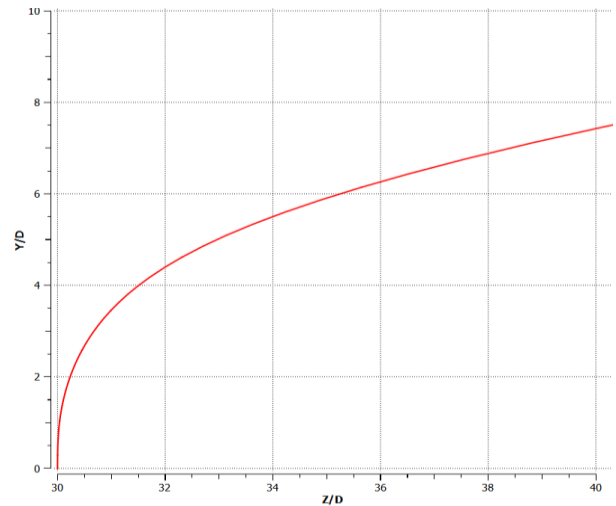


Figura 5.17: Trajetória para o bocal quadrado para  $V_j/U_0=4$

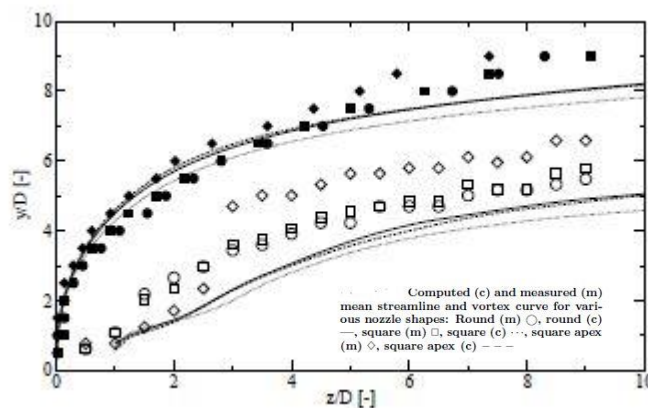


Figura 5.18: Trajetória para vários tipos de bocal de jato. (Salewski et al. (2006))



## 6 Conclusão

O objetivo desta dissertação foi estudar através das equações RANS um jato através de um escoamento cruzado para duas configurações de bocal de jato distintas (circular e quadrado) e para três razões de velocidade,  $V_j/U_0$  iguais a 2, 4 e 8.

Numa primeira fase realizou-se um extenso estudo do estado de arte para os jatos através de um escoamento cruzado, o que permitiu identificar as condições a adotar no *ANSYS Fluent*, bem como os modelos de turbulência mais indicados e os parâmetros de estudo mais utilizados. No capítulo 3 apresentou-se o modelo computacional, onde foi feita uma breve revisão às ferramentas computacionais a utilizar. Em seguida procedeu-se à construção do domínio computacional, em que se modelou apenas metade do domínio com vista a um menor esforço computacional, gerando-se a malha. Seguidamente, procedeu-se à atribuição das condições de fronteira e respetivos parâmetros de escoamento e, escolheu-se o modelo de turbulência e o *Solver* para se efetuarem as simulações. No capítulo 5, simulou-se o caso de estudo, validou-se com o estudo de *Salewski et al. (2006)* e realizou-se a independência da malha. Após terem sido realizadas as simulações, procedeu-se à análise dos resultados obtidos.

A partir dos campos de velocidade e de pressão no plano de simetria observou-se que quanto maior é a razão de velocidades entre o jato e o escoamento cruzado, maior é a região de alta pressão a montante do jato, e maior é a região de pressão negativa imediatamente a jusante deste, gerando um escoamento reverso na esteira do jato. Quanto à penetração do jato no escoamento cruzado verificou-se o seu aumento, com o aumento da razão de velocidades, sendo essa penetração maior para o bocal circular do que para o bocal quadrado. Assim, o bocal circular apresenta uma trajetória superior num campo próximo ao jato quando comparado com o bocal quadrado.

A partir do campo de escoamento, é verificado que para  $V_j/U_0 = 2$ , o comprimento da região do núcleo potencial é igual para ambos os bocais. Para  $V_j/U_0 = 4$  e  $V_j/U_0 = 8$ , verificou-se uma penetração diferente para os bocais circular e quadrado, tendo sido registado um maior aumento do comprimento do núcleo potencial para o bocal circular. No que toca à distância entre os vórtices do CVP observou-se ser menor no bocal circular do que no bocal quadrado. Para cada configuração de bocal verifica-se que a distância do CVP aumenta à medida que a razão de velocidades cresce. No que toca ao enrolamento dos vórtices do CVP denota-se um maior enrolamento para os vórtices criados a partir do bocal circular.

## 6.1. Limitações e Perspetivas de Trabalhos Futuros

Este estudo apresenta a limitação de apenas prever as escalas médias do escoamento, uma vez que ao se utilizar o modelo RANS os modelos de turbulência estatística são baseados nas equações de Navier-Stokes médias no tempo, não possibilitando a leitura de grandes escalas como no modelo LES e não resolve todas as escalas como no modelo DNS.

Nesta dissertação apenas foram abordados os jatos com bocais circular e quadrado através de um escoamento cruzado, utilizando as equações RANS, pelo que no seguimento desta dissertação poder-se-ia investigar os jatos com bocais elípticos com alta RA e baixa RA através de um escoamento cruzado, recorrendo-se às equações RANS, e realizar-se uma comparação com os resultados obtidos por Salewski et al. (2006).

## Bibliografia

- Andreopoulos, J. (1983). Heat transfer measurements in a heated jet-pipe flow issuing into a cold cross stream. *Physics of Fluids*, 26(11). <https://doi.org/10.1063/1.864092>
- Andreopoulos, J. (1985). On the structure of jets in a crossflow. *Journal of Fluid Mechanics*, 157. <https://doi.org/10.1017/S0022112085002348>
- Andreopoulos, J., & Rodi, W. (1984). Experimental investigation of jets in a crossflow. *Journal of Fluid Mechanics*, 138. <https://doi.org/10.1017/S0022112084000057>
- Anslys Fluent Theory Guide. (2021). Ansys Fluent Theory Guide. In *ANSYS Inc., USA* (Vol. 15317, Issue November).
- Blanchard, J. N., Brunet, Y., & Merlen, A. (1999). Influence of a counter rotating vortex pair on the stability of a jet in a cross flow: An experimental study by flow visualizations. *Experiments in Fluids*, 26(1–2). <https://doi.org/10.1007/s003480050265>
- Camussi, R., Guj, G., & Stella, A. (2002). Experimental study of a jet in a crossflow at very low Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, 454. <https://doi.org/10.1017/S0022112001007005>
- Chochua, G., Shyy, W., Thakur, S., Brankovic, A., Lienau, J., Porter, L., & Lischinsky, D. (2000). A computational and experimental investigation of turbulent jet and crossflow interaction. *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, 38(6). <https://doi.org/10.1080/104077800750021134>
- Fric, T. F., & Roshko, A. (1994). Vortical Structure in the Wake of a Transverse Jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 279. <https://doi.org/10.1017/S0022112094003800>
- Gopalan, S., Abraham, B. M., & Katz, J. (2004). The structure of a jet in cross flow at low velocity ratios. *Physics of Fluids*, 16(6). <https://doi.org/10.1063/1.1697397>
- Haven, B. A., & Kurosaka, M. (1997). Kidney and anti-kidney vortices in crossflow jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 352. <https://doi.org/10.1017/S0022112097007271>
- Jia, R., Sundén, B., Miron, P., & Léger, B. (2005). A numerical and experimental investigation of the slot film-cooling jet with various angles. *Journal of Turbomachinery*, 127(3). <https://doi.org/10.1115/1.1929821>
- Kalifa, R. ben, Habli, S., Saïd, N. M., Bournot, H., & le Palec, G. (2014). Numerical and experimental study of a jet in a crossflow for different velocity ratio. In *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* (Vol. 36, Issue 4). <https://doi.org/10.1007/s40430-014-0129-z>
- Kamotani, Y., & Greber, I. (1972). Experiments on a turbulent jet in a cross flow. *AIAA Journal*, 10(11). <https://doi.org/10.2514/3.50386>
- Kelso, R. M., Lim, T. T., & Perry, A. E. (1996). An experimental study of round jets in cross-flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 306. <https://doi.org/10.1017/S0022112096001255>
- Li, S. H., Zhu, L., Yuan, B., Guo, T. T., & Liu, L. X. (2007). Numerical investigation on the vortices of multiple turbulent Jet in crossflow. *Challenges on Power Engineering and Environment - Proceedings of the International Conference on Power Engineering 2007, ICOPE 2007*.
- Li, Z., Murugappan, S., Gutmark, E., & Vallet, L. (2006). Numerical simulation and experiments of jets in cross flow. *Collection of Technical Papers - 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 6. <https://doi.org/10.2514/6.2006-307>

- Lim, T. T., New, T. H., & Luo, S. C. (2001). On the development of large-scale structures of a jet normal to a cross flow. *Physics of Fluids*, 13(3). <https://doi.org/10.1063/1.1347960>
- Liscinsky, D. S., True, B., & Holdeman, J. D. (1996). Crossflow mixing of noncircular jets. *Journal of Propulsion and Power*, 12(2). <https://doi.org/10.2514/3.24017>
- Margason, R. J. (1983). Fifty years of jet in cross flow research. *Proceedings of the AGARD Symposium on Computational and Experimental Assessment of Jets in Crossflow, Winchester, UK, No. AGARD-CP-534*, 1.
- Muppidi, S., & Mahesh, K. (2005). Study of trajectories of jets in crossflow using direct numerical simulations. *Journal of Fluid Mechanics*, 530. <https://doi.org/10.1017/S0022112005003514>
- Muppidi, S., & Mahesh, K. (2007). Direct numerical simulation of round turbulent jets in crossflow. *Journal of Fluid Mechanics*, 574. <https://doi.org/10.1017/S0022112006004034>
- New, T. H., Lim, T. T., & Luo, S. C. (2006). Effects of jet velocity profiles on a round jet in cross-flow. *Experiments in Fluids*, 40(6). <https://doi.org/10.1007/s00348-006-0124-y>
- Özcan, O., & Larsen, P. S. (2003). Laser Doppler anemometry study of a turbulent jet in crossflow. *AIAA Journal*, 41(8). <https://doi.org/10.2514/2.2119>
- Prause, J., Emmi, Y., Noll, B., & Aigner, M. (2016). LES/RANS modeling of turbulent mixing in a jet in crossflow at low momentum ratios. *54th AIAA Aerospace Sciences Meeting*. <https://doi.org/10.2514/6.2016-0609>
- Radhouane, A., Bournot, H., Mahjoub Said, N., Mhiri, H., & le Palec, G. (2009). Numerical and experimental study of a double jet inclination variation on its dynamic evolution within a crossflow. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 45(12). <https://doi.org/10.1007/s00231-009-0535-4>
- Radhouane, A., Mahjoub Said, N., Mhiri, H., le Palec, G., & Bournot, P. (2011). Dispersion of twin inclined fume jets of a variable height within a crossflow. *Defect and Diffusion Forum*, 312–315. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.312-315.929>
- Rodi, W., & Srivatsa, S. K. (1980). A locally elliptic calculation procedure for three-dimensional flows and its application to a jet in a cross-flow. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 23(1). [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(80\)90079-1](https://doi.org/10.1016/0045-7825(80)90079-1)
- Salewski, M., Stankovic, D., & Fuchs, L. (2008). Mixing in circular and non-circular jets in crossflow. *Flow, Turbulence and Combustion*, 80(2). <https://doi.org/10.1007/s10494-007-9119-x>
- Salewski, M., Stankovic, D., Fuchs, L., & Gutmark, E. J. (2006). Coherent structures in circular and non-circular jets in crossflow. *Collection of Technical Papers - 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 15. <https://doi.org/10.2514/6.2006-907>
- Sau, A., Sheu, T. W. H., Hwang, R. R., & Yang, W. C. (2004). Three-dimensional simulation of square jets in cross-flow. *Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, 69(6). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.066302>
- Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., & Zhu, J. (1995). A New K-epsilon Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows: Model Development and Validation. *Computer & Fluids*, 24(August).
- Smith, S. H., & Mungal, M. G. (1998). Mixing, structure and scaling of the jet in crossflow. *Journal of Fluid Mechanics*, 357. <https://doi.org/10.1017/S0022112097007891>
- Su, L. K., & Mungal, M. G. (2004). Simultaneous measurements of scalar and velocity field evolution in turbulent crossflowing jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 513. <https://doi.org/10.1017/S0022112004009401>
- Sykes, R. I., Parker, S. F., & Lewellen, W. S. (1986). On the vorticity dynamics of a turbulent jet in a crossflow. *Journal of Fluid Mechanics*, 168. <https://doi.org/10.1017/S0022112086000435>
- Versteeg, H. K., Malalasekera, W., Orsi, G., Ferziger, J. H., Date, A. W., & Anderson, J. D. (1995). An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method. In *Fluid flow handbook*. McGraw-Hill ....

- Wegner, B., Huai, Y., & Sadiki, A. (2004). Comparative study of turbulent mixing in jet in cross-flow configurations using LES. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 25(5). <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2004.05.015>
- Wu, Z., Laurence, D., & Afgan, I. (2017). Direct numerical simulation of a low momentum round jet in channel crossflow. *Nuclear Engineering and Design*, 313. <https://doi.org/10.1016/j.nuceng-des.2016.12.018>
- Xiao, Y., Tang, H. W., Liang, D. F., & Zhang, J. D. (2011). Numerical study of hydrodynamics of multiple tandem jets in cross flow. *Journal of Hydrodynamics*, 23(6). [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(10\)60179-5](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(10)60179-5)
- Yuan, L. L., Street, R. L., & Ferziger, J. H. (1999). Large-eddy simulations of a round jet in crossflow. *Journal of Fluid Mechanics*, 379. <https://doi.org/10.1017/S0022112098003346>
- Yunus A. Çengel, J. M., & Cimbala. (2013). Fluid Mechanics: Fundamentals And Applications, Third Edition. In *McGraw-Hill* (Vol. 53, Issue 9).





# Anexos

## I-Descrição do Domínio computacional

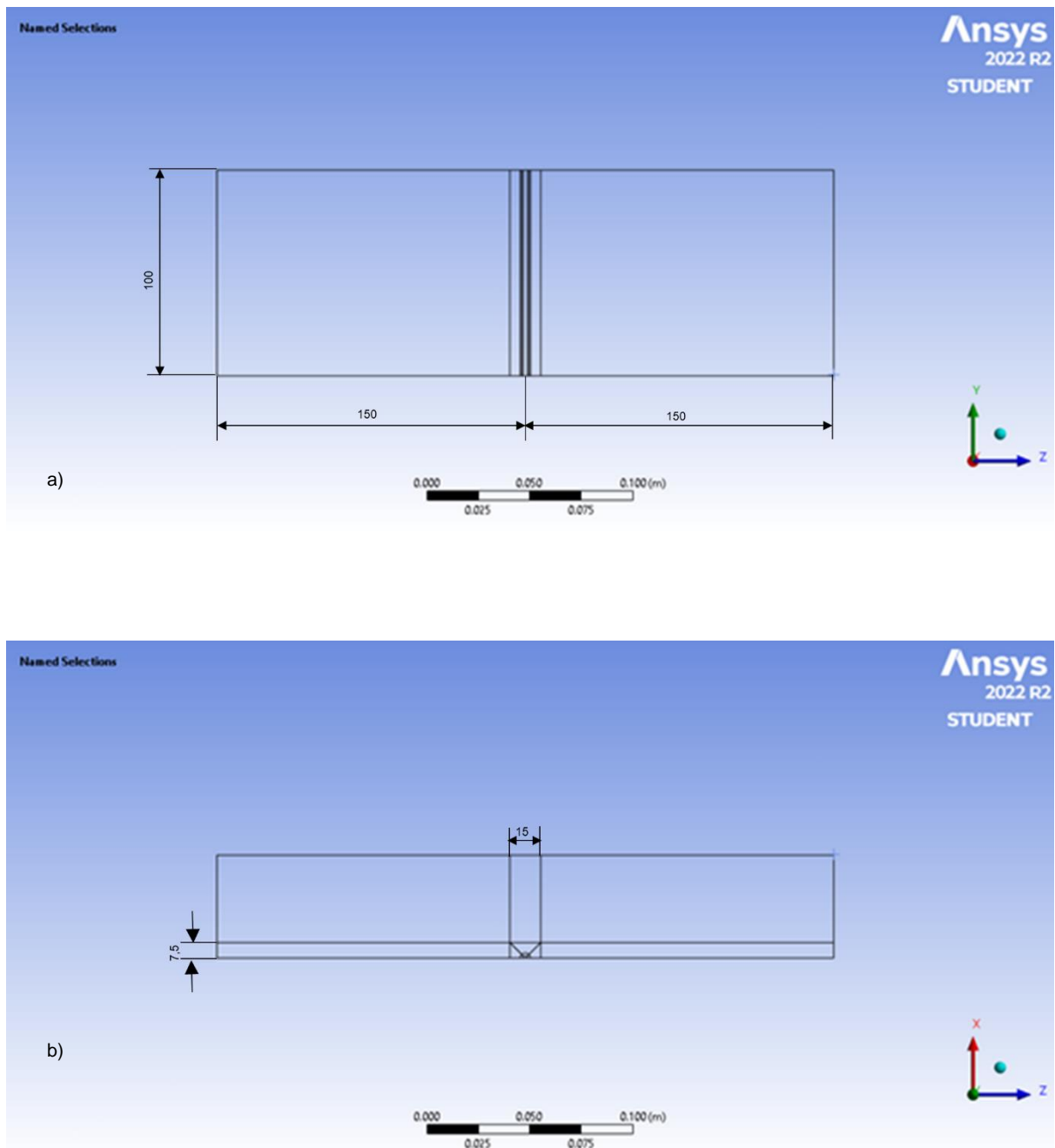


Figura I.1: Domínio computacional: (a)- vista frontal; (b)- vista em planta

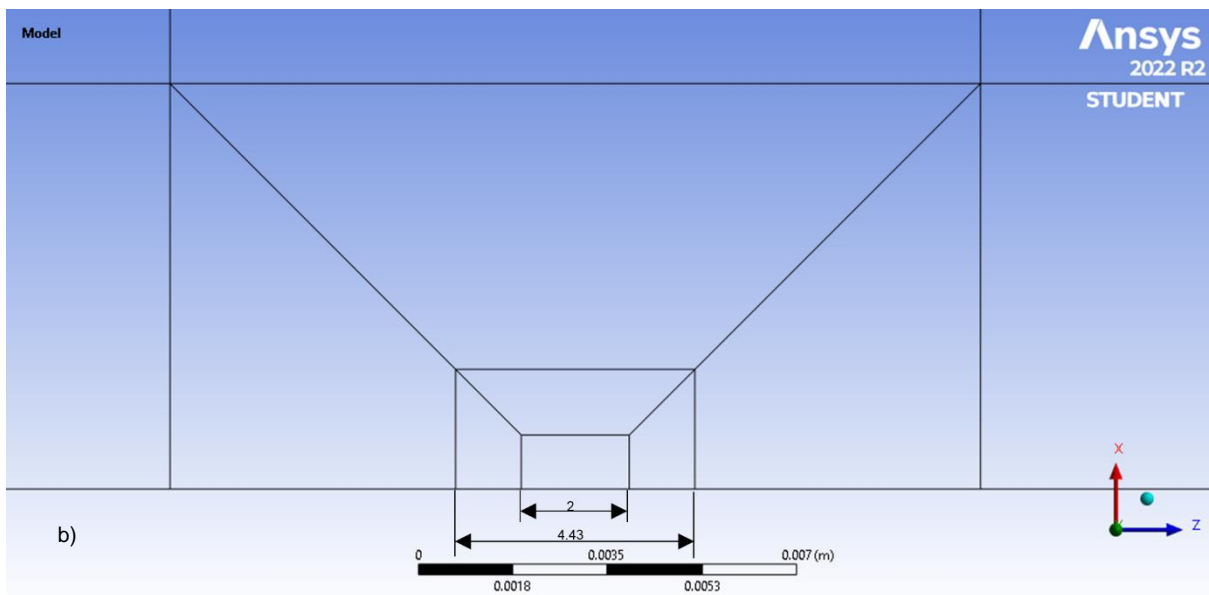
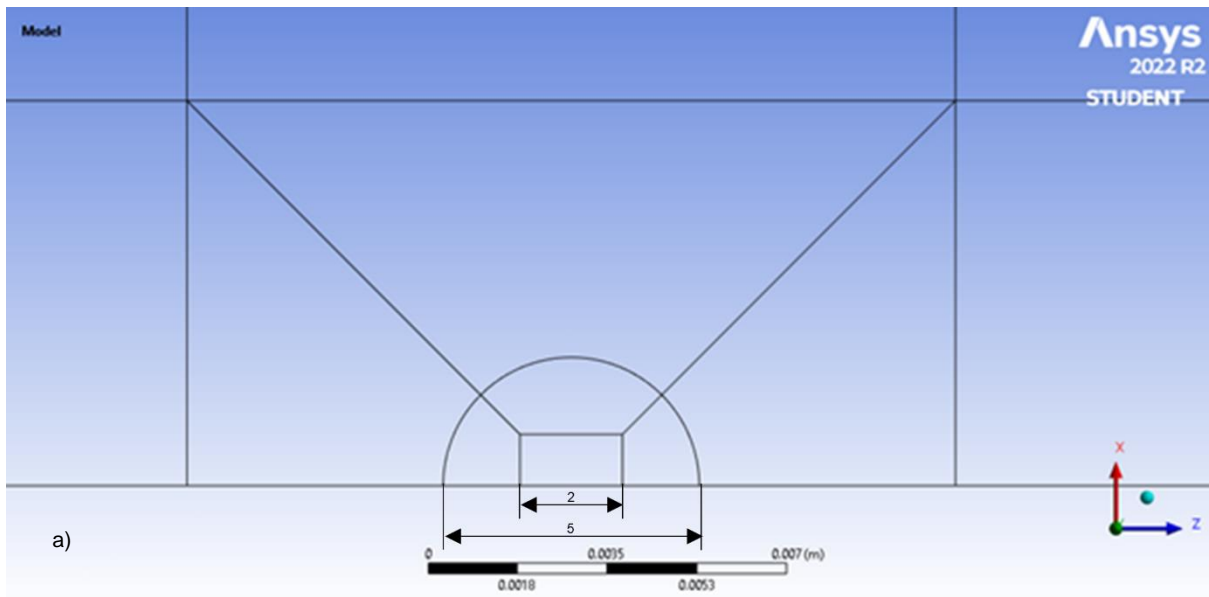


Figura I.2: Detalhe de construção do bocal: (a)- Bocal Circular; (b)- Bocal quadrado.

## II- Construção da Malha

Os detalhes de construção da malha estão presentes apenas para a malha intermédia com 570000 elementos. Na direção do escoamento cruzado (Z) e longe do bocal, as arestas estão divididas em 25 divisões com um *bias factor* de 24.0, como consta na Figura II.1. Na direção do escoamento do jato (Y) as arestas estão divididas em 150 divisões com um *bias factor* de 22.0, como consta na Figura II.2. Na direção (X) e longe do bocal, as arestas estão divididas em 30 divisões com um *bias factor* de 3.0, como se encontra representado na Figura II.3. Perto do bocal, há um maior refinamento, não havendo um *bias factor* elevado para não criar grandes discontinuidades. Na Figura II.4, apresenta-se o refinamento em detalhe para o bocal circular, sendo idêntica a discretização para o bocal quadrado. As arestas com seta (a laranja e verde na figura) foram definidas com um *bias factor* e as arestas sem seta (azul e preto na figura) foram definidas sem um *bias factor*.

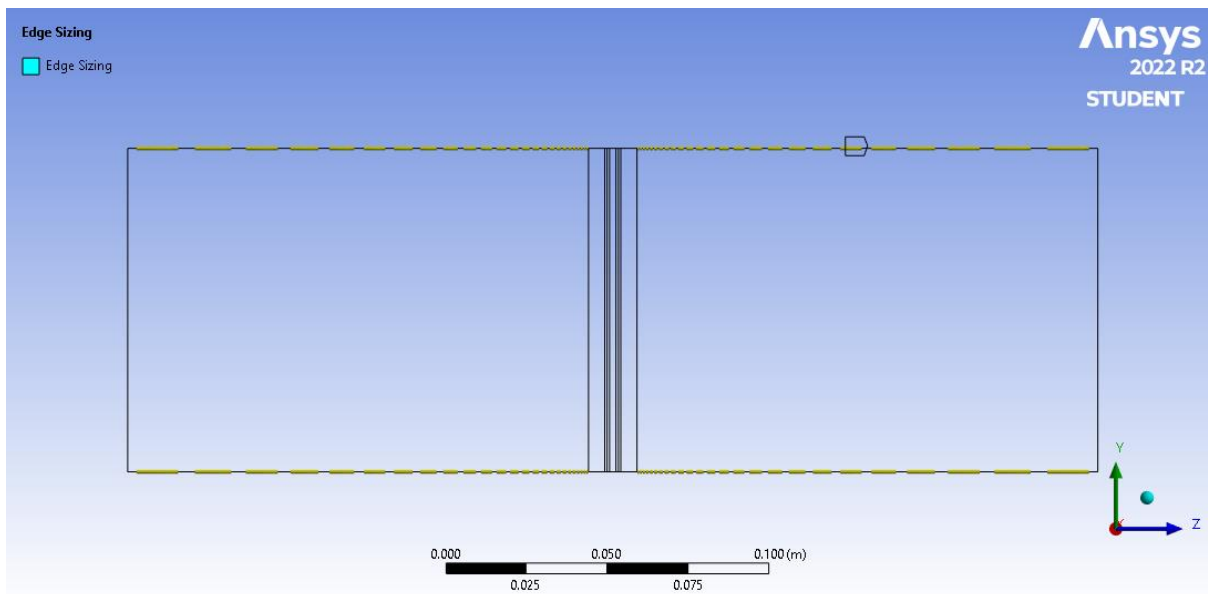


Figura II.1- Discretização da malha na direção Z longe do bocal

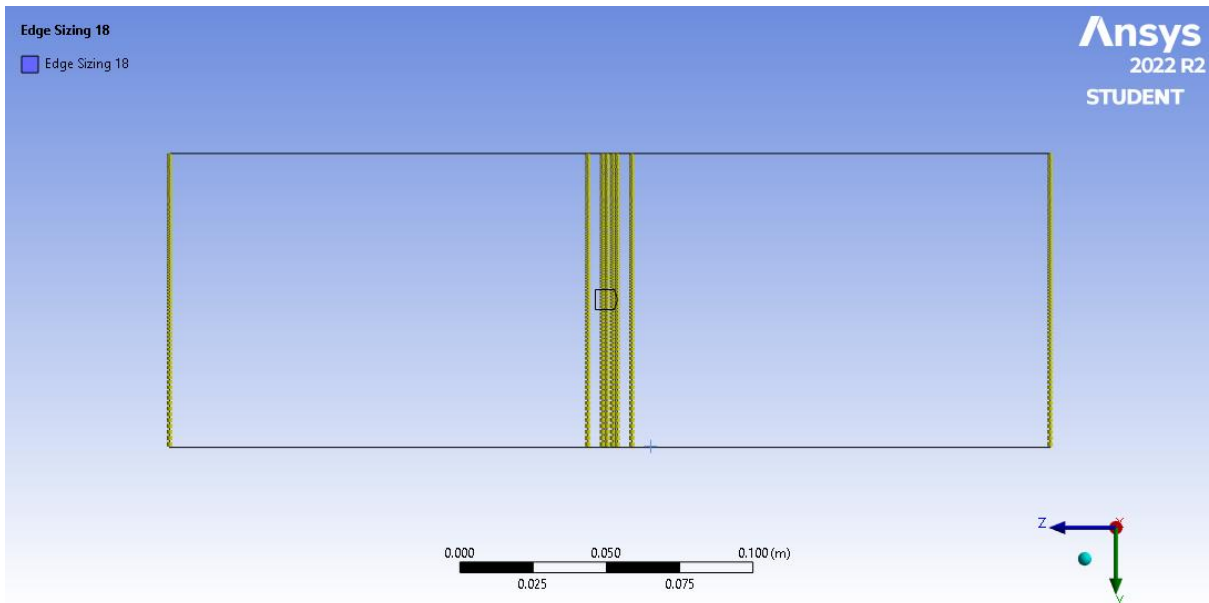


Figura II.2- Discretização da malha na direção Y

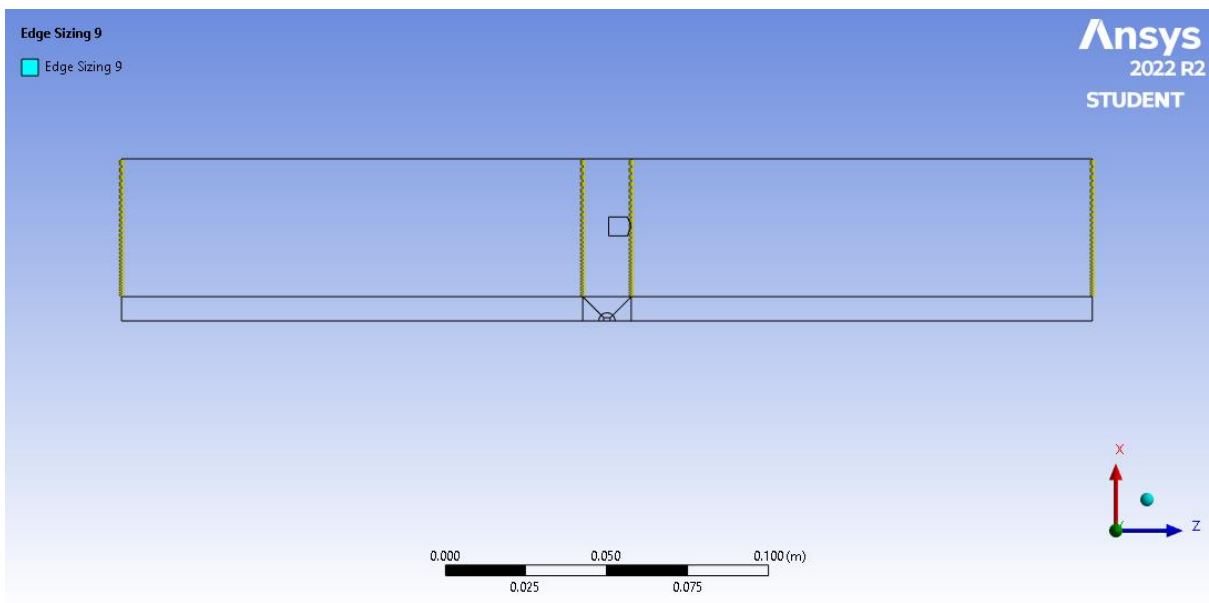


Figura II.3- Discretização da malha na direção X longe do bocal

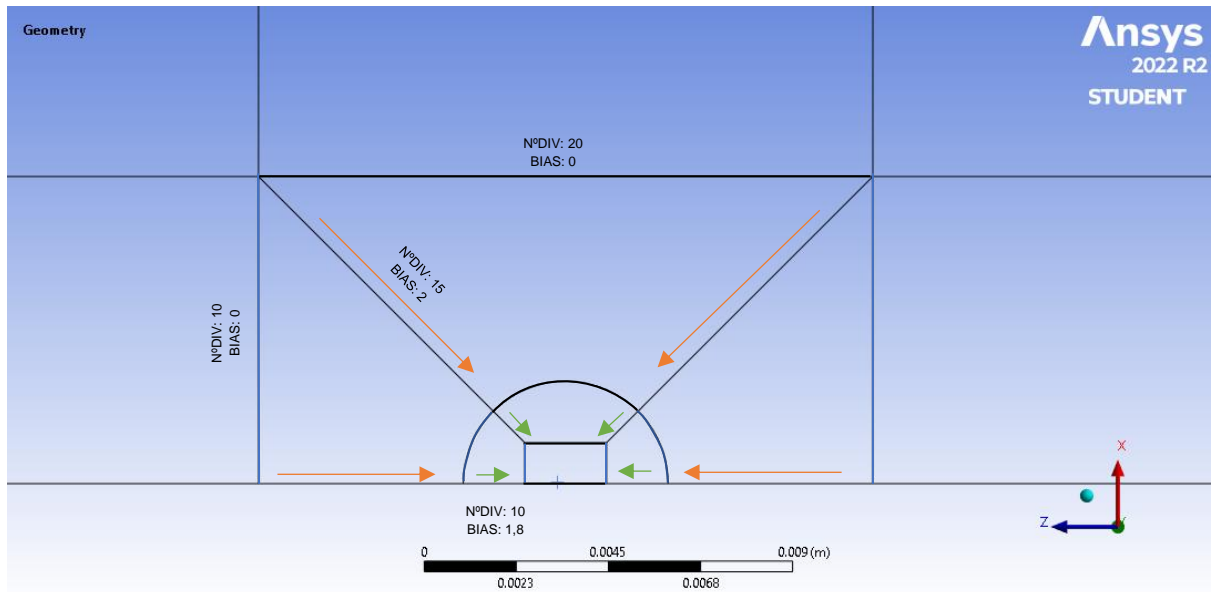


Figura II.4- Discretização da malha em redor do bocal circular

