



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Celso Oliveira Almeida

Simulação CFD de jatos
em espaços confinados

Celso Oliveira Almeida Simulação CFD de jatos em espaços confinados

UMinho | 2013

dezembro de 2013



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Celso Oliveira Almeida

Simulação CFD de jatos
em espaços confinados

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor José Carlos Fernandes Teixeira

Co orientador
Professor Doutor Pedro Alexandre Moreira
Lobarinhas

DECLARAÇÃO

Nome: Celso Oliveira Almeida

Endereço eletrónico: celsoalmeida27@gmail.com

Telefone: 00351 936298219

Número do cartão do cidadão: 13809301 6ZZ6

Título de dissertação: **Simulação *CFD* de jatos em espaços confinados**

Orientador(es): Professor Doutor José Carlos Fernandes Teixeira; Professor Doutor Pedro Alexandre Moreira Lobarinhas

Ano de conclusão: 2013

Designação do Mestrado ou do Ramo de Conhecimento do Doutoramento:

Ciclo de Estudos Conducente ao Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Declaro que concedo à Universidade do Minho e aos seus agentes uma licença não-exclusiva para arquivar e tornar acessível, nomeadamente através do seu repositório institucional, nas condições abaixo indicadas, a minha dissertação, no todo ou em parte, em suporte digital.

Declaro que autorizo a Universidade do Minho a arquivar mais de uma cópia da dissertação e a, sem alterar o seu conteúdo, converter a dissertação entregue, para qualquer formato de ficheiro, meio ou suporte, para efeitos de preservação e acesso.

Retenho todos os direitos de autor relativos à dissertação, e o direito de a usar em trabalhos futuros (como artigos ou livros).

Concordo que a minha tese ou dissertação seja colocada no repositório da Universidade do Minho com o seguinte estatuto:

- Disponibilização imediata do conjunto do trabalho para acesso mundial

Universidade do Minho, ___ / ___ / _____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para a execução do presente projeto de dissertação de mestrado, pretendo aqui deixar um agradecimento e uma palavra de apreço. Entre eles, gostaria de destacar de forma especial:

Aos meus orientadores, Professor Doutor José Carlos Teixeira, Professor Doutor Pedro Alexandre Moreira Lobarinhas, pela orientação, disponibilidade e ajuda prestada;

Ao companheiro Júlio Cunha pela ajuda preciosa prestada no programa *FLUENT* da *ANSYS*;

Ao Professor Doutor Amaral Nunes no esclarecimento de dúvidas relativamente à sua tese de doutoramento, a qual foi alvo de estudo.

Aos restantes amigos, Pedro Ribeiro, Carlos Mendes, Francisco Marques pela motivação, apoio e companheirismo;

À enorme comunidade do site, <http://www.cfd-online.com/>, pela disponibilidade em esclarecer alguma dúvida;

Por último e não menos importante, gostaria de agradecer e dedicar o presente trabalho aos meus Pais, Luís Almeida e Ana Almeida, pelo apoio, dedicação e suporte prestado em todos os momentos.

RESUMO

A presente tese tem por objetivo o estudo da interação de um jato num escoamento livre. Com este objetivo efetuou-se a modelação do escoamento usando o *software* de Computação em Dinâmica dos Fluidos – *CFD* – *ANSYS FLUENT*. Este baseia-se na utilização da técnica de volumes finitos para a solução das equações de conservação de um fluido: massa, *momentum* e energia.

Neste estudo foram consideradas três situações: interação de um jato com um fluido em repouso; interação de um jato com um fluxo perpendicular e a interação de 13 jatos com um fluxo perpendicular. Neste estudo foram avaliados vários modelos de turbulência e a influência de gradientes térmicos entre os dois fluxos. Os dados obtidos foram comparados com resultados experimentais obtidos por Nunes (2003) num túnel de vento subsónico. De entre os vários modelos de turbulência o k- ϵ mostrou ser o mais adequado. A convergência da solução exigiu um elevado refinamento da malha na região de interação dos fluxos.

Os resultados mostram que a injeção cruzada de caudais relativamente pequenos pode provocar o estabelecimento de extensas regiões de interação com a corrente principal, acompanhadas da criação de vórtices, os quais contribuem, eficazmente, para a rápida mistura das duas correntes.

A simulação *CFD* de temperatura para um jato mostrou que a 30D ocorre um alargamento da pluma que abrange quase metade da secção transversal e uma boa homogeneização, então a 120D ocorre o alargamento da pluma que abrange quase a totalidade da secção transversal e uma óptima homogeneização. A simulação *CFD* de temperatura para 13 jatos mostrou que já a partir de 30D, ocorre um alargamento toroidal da pluma e uma boa homogeneização. Verifica-se que quer para 1 e 13 jatos, quanto menor a temperatura do jato, mais alta é a posição da pluma a 120D a jusante da injeção, tal situação deve-se ao fenómeno da convecção natural.

Palavras-chave: Simulação *CFD*; jatos cruzados; jato circular; escoamento; laminar; turbulento.

ABSTRACT

This thesis aims to study the interaction of a jet in a free-flowing. With this aim was carried out by modeling the flow field using the software on Computational Fluid Dynamics - *CFD* – *ANSYS FLUENT*. This is based on the use of the finite volume technique for solving the conservation equations of fluid: mass, momentum and energy.

In this study, three cases were considered: interaction with a jet of a fluid at rest; interaction of a single jet with a cross-flow and the interaction of 13 jets in cross flow. In this study, various turbulence models and the influence of thermal gradients between the two streams were evaluated. The data obtained were compared with experimental results obtained by Nunes (2003) in a subsonic wind tunnel. Amongst the various turbulence models the $k-\epsilon$ proved to be the most suitable. The convergence of the solution required a high mesh refinement in the region of interaction flows.

The results show that the injection of relatively small cross-flow rates can cause the establishment of large regions of interaction with the main flux, accompanied by the creation of eddies, which contribute effectively to rapid mixing of the two streams.

A CFD simulation of temperature showed that a jet 30D is an extension of the plume covering almost half of the cross section and a good homogeneity, then the extension of the plume 120D which covers almost the entire cross section and an optimum mixing occurs.

The CFD simulation temperature to 13 jets showed that a toroidal extension of the plume and a good homogenization starting 30D downstream of the injection point, occurs.

Keywords: CFD simulation; cross jets; circular jet; flow; laminar; turbulent.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE TABELAS	XI
GLOSSÁRIO DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XIV
GLOSSÁRIO DE SÍMBOLOS.....	XV
1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 CLIMATIZAÇÃO.....	20
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	22
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 CLIMATIZAÇÃO EM EDIFÍCIOS.....	25
2.2 DIFUSÃO DO AR.....	41
2.2.1 Conceito de difusão	41
2.2.2 Aplicações do difusor de ar	41
2.2.3 Objectivos da difusão	42
2.2.4 Mecanismos de transporte	42
2.2.5 Injeção de jatos	42
2.2.6 Estudos de jatos	44
3 COMPUTACIONAL FLUID DYNAMICS.....	47
3.1 PROGRAMA DE SIMULAÇÃO <i>CFD</i> – <i>ANSYS</i>	49
3.1.1 Pré - Processamento	49
3.1.2 Solver	50
3.1.3 Pós – Processamento	50
3.2 LEIS DA CONSERVAÇÃO	51
3.2.1 Volume de controlo finito	52
3.2.2 Equação da continuidade	53
3.2.3 Equação do <i>momentum</i>	54
3.2.4 Equação da Energia	56
3.3 TURBULÊNCIA	58
3.3.1 Modelos de Turbulência	58
3.3.2 Modelo <i>Standard k - ε</i>	59
3.3.3 Modelo <i>Realizable k-ε</i>	59

3.4	MÉTODO DE SOLUÇÃO.....	60
3.4.1	Discretização.....	60
3.4.2	Acoplamento.....	61
3.4.3	Critérios de paragem.....	61
3.5	TIPOS DE MALHA.....	61
3.5.1	Avaliação de malha.....	62
3.6	TRATAMENTO JUNTO À PAREDE.....	62
4	VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO CFD.....	65
4.1	CÁLCULO DO ESCOAMENTO NUMA TUBAGEM EM REGIME LAMINAR.....	65
4.1.1	Cálculo analítico.....	65
4.1.2	Análise CFD.....	67
4.1.2.1	Geometria.....	67
4.1.2.2	Malha.....	67
4.1.2.3	Inputs do FLUENT.....	71
4.1.2.4	Critérios de paragem.....	71
4.1.2.5	Contornos e Perfis.....	71
4.1.3	Comparação dos dados analíticos com os dados simulados.....	75
4.2	CÁLCULO DO ESCOAMENTO NA TUBAGEM EM REGIME TURBULENTO.....	76
4.2.1	Dados experimentais.....	76
4.2.1.1	Resumo.....	76
4.2.1.2	Experiência.....	77
4.2.2	Simulação CFD.....	78
4.2.2.1	Aproximação 3D da instalação real.....	78
4.2.2.2	Geometria.....	79
4.2.2.3	Malha.....	79
4.2.2.4	Inputs do FLUENT.....	82
4.2.2.5	Critérios de paragem.....	82
4.2.3	Comparação das simulações com dados experimentais.....	82
4.2.3.1	Comparação para $Re = 50\ 000$	82
4.2.3.2	Comparação para $Re = 500\ 000$	85
5	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	88
5.1	JATO CIRCULAR.....	88
5.1.1	Experiência.....	88
5.1.2	Simulação CFD.....	90
5.1.2.1	Geometria.....	90
5.1.2.2	Malha.....	90
5.1.2.3	Inputs do FLUENT.....	93
5.1.2.4	Critérios de paragem.....	94
5.1.2.5	Análise dos Resultados Obtidos.....	94

5.1.3	Comparação dos resultados da Simulação com a Experiência	98
5.1.3.1	Comparação do perfil de velocidades em zonas próximas da boca da tubeira	98
5.1.3.2	Comparação do perfil adimensional de velocidades em zonas próximas	99
5.1.3.3	Comparação das isovelocidades em zonas próximas da boca da tubeira	99
5.1.3.4	Comparação do perfil de velocidades, normal e adimensional, em zonas a mais de 6D	100
5.1.3.5	Comparação da 2ª adimensionalização da velocidade em zonas a mais de 6 diâmetros	102
5.1.3.6	Comparação das isovelocidades em zonas a mais de 6 diâmetros	102
5.2	1 JATO CRUZADO	105
5.2.1	Caso Experimental	105
5.2.2	Simulação <i>CFD</i>	112
5.2.2.1	Geometria	112
5.2.2.2	Malha	112
5.2.2.3	<i>Inputs</i> do <i>FLUENT</i>	116
5.2.2.4	CrITÉRIOS de paragem	117
5.2.2.5	Análise dos resultados obtidos	117
5.2.3	Comparação da Experiência com Simulação <i>CFD</i>	126
5.2.3.1	Contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 30$	126
5.2.3.2	Pressão estática – 1 jato – 30 diâmetros	129
5.2.3.3	Contorno das isovelocidades para o plano $x/D = 60$	131
5.3	13 JATOS CRUZADOS	135
5.3.1	Caso Experimental	135
5.3.2	Simulação <i>CFD</i>	135
5.3.2.1	Geometria	135
5.3.2.2	Malha	136
5.3.2.3	<i>Inputs</i> do <i>FLUENT</i>	138
5.3.2.4	CrITÉRIOS de paragem	139
5.3.2.5	Análise dos resultados obtidos	139
5.3.3	Comparação da Experiência com Simulação <i>CFD</i>	147
5.3.3.1	Contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 30$	147
5.3.3.2	Contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 60$	150
5.3.3.3	Contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 120$	152
6	APONTAMENTOS FINAIS	157
6.1	CONCLUSÕES	157
6.1.1	Estudos Preliminares	158
6.1.2	Injeção de Jato Único	159
6.1.3	Injeção Múltipla	160
6.1.4	Temperaturas	161
6.2	TRABALHOS FUTUROS	161
	REFERÊNCIAS	163

ANEXOS.....	167
ANEXO A - DADOS PARA INJEÇÃO CIRCULAR	167
ANEXO B - DADOS PARA INJEÇÃO TRANSVERSAL	177

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Pegada ecológica global em comparação com a biocapacidade global (WWF, 2010)	20
Figura 2.1 – Laboratório de Informática (Rossi et al., 2012)	26
Figura 2.2 - Insuflação através do esquema 1 (Adaptado de Li et al. (2009))	28
Figura 2.3 - Difusor com integração da insuflação e exaustão, com distribuição do fluxo de ar na zona ocupada de um escritório aberto (Adaptado de Lo e Novoselac (2010))	30
Figura 2.4 - As duas configurações do escritório: (a) configuração do escritório com uma parede a dividir os dois espaços e (b) configuração dos escritórios com corredor aberto (Adaptado do Lo e Novoselac (2010))	31
Figura 2.5 - Sala teste (Adaptado de Catalina et al. (2009))	32
Figura 2.6 - Vista do interior da Arena Galatsi, com indicação da localização da insuflação e extração de ar (Adaptado de Stamou et al. (2008))	34
Figura 2.7 - Geometria da instalação experimental (Adaptado de Aziz et al. (2012))	36
Figura 2.8 – Configuração geométrica dos difusores (Adaptado de Aziz et al. (2012))	36
Figura 2.9 - Geometria do difusor de ar real (A) e representação <i>CFD</i> (B) (Adaptado de Einberg et al. (2005))	38
Figura 2.10 - Configuração da sala de experiência (Adaptado de Einberg et al. (2005))	38
Figura 2.11 – Aplicações do difusor de ar (Nunes, 2012)	41
Figura 2.12 – As quatro zonas principais dos jatos (Nunes, 2012)	42
Figura 2.13 – Alcance e queda de um jato (Nunes, 2012)	43
Figura 3.1 - Estrutura para obter um protótipo virtual (Hirsch, 2007)	48
Figura 3.2 - Definição de um volume de controlo finito (fixo no espaço) (Blazeck, 2001)	52
Figura 3.3 - Forças de superfície a atuar na superfície do volume de controlo (Blazeck, 2001)	56
Figura 3.4 – Tipos de malha (FLUENT, 2012)	61
Figura 3.5 – Elementos com <i>skewness</i> de 0 e de cerca de 1, respectivamente (FLUENT, 2012)	62
Figura 3.6 - Camada limite junto à parede (Adaptado de Nezu e Tominaga (2000))	63
Figura 4.1 - Perfil de velocidades transversal ao longo do eixo da tubagem para escoamento laminar (Adaptado de Cengel e Cimbala (2006))	66

Figura 4.2 – Geometria da tubagem	67
Figura 4.3 – Configuração da malha.....	70
Figura 4.4 – <i>Monitor</i> dos resíduos da equação da continuidade e das componentes x, y e z, monitor da velocidade máxima em todo o volume do sólido e a pressão média na superfície de entrada do fluido, respectivamente	71
Figura 4.5 – a) Distribuição do gradiente de velocidades na secção longitudinal do tubo; b) Perfil de velocidades ao longo do eixo do tubo.....	72
Figura 4.6 – a) Distribuição do gradiente de pressões na secção longitudinal do tubo b) Perfil de pressões ao longo do eixo do tubo.....	73
Figura 4.7 - Contornos da velocidade e pressão na secção transversal do tubo em diferentes planos	74
Figura 4.8 - Comparação da velocidade simulada com a velocidade teórica	75
Figura 4.9 - Diagrama esquemático da configuração do teste (Adaptado de Laufer (1953))	77
Figura 4.10 – Desenho 3D da tubagem, obtida pelo <i>Design Modeler</i>	79
Figura 4.11 – Configuração da malha selecionada.....	81
Figura 4.12 - Distribuição da pressão média ao longo do eixo da tubagem	83
Figura 4.13 - Distribuição da velocidade média na secção transversal do tubo.....	83
Figura 4.14 - Distribuição da velocidade média na secção transversal do tubo, junto à parede.....	84
Figura 4.15 - Distribuição das velocidades na secção transversal do tubo, junto à parede, para diferentes modelos de turbulência e condição de parede	85
Figura 4.16 - Distribuição da pressão média ao longo do eixo da tubagem	86
Figura 4.17 - Distribuição da velocidade média na secção transversal do tubo.....	86
Figura 4.18 - Distribuição da velocidade média na secção transversal do tubo, junto à parede.....	87
Figura 5.1 - Esquema do túnel de jatos (Nunes, 2003)	89
Figura 5.2 - Adaptador para jato redondo (Nunes, 2003)	89
Figura 5.3 - Geometria de um jato circular.....	90
Figura 5.4 - Malha 2D, com vista pormenorizada da boca da tubeira e global, respectivamente ...	91
Figura 5.5 - Malha 2D – Teste de diferentes modelos de turbulência.....	91
Figura 5.6 - Teste de Malha, em 3D, para diferentes tipos de elementos	92

Figura 5.7 - Testes de Malha, em 3D, com simetria e elementos hexaedros.....	93
Figura 5.8 – Configuração da malha selecionada	93
Figura 5.9 - Vectores da velocidade na injeção de um jato, para todo o domínio.....	94
Figura 5.10 - Vectores da velocidade na injeção de um jato, para a região próxima da tubeira.....	95
Figura 5.11 - Vectores da velocidade na injeção de um jato, para uma região muito próxima da tubeira, utilizando vectores 2D	96
Figura 5.12 - Vectores da velocidade na injeção de um jato, para uma região muito próxima da tubeira, utilizando vectores 3D	96
Figura 5.13 - Distribuição de pressões na saída da tubeira, para pressão máxima e mínima limitada, entre 0 e -5 Pa, respetivamente	97
Figura 5.14 - Distribuição de velocidades por todo o dominio, tendo sido a velocidade máxima limitada a 2 m/s.....	97
Figura 5.15 - Comparação do perfil de velocidades em zonas próximas da boca da tubeira, entre simulação e experiência (Tabela A. 1)	98
Figura 5.16 - Comparação do perfil adimensional de velocidades em zonas próximas da boca da tubeira, entre simulação e experiência (Tabela A. 2)	99
Figura 5.17 - Comparação das isovelocidades em zonas próximas da boca da tubeira, entre a simulação e a experiência (Tabela A. 3).....	100
Figura 5.18 - Comparação do perfil de velocidades em zonas a mais de 6 diâmetros, entre simulação e experiência (Tabela A. 4)	101
Figura 5.19 - Comparação do perfil de velocidades adimensional, em zonas a mais de 6 diâmetros, entre simulação e experiência (Tabela A. 5)	101
Figura 5.20 - Comparação da 2ª adimensionalização da velocidade, em zonas a mais de 6 diâmetros, entre simulação e experiência (Tabela A. 6)	102
Figura 5.21 - Comparação das isovelocidades em zonas a mais de 6 diâmetros, entre a simulação e a experiência (Tabela A. 7)	103
Figura 5.22 - Adaptador circular (Nunes, 2003).....	105
Figura 5.23 - Túnel aerodinâmico subsónico de 1.400 x 0.800 (medidas em metros) (Nunes, 2003).....	106
Figura 5.24 - Módulo de Visualização (Nunes, 2003)	107
Figura 5.25 - Módulo de Medição (Nunes, 2003).....	107
Figura 5.26 - <i>Plenum</i> para a injeção dos jatos (Nunes, 2003).....	109

Figura 5.27 - Placa base dos jatos (Nunes, 2003).....	110
Figura 5.28 - Diagrama da tubagem do jato (Nunes, 2003).....	111
Figura 5.29 - Geometria do caso de estudo.....	112
Figura 5.30 - Teste de malha às condições de turbulência	114
Figura 5.31 - Teste de malha aos modelos de turbulência.....	115
Figura 5.32 - Refinamento de malha.....	115
Figura 5.33 – Representação da malha final.....	116
Figura 5.34 - Linhas de fluxo do ar	117
Figura 5.35 - Distribuição das velocidades e das pressões, para vários planos transversais	118
Figura 5.36 - Distribuição das velocidades e pressões, a meia largura, bem como a meia altura do túnel aerodinâmico	118
Figura 5.37 – Distribuição dos vetores da velocidade, à meia largura do túnel aerodinâmico, na visão global, pormenorizada e pormenorizada com projeção, respetivamente.....	119
Figura 5.38 – Configuração da malha utilizada	119
Figura 5.39 - Distribuição dos vetores do escoamento para convecção natural desativada	121
Figura 5.40 - Distribuição dos vetores do escoamento para convecção natural ativada	122
Figura 5.41 - Distribuição de temperaturas para diferentes planos transversais, utilizando três temperaturas de injeção, 303.15 K, 313.15 K e 323.15 K, respetivamente.	123
Figura 5.42 - Distribuição de temperaturas para a meia largura e meia altura do túnel aerodinâmico, utilizando três temperaturas de injeção, tais como, 303.15 K, 313.15 K e 323.15 K, respetivamente.	124
Figura 5.43 - Distribuição de temperaturas para diferentes planos transversais, utilizando três temperaturas de injeção, 283.15 K, 323.15 K e 383.15 K, respetivamente.	125
Figura 5.44 - Distribuição de temperaturas para a meia largura e meia altura do túnel aerodinâmico, utilizando três temperaturas de injeção, tais como, 283.15 K, 323.15 K e 383.15 K, respetivamente.	125
Figura 5.45 - Perfil de velocidades – 1 jato – 30 diâmetros – Pressão total – Experiência (Tabela B. 1) (Nunes, 2003)	126
Figura 5.46 - Perfil de velocidades – 1 jato – 30 diâmetros – Fio quente vertical – Experiência (Tabela B. 2) (Nunes, 2003).....	127
Figura 5.47 - Perfil de velocidades – 1 jato – 30 diâmetros – 2D – Simulação (Tabela B. 3).....	127

Figura 5.48 - Perfil de velocidades – 1 jato – 30 diâmetros – 3D – Simulação (Tabela B. 3)	128
Figura 5.49 - Pressão estática – 1 jato – 30 diâmetros – Experiência (Tabela B. 4) (Nunes, 2003)	129
Figura 5.50 - Pressão estática – 1 jato – 30 diâmetros – 2D – Simulação (Tabela B. 5).....	130
Figura 5.51 - Pressão estática – 1 jato – 30 diâmetros – 3D – Simulação (Tabela B. 5).....	130
Figura 5.52 - Perfil de velocidades – 1 jato – 60 diâmetros – Fio quente vertical – Experiência (Tabela B. 6) (Nunes, 2003)	131
Figura 5.53 - Perfil de velocidades – 1 jato – 60 diâmetros – 2D – Simulação (Tabela B. 7)	132
Figura 5.54 - Perfil de velocidades – 1 jato – 60 diâmetros – 3D – Simulação (Tabela B. 7)	132
Figura 5.55 - Figura geométrica	136
Figura 5.56 – Configuração da malha “ <i>hexacore</i> ”	136
Figura 5.57 – Configuração da malha “ <i>sweep</i> ”	137
Figura 5.58 – Configuração da malha do “ <i>cutcell</i> ”	137
Figura 5.59 - Comparação de diferentes tipos de malha	138
Figura 5.60 - Distribuição das velocidades e das pressões, para vários planos transversais	140
Figura 5.61 - Distribuição das velocidades e pressões, a meia largura, bem como a meia altura do túnel aerodinâmico	141
Figura 5.62 - Distribuição dos vetores da velocidade, à meia largura do túnel aerodinâmico, através de uma visão global, e através de três vistas cada vez mais pormenorizadas, respetivamente. ..	141
Figura 5.63 - Distribuição de temperaturas para diferentes planos transversais, utilizando três temperaturas de injeção, 303.15 K, 313.15 K e 323.15 K, respetivamente.....	142
Figura 5.64 - Distribuição de temperaturas para a meia largura e meia altura do túnel aerodinâmico, utilizando três temperaturas de injeção, tais como, 303.15 K, 313.15 K e 323.15 K, respetivamente.....	143
Figura 5.65 - Distribuição de temperaturas para diferentes planos transversais, utilizando três temperaturas de injeção, 283.15 K, 323.15 K e 383.15 K, respetivamente.....	144
Figura 5.66 - Distribuição de temperaturas para a meia largura e meia altura do túnel aerodinâmico, utilizando três temperaturas de injeção, tais como, 283.15 K, 323.15 K e 383.15 K, respetivamente.....	144
Figura 5.67 - Diferença da temperatura no túnel para o ambiente – Com aquecimento – 13 jatos – 30 diâmetros – 54N10 (Nunes, 2003)	145

Figura 5.68 - Diferença da temperatura no túnel para o ambiente – Com aquecimento – 13 jatos – 120 diâmetros – 55P31 (Nunes, 2003).....146

Figura 5.69 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 30 diâmetros – Pressão dinâmica – Experiência (Tabela B. 8) (Nunes, 2003).....147

Figura 5.70 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 30 diâmetros – Sonda DANTEC 54N10 – Experiência (Tabela B. 9) (Nunes, 2003)148

Figura 5.71 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 30 diâmetros – 2D – Simulação (Tabela B. 10) 148

Figura 5.72 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 30 diâmetros – 3D – Simulação (Tabela B. 10) 149

Figura 5.73 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 60 diâmetros – Pressão dinâmica – Experiência (Tabela B. 11) (Nunes, 2003).....150

Figura 5.74 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 60 diâmetros – Fio quente Vertical – Experiência (Tabela B. 12) (Nunes, 2003).....150

Figura 5.75 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 60 diâmetros – 2D – Simulação (Tabela B. 13) 151

Figura 5.76 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 60 diâmetros – 3D – Simulação (Tabela B. 13) 151

Figura 5.77 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 120 diâmetros – Pressão dinâmica – Experiência (Tabela B. 14) (Nunes, 2003).....153

Figura 5.78 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 120 diâmetros – Fio quente Vertical – Experiência (Tabela B. 15) (Nunes, 2003).....153

Figura 5.79 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 120 diâmetros – 2D – Simulação (Tabela B. 16)154

Figura 5.80 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 120 diâmetros – 3D – Simulação (Tabela B. 16)154

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Disposição dos difusores e extractores para os três esquemas	28
Tabela 2.2 – Índices de Avaliação	29
Tabela 2.3 - Parâmetros de análise na simulação <i>CFD</i> (Adaptado de Lo e Novoselac (2010)).....	31
Tabela 2.4 – Características da célula 1 e 2	33
Tabela 2.5 - Características da Insuflação e Extração do Ar.....	34
Tabela 2.6 - Características do projeto.....	35
Tabela 2.7 - Características do modelo.....	35
Tabela 2.8 - Parâmetros do projeto	37
Tabela 2.9 - Condições do modelo utilizado.....	39
Tabela 2.10 – Comparação das características para os diversos estudos.....	40
Tabela 2.11 – Comparação dos modelos utilizados para os diversos trabalhos	40
Tabela 3.1 – Coeficientes do modelo <i>Standard k – ϵ</i>	59
Tabela 3.2 - Coeficientes do modelo <i>Realizabe k–ϵ</i>	60
Tabela 4.1 – Dados de entrada	65
Tabela 4.2 – Características da malha base	68
Tabela 4.3 – Diversas características de malha estudadas.....	69
Tabela 4.4 – <i>Inputs</i> do <i>FLUENT</i> para escoamento em regime laminar	71
Tabela 4.5 - Comparação da simulação com os dados analíticos	76
Tabela 4.6 – Propriedades do caso em estudo	79
Tabela 4.7 – Malha base	81
Tabela 4.8 – Teste de malha.....	81
Tabela 4.9 – <i>Inputs</i> do <i>FLUENT</i> para escoamento em regime turbulento	82
Tabela 5.1 – Características da malha dos diferentes tipos de elementos	92
Tabela 5.2 – <i>Inputs</i> do <i>FLUENT</i> para jato circular.....	94

Tabela 5.3 - Características do caso	113
Tabela 5.4 – Condições de turbulência testadas	114
Tabela 5.5 – <i>Inputs</i> do <i>FLUENT</i> para 1 jato cruzado	116
Tabela 5.6 - Características de diferentes tipos de malha	138
Tabela 5.7 – <i>Inputs</i> do <i>FLUENT</i> para 13 jatos cruzados.....	139
Tabela A. 1 - Velocidades de um jato circular – Zonas próximas da tubeira.....	169
Tabela A. 2 - Velocidades adimensionais de um jato circular – Zonas próximas da tubeira.....	170
Tabela A. 3 - Isovelocidades de um jato circular – Zonas próximas da tubeira.....	171
Tabela A. 4 - Perfil de velocidades – Jato circular Φ 100 mm e velocidade de 52.6 m/s.....	172
Tabela A. 5 - 1ª Adimensionalização de um jato circular - $x/D \geq 10$ diâmetros	173
Tabela A. 6 - 2ª Adimensionalização de um jato circular - $x/D \geq 10$ diâmetros	174
Tabela A. 7 - Isovelocidades de um jato circular	175
Tabela B. 1 - Dados para o perfil de velocidades – 1 jato – 30 diâmetros – Pressão total	179
Tabela B. 2 - Dados para o perfil de velocidades – 1 jato – 30 diâmetros – Fio quente vertical ..	179
Tabela B. 3 - Dados para o perfil de velocidades – 1 jato – 30 diâmetros – Simulação (dados truncados)	179
Tabela B. 4 - Pressões estáticas – 1 jato – 30 diâmetros – Experiência.....	180
Tabela B. 5 - Pressões estáticas – 1 jato – 30 diâmetros – Simulação (dados truncados).....	180
Tabela B. 6 - Dados para o perfil de velocidades – 1 jato – 60 diâmetros – Fio quente vertical ..	181
Tabela B. 7 - Dados para o perfil de velocidades – 1 jato – 60 diâmetros – Simulação (dados truncados)	181
Tabela B. 8 - Dados para o perfil de velocidades – 13 jatos – 30 diâmetros – Pressão dinâmica	182
Tabela B. 9 - Dados para o perfil de velocidades – 13 jatos – 30 diâmetros – DANTEC 54N10 ..	182
Tabela B. 10 - Dados para o perfil de velocidades – 13 jatos – 30 diâmetros – Simulação (dados truncados)	183
Tabela B. 11 - Dados para o perfil de velocidades – 13 jatos -60 diâmetros – Pressão dinâmica	184
Tabela B. 12 - Dados para o perfil de velocidades – 13 jatos -60 diâmetros – Fio quente vertical	184

Tabela B. 13 - Dados para o perfil de velocidades – 13 jatos -60 diâmetros – Simulação (dados truncados)	185
Tabela B. 14 - Dados para o perfil de velocidades – 13 jatos - 120 diâmetros – Pressão dinâmica	186
Tabela B. 15 - Dados para o perfil de velocidades – 13 jatos - 120 diâmetros – Fio quente vertical	186
Tabela B. 16 - Dados para o perfil de velocidades – 13 jatos - 120 diâmetros – Simulação (dados truncados)	187

GLOSSÁRIO DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Sigla	Definição
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>
<i>ASHRAE</i>	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
PNAEE	Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética
PNAER	Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis
<i>EC</i>	<i>Energy Community</i>
CE	Conselho Europeu
<i>CFD</i>	<i>Computer Fluid Dynamics</i>
<i>PMV</i>	<i>Predicted Mean Vote</i>
<i>TECA</i>	<i>Effective Draft Temperature</i>
<i>PPD</i>	<i>Predicted Percent Dissatisfied</i>
<i>HVAC</i>	<i>heating, ventilation, and air conditioning</i>
Ta	Temperatura de ar inicial na arena
Ti	Temperatura do ar de insuflação
Te	Temperatura do ar exterior
<i>LVP</i>	Parte de baixa velocidade
<i>HVP</i>	Parte de alta velocidade
<i>CAE</i>	Engenharia Assistida por Computador
<i>CAD</i>	Projeto Assistido por Computador
<i>CAE</i>	Engenharia Assistida por Computador
<i>CSM</i>	Computação da Mecânica dos Sólidos
<i>CAM</i>	Manufatura Assistida por Computador
<i>RANS</i>	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
<i>SIMPLE</i>	<i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i>
3D	Três dimensões
2D	Duas dimensões
<i>IPCC</i>	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
<i>WWF</i>	<i>World Wide Fund for Nature</i>
UTA	Unidade de Tratamento de Ar
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia

GLOSSÁRIO DE SÍMBOLOS

Símbolos	Definição	Unidade
$\partial\Omega$	Fronteira fechada	[-]
Ω	Volume de controlo	[-]
ds	Elemento superficial	[-]
\bar{n}	Vector normal	[-]
U/u	Velocidade do fluido	[m/s]
\vec{v}	Velocidade do fluxo através da fronteira	[m/s]
k	Coefficiente de condutibilidade térmica	[W/m. ^o K]
ρ	Massa volúmica	[kg/m ³]
Q_V	Termo de fonte de volume	[-]
\vec{Q}_S	Vector fonte de superfície	[-]
U^*	Razão de U com ρ	[m ⁴ /kg.s]
\bar{F}_C	Tensor de fluxo convectivo	[-]
\bar{F}_D	Tensor de fluxo difusivo	[-]
\vec{Q}_V	Vector fonte de volume	[-]
\bar{Q}_S	Tensor fonte de superfície	[-]
$\rho\vec{f}_E$	Força do corpo por unidade de volume	[N/m ³]
\bar{r}	Tensor de tensão viscosa	[-]
\bar{I}	Tensor unitário	[-]
E	Energia total por unidade de massa	[J/kg]
\vec{F}_D	Vector fluxo difusivo	[-]
γ	Coefficiente adiabático (C_d/C_v)	[-]
\dot{q}_h	Transferência de calor por unidade de massa	[W/kg]
\vec{f}_e	Força do corpo	[-]
Q_S	Termo fonte de superfície	[-]
H_T	Entalpia total	[kJ/kg.K]

h	Entalpia	[kJ/kg.K]
E	Energia total por unidade de massa	[J/kg]
p	Pressão estática	[Pa]
μ	Viscosidade	[Pa.s]
C	Comprimento	[m]
D	Diâmetro	[m]
ΔP	Perdas de carga	[Pa]
$U_{m\acute{a}x}$	Velocidade máxima no tubo	[m/s]
Erro rel. Máx.	Erro relativo máximo	[%]
Erro rel. Méd.	Erro relativo médio	[%]
C_{perfil}	Comprimento de desenvolvimento do perfil	[m]
H	Altura	[m]
L	Largura	[m]
i	Intensidade de turbulência	[%]
Re	Número de Reynolds	[-]
k	Energia cinética turbulenta	[-]
ϵ	Dissipação	[-]
p_{op}	Pressão de operação	[Pa]
M_W	Massa molecular do gás	[g/mol]
R	Constante universal do gás	[J*MOL ⁻¹ *K ⁻¹]
T	Temperatura	[°C]
A	Área	[m ²]

1 INTRODUÇÃO

Os seres humanos possuem pouca proteção contra as duras condições climáticas ao passo que as raposas ou os ursos já nascem com muitos pelos. Nesse sentido, os humanos procuram o conforto térmico desde o início da história da humanidade. Os primeiros seres humanos habitavam em cavernas que destinavam a dar segurança, mas também proteção das condições climáticas extremas. A primeira forma de aquecer o ambiente foi o fogo aberto, depois surgiram as lareiras com utilização de chaminé para dispersar os gases de combustão. O conceito de aquecimento central surgiu na época dos romanos que aqueciam as casas usando uma técnica de construção das casas em piso duplo, em que o fumo da combustão circulava pelas duas camadas do piso. Na mesma época criaram janelas transparentes feitas de mica ou vidro para proteger o interior da habitação do vento e da chuva e permitir a entrada de luz. As principais matérias-primas fontes de energia para aquecimento foram a madeira e o carvão. (Cengel e Ghajar, 2006)

Ao longo dos anos, a população mundial tem vindo a aumentar e conseqüentemente aumenta também o consumo de energia e a libertação de gases nocivos para o ambiente. A Divisão da População das Nações Unidas prevê uma população mundial de cerca de 9 mil milhões de pessoas em 2050, mais 2 mil milhões de pessoas do que em 2009.

A qualidade de vida de um país está relacionada com o seu consumo de energia. Normalmente um aumento do consumo de energia de um país corresponde a um aumento da qualidade de vida. (Alam, et al., 1991)

Os principais problemas do elevado consumo de energia prendem-se com a libertação de gases com efeito de estufa, com gases que destroem a camada de ozono, com o aumento do custo da energia, com as metas da redução de consumo de energias fósseis, mas também, contribui para que um país gaste mais energia renovável do que aquela que produz e por isso consuma recursos naturais.

A produção de energia elétrica provem, quer de combustíveis fósseis, tais como gás natural, carvão e *fuel* óleo, quer de energias renováveis, tais como a energia hídrica, energia eólica, e em menor quantidade de energia fotovoltaica. Portugal tem feito um grande esforço na produção de energia elétrica através de energias renováveis. O aumento da energia eólica tem sido exponencial, de 2002 para 2011 passou de praticamente 0 para 10 TWh, respectivamente.

A questão é que como a energia elétrica depende dos combustíveis fósseis, implica a libertação de gases com efeito de estufa, como o CO₂, e como consequência aumenta a temperatura do ambiente. (Altvater, 1995)

O último relatório de avaliação do IPCC, o mais importante a respeito do aquecimento global, calcula que a temperatura média do planeta subirá de 1,8 °C a 4 °C até 2100, provocando um aumento do nível dos oceanos de 18 a 59 cm, inundações e ondas de calor mais frequentes, além de ciclones mais violentos. (IPCC, 2013)

Para além disso, a relação da energia elétrica com os combustíveis fósseis implica a libertação de gases que destroem a camada de ozono, o CO₂, e consequentemente expõe o ser humano aos raios ultravioleta. (Altvater, 1995)

Um dos problemas do consumo de energia elétrica é o custo que constitui para o utilizador, nesse sentido uma racionalização energética é um ponto importante para a diminuição de custos para o utilizador-pagador. Para acentuar a teoria de baixar os custos com a energia elétrica, segundo dados da Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, o preço da eletricidade em Portugal aumentou desde 1990 até ao segundo trimestre de 2012, de aproximadamente 0.10 para 0.16 €/kWh.

Deve-se também, baixar o consumo de energia elétrica para cumprir as metas da redução de consumo de energias fósseis. A diretiva 2009/28/EC impõe que a Europa reduza 20 % do consumo de energia primária em 2020 e que reduza 20 % das emissões de gases efeito de estufa até 2020. A Estratégia Nacional de Energia de 2020 impõe a Portugal uma poupança de 20 % no consumo energético em 2015. O Protocolo de Quioto que limita a emissão de gases de efeito de estufa por parte dos países membros, no qual consta Portugal, expirou em 31 de Dezembro de 2012. Entretanto, segundo a decisão N^o 406/2009/CE, foi renovado com novas metas, válidas de 1 de Janeiro de 2013 até 31 de Dezembro de 2020. Impõe que a comunidade europeia reduza pelo menos 20 % das emissões de gases com efeito de estufa, em relação a 1990. Em relação a Portugal, só poderá aumentar em 1 % as emissões de gases com efeito de estufa em 2020 em relação a 2005.

Existe outro problema do elevado consumo de energia elétrica. Uma vez que a produção de energia elétrica ainda está muito dependente das matérias-primas fósseis, o seu consumo provoca uma diminuição da matéria-prima que existe já em pouca quantidade.

A Pegada Ecológica é um modo de avaliar, proposto por Wackernagel e Rees, em 1996. É um instrumento que contabiliza os fluxos de matéria e energia que entram e saem de um sistema económico, convertendo-os em área correspondente de terra ou água existentes na natureza para sustentar esse sistema. (Bellen, 2002)

Considerando que a biocapacidade, o total disponível de área produtiva no mundo é de 11,9 bilhões de hectares e que o número de habitantes são 7 bilhões, vem que a biocapacidade por habitante é 1,7 gha.

Em 2007 a pegada humana foi de 18 bilhões de hectares globais, considerando que o número de habitantes é de 6,7 bilhões vem que a pegada ecológica por habitante foi de 2,7 gha. Neste sentido, conclui-se que com o atual nível de consumo de recursos naturais são necessários 1,5 planetas. Tal como se pode ver na Figura 1.1.

Como se não bastasse o aumento da pegada ecológica a biocapacidade tem vindo a diminuir, quer pelo aumento da população, quer pela degradação de solos e marés. (WWF, 2010)

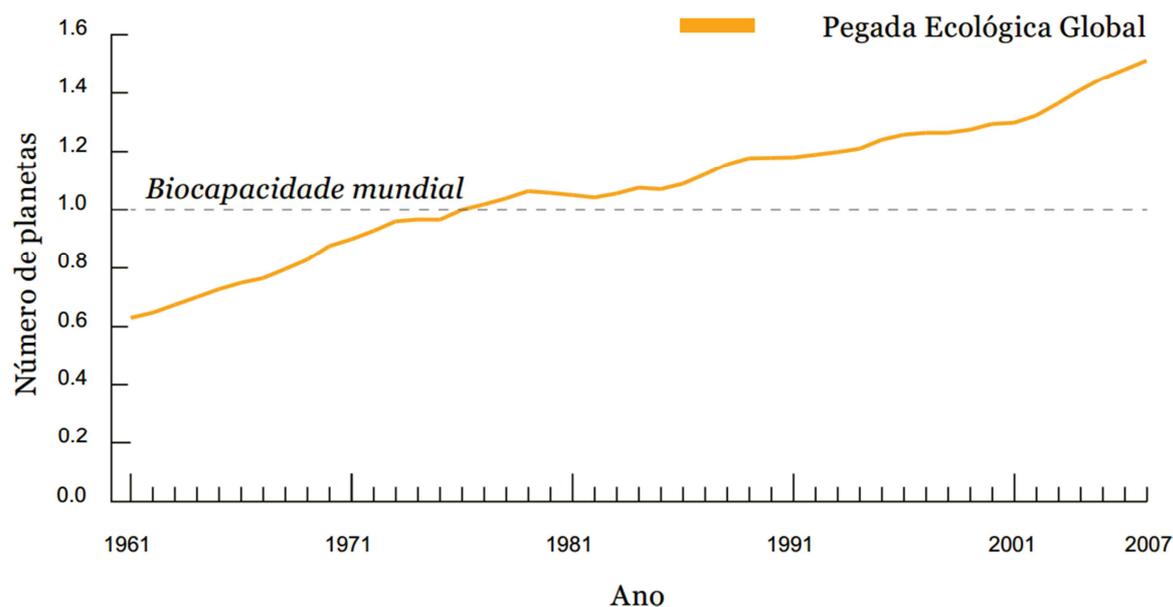


Figura 1.1 - Pegada ecológica global em comparação com a biocapacidade global (WWF, 2010)

Nesta fase vamos analisar a situação de Portugal face ao sector da Energia Elétrica através de dados disponibilizados pelo Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) e pelo Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER). (DGEG, 2012)

A situação de Portugal é que o peso da energia na balança comercial tem vindo a agravar-se na última década, registando um aumento de 4,5 % em 2010 face a 2000. Para além disso tem-se verificado um aumento progressivo do preço do petróleo. Apesar de se verificar uma redução do consumo total de energia final a partir de 2005, o consumo de eletricidade registou uma tendência inversa. Como ponto positivo, Portugal assistiu desde 2000 a uma evolução considerável no sector da geração de eletricidade por via de fontes renováveis.

Conclui-se que pelas razões enumeradas acima se deve diminuir a utilização de energia eléctrica. Nesse sentido, as soluções passam por utilizar recursos renováveis e racionalizar o consumo de energia.

1.1 Climatização

Melhorar a eficiência energética de um espaço confinado com injeção de jatos para o climatizar, mantendo o conforto térmico, bem como, de uma câmara de mistura, de uma unidade de tratamento de ar (UTA) constituem soluções importantes, a fim de diminuir o consumo de energia eléctrica.

Dada a importância do conforto térmico numa sala foi criada legislação por forma a garantir o conforto e a saúde do trabalhador. A legislação foi publicada pela *International Organization for Standardization (ISO)* e *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)*.

O conforto térmico é definido pela norma *ISO 7730* (1994) como uma condição da mente que demonstra agrado pelo ambiente térmico. O desconforto térmico poderá ser causado pelo calor ou frio em todo o corpo ou em alguma parte específica do corpo, ou por uma diferença de temperatura entre o tornozelo e a cabeça, ou por pisos quentes, ou por pisos frios, ou por uma grande diferença da temperatura radiada pelos objetos. O desconforto poderá ser causado devido à utilização de demasiada roupa, ou a uma taxa metabólica muito alta.

O conforto térmico é definido pela norma *ASHRAE Standard 55* (1992) como o estado de espírito que demonstra satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa. Refere que o homem atinge o conforto térmico se o balanço de todas as trocas de calor a que está submetido o corpo for nulo e a temperatura da pele e o suor, estiverem dentro de certos parâmetros.

Criar um ambiente térmico confortável para todas as pessoas que se encontram num recinto é praticamente impossível, na medida em que enquanto uma pessoa sente-se agradada com o ambiente outra sente-se desconfortável. (Markov e Stankov, 2002)

Portanto, o desafio essencial é criar um ambiente térmico que agrade o maior número de pessoas.

Ao longo dos anos tem-se feito pesquisas, quer em laboratório, quer em situações reais para analisar e avaliar a relação entre conforto térmico e o desempenho do trabalhador. Concluiu-se que ambientes que se encontravam frios ou quentes originavam um desconforto nas pessoas. Este desconforto pode causar uma redução significativa do desempenho. (Dumke, 2001)

Um estudo levado a cabo com as unidades industriais conclui que o melhoramento do conforto térmico favorece os índices de produtividade dos colaboradores, ou seja, controlando os sistemas de climatização obtém-se um aumento da produtividade dos trabalhadores, entre os 2,8 % a 8,6 %, de acordo com o tipo de atividade. (Stoops, 2004)

Apesar das flutuações térmicas do meio ambiente o Homem consegue manter a temperatura do seu corpo num intervalo de temperaturas definido, portanto denomina-se um ser vivo homotérmico. Para além disso, o Homem é um ser racional e procura dar resposta às suas necessidades e ambições. Logo, conclui-se que o melhoramento das condições ambientais, melhoram o conforto térmico, mas também a produtividade. (Ruas, 2002)

Um dos factores mais importantes para proporcionar melhor conforto térmico é a temperatura. A temperatura interna óptima para o ser humano é cerca de 37 °C. Contudo a temperatura interna pode variar devido à exposição a ambientes quentes, a ambientes frios, por estarmos doentes, ou por prática de exercício físico. A literatura mostra que a temperatura corporal média do Homem está compreendida no intervalo de 36,1 a 37,2 °C (Magalhães et al., 2002)

Um sistema de climatização pode ser fundamental para proporcionar uma temperatura mais confortável a um utilizador de um espaço, bem como para melhorar a sua produtividade no trabalho que realiza. O sistema de climatização aliado à ventilação forçada pode contribuir para retirar de um espaço poluentes que contaminam o ar e introduzir ar novo e limpo à temperatura pretendida.

A simulação *CFD* tem assumido uma importância cada vez mais determinante no cálculo computacional, das equações de mecânica dos fluidos, pois é uma forma flexível, pouco dispendiosa e rápida, ao invés de construir protótipos e fazer medições experimentais. Contudo, a técnica só proporciona resultados fiáveis utilizada adequadamente.

Em climatização, a obtenção de condições de insuflação da mistura ar/vapor de água com parâmetros de pureza, temperatura e humidade adequadas, assenta normalmente na mistura de caudais interiores recirculados com correntes de ar fresco de renovação.

1.2 Objetivos do Trabalho

A finalidade do presente trabalho foi em realizar simulações *CFD*, de jactos cruzados, em espaços confinados e estudar a influência da injeção na extensão do escoamento de interação com a corrente principal, em espaço confinado, através da avaliação do grau de homogeneização entre as duas correntes até ao escoamento de mistura final. Os resultados obtidos foram posteriormente comparados com dados experimentais de Nunes (2003).

Com a finalidade de estudar a distribuição de temperaturas da mistura, realizou-se várias simulações, para o caso do jacto injetado, a diferentes temperaturas.

Para adquirir competências no manuseamento do programa *CFD*, foram realizadas simulações de casos simples como o escoamento laminar e turbulento, numa tubagem, bem como, para a injeção de um jacto circular livre. Os dados foram comparados com dados experimentais, para validar os resultados.

Inicialmente, realizou-se uma extensa procura bibliográfica de artigos relacionados com este tema, a fim de conhecer os parâmetros a definir no programa *CFD*, o tipo de trabalhos realizados neste âmbito, e as conclusões que obtiveram.

1.3 Organização da tese

De modo a proporcionar uma leitura mais agradável e facilitar a compreensão do leitor, dividiu-se de forma criteriosa o presente relatório por vários capítulos, sendo o seu conteúdo organizado por pontos e subpontos de forma adequada.

No Capítulo 1, designado por “**Introdução**”, salienta-se a importância do tema a nível mundial, bem como o contributo deste trabalho na área em questão. Salientam-se as razões pelas quais se deve melhorar a eficiência da climatização. Menciona-se os principais objectivos deste trabalho e a estrutura adoptada para o relatório.

O Capítulo 2 consiste na “**Revisão Bibliográfica**”, no qual se apresenta todos os dados importantes para a compreensão do tema. Neste capítulo, evidenciam-se 2 tópicos: i) “Estado da Arte”, no qual serão apresentados diferentes trabalhos referentes ao tema que se consideraram interessantes; ii) “Difusão do ar”, ponto onde serão apresentadas as principais noções sobre difusão do ar, como o seu conceito, as suas aplicações, os seus objectivos, o mecanismo de transporte e a sua distribuição.

No Capítulo 3, “**Computational Fluid Dynamics**”, apresenta-se os princípios que estão na base do *CFD*, com maior realce para as Leis da Conservação, para os modelos de turbulência, para os métodos de solução, para os diversos tipos de malha utilizados pelo programa *FLUENT* e para os métodos de tratamento junto à parede.

No Capítulo 4, “**Validação da Simulação CFD**” são feitas duas simulações *CFD* e comparadas com os respectivos dados teóricos, a fim de adquirir competências na utilização do software *ANSYS* e para validar modelos que são utilizados em outros casos, mais complexos.

O Capítulo 5, “**Apresentação, Análise e Discussão dos Resultados**”, corresponde à base de todo o trabalho, sendo por isso de elevada importância. Em primeiro lugar é apresentado um dos diversos casos de estudo abordados. Em segundo lugar é feita uma explicação, ora do cálculo analítico, ora do caso experimental, conforme a situação. Em terceiro lugar é descrito o processo de simulação *CFD*, designadamente, a geometria modelada, a configuração da malha gerada, os parâmetros definidos no programa e os critérios de paragem utilizados. Em quarto lugar os resultados da simulação são comparados com os dados experimentais, ou teóricos, conforme a situação, e nesta fase é feita uma análise e discussão dos resultados obtidos.

O Capítulo 5, “**Apontamentos Finais**”, resume o projeto desenvolvido, lista as principais conclusões que a elaboração do presente trabalho proporcionou e faz-se sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta fase fez-se uma revisão bibliográfica dos estudos mais relevantes realizados acerca da simulação numérica na climatização em edifícios, bem como, da injeção de jatos. Este estudo foi realizado para perceber quais as conclusões que já se obtiveram com esses trabalhos, bem como para perceber quais os parâmetros mais estudados até ao momento, e para perceber quais os passos a seguir para a resolução de um trabalho desse tipo.

2.1 Climatização em edifícios

O trabalho realizado por Rossi et al. (2012) utilizou a simulação *CFD*, mas também medições reais, para avaliar o conforto térmico num laboratório de informática, com sistema de ar condicionado do tipo *split*, com jacto unidirecional.

O ambiente estudado foi um laboratório de informática com ar condicionado do tipo *split*, com potência de refrigeração de 5,28 kW (Figura 2.1). O laboratório possui lugar para 12 pessoas e as seguintes dimensões: 4,35 m (comprimento) x 5,10 m (largura) x 2,80 m (altura). A parede ao fundo possui janelas em toda sua extensão e está voltada para o exterior. As demais paredes são internas. O tecto é de gesso e possui um vão de 0,7 m até à laje, que é coberta por telhas metálicas.

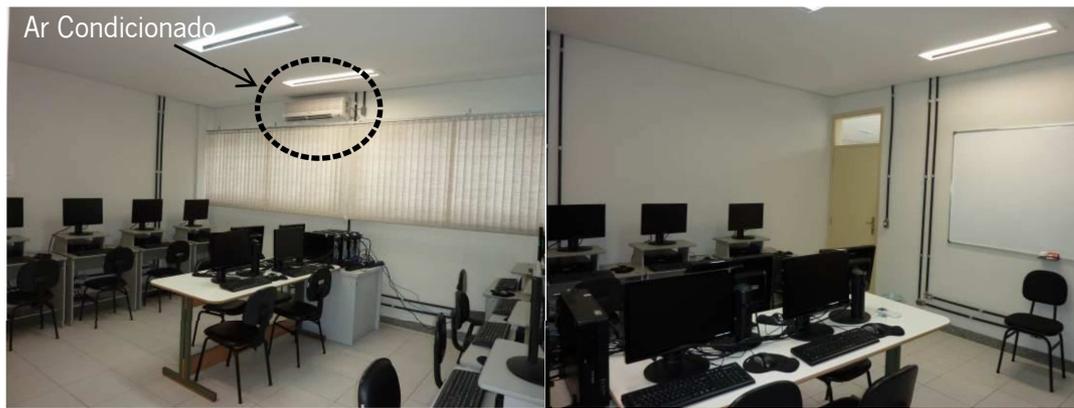


Figura 2.1 – Laboratório de Informática (Rossi et al., 2012)

Treze pontos de temperatura foram monitorados durante cerca de 2 h, a cada 10 s, num dia típico de uso. Oito pontos nas fronteiras da sala e os outros 5 pontos foram instalados no interior desta.

Após passarem 930 segundos de aquisição de dados ligou-se o aparelho de ar condicionado. Para efetuar as simulações, foram escolhidos dois intervalos de tempo. Um intervalo é o funcionamento do ar condicionado logo após ser ligado. O outro intervalo é o funcionamento do ar condicionado duas horas após o aparelho ter sido ligado.

Depois de se ter registado as temperaturas do laboratório nos treze pontos para os dois intervalos de tempo, obtiveram-se as equações da temperatura no ponto em função do instante de tempo.

Para iniciar a simulação *CFD* procedeu-se à escolha da malha a utilizar no laboratório.

A malha foi gerada com elementos hexaédricos com dimensão básica de 0,16 m. O escoamento de ar proveniente do aparelho de ar condicionado foi modelado como tridimensional, turbulento, incompressível e em regime transiente. Foi adoptado o modelo de turbulência *k-ε*. Efeitos de flutuabilidade foram considerados. Modelos de radiação e de carga térmica (pessoas e equipamentos) não foram incluídos. A temperatura inicial do ar na sala foi admitida como uniforme e com o valor 25,0 °C.

Na simulação *CFD* obteve-se para os dois intervalos a distribuição da temperatura e a distribuição da velocidade. Obtiveram-se também dois índices para avaliar a distribuição do nível de conforto térmico no laboratório, sendo o *PMV* (Predicted Mean Vote) e a *TECA* (*Effective Draft*

Temperature). Por fim ainda se calculou o *PPD* (Predicted Percent Dissatisfied). Os valores de *PMV* e *PPD* só foram calculados para o último instante dos dois intervalos.

Para analisar a credibilidade do estudo foi realizada uma validação da simulação, ou seja, os resultados da simulação do primeiro intervalo de tempo foram comparados com dados experimentais com objectivo de validar o modelo usado. A média das diferenças foi de 0,26 °C, o que permite concluir que os dados da simulação refletem com margem de erro pequena a situação medida.

Conclui-se que o ar condicionado com jacto unidirecional não foi capaz de promover uma distribuição uniforme de temperatura e velocidade do ar. Os pontos de desconforto avaliados através do *PMV* apontaram desconforto para frio na direção principal do jacto de ar. Nestes pontos o *PPD* chegou a 91,6 %.

Li et al. (2009) realizou um estudo usando o método *CFD* a fim de avaliar o ambiente térmico interior de um edifício de uma estação de comboios, em que se usa três modelos diferentes de ar condicionado. Também se estudou o impacto dos parâmetros do ar condicionado, tais como a temperatura de ar insuflada, velocidade, altitude e ângulo de incidência.

O edifício da estação de comboios fica localizado na China. O tamanho do edifício de dois pisos é 88 m (comprimento) * 70 m (largura) * 20.3 m (altura). No primeiro piso tem-se a sala de entrada e no segundo piso a sala de espera. A sala de entrada tem uma altura de 20.3 m, ao passo que a sala de espera de 12,8 m. A ligação entre os dois pisos é feita através de duas escadas rolantes. No verão o ar é arrefecido numa câmara de arrefecimento situada no telhado e libertado para ambas as salas. Para a sala de espera existe três esquemas de insuflação de ar, designadamente a insuflação de lado (esquema 1) (Figura 2.2), a insuflação por pilar artificial (esquema 2), e por último a insuflação pelo tecto (esquema 3). Por outro lado a sala de entrada só adopta a insuflação de lado. O esquema de insuflação de lado é o único que se usa na prática, os outros dois são apenas introduzidos para discussão. Para os 3 esquemas de insuflação de ar as cargas de arrefecimento são as mesmas. A temperatura de insuflação do ar é 16 °C e a temperatura do edifício é 26 °C.

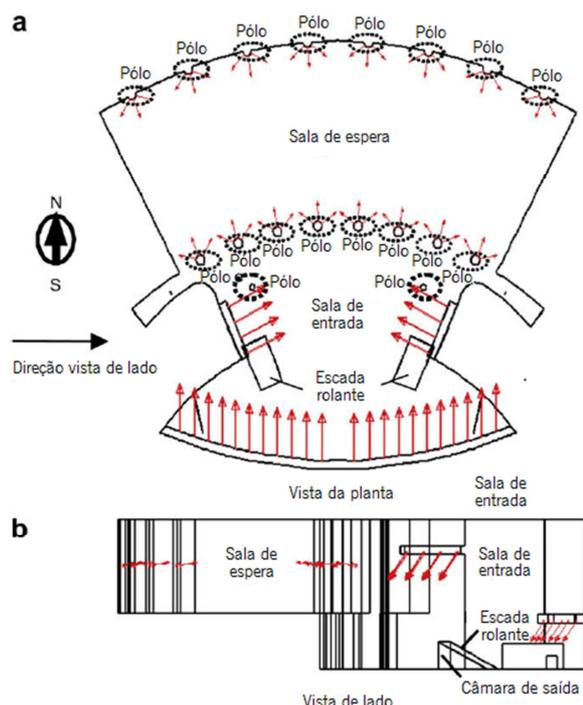


Figura 2.2 - Insuflação através do esquema 1 (Adaptado de Li et al. (2009))

A Tabela 2.1 demonstra a disposição dos difusores e extractores para os três esquemas estudados.

Tabela 2.1 - Disposição dos difusores e extractores para os três esquemas

		Esquema 1	Esquema 2	Esquema 3
Sala de Espera	Insuflação	8 pontos na parede Sul 8 pontos na parede Norte Altura de 14 m Ângulo de 10 ° para cima da horizontal	4 pilares com difusor no topo Altura de 2.2 m	33 difusores instalados no tecto
	Extração	16 pontos de saída Altura de 7.8 e 8.5 m		
Sala de Entrada	Insuflação	22 difusores à altura 6.5 m na parede Sul Ângulo de 30 ° para baixo da horizontal 8 difusores à altura de 15.7 m na parede Leste e Oeste Ângulo de 30 ° para baixo da horizontal		
	Extração	2 câmaras de saída atrás de cada escada rolante Altura de 1.5 m		

Realizaram-se medições da temperatura de ar detalhada e da velocidade em 11 pontos do edifício a 1.5 m do solo. Os pontos 1 ao 9 estão a 1.5 m acima do solo na sala de espera, ao passo que os pontos 10 e 11 estão a 1.5 m acima do solo na sala de entrada.

As condições do modelo da simulação são as seguintes:

- Software *CFD*, *STAR-CD*, método dos volumes finitos
- Modelo de turbulência *k-ε*
- Esquema *QUICK* e algoritmo *SIMPLE*
- Malha de elementos híbridos não estruturada

Na Tabela 2.2 são indicados os índices de avaliação utilizados no estudo para avaliar a velocidade do ar, os campos de temperatura, a distribuição do ar e o conforto térmico.

Tabela 2.2 – Índices de Avaliação

Índices de Avaliação	
Quais	O que avaliam
Velocidade média Temperatura média Coeficiente não uniforme da distribuição da velocidade Coeficiente não uniforme da distribuição da temperatura	Velocidade do ar e Campos da temperatura
Índice de desempenho da difusão do ar	Distribuição do ar e Conforto térmico

Neste estudo fez-se uma validação do modelo. Para os 11 pontos analisados os erros da velocidade média e da temperatura média foram de 0.032 m/s e 0.41 °C, respectivamente. Estes resultados demonstram a qualidade da simulação *CFD*.

Conclui-se que mantendo constantes todos os parâmetros, alterar o esquema de insuflação da sala de espera tem efeito significativo na distribuição de ar e conforto térmico da sala de espera e pouco na sala de entrada. O esquema de insuflação de lado cria uma satisfatória uniformidade da velocidade e distribuição da temperatura. Alterar a temperatura de ar insuflado, a velocidade, a altitude e o ângulo de incidência tem um efeito significativo no ambiente térmico do edifício. Para obter o melhor conforto térmico com ar condicionado estratificado, a meia altura do edifício é uma boa posição para insuflar o ar e o ângulo zero com a horizontal é um ângulo recomendável.

Lo e Novoselac (2010) realizaram um trabalho em que estuda a possibilidade de utilizar um fluxo de ar localizado a dividir um escritório aberto em zonas sem paredes divisórias. Utilizou-se a simulação *CFD* para simular o fluxo de ar localizado, a energia, bem como a qualidade de ar interior de um escritório.

Este estudo investiga o uso de três diferentes aspectos para o fluxo de ar localizado num escritório. O primeiro aspecto determina se a insuflação de ar e a configuração de exaustão de fluxo localizado pode produzir um fluxo de ar estável e condições térmicas para o conceito de zona de ocupação controlada. O segundo aspecto é sobre a análise do fluxo de ar de ventilação e da eficácia de remoção de contaminantes a fim de definir a qualidade de ar interior. O terceiro aspecto consiste numa análise da simulação de energia do escritório baseada na ocupação e o fluxo de ar localizado para determinar o potencial de energia salva.

O sistema de fluxo de ar localizado é diferente dos tradicionais difusores, na medida em que não utiliza o Efeito Coanda para a distribuição do ar no espaço. A configuração do difusor de fluxo localizado consiste num único ventilador de exaustão do ar ao centro cercado por quatro difusores que fazem a insuflação do ar. (Figura 2.3) O caudal debitado pelo difusor foi de $0.047 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e considerou-se o sistema adiabático.

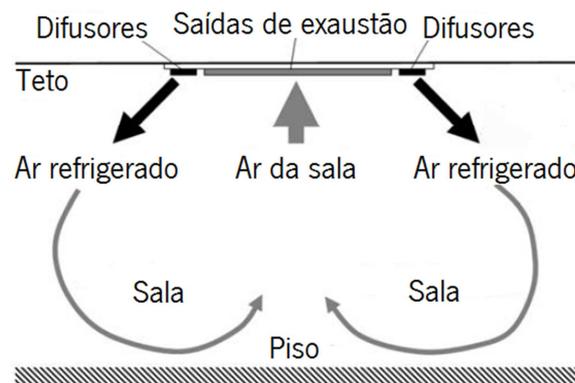


Figura 2.3 - Difusor com integração da insuflação e exaustão, com distribuição do fluxo de ar na zona ocupada de um escritório aberto (Adaptado de Lo e Novoselac (2010))

A área do escritório analisado é de $2.44 \text{ m} \times 2.44 \text{ m}$. Esse escritório tem duas configurações. A primeira é a configuração do escritório costas com costas com uma parede a dividir os dois espaços e a segunda é a configuração dos escritórios lado a lado com a existência de um corredor aberto. (Figura 2.4)

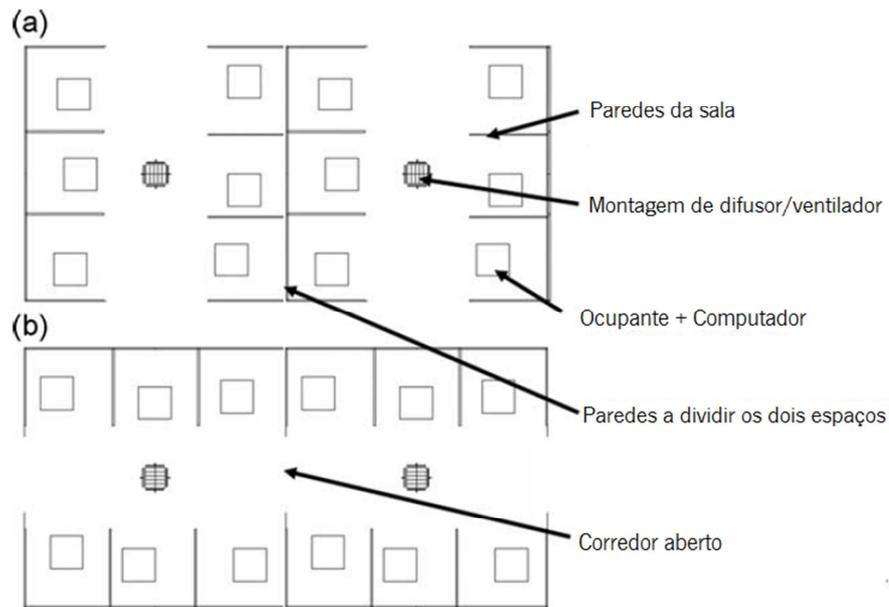


Figura 2.4 - As duas configurações do escritório: (a) configuração do escritório com uma parede a dividir os dois espaços e (b) configuração dos escritórios com corredor aberto (Adaptado do Lo e Novoselac (2010))

Para estas duas configurações do escritório as análises dos parâmetros foram realizadas considerando o efeito de diferentes cargas de arrefecimento consoante vários cenários de ocupação. (Tabela 2.3)

Tabela 2.3 - Parâmetros de análise na simulação *CFD* (Adaptado de Lo e Novoselac (2010))

Caso	Descrição	Zona esq. HVAC	Potência (W)
A1	Configuração "a" com ocupação total e equipamento ligado em ambas as zonas	Ligado	870
A2	Mesmo que A1 mas com zona esquerda com metade da ocupação	Ligado	435
A3	Mesmo que A1 mas com zona esquerda sem ocupação e equipamento desligado	Desligado	0
A4	Mesmo que A3 com uma carga adicional a simular uma área maior	Desligado	1740
B1	Configuração "b" com ocupação total e equipamento ligado em ambas as zonas	Ligado	870
B2	Mesmo que B1 mas com metade da ocupação	Ligado	435
B3	Mesmo que B1 mas sem ocupação e equipamento desligado	Desligado	0
B4	Mesmo que B3 com uma carga adicional a simular uma área maior	Desligado	1740

As condições do modelo CFD utilizado no estudo foram:

- Método do momento proposto por Srebric e Chen
- Modelo de turbulência $k-\epsilon$
- Malha de 20 cm
- Consideram cargas internas

Conclui-se que é possível criar um fluxo localizado com sucesso. O fluxo de ar é autossuficiente nas duas zonas, mas menos proeminente na zona aberta. A diferença de 2 °C entre a zona ocupada e desocupada indica potencial de poupança de energia. O caso de estudo

revela uma poupança de energia de até 12 %. O fluxo de ar evita a grande mistura de ar entre áreas ocupadas e desocupadas, cria uma boa qualidade de ar interior, remove os contaminantes do interior e ainda pode isolar contaminantes.

Catalina et al. (2009) fez um estudo experimental e *CFD* de um arrefecedor radiante de teto, sob condições controladas. Esta pesquisa pretende utilizar os resultados obtidos a partir dos dois estudos, a fim de analisar o conforto térmico interior usando a previsão do voto médio.

A principal diferença entre um arrefecedor de teto e um sistema de ar condicionado é o mecanismo de transferência de calor. Os sistemas de ar condicionado tradicionais são baseados apenas na convecção, enquanto o teto arrefecido emprega a combinação da radiação e convecção. Com tecto arrefecido, a transferência de calor radiante ocorre pela clara emissão de ondas electromagnéticas de ocupantes quentes e pelo meio ambiente para o tecto radiante. O ar quente entra em contacto com a superfície fria é arrefecido abaixo da temperatura média da sala e portanto desloca-se para a zona de ocupação.

A sala experimental em Lyon, França é composta por dois compartimentos idênticos (célula 1 e 2), cujas dimensões são 3.10, 3.10, 2.50 m, nas coordenadas (x,y,z). (Figura 2.5)

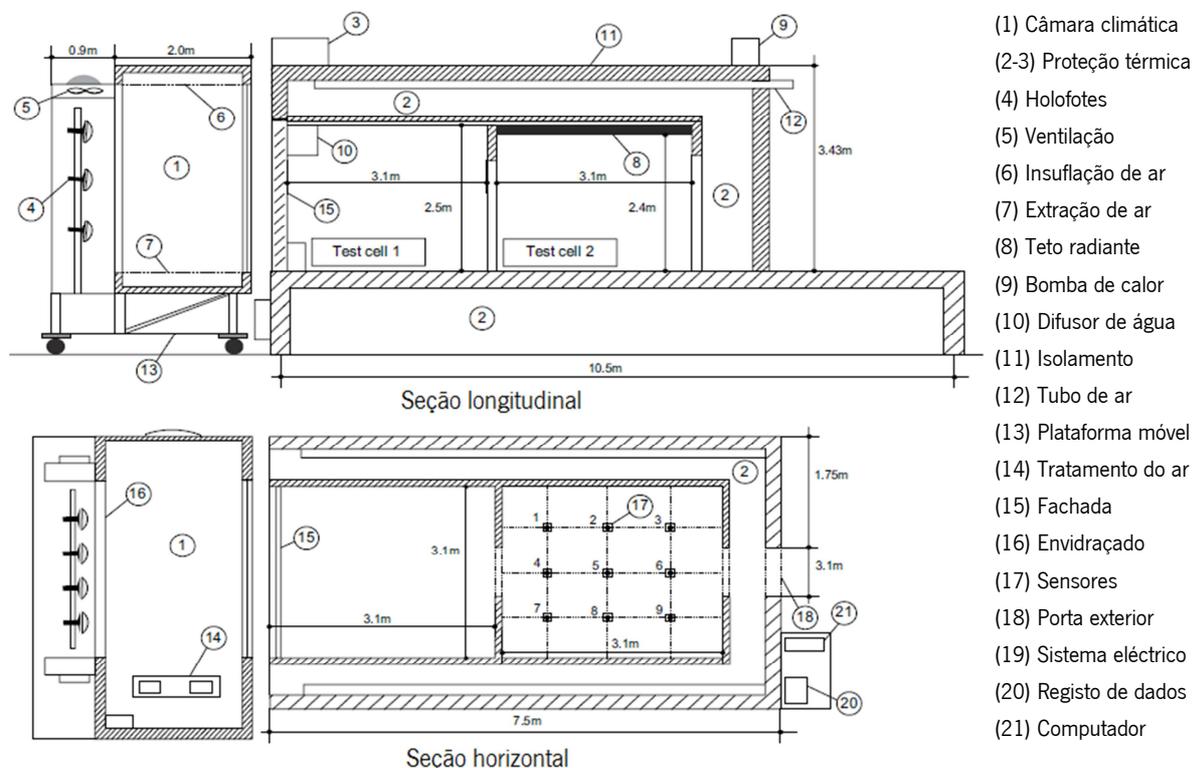


Figura 2.5 - Sala teste (Adaptado de Catalina et al. (2009))

As características de cada célula são demonstradas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Características da célula 1 e 2

Célula 1	Célula 2
12 holofotes de 1000 W cada	Teto de arrefecimento radiante
	$16.9 < \text{Temperatura teto } (^{\circ}\text{C}) < 18.9$
	Temperatura das paredes ($^{\circ}\text{C}$) = 26
$-10 < \text{Temperatura da câmara climática } (^{\circ}\text{C}) < 40$	

O tempo de medição foi de 45 segundos e foram feitas nove medições por cada face do quarto.

As condições do modelo utilizado para a simulação *CFD* são expressas de seguida:

- Fluxo de ar em estado estacionário, 3 dimensões, incompressível e turbulento;
- Modelo de turbulência k-ε;
- Programa *CFD*, *STAR-CCM+*;
- Malha não estruturada com elementos poliédricos, com 116 762 células.

Conclui-se que os painéis de teto arrefecido são uma alternativa interessante aos tradicionais sistemas de ar condicionado. Os campos de velocidade revelam desconforto na zona dos pés e tornozelos com bons valores no resto da sala. Para o teto de arrefecimento radiante a assimetria de temperatura vertical é menor do que 1 °C, o conforto térmico é obtido mesmo para altas taxas de metabolismo e isolamento de roupa. O índice *PMV* mostra que o conforto térmico é encontrado e é uniformemente distribuído, não importando a posição na sala teste.

Stamou et al. (2008) avaliou o conforto térmico de uma sala dos jogos olímpicos de Atenas de 2004. A simulação *CFD* foi utilizada de modo a calcular o fluxo do ar e os campos de temperatura, para os diversos valores de temperatura injetados pelo ar condicionado.

A arena tem dimensões de 122 m de comprimento, de 100 m de largura e 30 m de altura. Na Figura 2.6 tem-se a vista do interior da *Arena Galatsi* simulada com os principais dispositivos de insuflação e extração de ar.

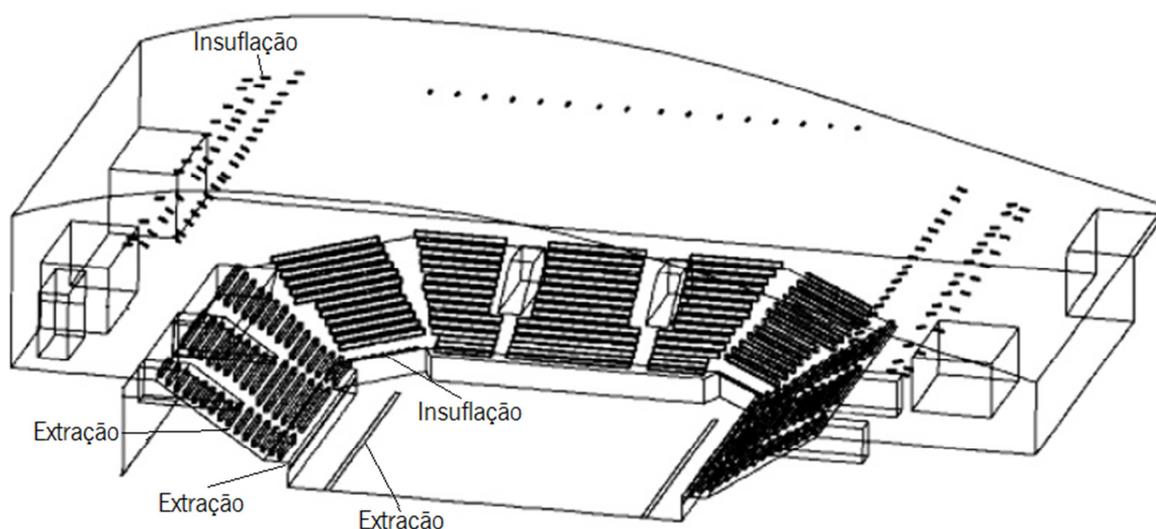


Figura 2.6 - Vista do interior da Arena Galatsi, com indicação da localização da insuflação e extração de ar (Adaptado de Stamou et al. (2008))

As características do projeto de insuflação e extração do ar, tais como, número de difusores e extractores instalados, posição, direcção do jacto de ar e caudal são indicados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Características da Insuflação e Extração do Ar

Insuflação	Nas 4 entradas existentes, 4 séries de 8 difusores ($53\,600 \frac{m^3}{h}$) Ângulo do difusor é + 28 °, para cima da horizontal
	Grupos de 56 difusores em 4 tubos de ar ($225\,120 \frac{m^3}{h}$) Os jactos apontam para baixo em ângulos entre - 30 ° a +18 °
Extração	32 grelhas nas paredes ($36\,100 \frac{m^3}{h}$)
	2046 aberturas em grupos de 20 debaixo dos bancos ($160\,774 \frac{m^3}{h}$)
	57 aberturas no piso ($57\,351 \frac{m^3}{h}$)

As Características do projeto estão representadas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Características do projeto

Nº de centrais de ar condicionado	9
Fluxo de ar	Varia entre 0 e 100 %
Ti	14 °C e 16 °C
Nº de pessoas	6000
Te	36.5 °C
Para Ti = 14 °C	Ta=23.52 °C
Para Ti = 16 °C	Ta=25.08 °C

Temperatura de ar inicial na arena (Ta)

Temperatura do ar de insuflação (Ti)

Temperatura do ar exterior (Te)

As Características do modelo estão representadas na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Características do modelo

Programa	<i>CFX</i>
Modelo de turbulência	<i>SST</i> (combina o modelo <i>k-x</i> com o <i>k-ε</i>)
Malha	Não estruturada com 4 000 000 de elementos

Os resultados da simulação *CFD* demonstraram que o sistema de ar condicionado de volume variável instalado é capaz de assegurar condições térmicas satisfatórias para os espetadores. Os valores de *PMV* e *PPD* calculados mostram que as condições térmicas na Arena são muito satisfatórias para $T_i = 16\text{ °C}$, só menos do que 7 % dos espetadores espera que seja um pouco desconfortável. A $T_i = 16\text{ °C}$ foi proposta para aplicação durante os jogos olímpicos de Atenas de 2004. Além disso, foram identificadas zonas de corrente de ar na área dos atletas.

Aziz et al. (2012) investigou experimentalmente e computacionalmente as características do fluxo de ar de três difusores de teto, nomeadamente, vórtice, redondo e quadrado, e o seu efeito no conforto térmico da sala.

Criou-se um quarto experimental a fim de medir o campo das temperaturas. A geometria, do caso experimental, é mostrada na Figura 2.7. Ela é composta por duas partes principais, tais como, a unidade de ar condicionado e a sala teste. O ar condicionado é um simples ciclo de compressão do vapor. A sala teste é cubica, envidraçada e tem 1 m de comprimento. A conduta de insuflação tem 15 cm de diâmetro que vai desde o ar condicionado até à sala teste.

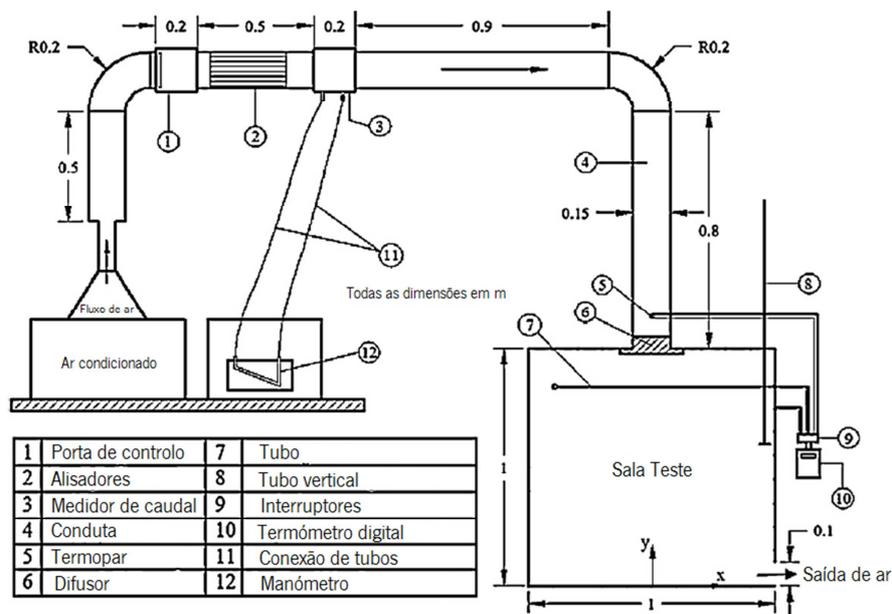


Figura 2.7 - Geometria da instalação experimental (Adaptado de Aziz et al. (2012))

A configuração geometria dos difusores estudados pode ser visualizada na Figura 2.8.

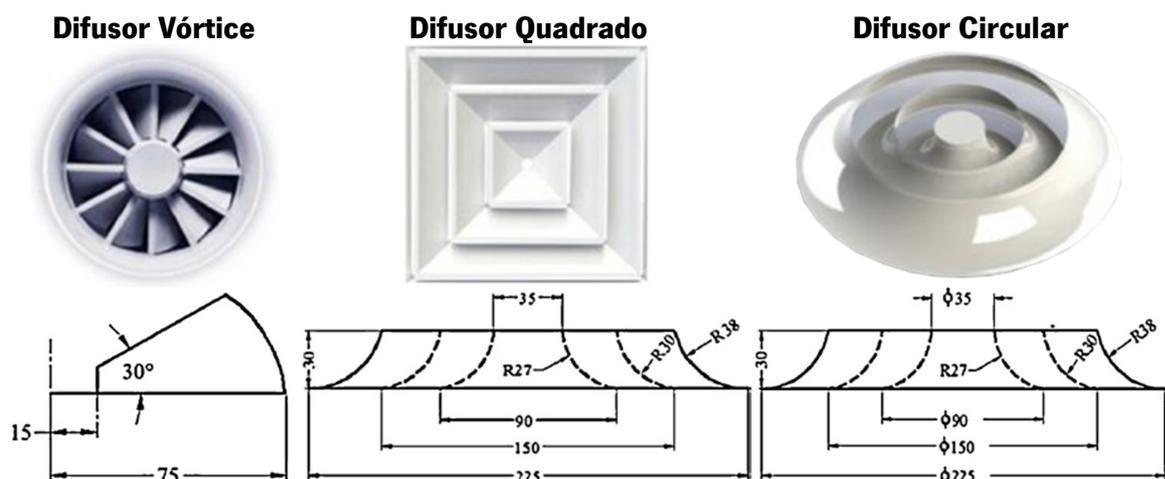


Figura 2.8 – Configuração geométrica dos difusores (Adaptado de Aziz et al. (2012))

As malhas não estruturadas foram usadas para discretizar o domínio numérico, as equações de conservação foram resolvidas usando o programa *FLUENT* e foi feita a comparação através de 3 modelos de turbulência diferentes com dados experimentais. Após a validação do código o efeito da velocidade do ar insuflado no fluxo e campo térmico é investigado e depois no conforto térmico e consumo energético.

Os parâmetros do projeto estão representados na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Parâmetros do projeto

Velocidades	Entre 1 a 4 m/s
Software	<i>FLUENT</i> 6.3.26 e <i>Gambit</i> 2.4.6
Flutuabilidade Térmica	Aproximação <i>Boussinesq</i>
Fluxo de ar	Equações <i>time-averaged Navier-Stokes</i>
Superfícies	Isotérmicas
Intensidade turbulência	8 %
Diâmetro hidráulico	0.15 m/s
Malha	Não estruturada com 150 000 células
Modelo de turbulência	$k-\epsilon$ (precisão de 0.77 %)

Os valores dos vetores da velocidade do difusor vórtice exibem três regiões específicas, nomeadamente, região do fluxo primário turbulenta, região no fim do jacto com recirculação superior e região inferior sem qualquer recirculação ou turbulência. Verifica-se que a força de reação tem bastante efeito no campo da temperatura e no de velocidade. A zona de conforto térmico criada pelos três difusores é grande, mas diminui no caso do difusor redondo quando o número de Reynolds aumenta acima de 30 000. O difusor de vórtice põe o quarto mais “frio” do que o difusor quadrado ou redondo. Consume menos energia 1.5 vezes do que o difusor quadrado, portanto economiza energia. O coeficiente de perda de velocidade de um difusor quadrado e redondo é quase a mesma e é 2.6 vezes maior do que a perda de um difusor de vórtice com ângulo de 45°. Os difusores de vórtice com ângulos de 45° são adequados para aplicações em edifícios arranha-céus, na medida em que têm um lançamento adequado e o seu jacto é focado no centro da sala e poupa energia.

Einberg et al. (2005) realizou ensaios experimentais e simulação *CFD* de um difusor de ar em espaço industrial, de modo a validar o modelo do difusor do fabricante.

O difusor de ar industrial em estudo consiste em duas partes, uma parte de baixa velocidade (*LVP*) e outra parte de alta velocidade (*HVP*). (Figura 2.9) A parte *LVP* tem uma ligação de conduta circular com 200 mm, o fluxo padrão é circular, constante e o painel frontal tem 10 % de perfuração. A parte *HVP* foi instalada sob a parte *LVP*, tem forma circular e dimensão de 160 mm. Este tem a funcionalidade de fornecer fluxo radial ou descendente e ar quente, bem como “frio”.

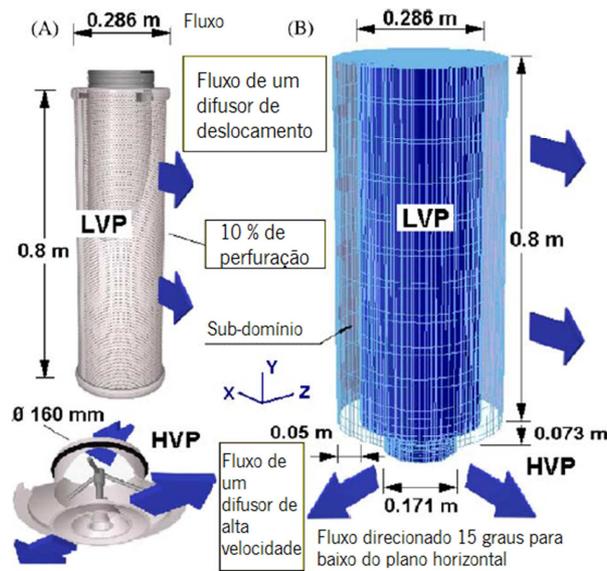


Figura 2.9 - Geometria do difusor de ar real (A) e representação *CFD* (B) (Adaptado de Einberg et al. (2005))

O difusor *LVP* faz insuflação com uma velocidade constante de aproximadamente 0.2 ms^{-1} e o fluxo de ar é de 84 ls^{-1} . Ao passo que no difusor *HVP* o jacto de insuflação pode ser dirigido de acordo com as necessidades do utilizador, neste caso específico, foi definido para formar cones com ângulo de 15° e disposto em diversas direções.

A sala da experiência tem uma área de 40 m^2 , uma altura de 6 m , e as paredes são de poliestireno, com uma espessura de 50 mm . (Figura 2.10)

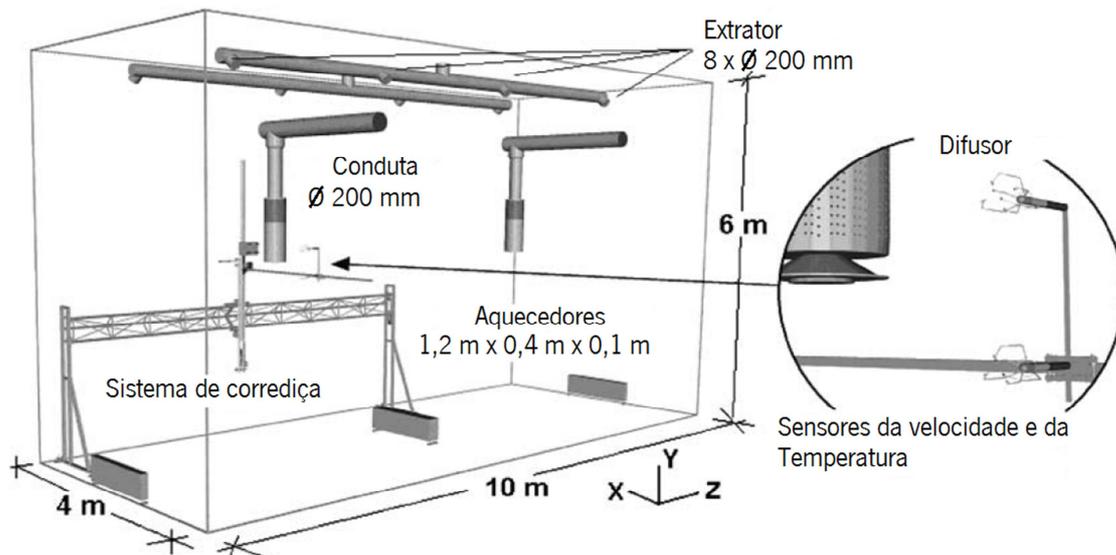


Figura 2.10 - Configuração da sala de experiência (Adaptado de Einberg et al. (2005))

A insuflação de ar é realizada através de dois dispositivos a 3 metros do solo, ao passo que a extração é realizada por 8 aberturas no teto da sala, com diâmetro de 0.2 m. Para ambas as situações o caudal de ar é 140 l/s.

Na sala também foram instalados três aquecedores convectivos, com uma potência total de 1344 W.

As medições experimentais da velocidade e temperatura foram realizadas em dois planos, para $z = 0,1$ m e $z = 0,5$ m.

As condições do modelo utilizado são apresentadas na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Condições do modelo utilizado

Malha	270 000 Elementos hexaédricos
Domínio	$4 \times 10 \times 6 \text{ m}^3$
Programa	<i>FLUENT</i>
Modelo de turbulência	k- ϵ
Discretização	Técnica de volumes finitos
Algoritmo	<i>SIMPLE</i>
Efeitos de flutuabilidade	Aproximação <i>Boussinesq</i>
Caudal de ar	Constante e incompressível
Convergência	Σ Resíduos normalizados $< 10^4$ (Equação da continuidade) Σ Resíduos normalizados $< 10^7$ (Equação da energia)

Conclui-se que o escoamento não foi simétrico em torno do difusor de acordo com as medições experimentais. A divergência de resultados ocorre essencialmente para uma altura entre 2.9 a 3.0 m do solo. Os melhores resultados da comparação foram obtidos a uma distância mais longa do difusor. A velocidade máxima do *HVP* do difusor foi subestimada em ambos os planos, ao passo que o *LVP* apresentou melhores resultados. Verificou-se que os resultados da simulação são similares aos dados de medição e aos testes de fumo visualizados.

Finalizada a apresentação ao leitor dos casos analisados, partiu-se para uma etapa importante, a fim de verificar quais os parâmetros de climatização mais estudados. Para tal, concebeu-se uma tabela, onde são definidos os parâmetros mais importantes de climatização e verifica-se se estes variam, ou se são fixos, para os diversos trabalhos. Portanto os parâmetros que mais variam são aqueles mais estudados. De acordo com a Tabela 2.10 eles são o tipo de difusores, a temperatura e humidade de insuflação.

Tabela 2.10 – Comparação das características para os diversos estudos

	Rossi et al. (2012)	Li et al. (2009)	James e Novoselac (2010)	Catalina et al. (2009)	Stamou et al. (2008)	Aziz et al. (2012)	Einberg et al. (2005)
Volume do edifício	Fixo	Fixo	Fixo	Fixo	Fixo	Fixo	Fixo
Controlo da ocupação	Fixo	Fixo	Variável	Fixo	Fixo	Fixo	Fixo
Localização dos difusores	Fixo	Variável	Fixo	Fixo	Variável	Fixo	Fixo
Tipo de difusores	Fixo	-	Fixo	Fixo	Fixo	Variável	Variável
Incidência de insuflação	Fixo	Fixo	Fixo	-	Variável	Fixo	Fixo
Velocidade de insuflação	Fixo	Fixa	Fixo	-	Fixo	Variável	Fixo
Temperatura de insuflação	Fixo	Fixo	Fixo	Variável	Variável	Fixo	Fixo
Humidade de insuflação	Fixo	Fixo	Fixo	Variável	Variável	Fixo	Fixo

Terminada esta etapa, de modo a estudar os *inputs* mais empregues em programas de simulação de fluídos, para climatização de espaços, concebeu-se uma tabela em que são definidos alguns parâmetros importantes e verificou-se quais as condições utilizadas, para os diversos trabalhos. Na Tabela 2.11 constata-se que o programa mais utilizado é o *FLUENT*, o modelo de turbulência é o $k-\epsilon$, o algoritmo é o *SIMPLE* e a malha é a de elementos não estruturados.

Tabela 2.11 – Comparação dos modelos utilizados para os diversos trabalhos

	Rossi et al. (2012)	Li et al. (2009)	James e Novoselac (2010)	Catalina et al. (2009)	Stamou et al. (2008)	Aziz et al. (2012)	Einberg et al. (2005)
Programa	-	<i>CFD, STAR-CD</i>	-	<i>CFD STAR-CCM+</i>	<i>CFX</i>	<i>FLUENT</i>	<i>FLUENT</i>
Modelo	$k-\epsilon$	$k-\epsilon$	$k-\epsilon$	$k-\epsilon$	SST ($k-\omega + k-\epsilon$)	$k-\epsilon$	$k-\epsilon$
Algoritmo	-	<i>SIMPLE</i>	-	-	-	-	<i>SIMPLE</i>
Malha	Elementos hexaédricos	Elementos híbridos não estruturada	-	Elementos poliédricos	Elementos não estruturados	Elementos não estruturados	-

Em climatização de espaços o difusor de ar tem uma importância crucial na distribuição do fluxo de ar, pelo que o estudo dos conceitos adjacentes ao mesmo, devem ser tidos em consideração, deste modo criou-se o seguinte subcapítulo.

2.2 Difusão do Ar

2.2.1 Conceito de difusão

Caracterizar como ar é introduzido, flui através de, e é removido do espaço é chamado de distribuição do ar do espaço. (ASHRAE, 2005)

Difusão é a distribuição do ar no interior de um espaço, provocada pela emissão de ar de alimentação, através da insuflação em várias direções e planos. (ASHRAE, 2001)

A difusão é a dispersão do ar no interior de um espaço. (ASHRAE, 2009)

2.2.2 Aplicações do difusor de ar

Os difusores podem ter diversas aplicações, tais como restaurantes, auditórios, fábricas, centros comerciais e muitas outras. Na Figura 2.11 pode visualizar-se a conjugação desse equipamento com o ambiente em redor.

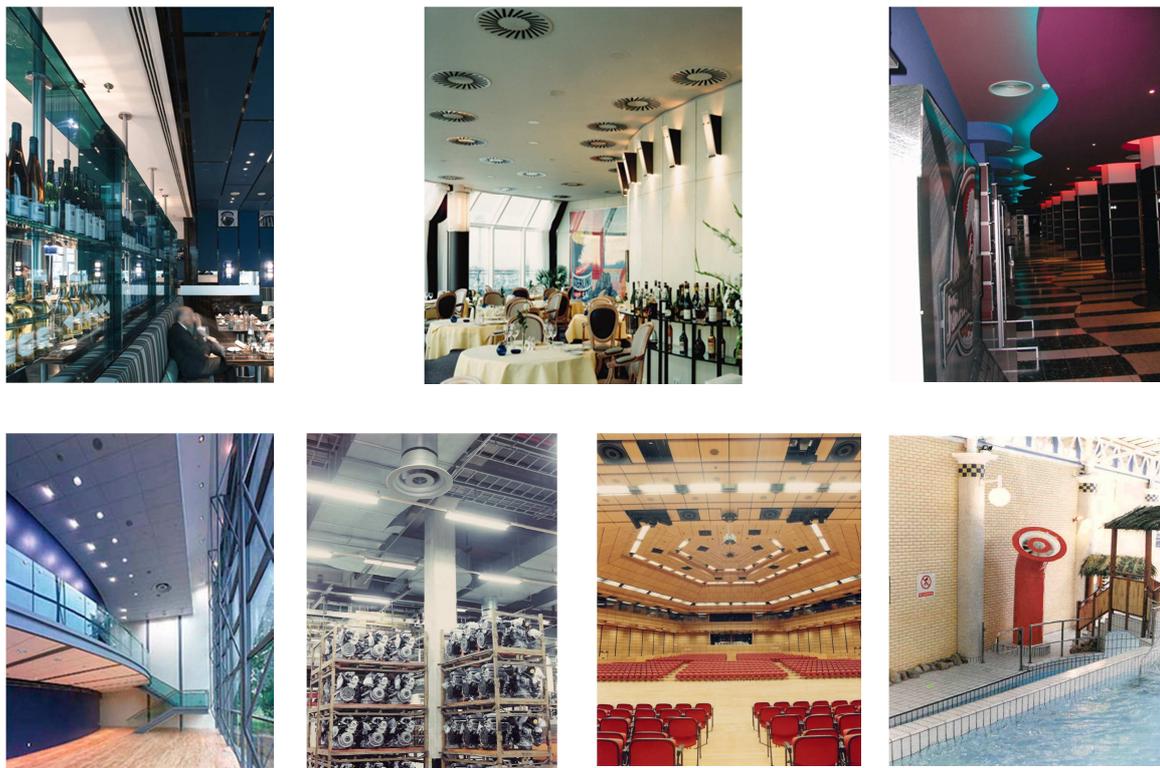


Figura 2.11 – Aplicações do difusor de ar (Nunes, 2012)

2.2.3 Objectivos da difusão

Os principais objectivos da difusão consistem nos pontos citados de seguida:

- Promover a remoção eficaz das cargas térmicas;
- Garantir a diluição dos poluentes em todo o espaço tratado;
- Não causar desconforto aos ocupantes (térmico e acústico);
- Integração arquitectónica;
- Relação custo/benefício;
- Funções específicas;
- Salas de operações, Industria e laboratórios.

2.2.4 Mecanismos de transporte

Os mecanismos que permitem o movimento do fluido consistem nos seguintes pontos:

- Quantidade de movimento;
- Forças de massa: Gravidade, convecção natural, difusão molecular;
- Forças de superfície: Pressão, tensões de corte.

2.2.5 Injeção de jatos

Os jatos emitidos pelos difusores de ar têm quatro zonas principais, com determinadas propriedades, tal como se pode visualizar na Figura 2.12.

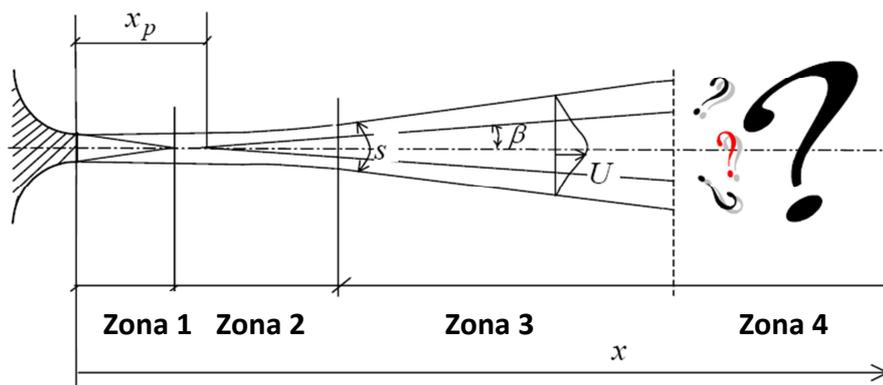


Figura 2.12 – As quatro zonas principais dos jatos (Nunes, 2012)

As quatro zonas do jato e as respectivas propriedades são:

- **Zona 1:** Estende-se por cerca de 4 diâmetros hidráulicos onde a velocidade e temperatura (máximas) se mantêm constantes;
- **Zona 2:** É uma zona de transição. Comprimento depende do tipo de difusor, turbulência inicial, etc;
- **Zona 3:** Zona em que o jato turbulento está completamente desenvolvido. Comprimento entre 25 a 100 diâmetros hidráulicos;
- **Zona 4:** Zona em que o jato se degrada. Em poucos diâmetros equivalentes a velocidade cai para valores inferiores a 0,25 m/s. Zona menos conhecida.

Uns dos principais termos utilizados nos jatos, são os seguintes:

- Jato livre: Quando a área de saída do jato é significativamente inferior à área da secção do espaço perpendicular ao jato;
- Jato isotérmico / não isotérmico: Temperatura do jato igual e maior ou menor que a temperatura do espaço, respectivamente;
- Ângulo de divergência, ou abertura (β): O ângulo de abertura do jato é bem conhecido na zona próxima da saída mas varia significativamente a partir desse ponto. Para jatos livres, em espaços amplos, o ângulo varia entre os 20 e os 24°.

Na Figura 2.13 pode-se visualizar a o alcance e a queda de um jato.

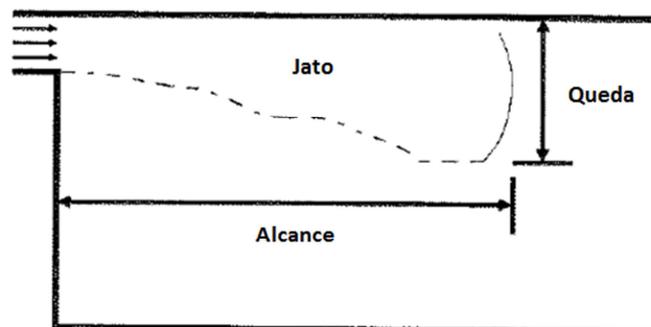


Figura 2.13 – Alcance e queda de um jato (Nunes, 2012)

2.2.6 Estudos de jatos

Chougule et al. (2011) investigou o fluxo de fluido e as características de transferência de calor na colisão de um jato múltiplo com uma parede plana, quer experimentalmente, quer numericamente. O modelo de turbulência utilizado foi o *Shear-Stress Transport (SST) k-w* e a malha utilizada foi uma estruturada com elementos hexaedros.

Shi et al. (2002) apresenta os resultados da simulação, para a injeção de um único jato, turbulento e confinado, perpendicularmente a uma placa plana. O modelo de turbulência utilizado foi o *standart k-ε* e o *RSM*. A malha utilizada foi uma malha estruturada, não uniforme, com elementos hexaedros. Na discretização foi utilizado o esquema de interpolação de primeira ordem e o algoritmo foi o *SIMPLEC*.

Ranade (1996) fez uma simulação *CFD*, a fim de prever o fluxo do escoamento e o tempo de mistura, num tanque de mistura, equipado com vários tipos de jato. O modelo de turbulência utilizado foi o *standart k-ε* e a malha era estruturada.

Parvareh et al. (2009) fez um estudo, experimental e *CFD*, sobre o efeito da posição do jato no desempenho da dispersão. O modelo de turbulência utilizado foi o *k-ε RNG* e a malha era não estruturada, com elementos tetraedros.

Kandakure et al. (2008) estudou através da simulação *CFD* a injeção de jatos turbulentos em espaços confinados. O modelo de turbulência utilizado foi *k-w standart* e a malha era não estruturada, com elementos tetraedros.

Caggese et al. (2013) realizou uma investigação experimental e numérica, do impacto criado pela injeção de um jato, com saída circular. O modelo de turbulência utilizado foi *k-w SST* e a malha era estruturada, com elementos hexaedros.

Berg et al. (2006) comparou o resultado de dois modelos de turbulência, o *standard k-epsilon* e o *standard k-w*, na simulação do fluxo de um jato turbulento. O modelo que apresentou melhores resultados foi o *standard k-epsilon*.

Wang e Mujumdar (2007) estudaram as características da mistura de múltiplos jatos, através de uma simulação numérica. Esses jatos eram turbulentos, opostos e estavam confinados. O modelo de turbulência utilizado foi *standard k-epsilon*.

3 COMPUTACIONAL FLUID DYNAMICS

A *CFD* (Computação Dinâmica de Fluidos) surge, aproximadamente nos anos 70, para combinar a física, os métodos numéricos e a informática a fim de simular o fluxo de fluidos. (Date, 2005)

A palavra “simulação” indica que se usa o computador para resolver numericamente as leis que governam o movimento dos fluidos, no ou à volta do corpo, onde a geometria é também modelada no computador. Assim sendo, todo o sistema é transformado num ambiente virtual. Isto é o oposto de uma investigação experimental em que são medidas as propriedades de fluxo no interior ou exterior de um modelo físico. Através desta ferramenta podemos visualizar com altos níveis de realismo o sistema e o seu comportamento, mesmo antes de uma peça ser construída. (Hirsch, 2007)

Para compreender a importância do *CFD* no mundo tecnológico atual convém perceber o conceito de *CAE* (Engenharia Assistida por Computador). *CAE* refere-se ao conjunto de ferramentas de simulação do trabalho de um engenheiro entre a fase inicial do projeto e a fase final do processo de fabricação. O processo industrial tem vindo a ser informatizado em todo o ciclo de produção.

A Figura 3.1 apresenta as diferentes fases para obter-se um protótipo virtual. A primeira parte é o Projeto Assistido por Computador (*CAD*), que permite a definição e criação do modelo geométrico do sistema através do auxílio do computador. A segunda parte é a Engenharia Assistida por Computador (*CAE*), em que ocorre a fase de análise e simulação do comportamento físico do sistema. Existem *softwares* de *CSM* (Computação da Mecânica dos Sólidos) e *CFD*. No *CFD* pode-se analisar o fluxo de fluido, incluindo a transferência de calor térmico e efeitos da condução de calor no fluido e através das fronteiras do domínio do fluxo. A terceira e última parte é a Manufatura Assistida por Computador (*CAM*). Quando a análise é considerada satisfatório e os objectivos de concepção atingidos, inicia-se o ciclo de fabrico. Esta fase simula o processo de fabrico e verifica se as formas obtidas a partir das etapas anteriores podem ser fabricadas dentro de tolerâncias aceitáveis.

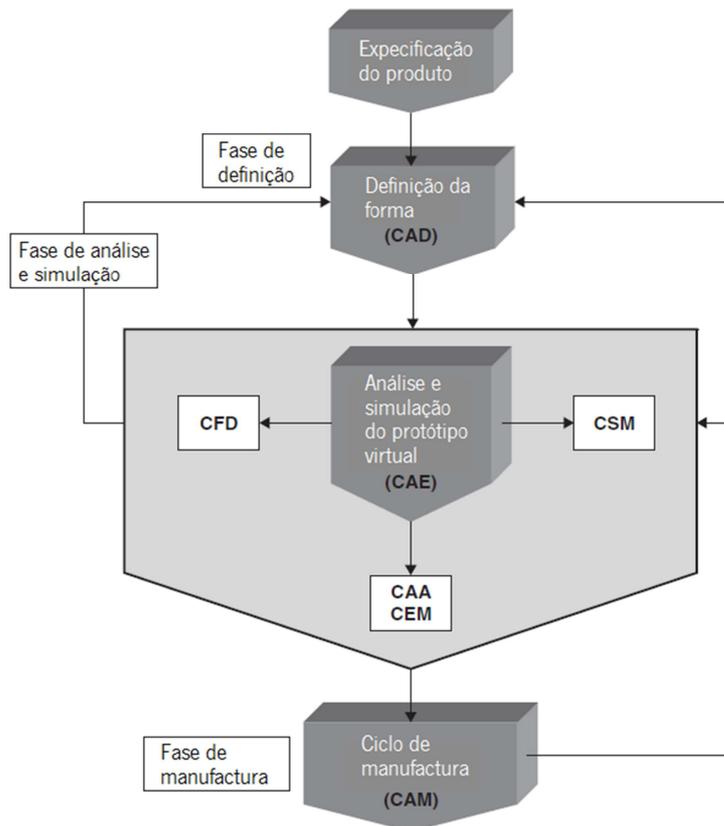


Figura 3.1 - Estrutura para obter um protótipo virtual (Hirsch, 2007)

A título de exemplo, esta estrutura de produção tem tido muito impacto na indústria automóvel. O tempo necessário para desenhar e produzir um modelo de um carro novo foi reduzido de 6 a 8 anos em 1970 para apenas 36 meses em 2005.

3.1 Programa de Simulação *CFD* – *ANSYS*

O *ANSYS* é um programa comercial de Dinâmica de Fluidos Computacional, usado para simulação de problemas de escoamentos de fluidos e transferência de calor. O *ANSYS* está estruturado em torno dos algoritmos numéricos capazes de resolver os problemas de fluxos de fluido, possibilitando a utilização de diferentes modelos físicos, tais como: fluidos compressíveis e incompressíveis, diferentes regimes de escoamento, radiação, combustão, entre outros. Possui interfaces gráficas desenvolvidas na introdução dos parâmetros do problema e na análise dos resultados, possibilitando usufruir de todas as potencialidades de cálculo do programa. De acordo com Versteeg e Malalaseka (1995), os programas de *CFD*, incluindo o *ANSYS*, possuem três grandes elementos: i) Pré-processamento, ii) *Solver* e iii) Pós-processamento. Em seguida, analisa-se a função de cada um destes elementos.

3.1.1 Pré - Processamento

O pré-processamento no *ANSYS* consiste na introdução de todos os parâmetros do problema e dos modelos físicos a utilizar, através de uma interface gráfica de fácil utilização, que comunica esta informação ao *Solver* de forma apropriada a ser utilizada.

Esta fase compreende as seguintes ações:

- Definição do domínio computacional (geometria);
- Geração e definição das malhas;
- Seleção dos fenômenos físicos e químicos a serem modelados;
- Definição das propriedades do fluido;
- Definição apropriada das condições fronteiras das células que coincidem com os limites do domínio e restantes condições.

A definição da geometria, a geração das malhas e a localização das condições fronteiras é efectuada recorrendo ao *software*, *ANSYS*.

A geração das malhas é a divisão do domínio computacional em pequenos subdomínios, designados por volumes de controlo ou elementos. A precisão de uma solução *CFD* é regida pelo número de células da malha. Em geral, uma malha mais refinada, logo com maior número de elementos, fornece valores mais precisos. Tanto a precisão de uma solução, o equipamento

informático e o tempo de cálculo necessário são dependentes do refinamento da malha. Dever-se-á encontrar um equilíbrio entre o número de elementos usados e o tempo de simulação. Existem dois tipos de malhas: as estruturadas e as não estruturadas.

As condições fronteiras são um elemento crítico para as simulações *CFD*, procuram representar condições reais e especificar o fluxo e as suas variáveis térmicas, nos limites do modelo computacional. A sua apropriada especificação é de extrema importância.

3.1.2 Solver

O *Solver* é o mecanismo responsável pela implementação das técnicas numéricas de solução e aplicação dos algoritmos para resolução eficaz dos problemas físicos. É a parte mais importante de um código de *CFD*, pois permite a obtenção da solução. Em traços gerais e de acordo com Versteeg e Malalaseka (1995) os métodos numéricos que formam a base do *Solver* executam os seguintes passos:

1. Aproximação das variáveis incógnitas do escoamento através de funções simples;
2. Discretização, pela substituição das equações diferenciais pelas aproximações, mencionadas acima, nas equações de transporte que governam o escoamento e posterior manipulação matemática;
3. Solução das equações algébricas.

O *Solver* do *ANSYS* é o *FLUENT*, este utiliza o método dos volumes finitos para a discretização e para a solução de equações algébricas.

3.1.3 Pós – Processamento

O *FLUENT* vem equipado com versáteis ferramentas de visualização de dados, nomeadamente:

- Visualização da geometria e da malha;
- Gráficos de vectores;
- Linhas e gráficos de contornos;
- Gráficos de superfície;
- Visualização de linhas de fluxo e trajetórias de partículas;
- Manipulação de imagem (rotação, translação, escala...).

3.2 Leis da Conservação

Antes de obter as equações que regem o comportamento do fluido convém perceber o significado do termo, *fluid dynamics*. Consiste na investigação do movimento de interação provocado por um número elevado de partículas. Essas partículas são moléculas ou átomos. Portanto supõe-se que a densidade do fluido é tão elevada que pode ser aproximado a um fenómeno contínuo. Implica que uma partícula infinitamente pequena, ainda contém um número suficiente de partículas, ao qual pode ser especificada a velocidade média e a energia cinética média. Deste modo pode-se definir a velocidade, a pressão, a temperatura, a densidade e outras quantidades importantes em cada ponto do fluido. (Blazek, 2001)

O comportamento dinâmico de um fluido é determinado pelas leis da conservação, deste modo é possível deduzir as principais equações da dinâmica de fluidos. As leis da conservação são:

- Conservação da massa;
- Conservação da *momentum*;
- Conservação da energia.

A conservação de certa quantidade de fluxo implica que a sua variação total, dentro de um volume arbitrário pode ser expressa como o efeito da quantidade a ser transportada através da fronteira, das fontes e forças internas, e das forças externas que atuam sobre o volume. O valor da quantidade que atravessa a fronteira é denominado fluxo. Normalmente o fluxo pode ser decomposto em duas partes diferentes, uma devido ao transporte convectivo e outra devido ao movimento molecular no fluido em repouso. Esta segunda contribuição é de natureza difusa. É proporcional ao gradiente da quantidade considerada e nesse sentido desaparecerá para uma distribuição homogénea.

A discussão das leis da conservação conduz à ideia de dividir o campo de fluxo num número de volumes e modelar o comportamento do fluido numa região finita. Com esse propósito define-se o denominado volume de controlo finito e desenvolve-se uma descrição matemática das suas propriedades físicas.

3.2.1 Volume de controlo finito

Considere-se um campo de fluxo geral tal como é representado nas linhas de fluxo na Figura 3.2. Uma região finita arbitrária do fluxo, delimitada por uma superfície fechada $\partial\Omega$ e fixa no espaço, define o volume de controlo Ω . O elemento da superfície é o dS e o vector unitário normal à superfície é o \vec{n} .

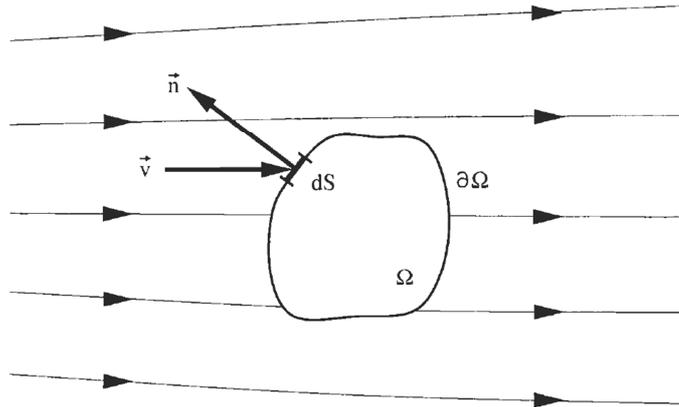


Figura 3.2 - Definição de um volume de controlo finito (fixo no espaço) (Blazec, 2001)

A lei da conservação aplicada a um exemplo de quantidade escalar por unidade de volume U é descrita pela sua variação no tempo t , dentro de Ω , como mostra:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U d\Omega \quad 3.1$$

é igual à soma das contribuições devidas ao fluxo convectivo, valor da quantidade U que entra no volume de controlo através da fronteira com a velocidade \vec{v} , daí $U\vec{v}$

$$- \oint_{\partial\Omega} U(\vec{v} \cdot \vec{n}) dS, \quad 3.2$$

e devido ao fluxo difuso, expresso pela generalizada lei de gradiente de Fick's:

$$\oint_{\partial\Omega} \kappa\rho[\nabla(U/\rho) \cdot \vec{n}] dS, \quad 3.3$$

onde κ é o coeficiente de difusão térmica, e devido ao volume, bem como às fontes de superfície, Q_V , \vec{Q}_S , vem que,

$$\int_{\Omega} Q_V d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (\vec{Q}_S \cdot \vec{n}) dS, \quad 3.4$$

respectivamente. Após a soma das contribuições acima, obtém-se a seguinte forma geral da lei de conservação para a quantidade escalar U

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U d\Omega + \oint_{\partial\Omega} [U(\vec{v} \cdot \vec{n}) - \kappa\rho(\nabla U^* \cdot \vec{n})] dS = \int_{\Omega} Q_V d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (\vec{Q}_S \cdot \vec{n}) dS, \quad 3.5$$

onde U^* simboliza a quantidade U por unidade de massa, ou seja, U/ρ .

É importante notar que se a quantidade conservada fosse um vector ao invés de um escalar, a equação permanecia formalmente válida. Mas contrariamente, os fluxos convectivo e difusivo tornar-se-iam tensores em vez de vectores, \bar{F}_C o tensor de fluxo convectivo e \bar{F}_D o tensor de fluxo difusivo. As fontes de volume seriam um vector \vec{Q}_V e as fontes de superfície seriam modificadas dentro do tensor \bar{Q}_S . Nesse sentido, pode-se escrever a lei da conservação para um vector geral de quantidade \vec{U} , como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \vec{U} d\Omega + \oint_{\partial\Omega} [(\bar{F}_C - \bar{F}_D) \cdot \vec{n}] dS = \int_{\Omega} \vec{Q}_V d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (\bar{Q}_S \cdot \vec{n}) dS, \quad 3.6$$

A formulação integral da lei da conservação, dada pelas equações 3.5 e 3.6, possui duas características muito importantes e desejáveis:

1. se não existem termos de fonte de volume, a variação de U depende apenas do fluxo que atravessa a fronteira $\partial\Omega$ e não de qualquer fluxo no interior do volume de controlo Ω ;
2. esta forma particular continua a ser válida na presença de descontinuidades no campo de fluxo, como choques ou descontinuidades em contactos.

Por causa da sua generalidade e das características desejáveis, não é de surpreendente que atualmente a maioria dos códigos *CFD* se baseiem na forma integral da equação de conservação. (Blazek, 2001)

3.2.2 Equação da continuidade

Em fluidos de uma única fase, a lei da conservação da massa impõe que num sistema a massa não pode ser criada, nem desaparecer. Portanto, num fluido em repouso uma variação de massa consiste num deslocamento das partículas do fluido. Deste modo não há contribuição do fluxo difusivo.

Com vista a formular a equação da continuidade considera-se o modelo de controlo de volume finito num espaço fixo, como o esboçado na Figura 3.2. No ponto sobre a superfície de controlo, a velocidade é \vec{v} , o vector normal unitário é \vec{n} e dS delimita uma superfície elementar. A quantidade conservada neste caso é a densidade ρ . Para a taxa de variação temporal da massa total no interior do volume finito Ω tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega \quad 3.7$$

O fluxo de massa do fluido que atravessa uma superfície fixa no espaço é igual ao produto da (densidade) \times (área da superfície) \times (componente perpendicular da velocidade à superfície). Portanto, o contributo do fluxo convectivo através de cada elemento da superfície dS é dado por:

$$\rho(\vec{v} \cdot \vec{n})dS \quad 3.8$$

Uma vez que por convecção \vec{n} aponta sempre para fora do volume de controlo, verifica-se entrada de fluido quando o produto $\vec{v} \cdot \vec{n}$ é negativo e de saída quando positivo. Assim o fluxo de massa sai do volume de controlo.

Como afirmado anteriormente, não existe fontes de volume ou de superfícies presentes. Assim, considerando-se a formulação geral da equação, pode-se escrever:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \rho(\vec{v} \cdot \vec{n})dS = 0 \quad 3.9$$

A equação representa o integral da equação da continuidade, ou seja, a lei da conservação da massa. (Blazek, 2001)

3.2.3 Equação do *momentum*

A fim de obter a equação do *momentum*, convém recordar a fórmula particular da segunda lei de Newton, que estabelece que a variação do *momentum* é causada pela força resultante atuando num elemento de massa. Para o *momentum* de uma parcela infinitamente pequena do volume de controlo Ω , tem-se:

$$\rho\vec{v} d\Omega \quad 3.10$$

A variação temporal do *momentum* dentro do volume de controlo é igual a:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho\vec{v} d\Omega \quad 3.11$$

Por isso, a quantidade conservada é o produto da densidade vezes a velocidade, ou seja,

$$\rho \vec{v} = [\rho u, \rho v, \rho w]^T \quad 3.12$$

O tensor de fluxo de convecção, que descreve a transferência do *momentum* que atravessa a fronteira do volume de controlo, consiste no sistema de coordenadas cartesianas com as seguintes três componentes:

$$\begin{aligned} \text{x- componente: } & \rho u \vec{v} \\ \text{y- componente: } & \rho v \vec{v} \\ \text{z- componente: } & \rho w \vec{v} \end{aligned} \quad 3.13$$

O contributo do tensor de fluxo convectivo para a conservação do *momentum* é então dado por:

$$- \oint_{\partial\Omega} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS, \quad 3.14$$

O fluxo difusivo é zero, pois não há propagação de *momentum* possível para um fluido em repouso. Identifica-se dois tipos de forças que atuam sobre o volume de controlo:

1. Externas ao volume ou forças de corpo, que agem diretamente sobre a massa do volume, por exemplo, força gravitacional, impulso, força de Coriolis ou força centrífuga. Em alguns casos, pode haver também forças electromagnéticas presentes;
2. Forças de superfície, que agem diretamente sobre a superfície do volume de controlo. Elas são o resultado de apenas duas fontes:
 - a. A distribuição de pressão, imposta pelo fluido exterior em torno do volume;
 - b. A tensão de corte e normal, resultante do atrito entre o fluido e a superfície do volume.

Dos dados acima, conclui-se que a força do corpo por unidade de volume, designada como $\rho \vec{f}_e$, corresponde aos termos de fonte de volume na equação. Assim, a contribuição da força do corpo (externo) para a conservação do *momentum* é:

$$\int_{\Omega} \rho \vec{f}_e d\Omega \quad 3.15$$

As fontes de superfície consistem em duas partes, uma componente de pressão isotrópica e um tensor de tensão viscosa $\vec{\tau}$, isto é,

$$\bar{Q}_S = -p\bar{I} + \bar{\tau} \quad 3.16$$

sendo \bar{I} o tensor unitário. O efeito das fontes de superfície no volume de controlo é demonstrado na Figura 3.3.

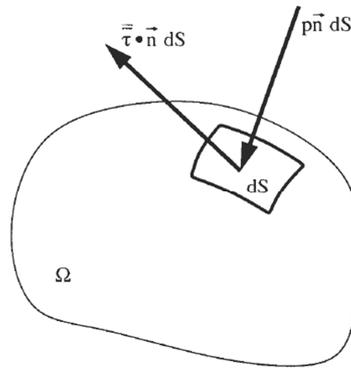


Figura 3.3 - Forças de superfície a atuar na superfície do volume de controlo (Blazeck, 2001)

Portanto, substituindo os dados obtidos acima na equação 3.6, pode-se escrever a equação da lei da conservação do *momentum* dentro de um volume de controlo arbitrário fixo no espaço:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \vec{v} d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \int_{\Omega} \rho \vec{f}_e d\Omega - \oint_{\partial\Omega} \rho \vec{n} dS + \oint_{\partial\Omega} (\bar{\tau} \cdot \vec{n}) dS \quad 3.17$$

3.2.4 Equação da Energia

O princípio subjacente na dedução da equação da energia é a primeira lei da termodinâmica. Aplicada ao volume de controlo, vem que qualquer mudança ao longo do tempo da energia total dentro do volume é causada pela taxa de trabalho das forças que atuam no volume e do fluxo de calor resultante. A energia total por unidade de massa E de um fluido é obtida adicionando a sua energia interna por unidade de massa e a sua energia cinética por unidade de massa, $|\vec{v}|^2/2$. Assim, pode-se escrever para a energia total:

$$E = e + \frac{|\vec{v}|^2}{2} = e + \frac{u^2 + \vec{v}^2 + w^2}{2} \quad 3.18$$

A quantidade conservada é a energia total por unidade de volume, ou seja, ρE . A sua variação no tempo dentro do volume Ω pode ser expressa como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho E d\Omega \quad 3.19$$

Analisando o raciocínio na dedução da lei da conservação geral, equação 3.5, pode-se facilmente especificar o contributo do fluxo convectivo:

$$- \oint_{\partial\Omega} \rho E (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS \quad 3.20$$

Ao contrário, da equação da continuidade e do *momentum*, há agora um fluxo difusivo. Como já foi visto, é proporcional ao gradiente da quantidade conservada por unidade de massa (Lei de *Fick*). Uma vez que o fluxo difusivo \vec{F}_D é definido para o fluido em repouso, apenas a energia interna se torna efectiva e obtém-se:

$$\vec{F}_D = -\gamma\rho\kappa\nabla e \quad 3.21$$

O termo $\gamma = C_p/C_v$ é a razão dos coeficientes de calor específico e κ o coeficiente de difusão térmica. O fluxo de difusão representa uma parte do fluxo de calor no interior do volume de controlo, ou seja, a difusão de calor devido à condução térmica molecular, devido ao gradiente de temperaturas. Assim, a equação 3.21 é normalmente escrita sob a forma da lei de *Fourier* da condução de calor, isto é,

$$\vec{F}_D = -\kappa\nabla T \quad 3.22$$

com k para o coeficiente de condutibilidade térmica e T para a temperatura estática absoluta.

A outra parcela líquida de fluxo de calor no interior do volume finito de controlo consiste em calor volumétrico, devido à absorção ou emissão de radiação, ou devido a reações químicas. Como fontes de calor tem-se a taxa temporal de transferência de calor por unidade de massa, \dot{q}_h . Em conjunto com a taxa de trabalho realizado pelas forças do corpo \vec{f}_e , introduzidas para a equação do momento, completa-se as fontes de volume:

$$Q_V = \rho\vec{f}_e \cdot \vec{v} + \dot{q}_h \quad 3.23$$

A última contribuição para a conservação da energia, que ainda é necessário determinar são as fontes de superfície Q_S . Correspondem à taxa temporal de trabalho realizado pela pressão, bem como, pela tensão de corte e normal ao elemento do fluido:

$$\vec{Q}_S = -p\vec{v} + \vec{r} \cdot \vec{v} \quad 3.24$$

Tendo em conta todos os termos e contribuições acima mencionados, obtém-se a expressão para a conservação de energia:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho E d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \rho E (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \\ & \oint_{\partial\Omega} \kappa (\nabla T \cdot \vec{n}) dS + \int_{\Omega} (\rho\vec{f}_e \cdot \vec{v} + \dot{q}_h) d\Omega - \oint_{\partial\Omega} \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS + \oint_{\partial\Omega} (\vec{r} \cdot \vec{v}) \cdot \vec{n} dS \end{aligned} \quad 3.25$$

Geralmente, a equação da energia 3.25 é escrita de forma ligeiramente diferente. Para o efeito usa-se a seguinte relação geral entre a entalpia total, a energia total e a pressão:

$$H_T = h + \frac{|\vec{v}|^2}{2} = E + \frac{p}{\rho} \quad 3.26$$

Reunindo o termo convectivo ($\rho E \vec{v}$) e o termo da pressão ($\rho \vec{v}$) na lei da conservação da energia, equação 3.25 e aplicando a equação 3.26 obtém-se a equação da energia na forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho E \, d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \rho H_T (\vec{v} \cdot \vec{n}) \, dS = \\ \oint_{\partial\Omega} \kappa (\nabla T \cdot \vec{n}) \, dS + \int_{\Omega} (\rho \vec{f}_e \cdot \vec{v} + \dot{q}_h) \, d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (\vec{r} \cdot \vec{v}) \cdot \vec{n} \, dS \end{aligned} \quad 3.27$$

3.3 Turbulência

A questão da turbulência torna-se importante para escoamentos que apresentem um valor superior ao número de *Reynolds* crítico. Quando é atingido esse estado o fluxo transita do estado estacionário para o estado turbulento e o fluxo torna-se instável e a direção da velocidade varia aleatoriamente, dando-se a geração de vórtices. (Versteeg e Malalaseka, 1995)

3.3.1 Modelos de Turbulência

A escolha correta do modelo de turbulência é crucial, na medida em que influencia a escolha da malha, o tempo de cálculos e a qualidade dos resultados obtidos.

O *FLUENT* possui diversos tipos de modelos de turbulência adequados para diferentes aplicações. Os modelos de turbulência utilizados neste trabalho foram o *Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)*. Estes são atualmente os mais utilizados visto que fornecem bons resultados com baixos recursos computacionais. De acordo com a pesquisa bibliográfica realizada os modelos de turbulência utilizados em casos semelhante ao caso em estudo são o $k-\epsilon$, $k-w$ e mais raramente o *Reynolds stress models*. O modelo $k-\epsilon$ destaca-se como o mais utilizado e que exige menos recursos computacionais.

3.3.2 Modelo *Standard* k - ε

O modelo *Standard* k-ε é um modelo de duas equações semi-empírico, onde são introduzidas duas novas variáveis para a modelação do escoamento, sendo elas, a energia cinética gerada pela turbulência (k) e a sua taxa de dissipação (ε).

As equações de transporte utilizadas para modelar k e ε são, as seguintes:

$$\frac{\partial}{\partial t}(pk) + \frac{\partial}{\partial x_i}(pk u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u + \frac{u_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_K + G_b + \rho \varepsilon - Y_M + S_K \quad 3.28$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(p\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(p\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u + \frac{u_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} + (G_K + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} S_\varepsilon \quad 3.29$$

Nestas equações, G_k representa a geração de energia cinética turbulenta devida aos gradientes da velocidade média. Por outro lado G_b diz respeito à energia cinética turbulenta gerada devido a efeitos de flutuabilidade. Y_M representa a contribuição da dilatação flutuante em turbulência compressível. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ são constantes que foram determinadas experimentalmente para ar e água em várias configurações de fluxo (Tabela 3.1), enquanto σ_k e σ_ε são números de Prandtl turbulentos, para k e ε respetivamente e assumem por defeito os valores apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Coeficientes do modelo *Standard* k - ε

Coeficiente	Valor
$C_{1\varepsilon}$	1.44
$C_{2\varepsilon}$	1.92
C_u	0.09
σ_k	1.0
σ_ε	1.3

Relativamente à viscosidade turbulenta u_t , pode ser determinada pela equação 3.30.

$$\mu_t = \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon} \quad 3.30$$

3.3.3 Modelo *Realizable* k-ε

O modelo de turbulência *Realizable* k-ε deriva das mesmas equações de transporte do modelo *Standard* k - ε, o termo *Realizable* aplica-se porque aqui as variáveis k e ε são derivadas de equações exatas, ao contrário do modelo *Standard* onde k advém de equações exatas e ε de formulações empíricas.

As diferenças em relação ao modelo *Standard* k - ϵ são então as seguintes:

- Uma nova formulação para a viscosidade turbulenta (ν_t), onde (C_u) (equação 3.30), constante no modelo *Standard*, é agora calculado.
- A taxa de dissipação dos vórtices (ϵ), resultante de formulações empíricas no modelo *Standard*, é agora derivada de uma equação de transporte exata.

Esta nova formulação do modelo *Realizable* k - ϵ , permite resultados mais precisos na separação da camada limite, em escoamentos que envolvam rotação, gradientes de pressão adversos e zonas de recirculação. As constantes do modelo foram também reajustadas e são as apresentadas na Tabela 3.2, observa-se que o modelo *Realizable* tem menos uma constante em relação ao modelo *Standard*, uma vez que (C_u), é agora resolvido.

Tabela 3.2 - Coeficientes do modelo *Realizable* k - ϵ

Coeficiente	Valor
$C_{1\epsilon}$	1.44
C_2	1.90
σ_k	1.0
σ_ϵ	1.2

3.4 Método de solução

Nesta secção são descritos os métodos numéricos e algoritmos de resolução usados pelo *FLUENT* neste trabalho, passando pela discretização, acoplamento e critérios de paragem.

3.4.1 Discretização

Para obter uma solução aproximada numericamente é necessária a utilização de métodos de discretização que aproximem as equações diferenciais por um sistema de equações algébricas que poderão ser posteriormente resolvidas por um computador. Assim, a exatidão de uma solução numérica está dependente da qualidade do método de discretização utilizado (Ferziger et al., 2002). O método dos volumes finitos é o utilizado pelo *FLUENT* para a discretização do domínio. Neste método, as equações diferenciais de conservação são integradas em cada volume de controlo criado pela malha computacional.

3.4.2 Acoplamento

O algoritmo de acoplamento, entre a pressão e velocidade, adotado para as simulações deste trabalho foi o *SIMPLE* (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*). O algoritmo *SIMPLE* é essencialmente um procedimento iterativo para prever e corrigir o cálculo do campo de pressão, cumprindo a conservação da massa (Versteeg e Malalaseka, 1995). As equações para as variáveis da solução são resolvidas sequencialmente e a solução é obtida iterativamente, de forma a obter a convergência da solução. (FLUENT, 2012)

3.4.3 Critérios de paragem

O *FLUENT* resolve o processo iterativo da solução até que atinja determinados critérios de paragem especificados pelo utilizador. Esses critérios de paragem são especificados para k , ϵ , para as equações da continuidade e energia e para as velocidades em x , y , z . Os critérios de paragem serão especificados, no decorrer do trabalho, para cada um dos casos analisados.

3.5 Tipos de malha

As malhas existentes no *software* gerador de malha podem resumir-se a quatro tipos de malha, tal como se pode visualizar na Figura 3.4.

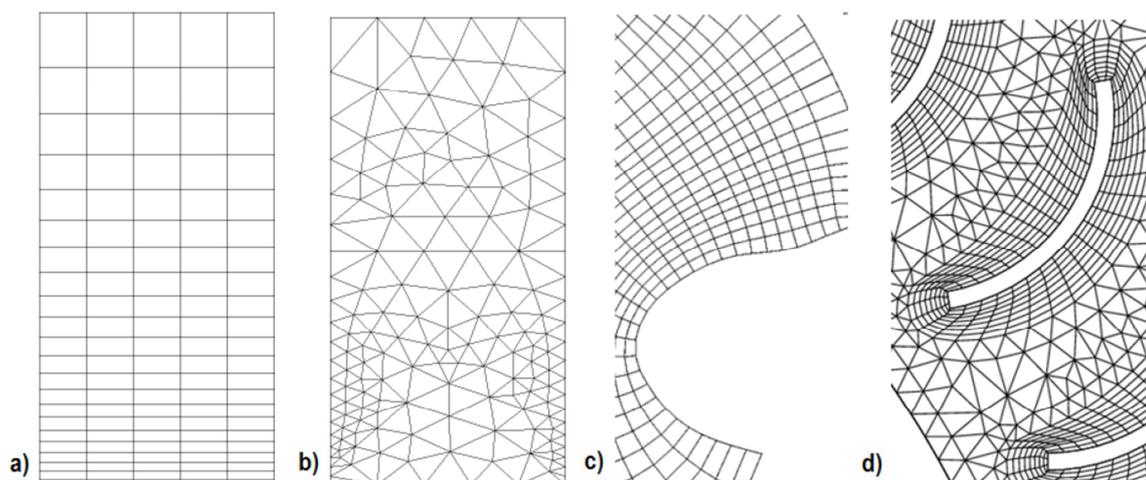


Figura 3.4 – Tipos de malha (FLUENT, 2012)

- a) **Malha estruturada ortogonal:** Define-se pela conectividade regular dos seus elementos e pela ortogonalidade perfeita dos seus elementos.

- b) **Malha não estruturada:** Define-se pela irregularidade na conectividade dos seus elementos.
- c) **Malha estrutura não ortogonal:** Define-se pelo mesmo algoritmo da malha estrutura ortogonal, no entanto neste caso a ortogonalidade pode variar.
- d) **Malha híbrida:** Define-se como a utilização simultânea da malha estruturada e malha não estruturada na mesma figura geométrica.

3.5.1 Avaliação de malha

A qualidade de malha influencia drasticamente a qualidade dos resultados, nesse sentido é importante controlar os parâmetros que contribuem para a geração de uma malha de qualidade. Além disso, a malha gerada deve estar alinhada com o fluido para a geração de bons resultados.

A qualidade das células da malha, podem ser avaliadas pelos seguintes parâmetros:

Skewness – Avalia a perfeição geométrica de um elemento. Valores próximos de 0 são excelentes, de 0,5 são aceitáveis e de 1 são inaceitáveis. Tal como se pode visualizar na Figura 3.5. Segundo a literatura o *skewness* máximo de um elemento deve ser obrigatoriamente inferior a 0,95.

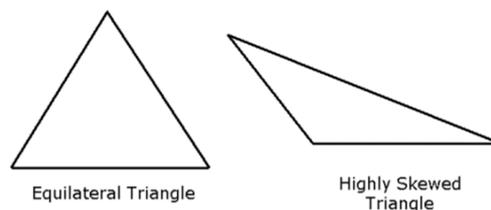


Figura 3.5 – Elementos com *skewness* de 0 e de cerca de 1, respectivamente (FLUENT, 2012)

Qualidade Ortogonal – Avalia a qualidade ortogonal de um elemento. Onde 1 corresponde a um elemento perfeitamente ortogonal e 0 a um elemento imperfeito.

3.6 Tratamento junto à parede

Escoamentos turbulentos são significativamente afetados pela presença de paredes e estas são mesmo as principais causadoras de vórtices e turbulência. Junto às paredes, variáveis como velocidade e pressão variam constantemente. Por esse motivo um cálculo preciso nessas zonas é relevante para conduzir a bons resultados.

Para y^+ de 1 tem-se malhas bastante refinadas junto à parede. O valor de y^+ é influenciado pela massa volúmica (ρ), pela velocidade do fluido (u) e pela viscosidade (μ) do mesmo, como se pode observar na equação 3.31.

$$y^+ = \frac{\rho u y}{\mu} \tag{3.31}$$

O desenvolvimento da camada limite junto à parede divide-se em três secções (Figura 3.6), a primeira para ($y^+ < 5$) em que o escoamento é laminar. A secção mais afastada é a ($y^+ > 30$), em que o escoamento é claramente turbulento. A secção intermédia ($5 < y^+ < 30$), o escoamento transita de laminar para turbulento e a viscosidade molecular e turbulenta é importante para o cálculo.

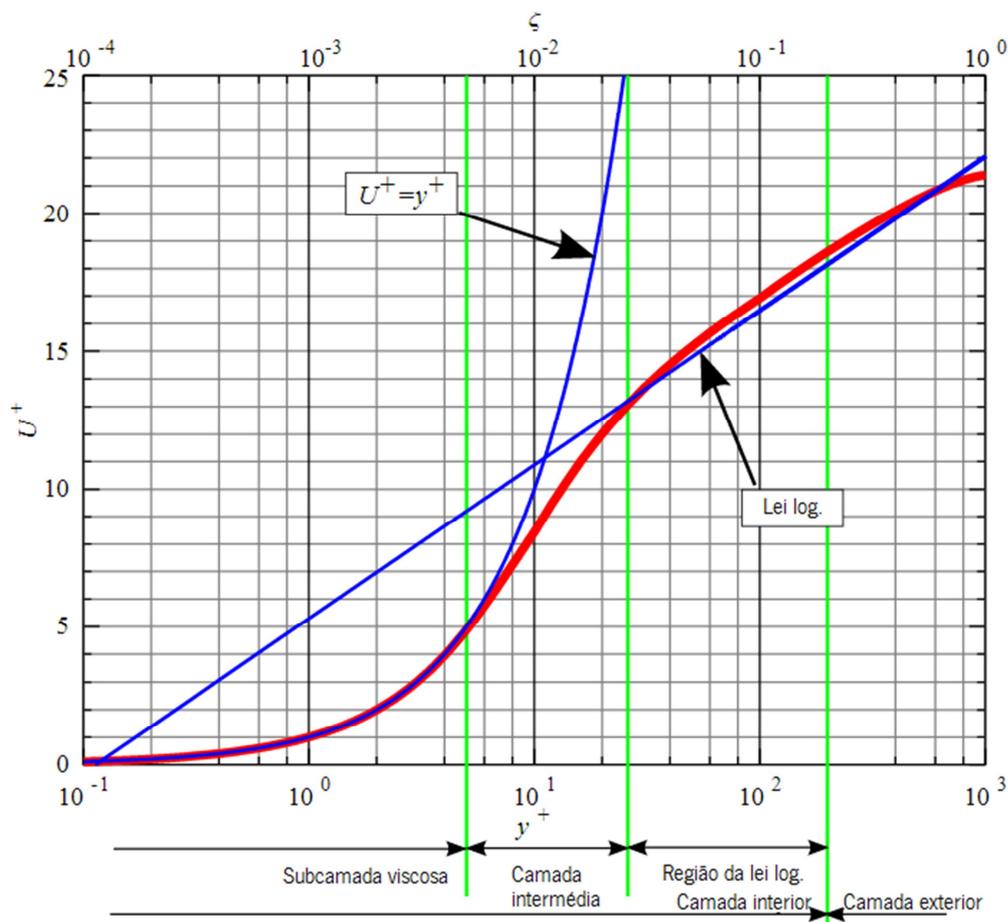


Figura 3.6 - Camada limite junto à parede (Adaptado de Nezu e Tominaga (2000))

O *FLUENT* permite a modelação junto às paredes, através de diferentes modelos. Permite a utilização da função de parede *Near-Wall model Approach*. Nesse caso, o utilizador define a espessura da primeira camada da parede de modo que o y^+ seja 1 e o programa calcula completamente, o escoamento junto às paredes.

A outra opção é a utilização *Wall function Approach* em que o cálculo é resolvido através de formulações empíricas. Nesse caso o utilizador define a espessura da primeira camada da parede de modo que o y^+ seja 30.

4 VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO CFD

4.1 Cálculo do Escoamento numa tubagem em regime laminar

Nesta secção será demonstrado o cálculo analítico e com recurso ao *software ANSYS*, para escoamento laminar em tubo circular. De seguida, os dados obtidos serão comparados e analisados os resultados de ambos os métodos.

4.1.1 Cálculo analítico

Foram considerados os dados de entrada, apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dados de entrada

Dados de entrada		Propriedades físicas do ar	
D (m)	0,005	$\rho_{ar} (kg/m^3)$	1,225
L (m)	1	$\mu_{ar} (kg/m.s)$	$1.7894 * 10^{-5}$
U ar (m/s)	2		

No intuito de saber qual o regime do escoamento no tubo circular, calculou-se o número de Reynolds, sendo o $Re = 685$ (Equação 4.1), trata-se de um escoamento claramente laminar uma vez que para tubagens um escoamento é laminar para números de Reynolds inferiores a 2100.

$$Re = \frac{\rho * U_{medio} * D}{\mu} \quad 4.1$$

Através da Lei de Hagen-Poiseuille para escoamentos laminares em tubos longos (Equação 4.2), calculou-se as perdas de carga no eixo longitudinal do tubo, tendo sido obtido um valor de aproximadamente 46 *pascals*.

$$\Delta p = \frac{32 * \mu * L * U_{medio}}{D^2} \cong 45.8 Pa \quad 4.2$$

De seguida, aplicou-se a Equação 4.3 que representa a distribuição de velocidade ao longo da secção transversal do tubo.

$$U_r = \frac{\Delta p}{4 * \mu_{ar} * L} (R^2 - r^2) = -6.4 * 10^5 * r^2 + 4 \quad 4.3$$

Num escoamento laminar a velocidade máxima é o dobro da velocidade média e esta encontra-se no eixo do tubo. A velocidade máxima do escoamento em estudo será de 4 m/s. (Equação 4.4)

$$U_{max} = 2 * U_{med} = 4 \frac{m}{s} \quad 4.4$$

O comprimento necessário até que o escoamento se encontre totalmente desenvolvido, pode ser estimado pela Equação 4.5. O escoamento estará desenvolvido após 99,3 mm ao longo do eixo do tubo.

$$L' = 0.029 * Re * D \cong 99.3 mm \quad 4.5$$

Na Figura 4.1 pode-se visualizar o comportamento do perfil de velocidades transversal ao longo do eixo da tubagem. Desde o início em que o perfil é uniforme até à fase em que o perfil atinge o estado totalmente desenvolvido.

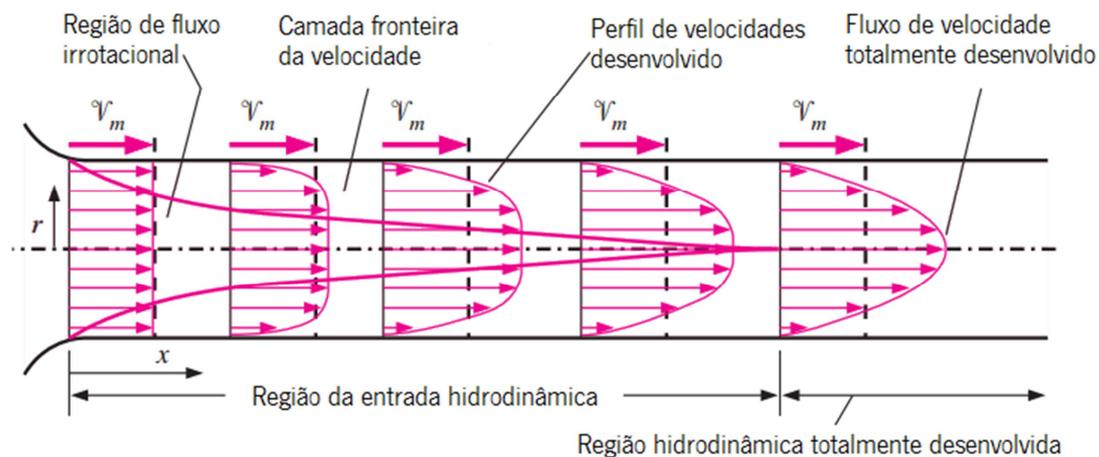


Figura 4.1 - Perfil de velocidades transversal ao longo do eixo da tubagem para escoamento laminar (Adaptado de Cengel e Cimbala (2006))

4.1.2 Análise *CFD*

Como os resultados analíticos obtidos para este caso de estudo são à partida mais precisos do que os casos que serão estudados seguidamente (pois serão casos de escoamento mais complexo, onde os métodos de cálculo apresentam erros superiores), este primeiro caso de estudo servirá de modelo padrão para ajustar as definições do *FLUENT*. Algumas das definições e metodologias do *software* aqui adotadas serão extrapoladas para os restantes casos estudados. A análise detalhada deste caso torna-se portanto numa importante etapa deste trabalho, pois por se tratar de um caso simples permite uma melhor compreensão dos bons e dos maus resultados das simulações.

4.1.2.1 Geometria

O primeiro passo foi criar a geometria do permutador no *Design Modeler*. A figura geométrica consiste num cilindro com um diâmetro de 5 mm e um comprimento de 1000 mm (Figura 4.2). Para realizar a simulação basta desenhar o volume em que circula o fluido (Ar), não é necessário desenhar um tubo propriamente dito, oco e com uma determinada espessura.

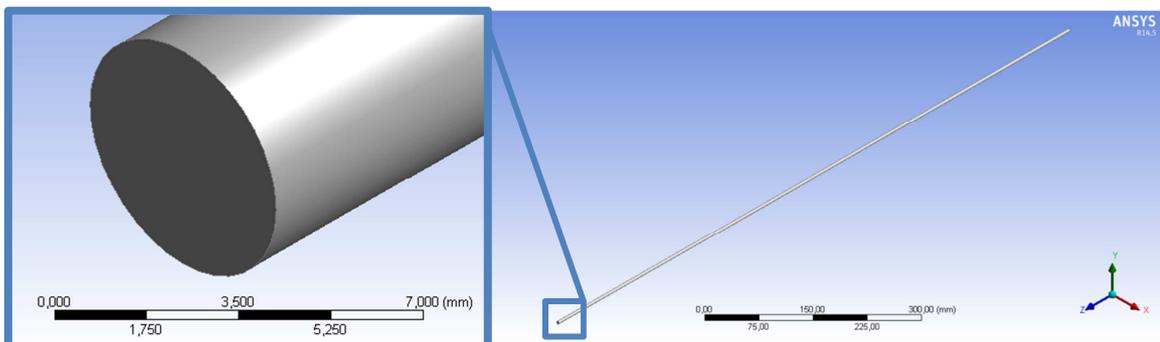


Figura 4.2 – Geometria da tubagem

4.1.2.2 Malha

Escolhida a geometria do problema seleccionou-se o tipo de malha mais adequada. Sabendo que se trata do escoamento de um fluido é importante que o alinhamento da malha siga a direção do escoamento, o que é conseguido mais efetivamente com prismas ou hexaedros.

No controlador da malha definiu-se alguns critérios para obter-se uma malha que proporcionasse os melhores resultados, nomeadamente:

Sweep method – através desta ferramenta é feito um extrude a partir de uma face do tubo o força a que os elementos da malha fiquem perfeitamente alinhados com o escoamento. Controlou-se o numero de divisões ao longo do tubo, a fim de ter o menor numero de elementos a dar o melhor resultado. Forçou-se que os elementos fossem prismas em vez de hexaedros, pois apesar de gerarem mais elementos proporcionam um melhor arranjo da malha e melhores valores de *Skewness*. Através da ferramenta *Bias*, refinou-se o inicio do escoamento pois é o local em que ocorre as maiores transições de velocidade pois à medida em que o fluido percorre o tubo tende a estabilizar-se.

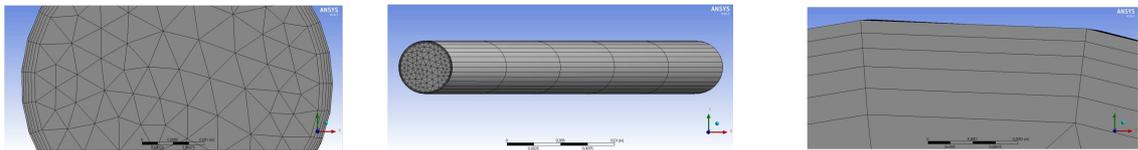
Inflation – esta ferramenta permite um refinamento por camadas junto à parede. É muito importante porque nesse locais existem elevados gradientes da velocidade. Define-se um tamanho para a primeira camada, o número de camadas total que se pretende e a taxa de crestimento entre camadas de forma a que a progressão seja o mais suave possível para evitar erros.

Face sizing – Esta ferramenta permite aumentar o refinamento na secção circular do tubo. O refinamento é realizado e são feitas simulações preliminares em que se verifica o comportamento de uma variavel importante, até esta estabilizar.

Teste de malha

O teste de malha consistiu em definir uma malha base, com um refinamento grosseiro, mas com valores *skewness* e ortogonalidade média razoáveis, tal como pode ser visualizado na Tabela 4.2. Mantendo todos as características da malha base constantes variou-se certos parâmetros e estudou-se a sua importância, tal como pode ser visualizado na Tabela 4.3

Tabela 4.2 – Características da malha base



Comprimento da aresta (mm)	Nº divisões	Geometria	Factor de crescimento	Espessura 1ª camada (mm)	Nº camadas	Taxa de crescimento
0,5	5	Triângulos	Nenhum	0,028	5	1,2

Tamanho da malha na face

Tabela 4.3 – Diversas características de malha estudadas

Face Sizing (mm)	0.5	0.2	0.15	0.1
$U_{\max}(\frac{m}{s})$	4.0215	4.0233	4.0155	Diverge*
$P_{\text{entrada}}(\text{Pa})$	48.693	49.001	49.044	Diverge*
Nº Elementos	1580	6160	10420	20930
Average Skewness	0.1154	0.1227	0.1278	0.1354
Average Orthogonal	0.6827	0.6189	0.4931	0.2761

*Diverge devido ao baixo valor da ortogonalidade média

Numero de divisões ao longo do eixo

Sweep division	5	200	500
$U_{\max}(\frac{m}{s})$	4.0233	3.9922	3.9924
$P_{\text{entrada}}(\text{Pa})$	49.001	48.94136	48.93
Nº Elementos	6160	246400	616000
Average Skewness	0.1227	0.1211	0.1211
Average Orthogonal	0.6189	0.9728	0.9728

Factor de crescimento da malha ao longo do eixo

Bias	0	5	10
$U_{\max}(\frac{m}{s})$	3.9922	3.9924	3.9924
$P_{\text{entrada}}(\text{Pa})$	48.94136	48.930	48.942
Nº Elementos	246400	246400	246400
Average Skewness	0.1211	0.1199	0.1195
Average Orthogonal	0.9728	0.9730	0.9731

Espessura da 1ªcamada

Espessura (mm)	0.021	0.028	0.035
$U_{\max}(\frac{m}{s})$	3.9921	3.9924	3.9929
$P_{\text{entrada}}(\text{Pa})$	48.945	48.942	48.946
Nº Elementos	256000	246400	245600
Average Skewness	0.1233	0.1195	0.1138
Average Orthogonal	0.9721	0.9731	0.9760

Comparação entre número de camadas

5 camadas

Espessura(mm)	$U_{\max}(\frac{m}{s})$	$P_{\text{entrada}}(\text{Pa})$	Nº Elementos	Average Skewness	Average Orthogonal
0.021	3.9921	48.945	256000	0.1233	0.9721
0.028	3.9924	48.942	246400	0.1195	0.9731
0.035	3.9929	48.946	245600	0.1138	0.9760

6 camadas

Espessura(mm)	$U_{\max}(\frac{m}{s})$	$P_{\text{entrada}}(\text{Pa})$	Nº Elementos	Average Skewness	Average Orthogonal
0.021	3.9924	48.944	261400	0.1146	0.9744
0.028	3.9931	48.952	260200	0.1095	0.9770
0.035	3.9930	48.951	247400	0.1125	0.9744

7 camadas

Espessura(mm)	$U_{\max}(\frac{m}{s})$	$P_{\text{entrada}}(\text{Pa})$	Nº Elementos	Average Skewness	Average Orthogonal
0.021	3.9928	48.952	275200	0.1048	0.9785
0.028	3.9931	48.951	260000	0.1076	0.9765
0.035	3.9933	48.953	250400	0.1069	0.9768

Na Tabela 4.3, as linhas ou colunas marcadas, destacam as características da malha estudada que proporcionam melhores valores, isto é, mais próximos dos obtidos pela teoria, quer para a velocidade máxima, quer para a pressão de entrada. Tem-se preferência pelas malhas que proporcionam menor número de elementos pois diminuem significativamente o tempo de cálculo e pelas que apresentam melhores valores de *skewness* médio e ortogonalidade média. Nesse sentido, as linhas ou colunas marcadas destacam as características selecionadas para a malha final.

Malha selecionada

Na Figura 4.3 demonstra-se a configuração da malha selecionada.

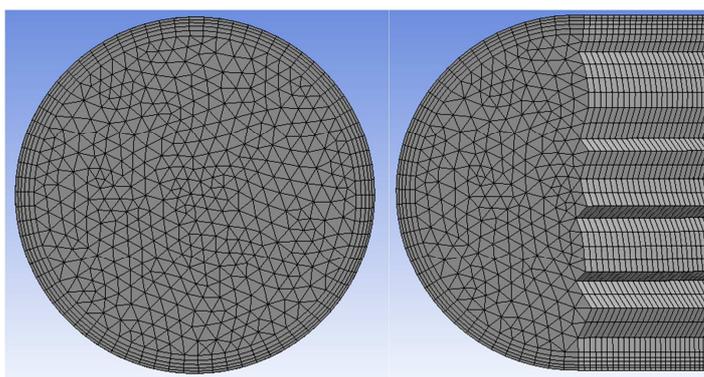


Figura 4.3 – Configuração da malha

Pode-se visualizar as várias camadas de quadriláteros junto à parede para refinar esta zona de elevados gradientes de velocidade e os primas no interior. Esta malha tem 245600 elementos

e qualitativamente é quase perfeita, apresenta *Skewness* e qualidade ortogonal média de 0,11 e 0.98 respetivamente.

4.1.2.3 Inputs do FLUENT

Uma vez definida a malha, a próxima etapa foi configurar os *inputs* do FLUENT, onde será realizado o cálculo. As condições de fronteira e modelo de turbulência adotados estão resumidos na Tabela 4.4

Tabela 4.4 – *Inputs* do FLUENT para escoamento em regime laminar

Modelo de turbulência – Realizable $k\epsilon$ – enhanced wall treatment		
	Tipo de condição	Input
Inlet	<i>Velocity inlet</i>	2 m/s
Outlet	<i>Pressure outlet</i>	0
Wall	-	-

4.1.2.4 Critérios de paragem

O método iterativo foi terminado quando os resíduos da equação da continuidade e das componentes x, y e z foram inferiores a 10^{-6} e quando os *monitors* definidos previamente convergiram. Os *monitors* criados foram a velocidade máxima em todo o volume do sólido e a pressão média na superfície de entrada do fluido. (Figura 4.4)

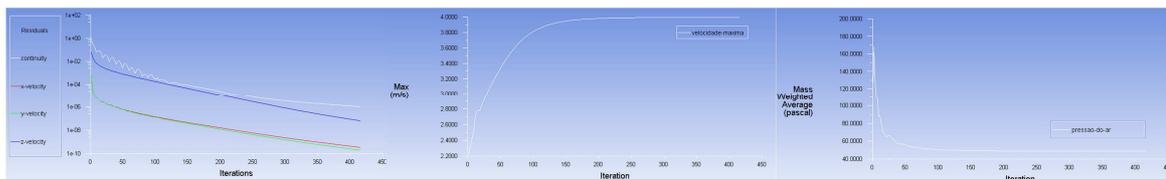


Figura 4.4 – *Monitor* dos resíduos da equação da continuidade e das componentes x, y e z, monitor da velocidade máxima em todo o volume do sólido e a pressão média na superfície de entrada do fluido, respetivamente

4.1.2.5 Contornos e Perfis

Os contornos e os perfis são um output que o ANSYS disponibiliza, a sua visualização permite rapidamente perceber se o fenómeno físico segue tendências realistas. Os perfis em detrimento dos contornos dão uma informação mais detalhada das variáveis em análise.

Na Figura 4.5 a) pode-se observar a distribuição do gradiente de velocidade na seção longitudinal do domínio, são apresentados vários cortes da seção (na entrada, centro e saída do

tubo) para que se possa observar grande parte do domínio. Esta técnica é utilizada por se tratar de uma geometria esbelta.

A distribuição do gradiente apresenta-se de acordo com o espetável, ou seja a velocidade tende para o seu máximo à medida que a distância às paredes aumenta e é zero na parede. Os contornos de velocidade permitem antever que essa distribuição de velocidades é parabólica como se vai confirmar mais adiante. Verifica-se também na primeira seção longitudinal do tubo, o gradiente de velocidades varia e nas seguintes torna-se constante.

Na Figura 4.5 b) apresenta-se o perfil de velocidades ao longo do eixo do tubo e verifica-se que a velocidade aumenta na zona inicial do tubo e depois atinge um máximo e permanece constante.

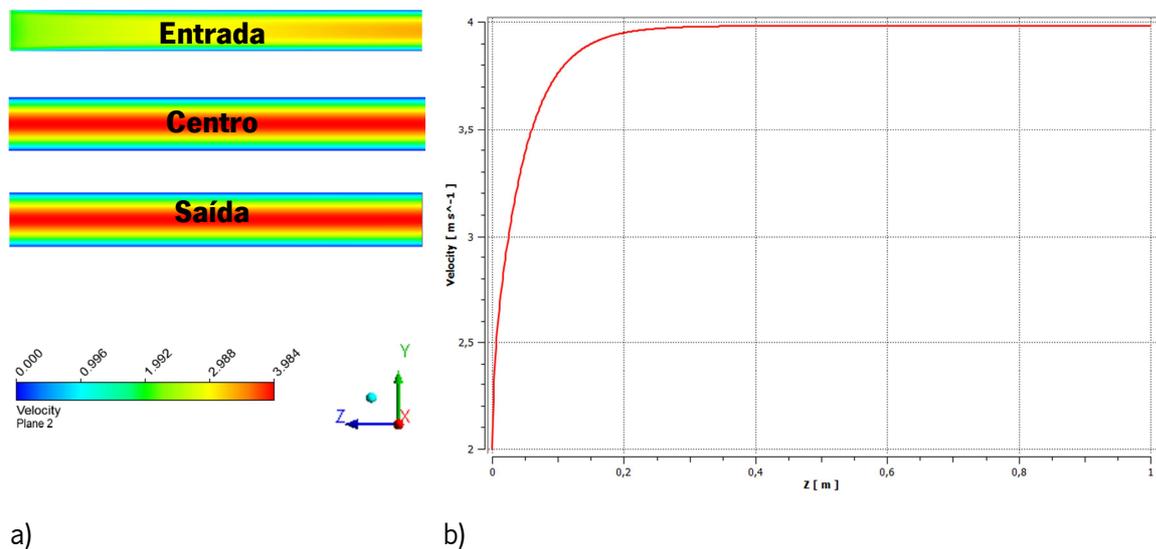


Figura 4.5 – a) Distribuição do gradiente de velocidades na seção longitudinal do tubo; b) Perfil de velocidades ao longo do eixo do tubo

Na Figura 4.6 a) pode-se observar a distribuição do gradiente de pressões na seção longitudinal do domínio. Verifica-se facilmente que na seção transversal do tubo a pressão permanece constante, sendo esta afirmação válida para todo o comprimento. Constata-se também, que do ponto inicial ao ponto final do tubo a pressão decresce significativamente. Na entrada tem um valor próximo de 49,2 Pa, no centro de 24,6 Pa e no final de 0 Pa.

Na Figura 4.6 b) apresenta-se o perfil de pressões ao longo do eixo do tubo e verifica-se que a pressão decresce linearmente, de forma aproximada. A perda de carga na fase inicial não é linear e depois torna-se linear. Segundo o gráfico a pressão de entrada é 48,8 Pa.

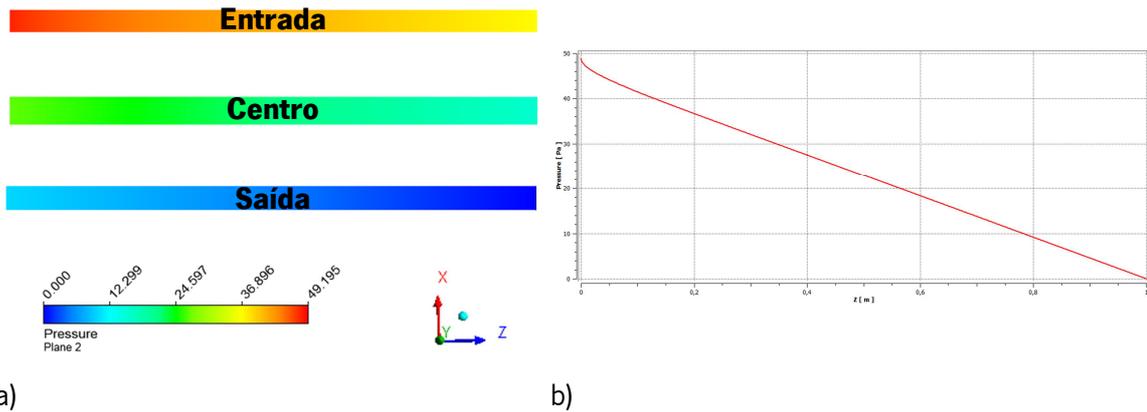


Figura 4.6 – a) Distribuição do gradiente de pressões na secção longitudinal do tubo b) Perfil de pressões ao longo do eixo do tubo

Na Figura 4.7, nas imagens dos contornos da velocidade na secção circular do tubo, verifica-se que na entrada a velocidade é uniforme e à medida em que se percorre o eixo longitudinal do tubo até 0,1 m de distância os gradientes da velocidade aumentam significativamente. Entre 0,1m e 0,5m a velocidade máxima aumenta ligeiramente e de 0,5m até ao ponto final o perfil permanece inalterado.

Na Figura 4.7, nas imagens dos contornos da pressão na secção transversal do tubo verifica-se que ao longo de todo o tubo a pressão é uniforme. Contactasse que a pressão vai diminuindo lentamente, à medida que se percorre o eixo longitudinal da tubagem.

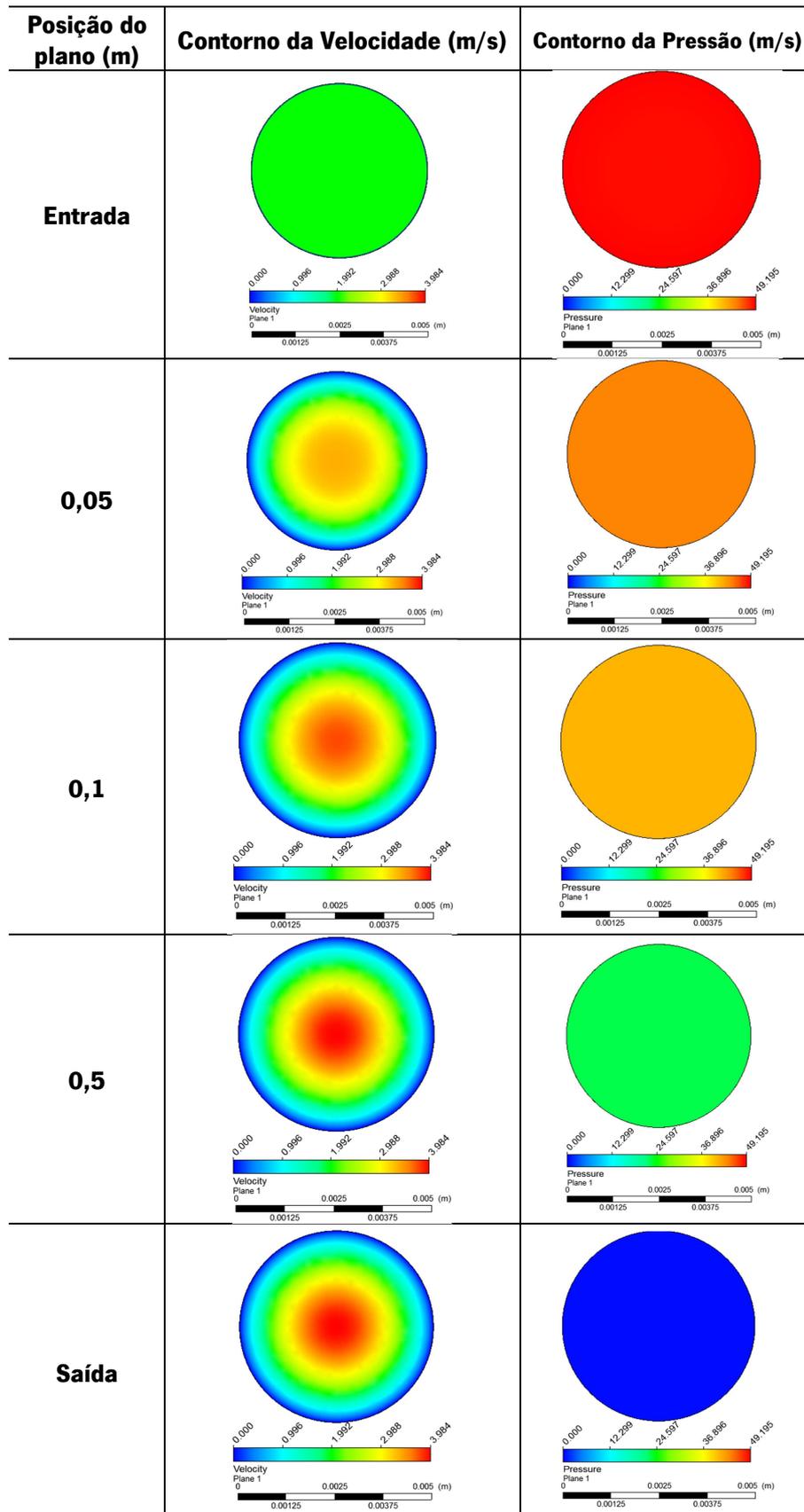


Figura 4.7 - Contornos da velocidade e pressão na seção transversal do tubo em diferentes planos

4.1.3 Comparação dos dados analíticos com os dados simulados

Foram também obtidos o perfil de velocidades totalmente desenvolvido ao longo da secção transversal do tubo, Figura 4.8 e foram colocados num gráfico juntamente com os resultados analíticos, para que se possa ver se o modelo segue a solução analítica. Este gráfico demonstra que os resultados obtidos no *FLUENT*, são quase uma cópia dos resultados obtidos analiticamente, em todos os pontos do tubo. Estes resultados são muito satisfatórios, pois como foi dito anteriormente, as correlações usadas no cálculo deste tubo são mais precisas na previsão do que em qualquer outro caso que se possa analisar. Verificando-se assim que a fiabilidade dos resultados é elevada.

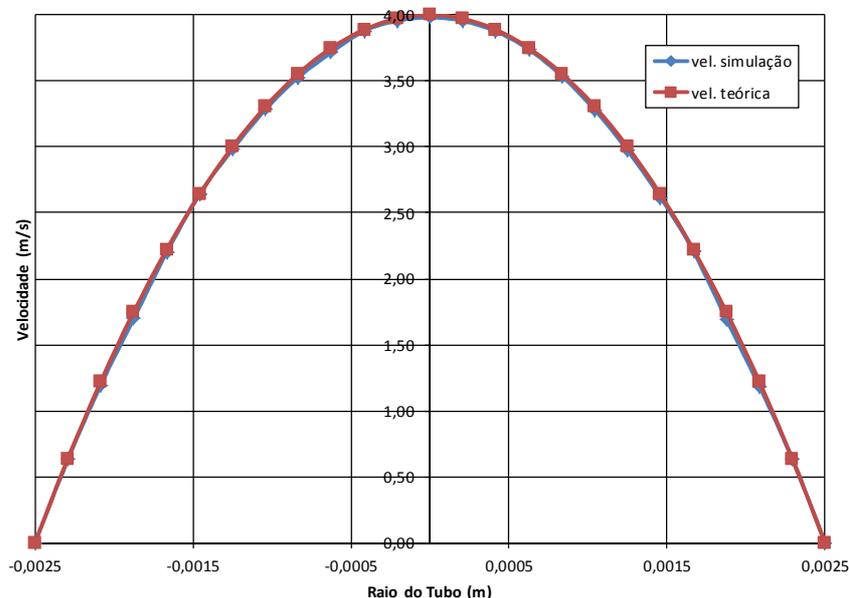


Figura 4.8 - Comparação da velocidade simulada com a velocidade teórica

Foram ainda agrupados na Tabela 4.5 os resultados relativos a perdas de carga (ΔP), velocidade máxima no tubo (U máx.) e Erro relativo máximo (Erro rel. Máx.) e médio (Erro rel. Méd.), para o perfil de velocidades totalmente desenvolvido, na comparação da simulação com os dados analíticos.

Pode-se observar que relativamente às perdas de carga os resultados apresentam boa concordância. De notar também que as perdas de carga são sobre estimadas em relação ao cálculo analítico. No que diz respeito às velocidades máximas a simulação e o cálculo analítico apresentam resultados muito idênticos com diferenças na casa das centésimas. Quanto ao erro

relativo máximo, o ponto da simulação que mais se afastou do caso analítico, foi na ordem dos 3,19 %. Quanto ao erro relativo médio, os pontos da simulação em média afastaram-se do caso analítico, na ordem dos 0,88 %, portanto atingiu-se um resultado muito bom.

Tabela 4.5 - Comparação da simulação com os dados analíticos

ΔP (Pa) Cal. analítico	ΔP (Pa) <i>FLUENT</i>	$V_{m\acute{a}x.}$ (m/s) Cal. analítico	$V_{m\acute{a}x.}$ (m/s) <i>FLUENT</i>	Erro rel. Máx. (%)	Erro rel. Méd. (%)
45,81	48,75	4	3,99	3,19	0,88

Os resultados da Tabela 4.5 mostram que o modelo desenvolvido apresenta em todas as leituras resultados coerentes com a solução analítica. Os bons resultados obtidos neste modelo foram importantes pelo fato de existirem correlações precisas que permitem confirmar que o modelo segue uma tendência real. Assim, muitas das técnicas e metodologias utilizadas para este modelo serão extrapoladas para os próximos casos analisados.

4.2 Cálculo do escoamento na tubagem em regime turbulento

Nesta secção, o trabalho realizado por Laufer (1953), intitulado como, “A estrutura de turbulência de um fluxo totalmente desenvolvido num tubo” será simulado em *FLUENT* e os resultados obtidos serão comparados. O trabalho foi realizado em 1954 e destaca-se na história como sendo um trabalho pioneiro no estudo experimental de escoamentos turbulentos em tubagens.

4.2.1 Dados experimentais

4.2.1.1 Resumo

Neste trabalho foram feitas medições, principalmente com anemómetro de fio quente, em fluxo turbulento totalmente desenvolvido, num tubo de 10 *inch*, para velocidades de aproximadamente 10 e 100 *feet per second*. A ênfase foi colocada sobre a turbulência e condições junto à parede. Os resultados incluem médias relevantes e quantidades estatísticas, tais como tensões de Reynolds, correlações triplas, dissipação turbulenta e espectros de energia. Mostra-se que as taxas de produção de energia turbulenta, dissipação e difusão têm os máximos perto da aresta da subcamada laminar e que existe um intenso movimento de energia cinética a partir desse ponto e um equivalente movimento intenso de energia de pressão em sua direção.

Finalmente do ponto de vista da estrutura turbulenta, o campo é dividido em três regiões: (1) a proximidade da parede onde a produção de turbulência, a difusão e ação da viscosidade são todas de igual importância; (2) a região central do tubo onde a energia de difusão tem um papel predominante; e (3) a região entre (1) e (2) onde a taxa local de produção de energia turbulenta domina a energia recebida por ação difusiva.

4.2.1.2 Experiência

A investigação foi levada a cabo numa sala, através de uma instalação experimental, como mostra a Figura 4.9. O ventilador centrífugo tem uma capacidade de $5,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Este é alimentado por um motor de velocidade constante de 15,2 cv, colocado dentro de uma grande caixa de pressão. A caixa era octogonal na secção transversal e tinha 3 m de altura e 4,9 m de comprimento. O ar é injetado através do ventilador no espaço que rodeia o ventilador e atravessa um favo de mel, três telas e um grande cone de contração. O favo de mel consiste de células hexagonais com 51 mm na transversal e 203 mm no comprimento. Os ecrãs têm 10 malhas por cm e um diâmetro de fio de 0,2 mm. O cone de contração, que era feito de madeira e na secção transversal era de secção circular, reduziu a passagem de ar de 1,2 m para 500 mm no diâmetro.

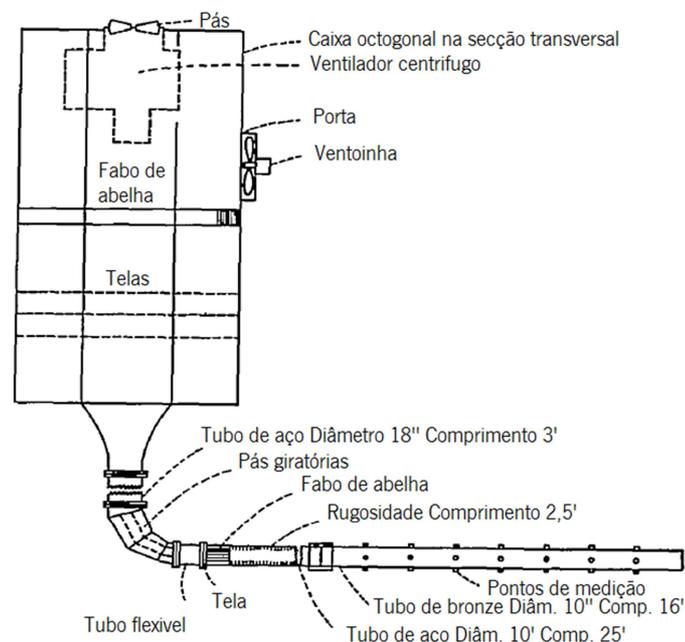


Figura 4.9 - Diagrama esquemático da configuração do teste (Adaptado de Laufer (1953))

A secção transversal foi ainda mais reduzida, de 500 mm para 250 mm no diâmetro através de um cotovelo de 90°. Após o cotovelo, foi utilizado um acoplamento de elástico curto para prevenir a transmissão de vibrações da caixa de pressão para o tubo. A fim de minimizar qualquer irregularidade de fluxo devido ao cotovelo, outra tela e um favo de mel, de 203 mm de comprimento, foram instalados nas secções de entrada de um tubo de aço, com 7,6 m de comprimento. Além disso, a fim de acelerar o crescimento da camada limite, foi colado um papel rugoso na parede do tubo, ao longo de um comprimento de 762 mm. Com esta disposição, verificou-se pela medição da distribuição da velocidade média, no fim do tubo de aço, que depois de um comprimento de entrada de 30 diâmetros, o fluxo é turbulento e totalmente desenvolvido. Após o tubo de aço foi anexado um tubo de bronze, com 4,9 m de comprimento e diâmetro interno de 247 mm. Este serviu como seção de teste.

4.2.2 Simulação CFD

4.2.2.1 Aproximação 3D da instalação real

Criou-se um tubo com o comprimento igual ao comprimento em que se fizeram as medições das propriedades do fluxo. Acontece que no caso experimental, foi instalado um tubo em que se colou um papel com rugosidade para acelerar o desenvolvimento do perfil de velocidades. Nesse sentido no caso simulado foi necessário adicionar um comprimento adicional ao tubo. Tal comprimento foi calculado segundo a equação 4.6 e 4.7.

$$4,4 \times Re^{\frac{1}{6}} = M \quad 4.6$$

$$M \times D = C_{\text{perfil}} \quad 4.7$$

D - Diâmetro do tubo (m)

C_{perfil} - Comprimento de desenvolvimento do perfil (m)

M – incógnita (-)

Para um número de Reynolds de 50 000 obteve-se um comprimento de desenvolvimento do perfil de velocidades de 6,7 metros, ao passo que para um número de Reynolds de 500 000 obteve-se um valor de 9,7 metros. Portanto considerou-se o caso mais crítico e adicionou-se ao tubo mais 10 metros de comprimento.

De seguida, foi necessário determinar a velocidade de entrada do fluido à entrada da tubagem, a partir do número de Reynolds que foi dito no trabalho. Através das propriedades da Tabela 4.6 e da equação 4.8, determinou-se a velocidade para ambos os números de Reynolds.

Para um número de Reynolds de 50 000, a $U_{\text{medio}} = 2,96 \text{ ms}^{-1}$, ao passo que para um número de Reynolds de 500 000, um $U_{\text{medio}} = 29,6 \text{ ms}^{-1}$.

Tabela 4.6 – Propriedades do caso em estudo

Dados de entrada		Propriedades físicas do ar	
D (m)	0,25	$\rho_{\text{ar}} (\text{kg}/\text{m}^3)$	1,225
C (m)	14,88	$\mu_{\text{ar}} (\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s})$	$1.7894 * 10^{-5}$

$$U_{\text{medio}} = \frac{Re * \mu_{\text{ar}}}{\rho_{\text{ar}} * D} \quad 4.8$$

4.2.2.2 Geometria

Na ferramenta de desenho do *FLUENT, Design Modeler*, desenhou-se a figura geométrica que é uma simplificação realística da experiência de Laufer (1953). Desenhou-se um cilindro com um diâmetro de 0,250 m e um comprimento de 14,88 metros. Pode-se visualiza-lo na Figura 4.10.

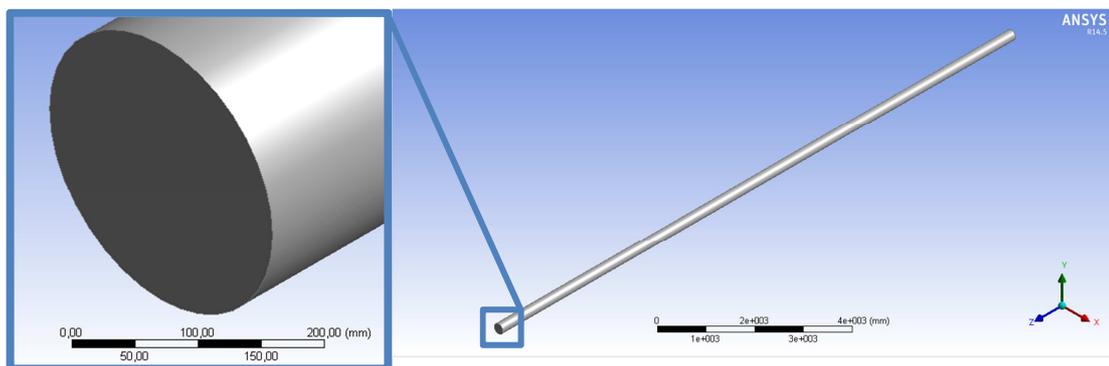


Figura 4.10 – Desenho 3D da tubagem, obtida pelo *Design Modeler*

4.2.2.3 Malha

Segundo a literatura, para regimes turbulentos, na região próxima das paredes ocorrem muitas colisões do fluido com a parede e a geração de vórtices. Para capturar essa camada linear de velocidades, a subcamada viscosa, é necessário uma malha muito refinada junto à parede, sendo que tal é conseguido com $y^+ = 1$. De seguida, demonstra-se como se determina a espessura de primeira camada para obter-se um $y^+ = 1$.

Calculou-se iterativamente o factor de atrito para regime turbulento de acordo com a equação 4.9 de Prandtl. Para $Re = 50\ 000$, o $f = 0,0209$ e para $Re = 500\ 000$ o $f = 0,0132$

$$f^{-1/2} = 2.0 \log(\text{Re} \sqrt{f}) - 0.8 \quad 4.9$$

Calculou-se também o rácio entre a velocidade média e a máxima em conduta circular, de acordo com a equação 4.10. Para $\text{Re} = 50\,000$, o rácio = 0,8387 e para $\text{Re} = 500\,000$ o rácio = 0,8676.

$$\frac{\langle u \rangle}{\bar{u}_{max}} = (1 + 1.33\sqrt{f})^{-1} \quad 4.10$$

De seguida, calculou-se a tensão de corte na parede de acordo com a equação 4.11. Para $\text{Re} = 50\,000$, o $\tau_0 = 0,0273$ e para $\text{Re} = 500\,000$ o $\tau_0 = 1,7199$.

$$\tau_0 = f * \frac{1}{2} * \rho * U_{med}^2 \quad 4.11$$

Depois calculou-se a velocidade de corte na parede de acordo com a equação 4.12. Para $\text{Re} = 50\,000$, o $U_r = 0,1493$ e para $\text{Re} = 500\,000$, o $U_r = 1,1849$.

$$U_r = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad 4.12$$

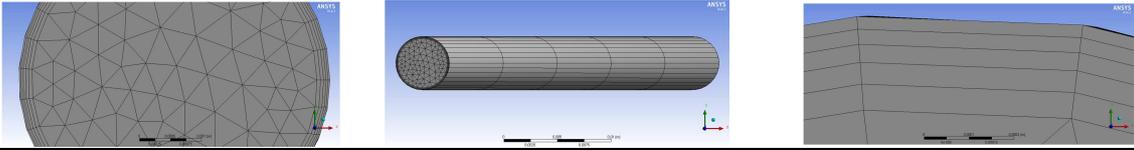
Depois calculou-se a espessura da primeira camada da célula junto à parede, a fim de obter-se um $y^+ = 1$, equação 4.13. Para $\text{Re} = 50\,000$, o $y = 9,78 * 10^{-5}$ m e para $\text{Re} = 500\,000$, o $y = 1,23 * 10^{-5}$ m.

$$y = \frac{y^+ * \mu}{\rho * U_r} \quad 4.13$$

O método utilizado para a construção da malha foi muito semelhante ao método utilizado para o caso anterior, do escoamento laminar em tubagem. A única diferença foi que neste caso definiu-se a espessura da primeira camada a fim de obter-se um y^+ de 1.

O teste de malha consistiu em definir uma malha base com as características expressas na Tabela 4.7 e variar determinados parâmetros, mantendo todos os outros parâmetros constantes, Tabela 4.8, e encontrar a malha que proporciona melhor qualidade. Foram marcados os parâmetros que proporcionaram melhores resultados.

Tabela 4.7 – Malha base



Comprimento da aresta (mm)	Nº divisões	Geometria	Factor de crescimento	Espessura 1ª camada (mm)	Nº camadas	Taxa de crescimento
10	100	Triângulos	Nenhum	0,0978	20	1,2

Tabela 4.8 – Teste de malha

Nº de divisões ao longo do eixo:

Nº de divisões	100	500	1000
Vmax (m/s)	3,5999	3,6154	3,6155
Pentrada (Pa)	7,0621	7,1190	7,1288
Nº elementos	244000	1220000	2440000
Average Skewness	0,0833	0,0832	0,0832
Average Orthogonal Quality	0,9820	0,9825	0,9825

Face sizing;

Tamanho do elemento da face (mm)	10	5
Vmax (m/s)	3,5999	3,6107
Pentrada (Pa)	7,0621	7,0564
Nº elementos	244000	690300
Average Skewness	0,0833	0,1078
Average Orthogonal Quality	0,9820	0,9760

Na Figura 4.11, é possível visualizar-se a configuração da malha seleccionada.

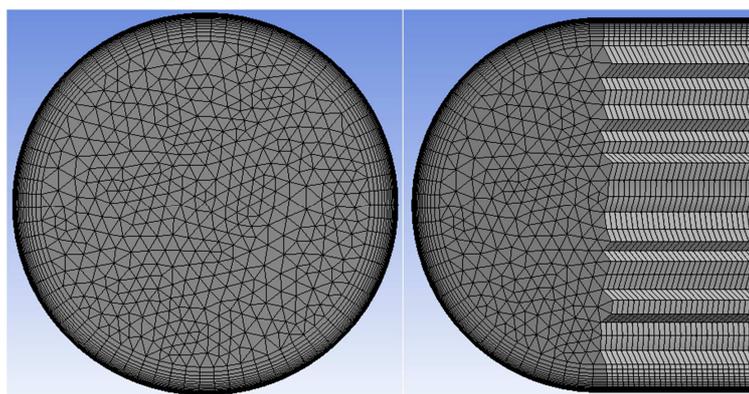


Figura 4.11 – Configuração da malha seleccionada

Esta malha tem 1 220 000 elementos e qualitativamente é quase perfeita, apresenta *skewness* e uma qualidade ortogonal média de 0,08 e 0.98, respetivamente.

4.2.2.4 *Inputs* do *FLUENT*

Uma vez definida a malha, a próxima etapa foi definir os *inputs* do *FLUENT*, a partir dos quais será realizado o cálculo. As condições de fronteira e modelo de turbulência adotados estão resumidos na Tabela 4.9

Tabela 4.9 – *Inputs* do *FLUENT* para escoamento em regime turbulento

Modelo de turbulencia – Realizable $k\epsilon$ – enhanced wall treatment		
	Tipo de condição	Input
Inlet	<i>Velocity inlet</i>	2,96 m/s e 29,6 m/s
Outlet	<i>Pressure outlet</i>	0
Wall	-	-

4.2.2.5 Critérios de paragem

O método iterativo foi terminado quando os resíduos da equação da continuidade e das componentes x , y e z foram inferiores a 10^{-6} e quando os *monitors* definidos previamente convergiram. Os *monitors* criados foram a velocidade máxima em todo o volume do sólido e a pressão média na superfície de entrada do fluido.

4.2.3 Comparação das simulações com dados experimentais

Nesta secção serão comparados os dados obtidos na simulação *CFD* com os dados experimentais de Laufer (1953). O modelo de turbulência utilizado na simulação e consequentemente utilizado nos seguintes gráficos é o $k\epsilon$ *realizable*.

4.2.3.1 Comparação para $Re = 50\ 000$

Na Figura 4.12 apresenta-se a distribuição da pressão média ao longo do eixo da tubagem. À medida que aumenta o valor da abcissa do gráfico ocorre um deslocamento da secção final do tubo no sentido do interior do tubo. Logo, verifica-se que a pressão tende a aumentar, à medida que ocorre um afastamento, ao final do tubo. Verifica-se também uma coincidência quase perfeita entre os dados da experiência com os dados da simulação, afastando mais, perto do início do tubo.

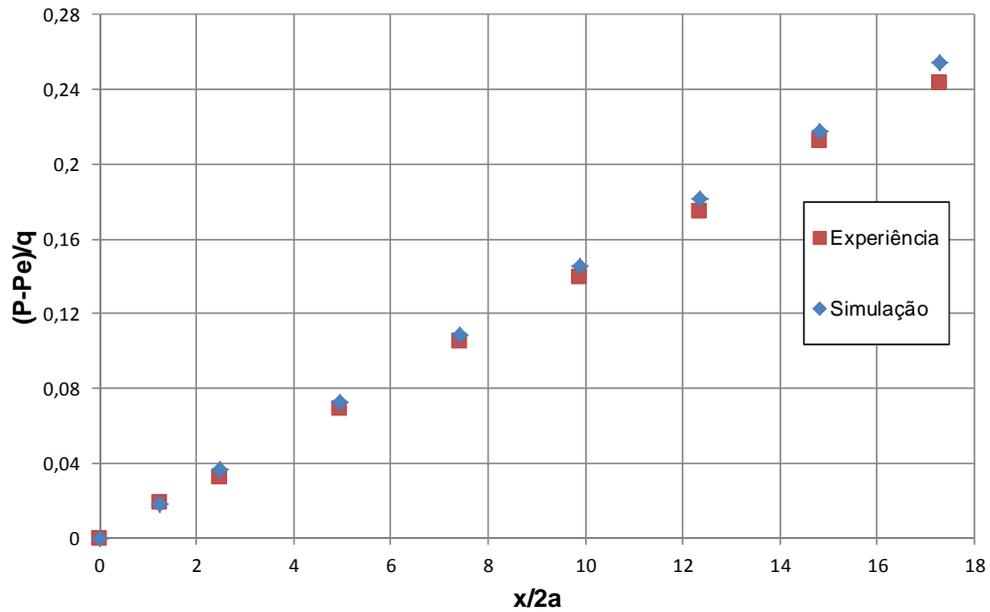


Figura 4.12 - Distribuição da pressão média ao longo do eixo da tubagem

Na Figura 4.13 apresenta-se a distribuição da velocidade média na secção transversal do tubo. Verifica-se que o perfil de velocidades tem o formato de uma parábola e que a velocidade é zero junto à parede e vai aumentando progressivamente até ao centro do tubo. Constata-se que a diferença entre os dados simulados e experimentais é ligeiramente diferente, em todo o comprimento do raio

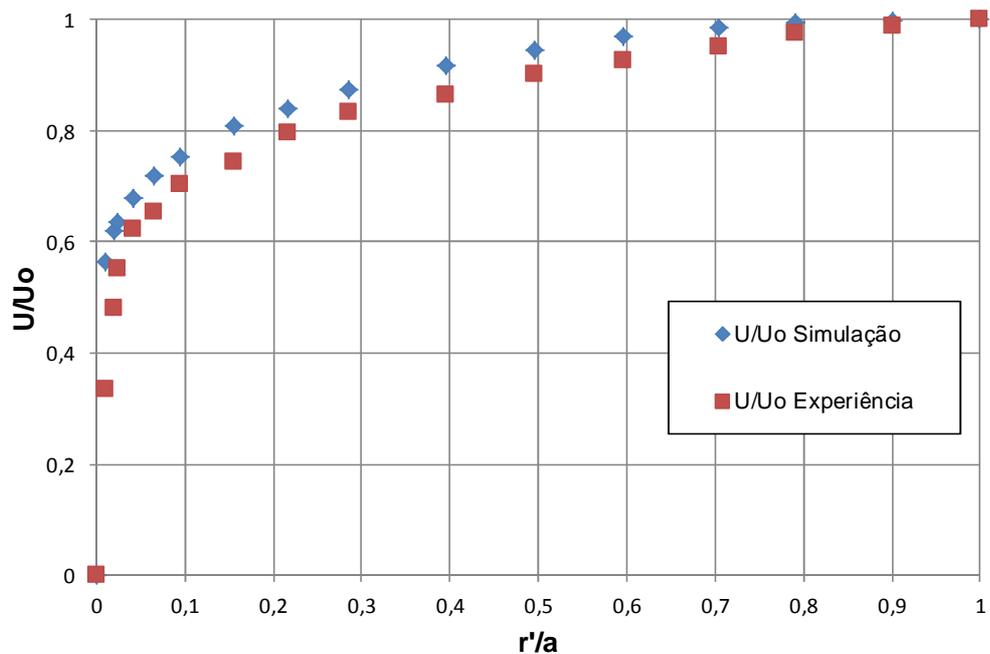


Figura 4.13 - Distribuição da velocidade média na secção transversal do tubo

Na Figura 4.14 apresenta-se a distribuição da velocidade média na secção transversal do tubo, junto à parede. Verifica-se em ambos os casos que o perfil de velocidades junto à parede tem uma tendência linear. Constata-se também, que junto à parede as diferenças entre os dados simulados e experimentais são significativamente diferentes, visto que os valores obtidos da velocidade para a simulação são muito superiores aos da experiência.

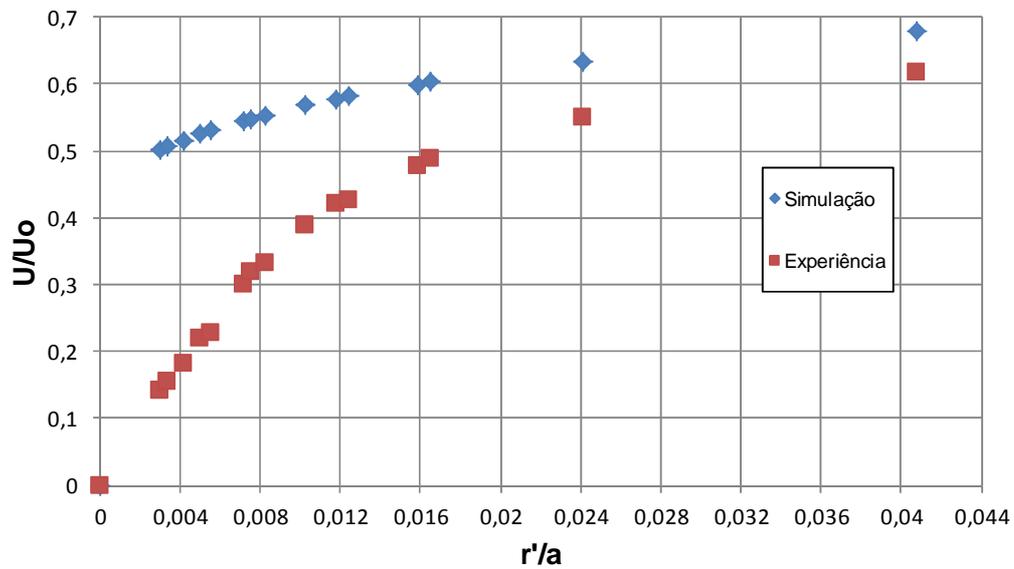


Figura 4.14 - Distribuição da velocidade média na secção transversal do tubo, junto à parede

Dado que se assistiu a divergências bastante significativas para o perfil de velocidades junto à parede, obtido através da simulação, procedeu-se a um teste com diversos modelos de turbulência e também com outra condição de parede a fim de obter melhores resultados, Figura 4.15.

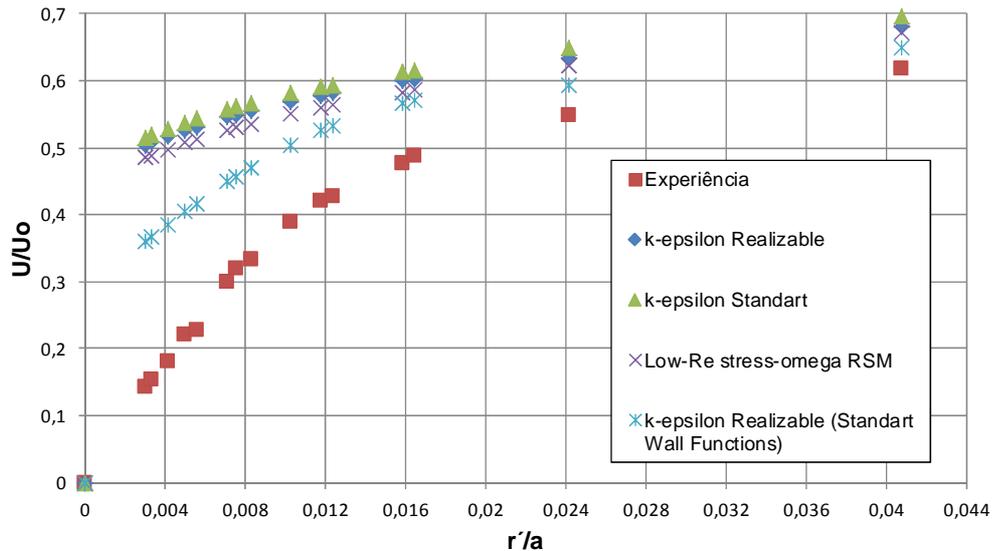


Figura 4.15 - Distribuição das velocidades na secção transversal do tubo, junto à parede, para diferentes modelos de turbulência e condição de parede

Os modelos de turbulência, na ordem dos que mais se afastaram, para aqueles que mais se aproximaram, foram respectivamente, o modelo $k-\varepsilon$ *Standart*, o $k-\varepsilon$ *Realizable*, o *Low-Re stress-omega RSM* e o $k-\varepsilon$ *Realizable (Standart Wall Functions)*.

4.2.3.2 Comparação para $Re = 500\,000$

Na Figura 4.16, apresenta-se a distribuição da pressão média ao longo do eixo da tubagem. À medida que aumenta o valor da abcissa do gráfico ocorre um deslocamento da secção final do tubo no sentido do interior do tubo. Logo, verifica-se que a pressão tende a aumentar. Verifica-se também uma coincidência perfeita entre os dados da experiência com os dados da simulação. Contactasse facilmente que os valores das ordenadas neste caso são bastante inferiores aos valores do caso de Reynolds igual a 50 000, tal facto deve-se principalmente porque neste caso os valores da pressão dinâmica no centro do tubo são muito mais elevados.

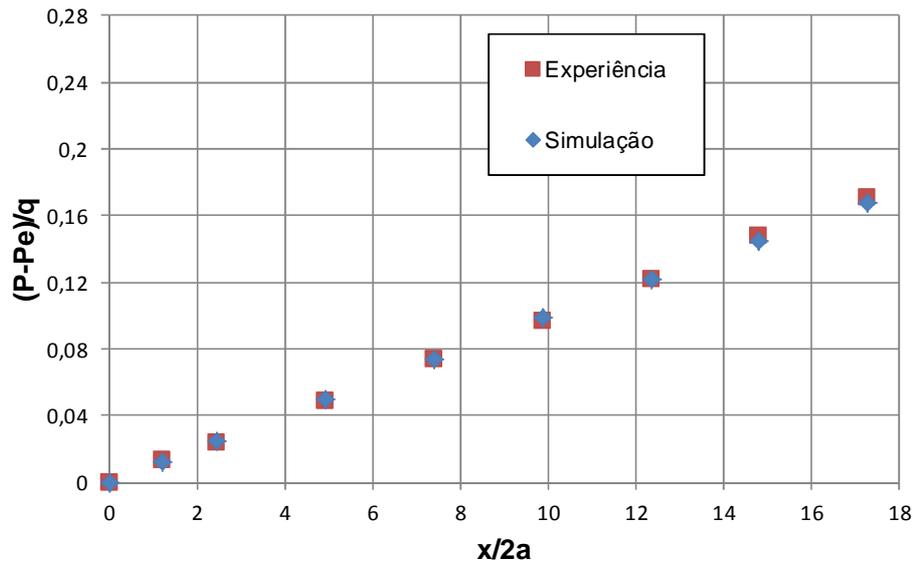


Figura 4.16 - Distribuição da pressão média ao longo do eixo da tubagem

Na Figura 4.17 apresenta-se a distribuição da velocidade média na secção transversal do tubo. Verifica-se que o perfil de velocidades tem o formato de uma parábola e que a velocidade é zero junto à parede e vai aumentando progressivamente até ao centro do tubo. Constatamos que a diferença entre os dados simulados e experimentais é bastante similar, em todo o comprimento do raio do tubo. O resultado obtido é muito melhor ao obtido para número de Reynolds de 50 000.

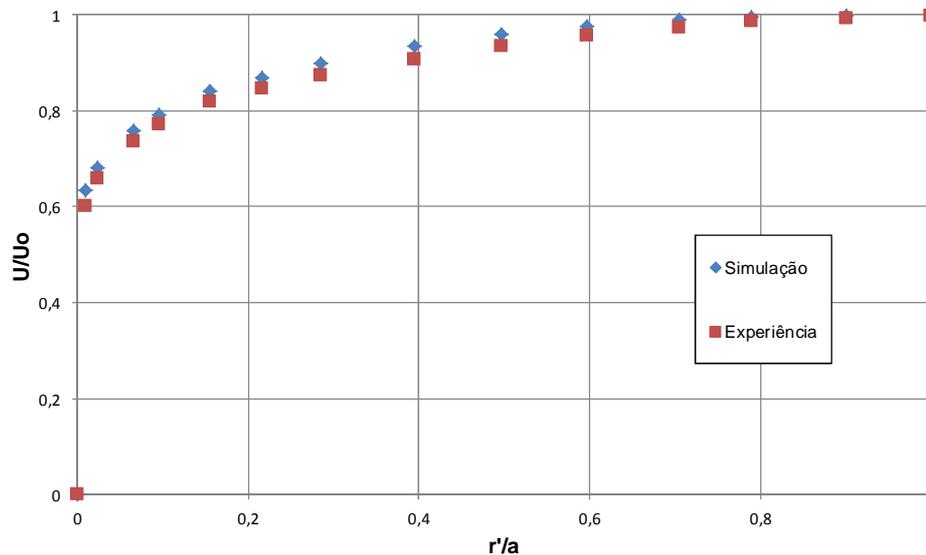


Figura 4.17 - Distribuição da velocidade média na secção transversal do tubo

Na Figura 4.18 apresenta-se a distribuição da velocidade média na secção transversal do tubo, junto à parede. Verifica-se em ambos os casos que o perfil de velocidades junto à parede

tem uma tendência linear. Constatase também que junto à parede as diferenças entre os dados simulados e experimentais é significativamente diferente, visto que os valores obtidos da velocidade para a simulação são muito superiores aos da experiência. Vê-se claramente que a diferença neste caso é muito superior ao caso de Reynolds de 50 000 visto que a diferença neste caso é na ordem das 5 unidades e no outro das 3.5 unidades.

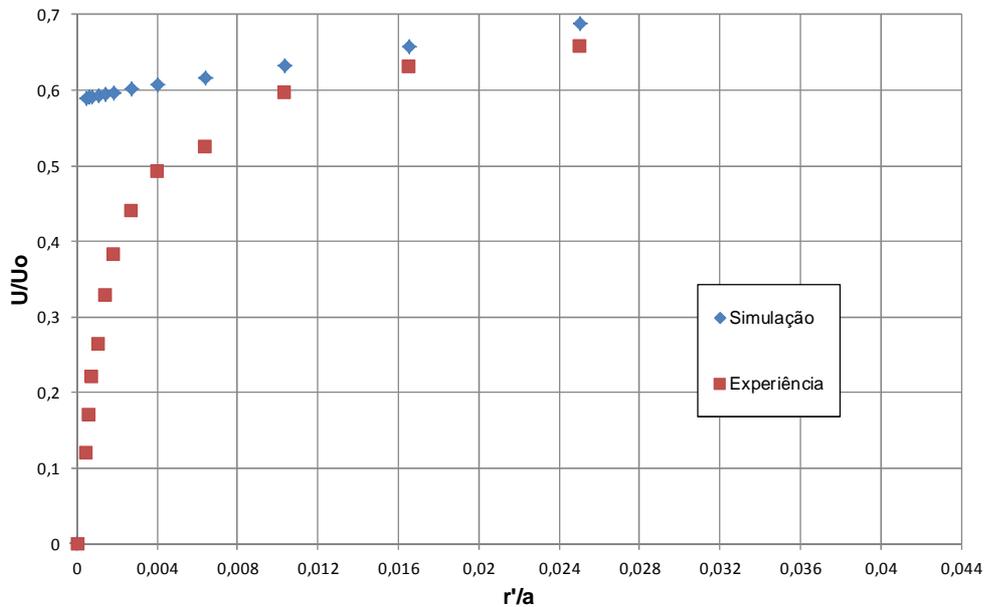


Figura 4.18 - Distribuição da velocidade média na secção transversal do tubo, junto à parede

5 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Jato Circular

Nesta secção será realizada uma simulação *CFD* de um jato circular, os dados obtidos serão posteriormente comparados com os dados experimentais.

5.1.1 Experiência

Os dados experimentais advêm do trabalho experimental desenvolvido pelo Nunes (2003), no âmbito da tese de doutoramento.

O trabalho experimental foi desenvolvido num túnel de jatos (Figura 5.1), este é um túnel aberto, de sopro, dotado de um ventilador centrífugo acionado por um motor eléctrico de 4 kW, através de transmissão por correias. É de velocidade constante, sendo a regulação de caudal feita por estrangulamento controlado da admissão.

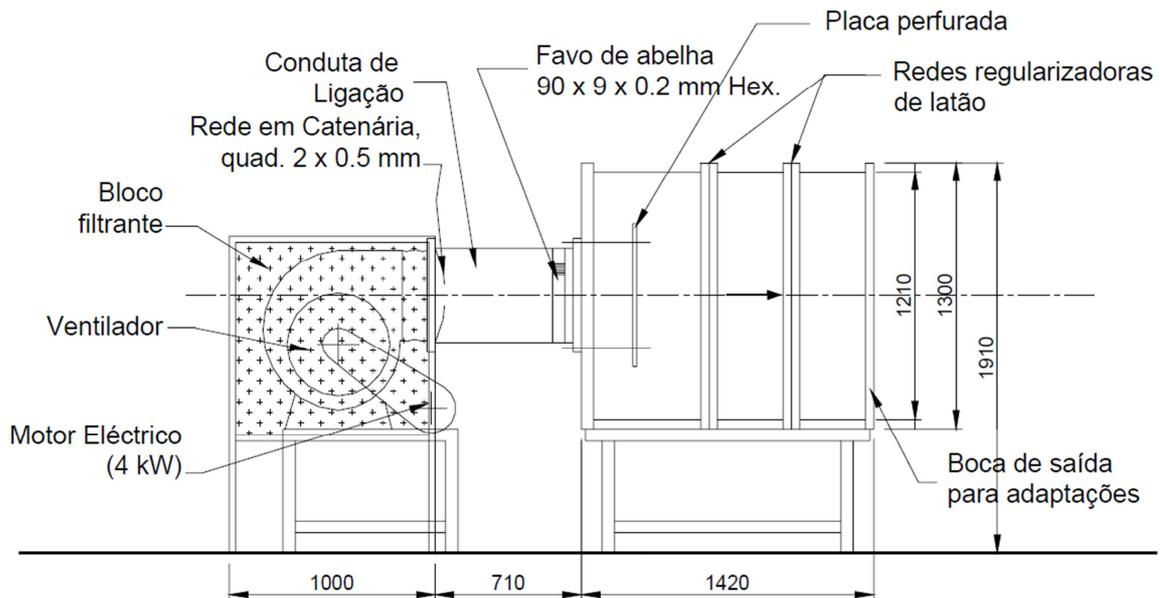


Figura 5.1 - Esquema do túnel de jatos (Nunes, 2003)

O escoamento de ar filtrado produzido pelo ventilador é ligado à câmara de tranquilização de secção de 1 000 x 1 210, com 1 420 mm de comprimento, sendo primeiramente quebrado numa placa perfurada, a fim de se evitar o escoamento direto para a boca de saída. Após preencher toda a zona do *plenum* passa por duas redes muito finas de latão de malha quadrada de 2 x 0.5 mm para uniformização, estando então em condições de passar pelas adaptações para se obter o jato pretendido.

Esta adaptação compõe-se de uma placa que fecha completamente a boca de saída, dispondo no seu centro de uma tubeira de forma elíptica, com um diâmetro de saída de 100 mm (Figura 5.2). Com esta tubeira obtém-se uma velocidade do jato redondo de 52.6 ms^{-1} , com um perfil em “Cartola”.

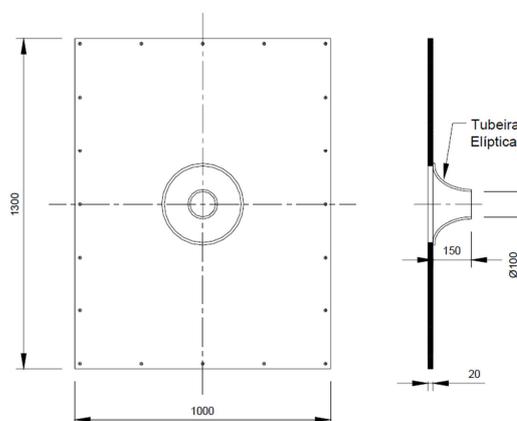


Figura 5.2 - Adaptador para jato redondo (Nunes, 2003)

5.1.2 Simulação CFD

5.1.2.1 Geometria

A figura geométrica foi modelada recorrendo ao programa *SolidWorks* e depois exportada para a ferramenta de desenho do *ANSYS*, o *Design Modeler*. (Figura 5.3) Desenhou-se a seção circular da tubeira com um diâmetro de 100 mm, a parede da tubeira com forma elíptica e a placa que cobre a câmara de tranquilização. Finda essa etapa foi necessário definir o domínio do problema. Para tal fez-se uma simulação num domínio bastante amplo, com 120 m de comprimento por 60 m de largura, para visualizar a extensão do fluido. Concluiu-se que um domínio, com 60 m de comprimento por 30 m de largura, seria mais que suficiente visto que captura os principais gradientes de velocidade.

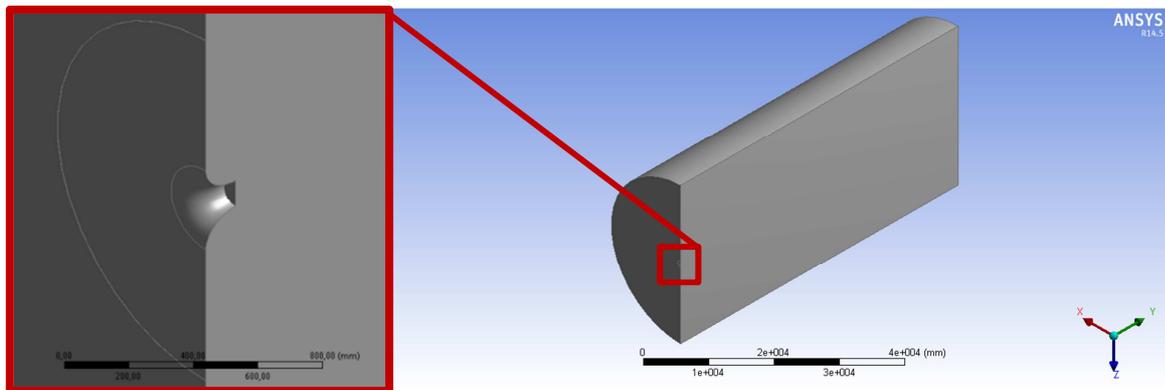


Figura 5.3 - Geometria de um jato circular

5.1.2.2 Malha

Testes de malha

Teste de Malha 2D

Numa fase inicial testou-se a simulação para a geometria em 2D, com um domínio bastante amplo, com 120 m de comprimento e 60 m de largura. Na Figura 5.4 pode-se visualizar a configuração da malha utilizada com 27 108 elementos, com um *skewness* médio de 0,037 e ortogonalidade média de 0,99.

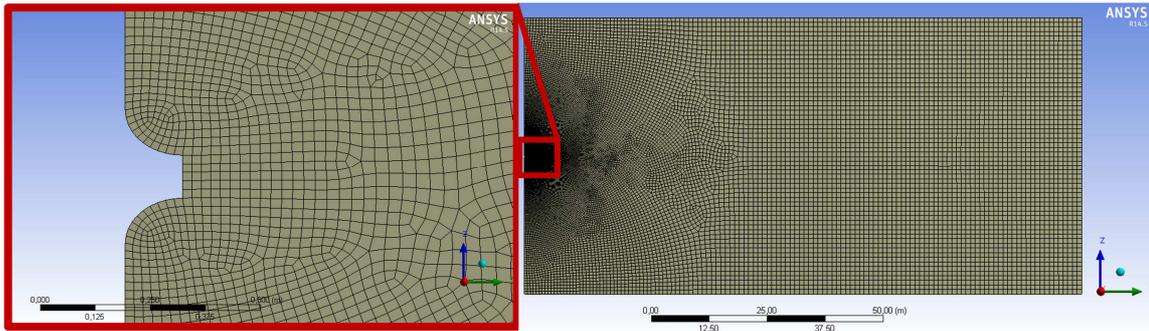


Figura 5.4 - Malha 2D, com vista pormenorizada da boca da tubeira e global, respectivamente

O modelo de turbulência escolhido foi o $k-\epsilon$ *Realizable*. Apesar dos casos semelhantes da pesquisa bibliográfica utilizarem na maioria o $k-\epsilon$ *Standart*, o *Realizable* é semelhante ao *Standart* e é recomendado pelo *FLUENT*, embora exija mais capacidade computacional.

Na Figura 5.5 é possível observar os resultados obtidos para o modelo em estudo. Dado que os dados obtidos eram afastados da experiência, optou-se por testar mais modelos de turbulência, a fim de verificar se ocorreria uma aproximação da simulação à experiência. Mas o teste de modelos de turbulência trouxe resultados infrutíferos, portanto optou-se por outras alternativas, expostas de seguida, tais como, geometria em 3D com simetria e diferentes tipos de elementos.

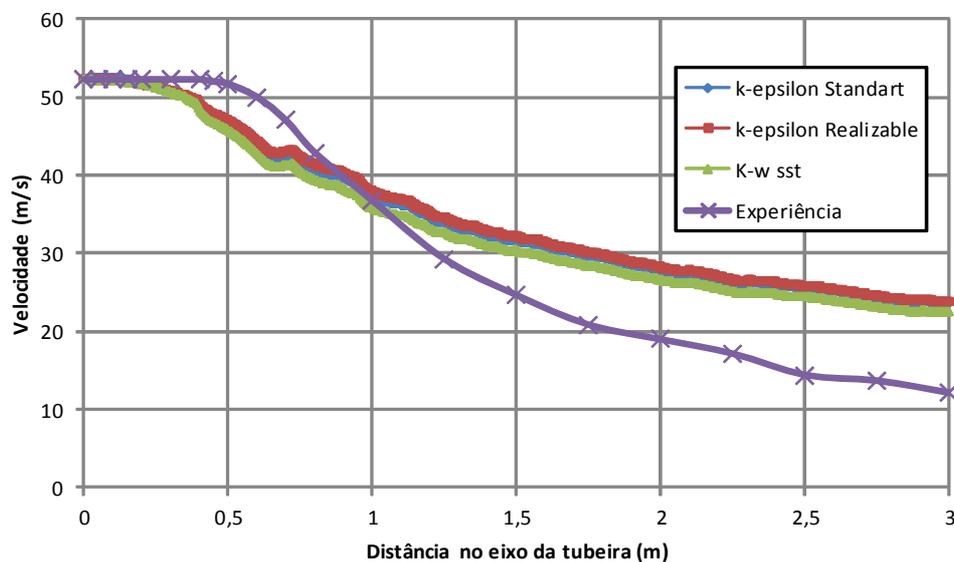


Figura 5.5 - Malha 2D – Teste de diferentes modelos de turbulência

Na Figura 5.6 pode-se visualizar o comportamento da curva de velocidade ao longo do eixo da tubeira, para diferentes tipos de elementos e constata-se que os elementos tetraedros têm um comportamento bastante diferente dos outros dois tipos de elementos e algo instável pela

existência de vários picos. A causa mais provável deverá ser a geometria 3D, sem simetria, ao contrário dos outros casos. Na Tabela 5.1 estão definidas as características da malha dos diferentes tipos de elementos.

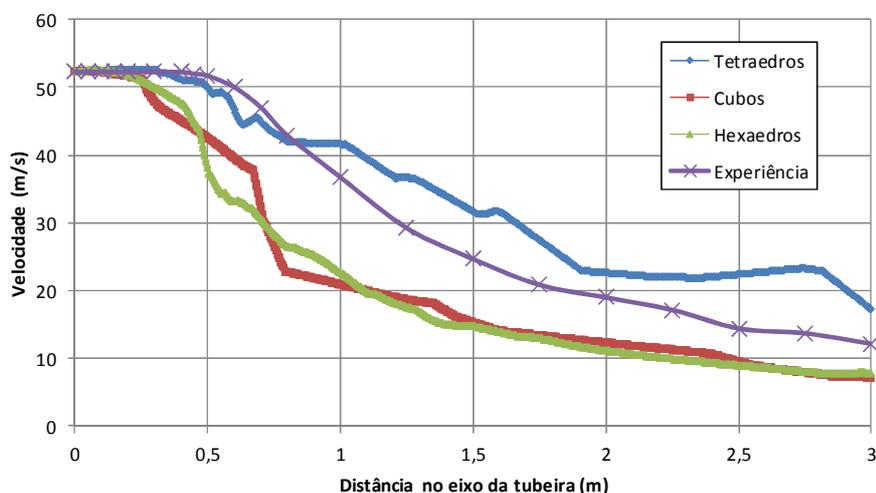


Figura 5.6 - Teste de Malha, em 3D, para diferentes tipos de elementos

Tabela 5.1 – Características da malha dos diferentes tipos de elementos

Tipo de elementos	Dominio	Geometria	NºElementos	Skewness médio	Ortogonalidade média
Tetraedros	120*60	3D	90 225	0,23	0,86
Cubos	60*30	3D simetria	48500	0,024	0,97
Hexaedros	60*30	3D simetria	88 055	0,32	0,84

Os elementos Hexaedros apresentaram uma curva mais uniforme, mais idêntica à curva do caso experimental, deste modo foram os elementos escolhidos. Posteriormente foi realizado um refinamento de malha.

Testes de Malha em 3D com simetria e elementos hexaedros

Para a malha escolhida, elementos hexaedros e geometria 3D com simetria, realizou-se um estudo do tamanho de malha para encontrar a malha que com o menor número de elementos fornecesse os melhores resultados. O estudo está representado na Figura 5.7, em que se verifica que a malha com 198992 elementos fornece os melhores resultados, pois aumentando o refinamento não introduz alterações na tendência da curva representada.

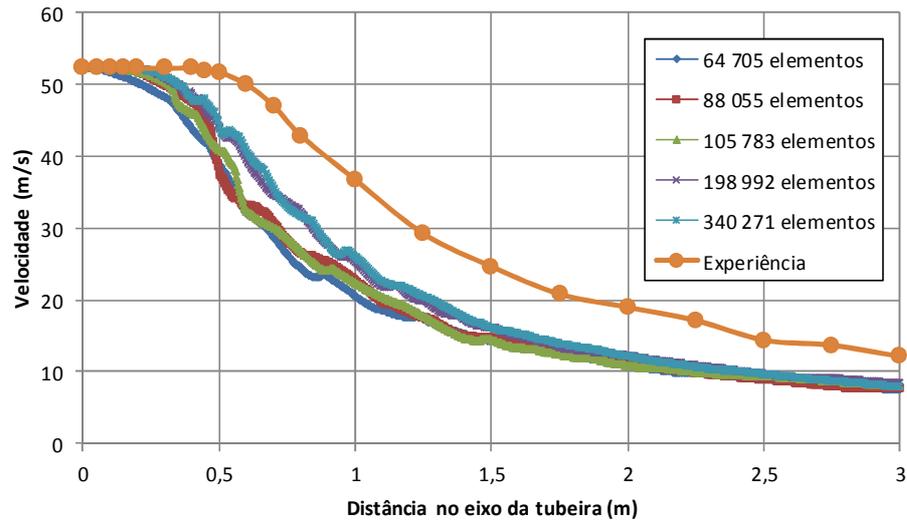


Figura 5.7 - Testes de Malha, em 3D, com simetria e elementos hexaedros

A configuração dos elementos da malha final, estão representados na Figura 5.8. Esta malha foi criada recorrendo a dois comandos, do painel de ferramentas do *meshing*, sendo elas, o *method* e o *sizing*. No *method* definiu-se que os elementos da malha seriam hexaedros e que a face da malha podia ser quadrada ou triangular. No *sizing* seleccionou-se a face pela qual é injetado o fluido e definiu-se o tamanho dos elementos.

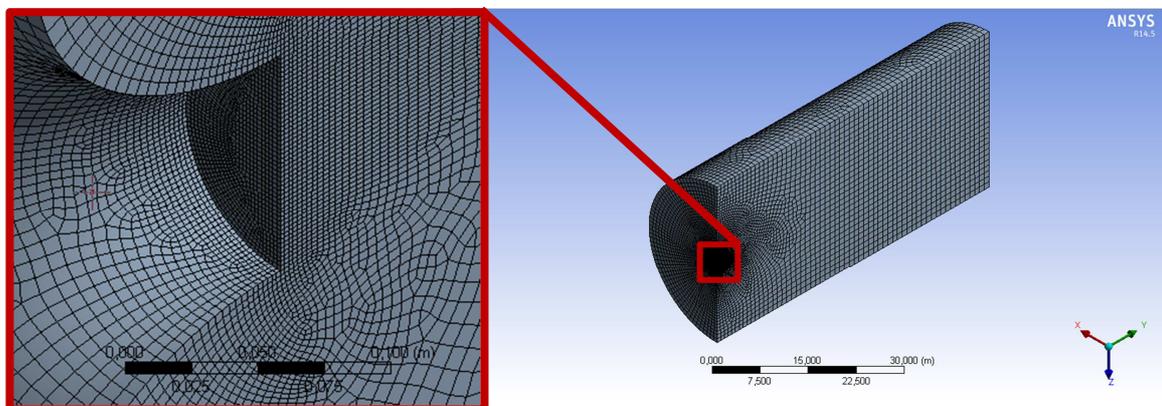


Figura 5.8 – Configuração da malha seleccionada

Esta malha tem 198 992 elementos e apresenta uma qualidade razoável, tem *Skewness* e qualidade ortogonal média de 0,32 e 0,80, respetivamente.

5.1.2.3 Inputs do FLUENT

Uma vez definida a malha, a próxima etapa foi definir os *inputs* do *FLUENT*, onde será realizado o cálculo. As condições de fronteira e modelo de turbulência adotados estão resumidos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – *Inputs* do *FLUENT* para jato circular

Modelo de turbulencia – Realizable $k - \epsilon$ – Standard Wall Functions		
	Tipo de condição	Input
Inlet	<i>Velocity inlet</i>	52,26 ($i = 10\%$) (D Hidráulico 0,1 m)
	<i>Pressure inlet</i>	0
Outlet	<i>Pressure outlet</i>	0
Wall	<i>Wall</i>	-
Symmetry	<i>Symmetry</i>	-

5.1.2.4 Critérios de paragem

O método iterativo foi terminado quando os resíduos da equação da continuidade e das componentes x , y e z foram inferiores a 10^{-6} e quando os *monitors* definidos previamente convergiram. Os *monitors* criados foram a velocidade média em todo o volume do sólido.

5.1.2.5 Análise dos Resultados Obtidos

Nas figuras seguintes podem-se visualizar algumas imagens da distribuição dos vectores da velocidade, bem como, da magnitude. Mostram-se imagens que dão uma perspectiva global e outras que dão uma perspectiva local das zonas perto da tubeira.

Na Figura 5.9 estão representados os vectores da velocidade na injeção de um jato, para todo o domínio. Verifica-se que o jato tem um espraioamento linear, durante o seu percurso, que é perfeitamente simétrico em relação ao eixo da tubeira, existe um fluxo muito intenso de fluido na região junto à tubeira e que o fluido em redor do jato move-se no sentido do jato principal.

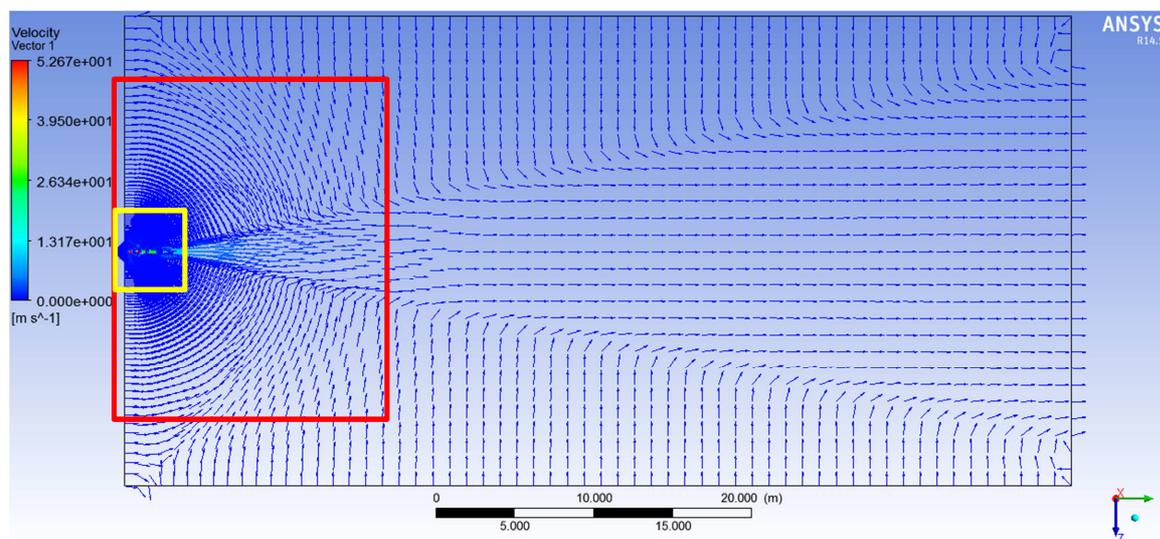


Figura 5.9 - Vectores da velocidade na injeção de um jato, para todo o domínio

Na Figura 5.10 estão representados os vectores da velocidade na injeção de um jato, para a região próxima da tubeira. Verifica-se que as maiores velocidades estão compreendidas entre a saída da tubeira e aproximadamente 0,75 m de distância. Verifica-se que o fluido em redor do jato se move descrevendo circunferências em direção do jato principal e nota-se uma perfeita simetria em relação ao eixo imaginário da tubeira.

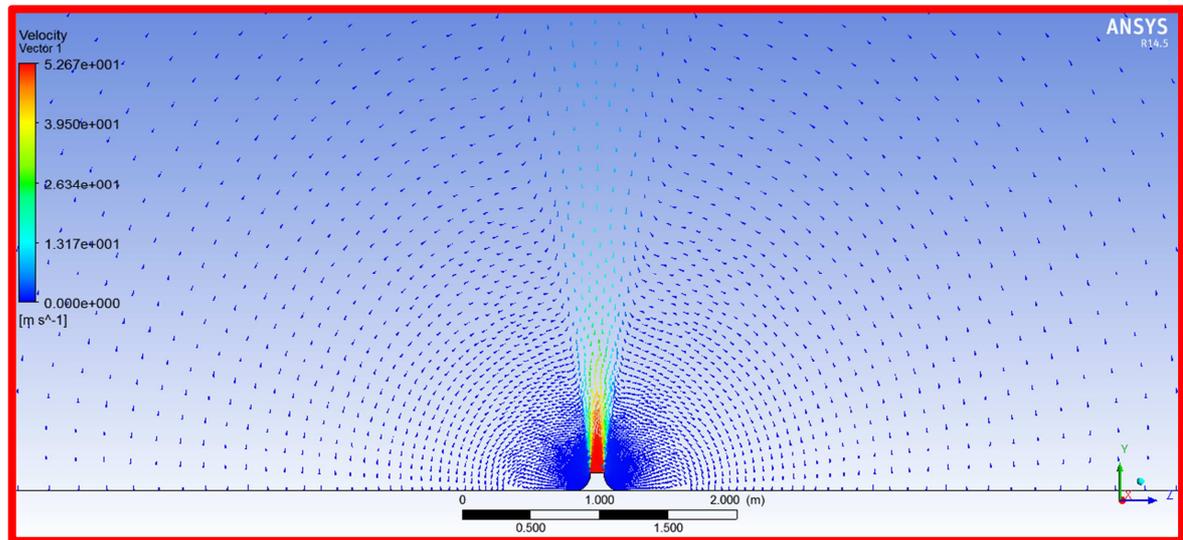


Figura 5.10 - Vectores da velocidade na injeção de um jato, para a região próxima da tubeira

Na Figura 5.11 e Figura 5.12 estão representados os vectores da velocidade na injeção de um jato, para uma região muito próxima da tubeira, para vectores 2D e para vectores 3D, respectivamente. Verifica-se que que o jato logo que sai da tubeira começa a espriar e começasse a formar um cone potencial com as maiores velocidades. Verifica-se que o jato arrasta o fluido em redor e com maior intensidade nas pontas da tubeira.

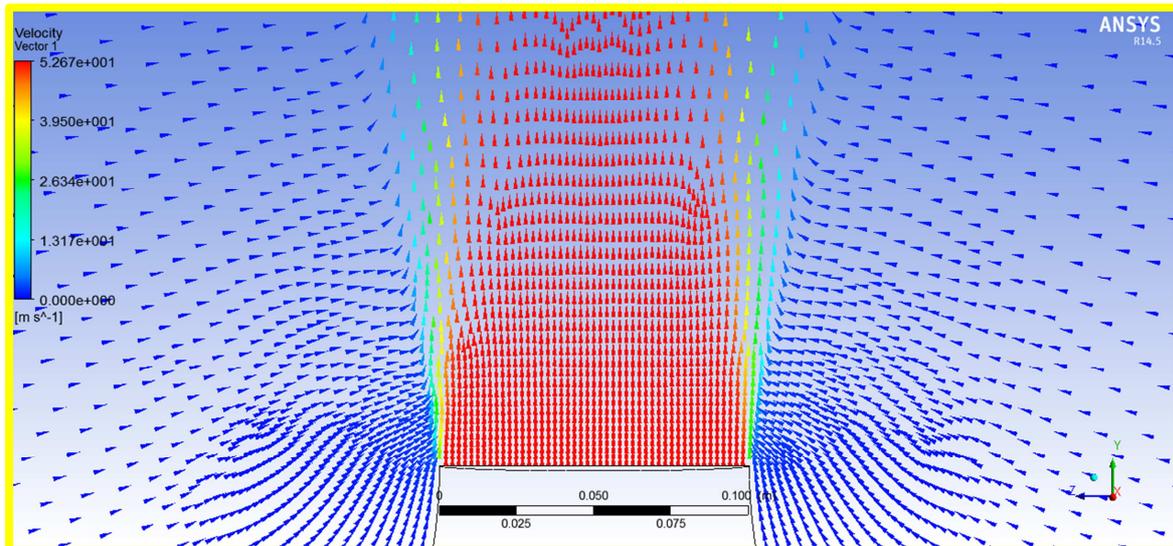


Figura 5.11 - Vectores da velocidade na injeção de um jato, para uma região muito próxima da tubeira, utilizando vectores 2D

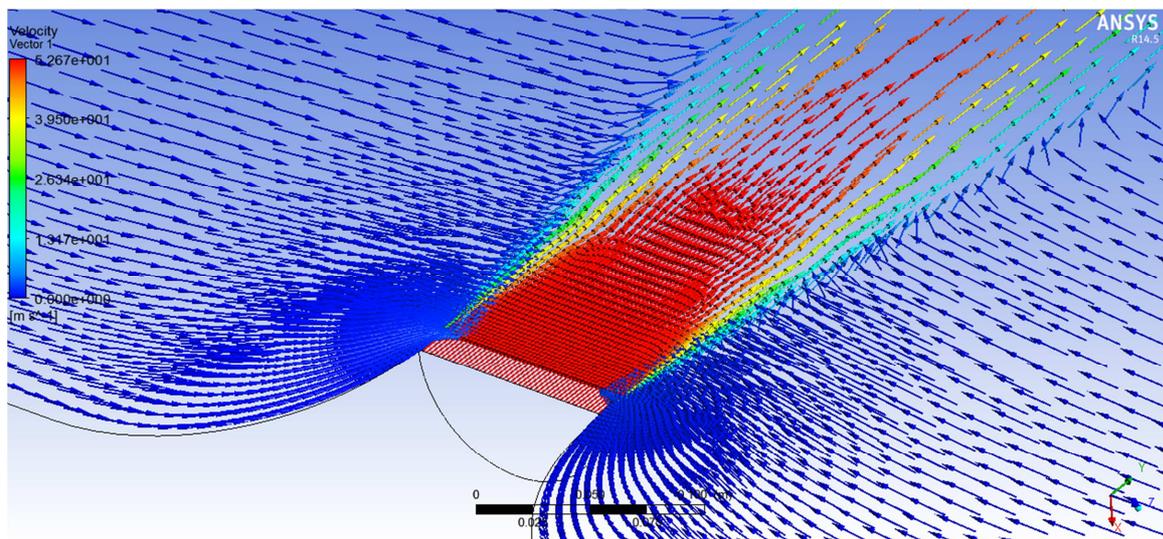


Figura 5.12 - Vectores da velocidade na injeção de um jato, para uma região muito próxima da tubeira, utilizando vectores 3D

Na Figura 5.13 está representada a distribuição de pressões na saída da tubeira, tendo a sido a pressão máxima e mínima limitada, entre 0 e -5 Pa, respectivamente, a fim de uma melhor visualização das regiões de depressão. A região do jato principal está a vermelho portanto pode estar a zero ou mais Pa e as regiões de fronteira entre jato principal e meio ambiente estão na região amarela em valores próximos de -1,25 Pa, numa extensão de aproximadamente 2 metros e a região junto à saída da tubeira está a azul com valores que atingem os -5 ou menos Pa, já a região atrás da saída da tubeira está a cor de laranja com valores próximos de -0,6 Pa. Todas essas regiões em depressão arrastam o ar ambiente no sentido do jacto principal. Dado que a

pressão é mais baixa junto à saída da tubeira é nesse local que existe uma maior intensidade de fluido ambiente arrastado.

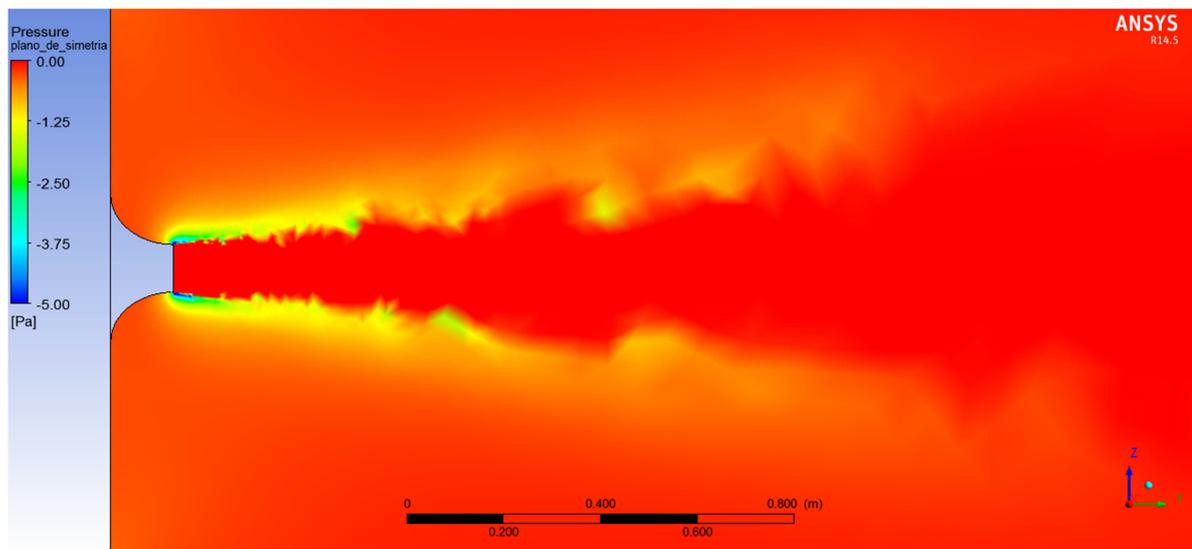


Figura 5.13 - Distribuição de pressões na saída da tubeira, para pressão máxima e mínima limitada, entre 0 e -5 Pa, respectivamente

Na Figura 5.14 é possível visualizar a distribuição de velocidades por todo o domínio, tendo sido a velocidade máxima limitada a 2 m/s, a fim de ser possível visualizar o comportamento do jato em todo o comprimento do domínio e o valor das velocidades. Portanto em zonas que marcam 2 m/s pode-se ter, velocidades iguais ou superiores a esse valor. Constata-se que a velocidade na saída do domínio é aproximadamente 0,5 m/s.

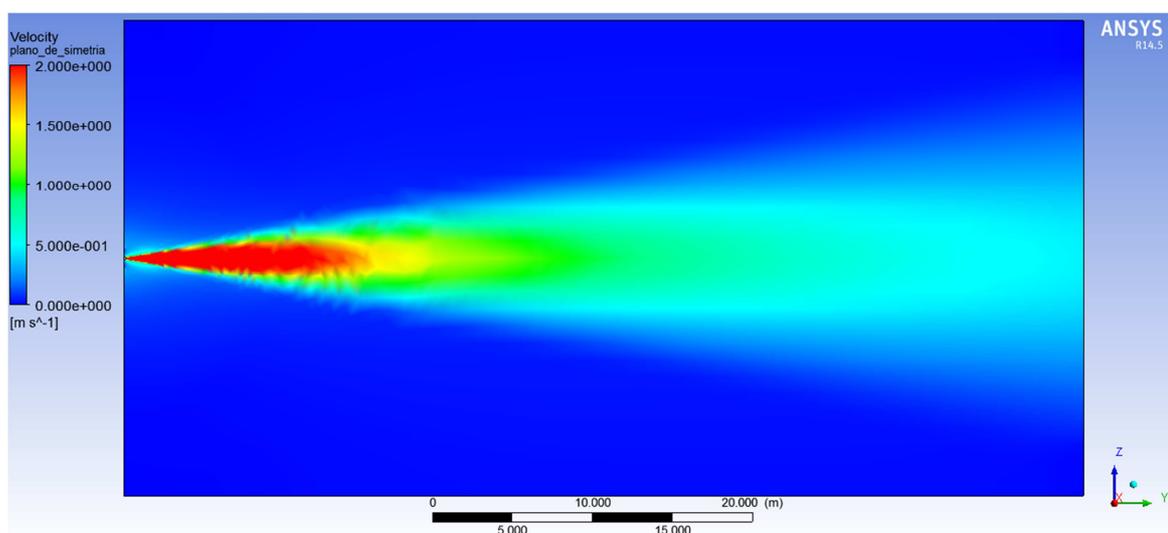


Figura 5.14 - Distribuição de velocidades por todo o domínio, tendo sido a velocidade máxima limitada a 2 m/s

5.1.3 Comparação dos resultados da Simulação com a Experiência

5.1.3.1 Comparação do perfil de velocidades em zonas próximas da boca da tubeira

Na Figura 5.15 pode-se visualizar a distribuição de velocidades para a secção transversal do jato, para várias distâncias à saída da tubeira. Verificasse que nas distâncias iniciais tem-se um perfil tipicamente “em cartola”. Verifica-se que na saída da tubeira a velocidade é uniforme e à medida que aumenta a distância à tubeira, o perfil de velocidades vai espreado. Da saída da tubeira até à distância de 0,5 m a velocidade máxima permanece constante e só após esse ponto diminui. Comparando a simulação com a experiência, verifica-se o mesmo comportamento descrito para a experiência, no entanto os valores obtidos são diferentes. A velocidade máxima deixa de ser constante a 0.2 m de distância. A dispersão é maior a menores distâncias e a velocidade axial no domínio considerado decresce bastante dos 52,26 aos 32 m/s, ao passo que na experiência dos 52,26 aos 42 m/s. Nas extremidades da tubeira, na experiência, as velocidades são iguais à máxima, quando deveriam ser iguais às da simulação, ou seja, zero por estarem junto à parede.

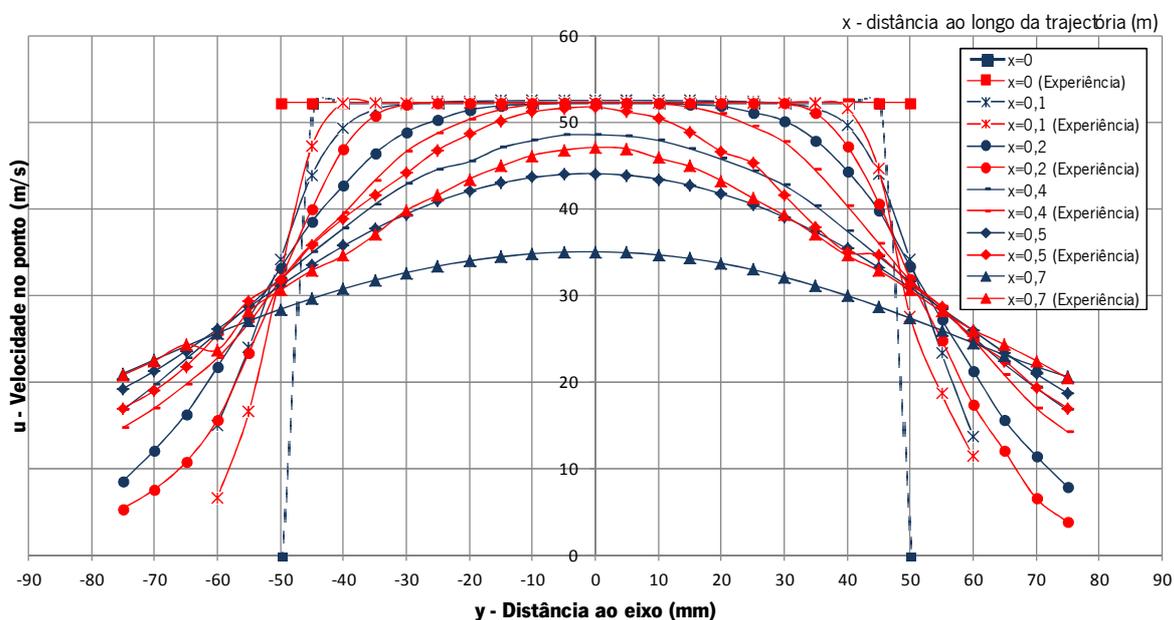


Figura 5.15 - Comparação do perfil de velocidades em zonas próximas da boca da tubeira, entre simulação e experiência (Tabela A. 1)

5.1.3.2 Comparação do perfil adimensional de velocidades em zonas próximas

Na Figura 5.16 é possível visualizar-se uma propriedade dos jactos. Quando ocorre erosão da região central potencial de um jato, os perfis transversais de velocidade exibem semelhança ao longo da trajetória, quando adimensionalizados pela velocidade máxima U_m e por y_c , a distância onde $u = U_m/2$. Comparando a simulação com a experiência, que o comportamento das curvas da velocidade adimensional é semelhante em ambos os casos.

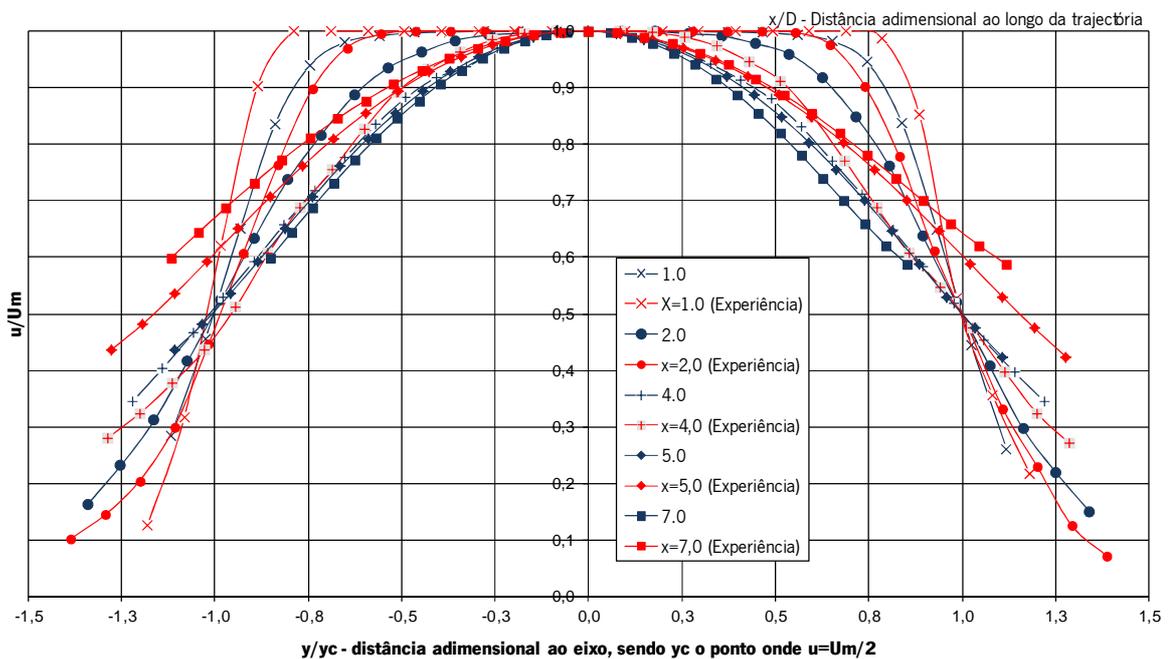


Figura 5.16 - Comparação do perfil adimensional de velocidades em zonas próximas da boca da tubeira, entre simulação e experiência (Tabela A. 2)

5.1.3.3 Comparação das isovelocidades em zonas próximas da boca da tubeira

Na

Figura 5.17 pode-se visualizar a comparação das isovelocidades em zonas próximas da boca da tubeira, entre a simulação e a experiência.

As linhas de isovalores adimensionais da velocidade axial, representadas ao longo da trajetória adimensionalizada, até $x/D = 8$, na experiência mostra a constância do parâmetro entre 2 a 5 (núcleo potencial) e o início da tendência linear de variação decorridos 6 diâmetros, ao passo que na simulação só é constante entre 2 e 3 e a tendência linear tem início a 3 diâmetros.

Ainda é detectável o ligeiro aumento da velocidade local, entre o plano de saída e $x/D = 1,5$, possivelmente resultado da pequena expansão sofrida pelo escoamento pouco após a saída da tubeira, seguido de regularização até aos 5 diâmetros e da abertura da pluma a partir de $x/D = 6$. Na simulação ocorre uma expansão até $x/D = 2$, seguida de uma regularização até 3 diâmetros e da abertura da pluma a partir de $x/D = 3$.

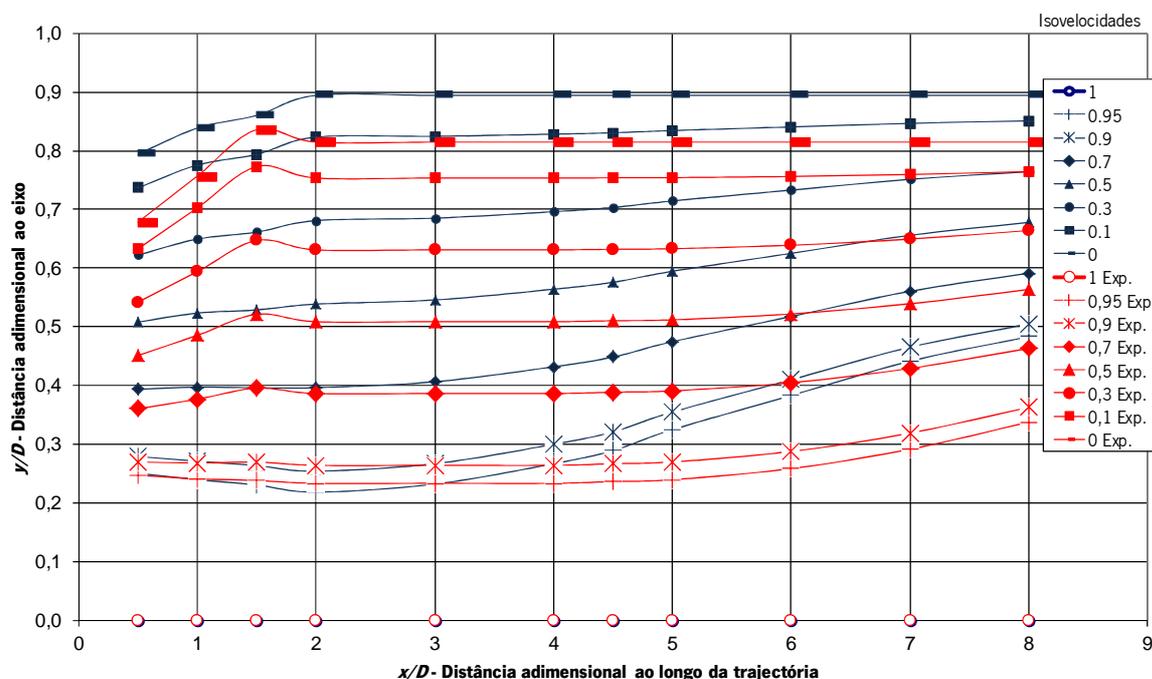


Figura 5.17 - Comparação das isovelocidades em zonas próximas da boca da tubeira, entre a simulação e a experiência (Tabela A. 3)

Zonas a mais de 6 diâmetros

5.1.3.4 Comparação do perfil de velocidades, normal e adimensional, em zonas a mais de 6D

A experiência está representada na Figura 5.18 e Figura 5.19, podem observar-se os perfis de velocidade medidos em planos normais à trajetória entre $x = 1.0$ e 3.0 m, correspondentes ao intervalo $x/D = 10$ até 30 . Todas as curvas exibem a forma esperada, com velocidades máximas no plano central, caindo dos 37 para os 12 ms-1 e espraio simétrico lateral, com a largura da pluma aumentando dos 100 até para além dos 400 mm nestas zonas. Não se assinala assimetria relevante na pluma, á escala da resolução utilizada. A simulação está representada na Figura 5.18 e Figura 5.19 e constata-se que as velocidades máximas caem dos 26 para 8 ms-1,

com a largura da pluma aumentando dos 100 até para além dos 400 mm. O espriamento da pluma também é simétrico.

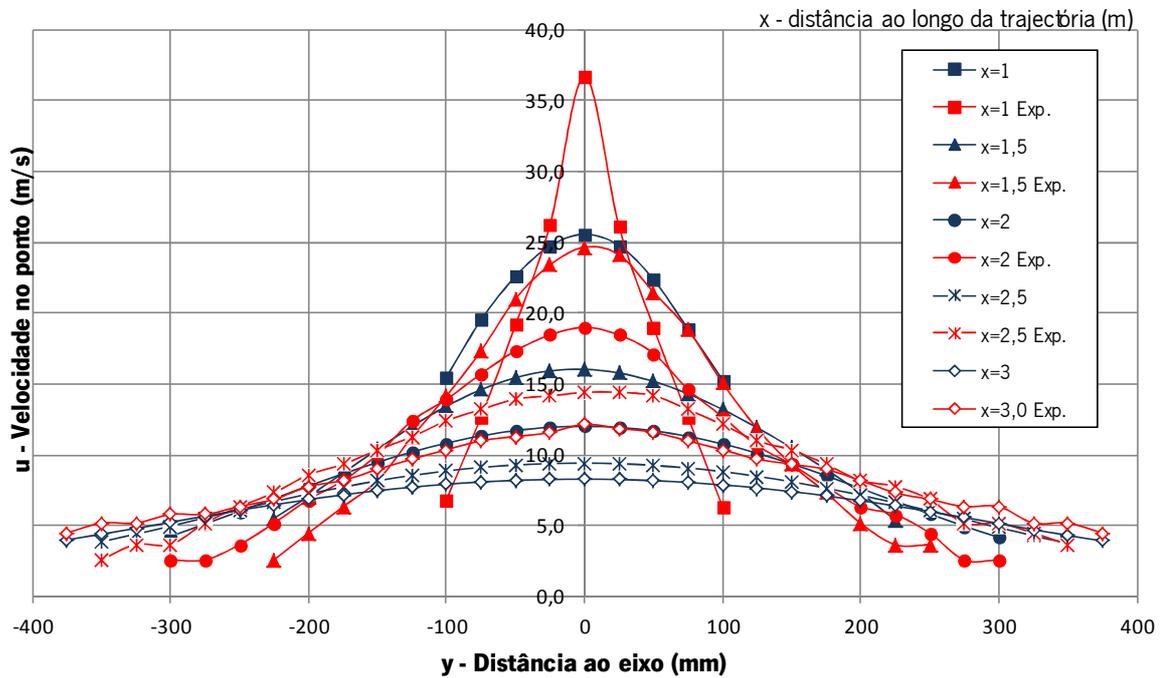


Figura 5.18 - Comparação do perfil de velocidades em zonas a mais de 6 diâmetros, entre simulação e experiência (Tabela A. 4)

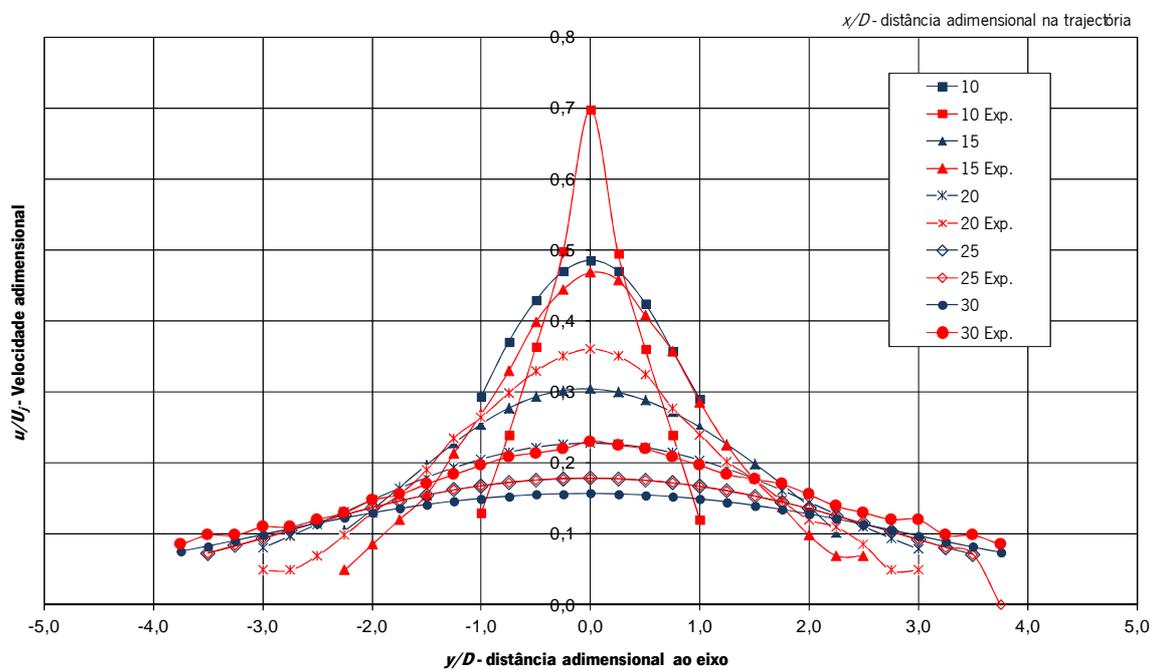


Figura 5.19 - Comparação do perfil de velocidades adimensional, em zonas a mais de 6 diâmetros, entre simulação e experiência (Tabela A. 5)

5.1.3.5 Comparação da 2ª adimensionalização da velocidade em zonas a mais de 6 diâmetros

O carácter de semelhança dos perfis obtidos é evidente, como se pode visualizar na Figura 5.20, em que a adimensionalização é feita em velocidade, tomando como referência a velocidade máxima no plano de medição, U_m , e a coordenada transversal, y , é normalizada pela distância y_c ao ponto onde a velocidade cai para metade do valor máximo. A dispersão dos resultados é aceitável, atendendo à precisão do método utilizado. Comparando a simulação com a experiência verifica-se que os resultados são próximos e a dispersão adimensional em y é menor porque y_c é maior. Verifica-se que independentemente do plano transversal o perfil adimensional das velocidades é o mesmo.

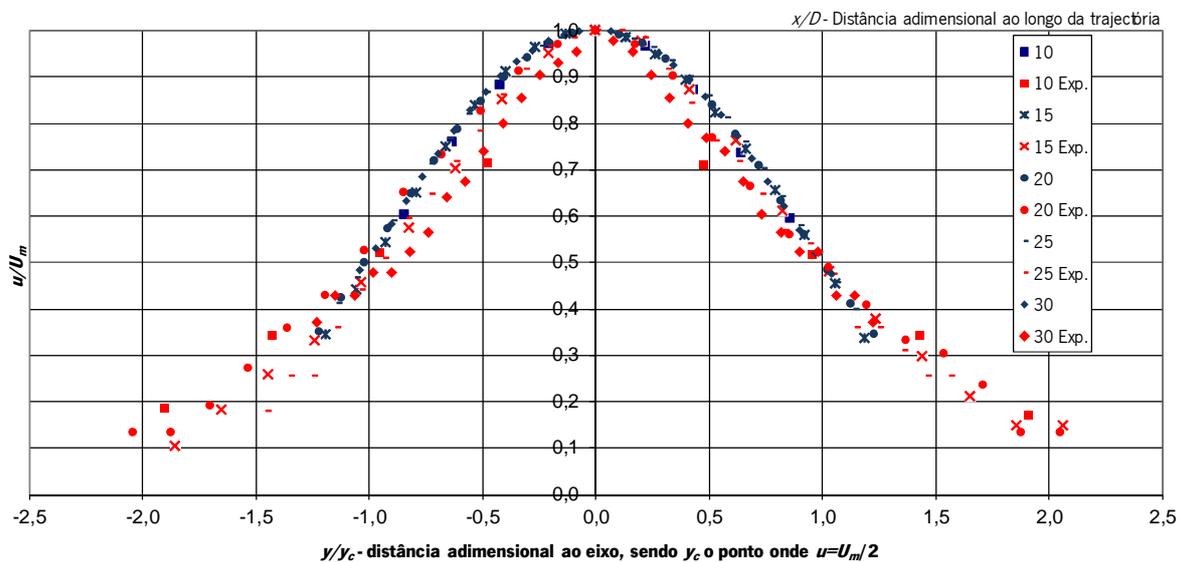


Figura 5.20 - Comparação da 2ª adimensionalização da velocidade, em zonas a mais de 6 diâmetros, entre simulação e experiência (Tabela A. 6)

5.1.3.6 Comparação das isovelocidades em zonas a mais de 6 diâmetros

Segundo Squire (1950) para $x/D > 10$, os círculos de meia velocidade estão contidos num cone de semi-ângulo de 5° , cujo vértice está no centro do orifício da tubeira. Ao passo que velocidades $1/10$ da velocidade máxima estão num cone de semi-ângulo de $9,2^\circ$.

Na Figura 5.21, apresentam-se as rectas de isovelocidades da experiência ajustadas aos resultados de $u/U_m=0,1$ (Squire $9,2^\circ$) e $0,5$ (Squire 5°). Nesta figura, é claro o espriamento

radial da pluma, a partir da origem no plano de saída. Já na simulação os valores obtidos excedem os dados experimentais de Nunes (2003) e de Squire (1950) numa unidade.

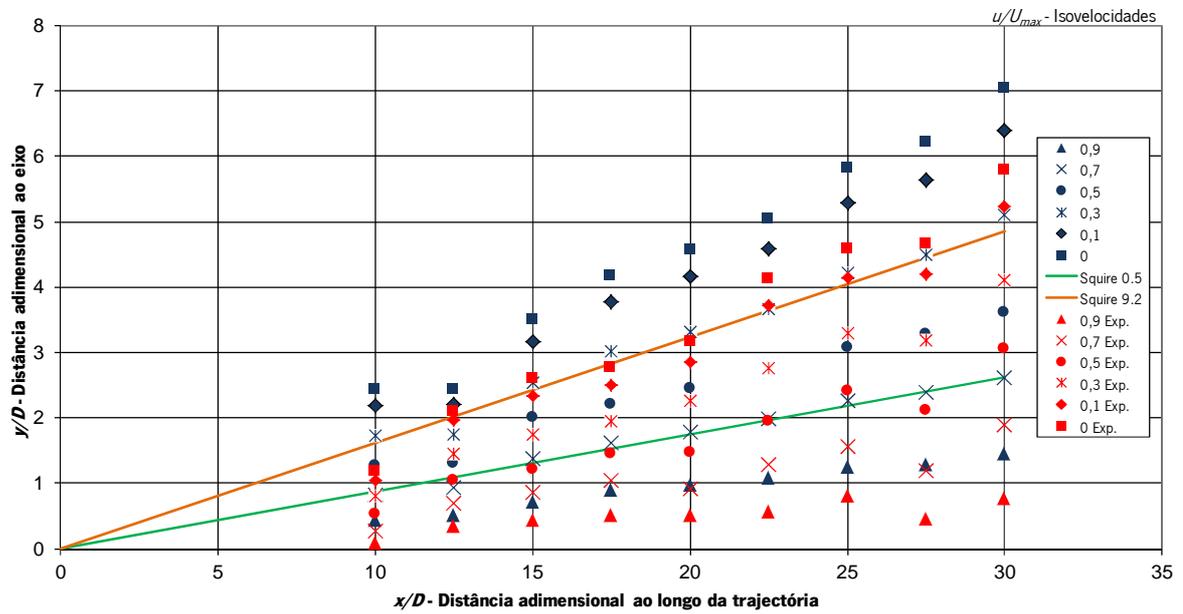


Figura 5.21 - Comparação das isovelocidades em zonas a mais de 6 diâmetros, entre a simulação e a experiência (Tabela A. 7)

5.2 1 Jato Cruzado

5.2.1 Caso Experimental

Nunes (2003) fez experiências com jatos cruzados, para tal utilizou um túnel de jatos que tinha disponível, adaptou uma placa de conversão (Figura 5.22), ligou-a a uma tubagem de alimentação, por sua vez, ligou-a a um *plenum* de jatos e por fim a uma placa de furos que estava sob o túnel aerodinâmico subsónico.

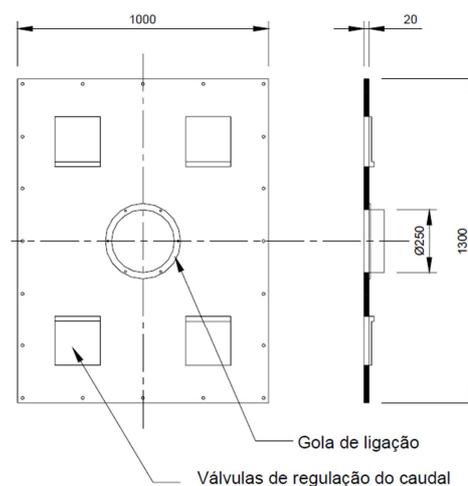


Figura 5.22 - Adaptador circular (Nunes, 2003)

O túnel é composto por diversas secções, o conjunto é apresentado na Figura 5.23.

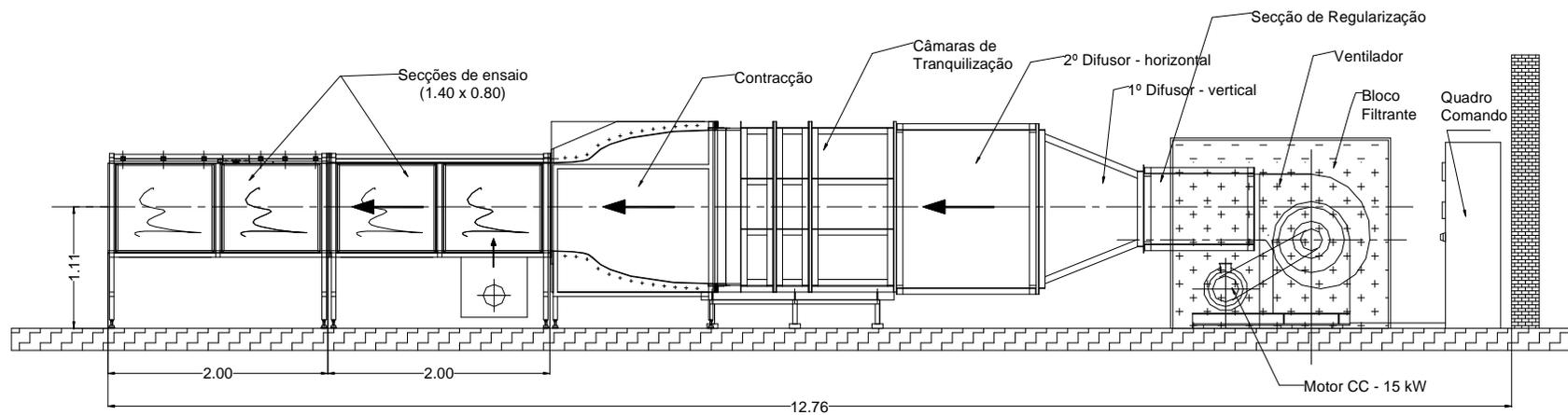


Figura 5.23 - Túnel aerodinâmico subsônico de 1.400 x 0.800 (medidas em metros) (Nunes, 2003)

A secção de ensaio, é composta por dois módulos completamente intermutáveis, perfazendo 4 m de comprimento. Um primeiro módulo, de visualização, foi montado a seguir à câmara de tranquilização, é dedicado à visualização dos escoamentos (Figura 5.24) e o segundo, de medição, no qual foram realizadas a maior parte das medições (Figura 5.25).

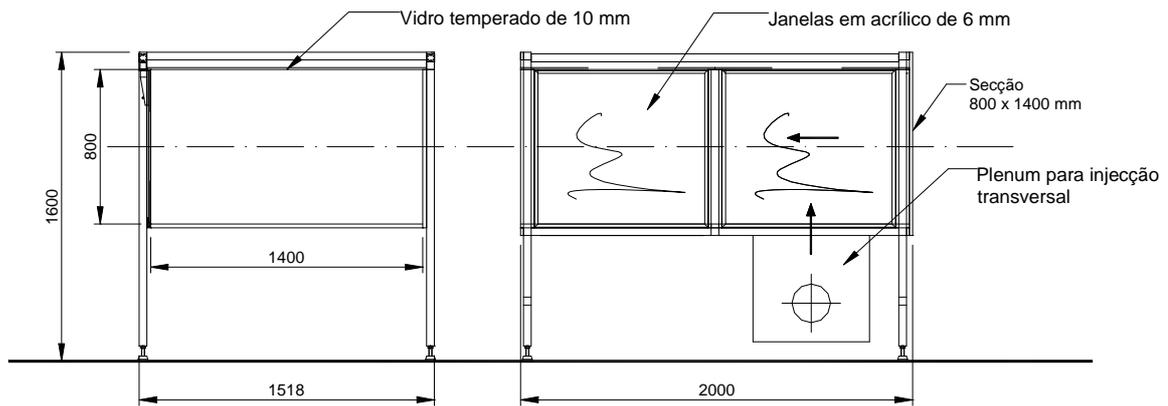


Figura 5.24 - Módulo de Visualização (Nunes, 2003)

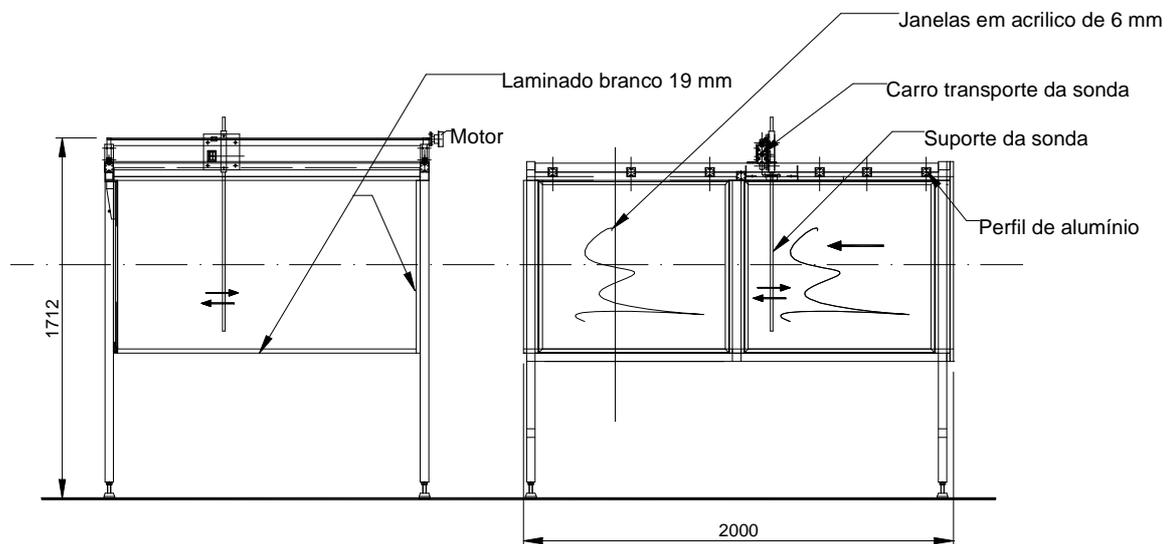
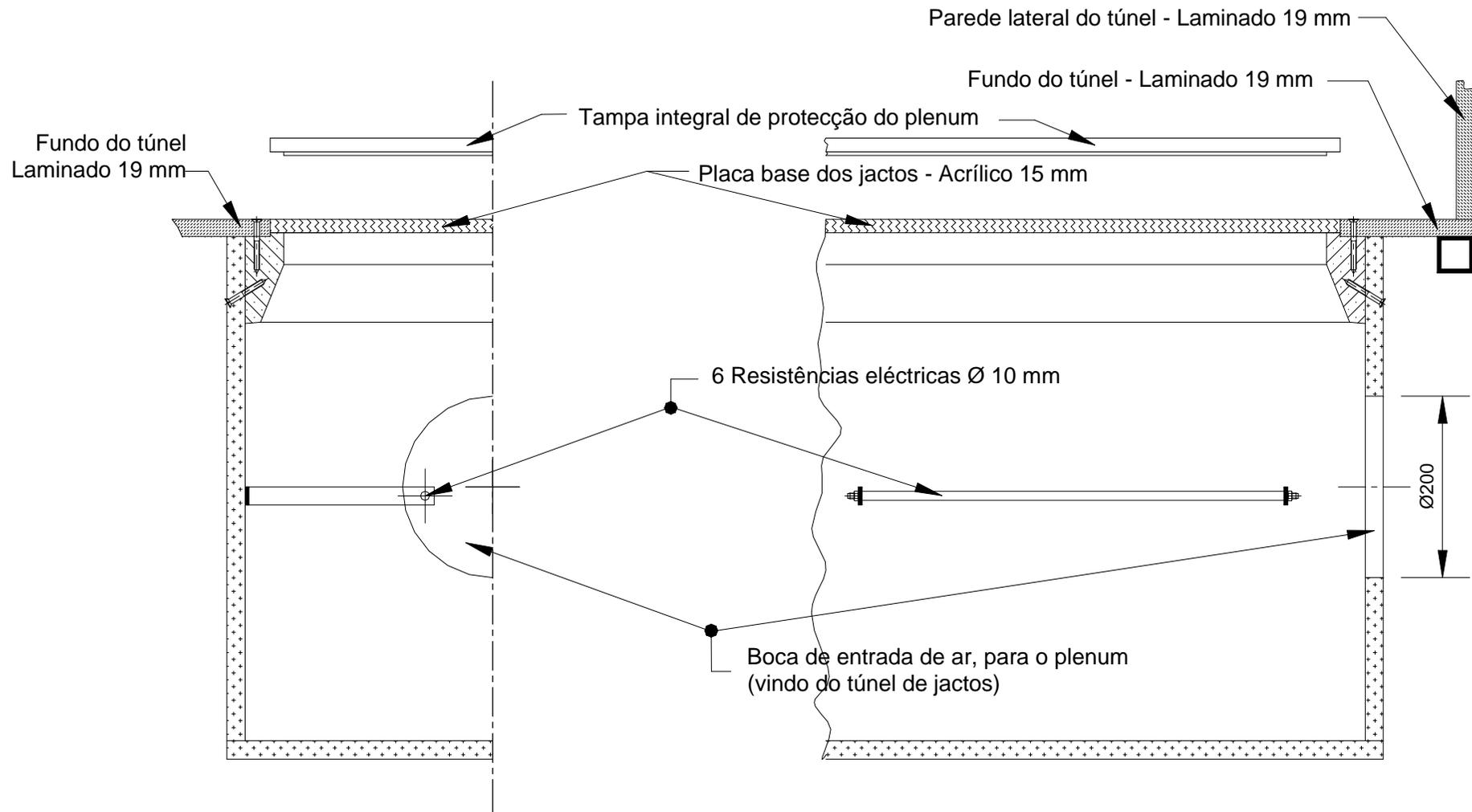


Figura 5.25 - Módulo de Medição (Nunes, 2003)

Por baixo do módulo de visualização, foi montada uma câmara de *plenum* representada na Figura 5.26, na localização apresentada na Figura 5.28. A entrada de ar, proveniente do túnel secundário de jactos, representado na Figura 5.1, é feita pelos dois topos transversais da câmara de *plenum* através de orifícios com o diâmetro de 200 mm. Em cima do *plenum* é instalada uma placa de furos, local pelo qual serão injetados os jactos transversais, a mesma está representada na Figura 5.27.

A placa de base dos jactos dava origem, numa fase 1 a um jacto cruzado perfeitamente alinhado transversal e longitudinalmente. Na fase 2, tinha três jactos cruzados, o anterior e mais dois alinhados transversalmente e simétricos. Finalmente, na fase final foram executados mais dez furos, ficando com um total de 13 na configuração apresentada na referida figura.

Figura 5.26 - *Plenum* para a injeção dos jatos (Nunes, 2003)

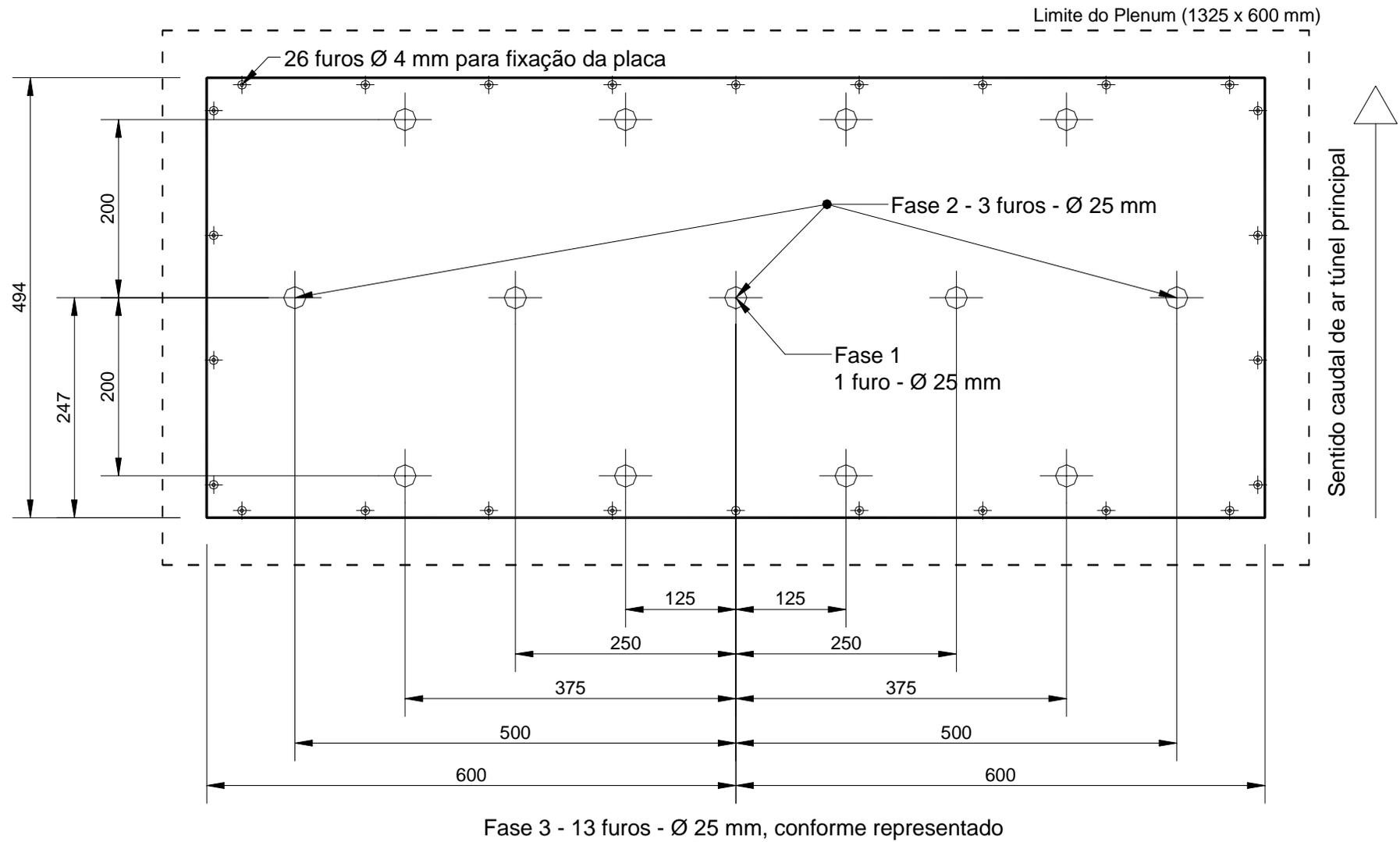


Figura 5.27 - Placa base dos jatos (Nunes, 2003)

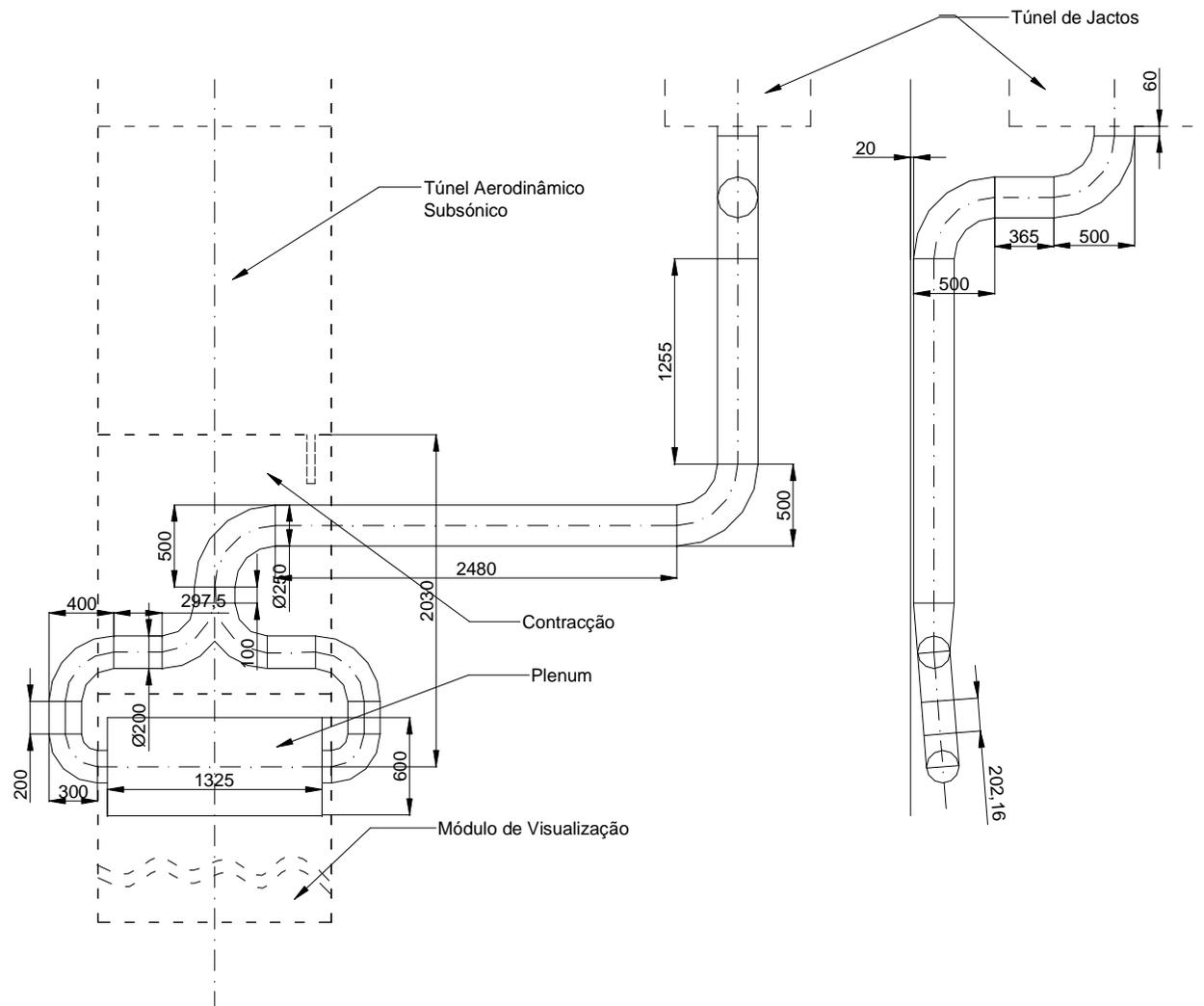


Figura 5.28 - Diagrama da tubagem do jato (Nunes, 2003)

5.2.2 Simulação *CFD*

5.2.2.1 Geometria

No *SolidWorks* desenhou-se a geometria do caso de estudo, Figura 5.29. Desenhou o interior da câmara de visualização e da câmara de medição, representado por um paralelepípedo com um comprimento de 4 metros e uma secção transversal de 1,4m de largura e 0,8m de altura. Desenhou-se um cilindro à distância de 520 mm da saída de ar do túnel subsónico e a meia largura do paralelepípedo. Este cilindro tem uma altura e diâmetro de 25 mm.

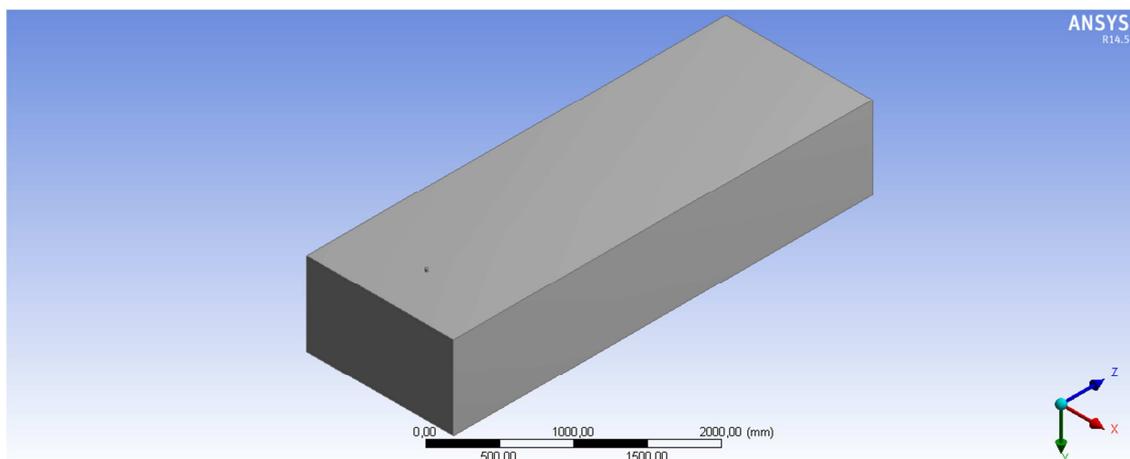


Figura 5.29 - Geometria do caso de estudo

5.2.2.2 Malha

Inicialmente, fez-se uma análise de malha a fim de obter uma malha de qualidade. A ferramenta utilizada para gerar a malha foi a “*hexacore*” que gerou uma malha em cubos no núcleo da figura geométrica e tetraedros na superfície.

Na fase inicial foi necessário calcular as condições de turbulência que se iria ter nas entradas de fluido, quer para o tubo a partir do tunel de jatos, quer para a saída do tunel subsónico. Na Tabela 5.3 estão representadas as características do caso em estudo.

Tabela 5.3 - Características do caso

Dados de entrada		Propriedades físicas do ar	
D tubo túnel jactos (m)	0,025	$\rho_{ar} (kg/m^3)$	1,225
U tubo túnel jactos (m/s)	54	$\mu_{ar} (kg/m.s)$	$1.7894 * 10^{-5}$
L túnel subsônico (m)	1,4		
H túnel subsônico (m)	0,8		
U túnel subsônico (m/s)	6,75		

Nas equações, expressas de 5.1 a 5.5, estão os resultados das condições de turbulência que se tem nas entradas de fluido.

Tunel de Jatos:

$$Re = \frac{\rho_{ar} * U_{medio} * D}{\mu_{ar}} = 91\ 875 \quad 5.1$$

$$i = 0,16 * Re^{-\frac{1}{8}} = 3,83\% \quad 5.2$$

$$D \text{ hidraulico} = 0,025 \text{ m} \quad 5.3$$

Tunel Subsônico:

$$i=0,05 \text{ (tunel aerodinâmicos recentes)} \quad i=0,5 \text{ (tunel aerodinâmicos antigos)} \quad 5.4$$

$$Dh = \frac{4 * A}{P} = \frac{4 * H * L}{L * 2 + H * 2} = 1,0182 \text{ m} \quad 5.5$$

Teste de malha às condições de turbulência

Finda esta etapa testou-se as condições de turbulência, com os valores calculados previamente e com outros valores, para encontrar o modelo que fornecesse melhores resultados. Tal como é possível observar na Figura 5.30 e na Tabela 5.4.

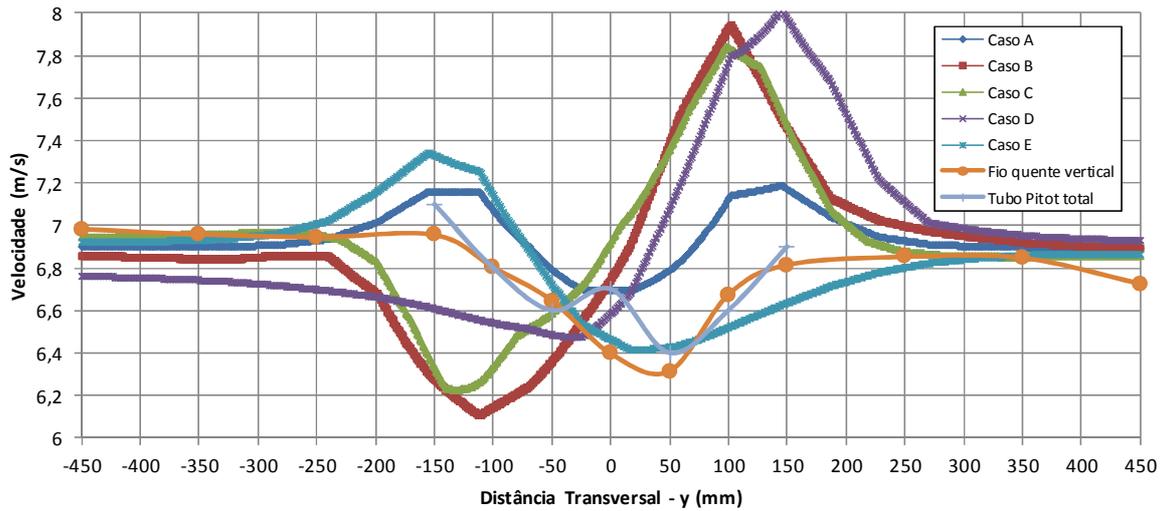


Figura 5.30 - Teste de malha às condições de turbulência

Tabela 5.4 – Condições de turbulência testadas

	U (m/s)	I (%)	D (m)	U (m/s)	I (%)	D (m)
Caso A	54	10	0,025	6,75	K = 1	$\epsilon = 1$
Caso B	54	3,83	0,025	6,75	0,5	1,0182
Caso C	54	10	0,025	6,75	10	1,0182
Caso D	54	3,83	0,025	6,75	0,05	1,0182
Caso E	54	3,83	0,025	6,75	K = 1	$\epsilon = 1$

Nota: A malha utilizada nos diversos casos é constituída por hexaedros e prismas, tem 190 272 elementos, o *skewness* médio é 0,17 e a ortogonalidade média é 0,93.

Aconteceu uma situação insólita porque o cálculo conforme a teoria fornece pior aproximação aos dados da experiência, do que outro caso testado. Então, o Caso E apresentou-se como a melhor aproximação ao caso experimental.

Teste de malha aos modelos de turbulência

Para o Caso E (Figura 5.30) e (Tabela 5.4) que se apresentou como o melhor caso, testou-se outros modelos de turbulência, mas o estudo conclui que o modelo de turbulência que apresenta resultados mais próximos da experiência é o $k-\epsilon$ *Realizable*. (Figura 5.31)

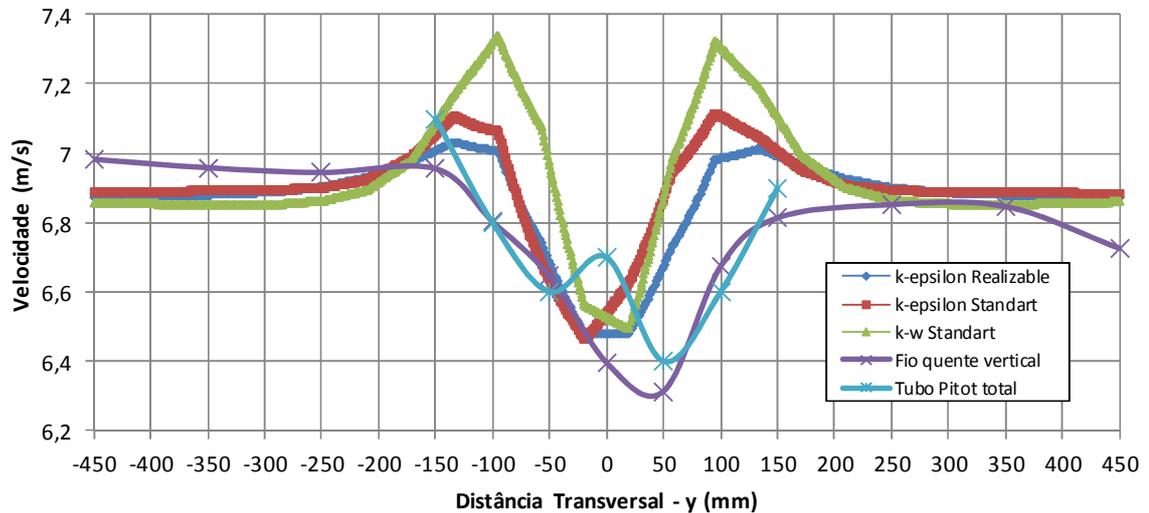


Figura 5.31 - Teste de malha aos modelos de turbulência

De seguida procedeu-se a um refinamento de malha tal como é representado na Figura 5.32, para detectar o número de elementos, a partir do qual um refinamento não provoca mudanças significativas na tendência da curva.

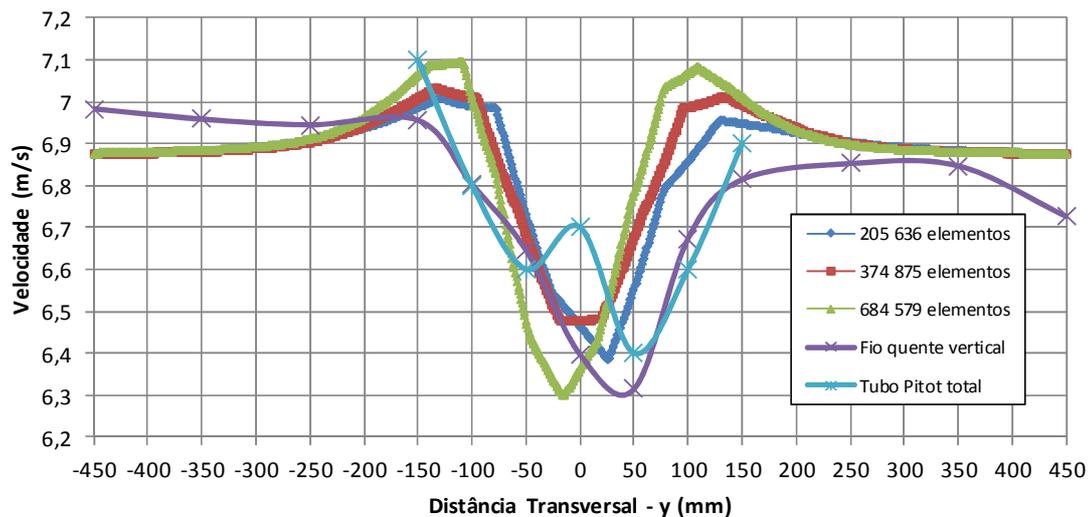


Figura 5.32 - Refinamento de malha

Escolheu-se a malha de 374 875 elementos, porque a malha que tem o dobro dos elementos não produz mudanças significativas na tendência da curva. A malha final possui 374 875 elementos, e tem um *skewness* médio de 0,32 e uma ortogonalidade média de 0,77. Tal como se pode visualizar na Figura 5.33.

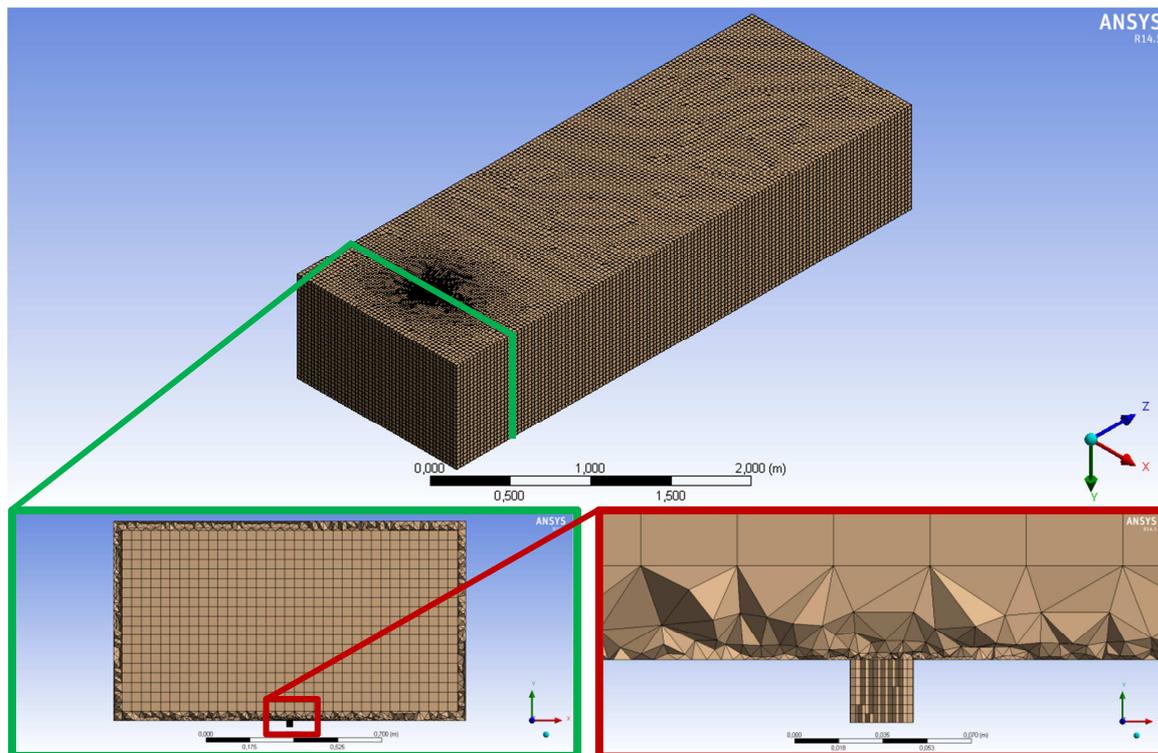


Figura 5.33 – Representação da malha final

5.2.2.3 Inputs do FLUENT

Uma vez definida a malha, a próxima etapa foi definir os *inputs* do *FLUENT*, onde será realizado o cálculo. As condições de fronteira e modelo de turbulência adotados estão resumidos na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Inputs do *FLUENT* para 1 jato cruzado

Modelo de turbulencia – Realizable $k-\epsilon$ – Standart wall functions			
		Tipo de condição	Input
Inlet	Saída do Tunel de Jatos	U (m/s)	54
		i (%)	10
		D (m)	0,025
	Saída do Tunel Subsónico	U (m/s)	6,75
		k	1
		ϵ	1
Outlet	Saída da camara de medições	<i>Pressure outlet</i>	0
Wall	Paredes da camara de visualização e medição		

5.2.2.4 Critérios de paragem

O método iterativo foi terminado quando os resíduos da equação da continuidade e das componentes x, y e z foram inferiores a 10^{-4} e quando o *monitor* definido previamente convergiu. O *monitor* criado foi a velocidade média em todo o volume do sólido.

5.2.2.5 Análise dos resultados obtidos

Na Figura 5.34 é possível visualizar a distribuição das linhas de fluxo do ar de todo o escoamento. É possível ver as que saem pelo furo que está ligado ao túnel de jatos e também as que proveem da saída do túnel aerodinâmico.

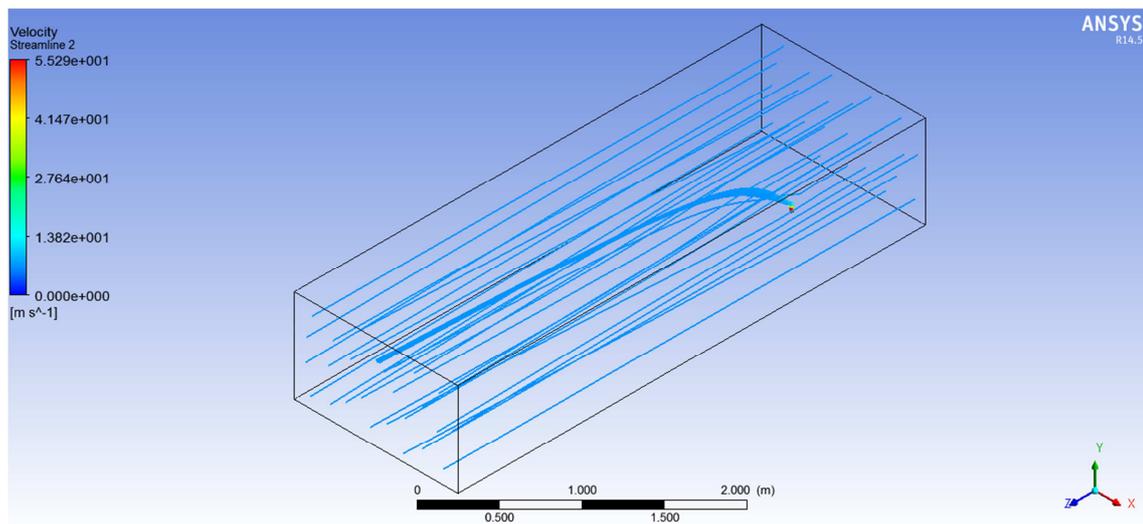


Figura 5.34 - Linhas de fluxo do ar

De seguida são apresentadas imagens dos perfis de velocidade e de pressão, para diversos planos, tais imagens não são comentadas, porque já são comentadas na comparação simulação/experiência e portanto servem de complemento de análise para a comparação, bem como para a distribuição das temperaturas.

Na Figura 5.35 pode-se visualizar a distribuição das velocidades e das pressões, na seção transversal, para várias distâncias relativamente ao furo, respetivamente.

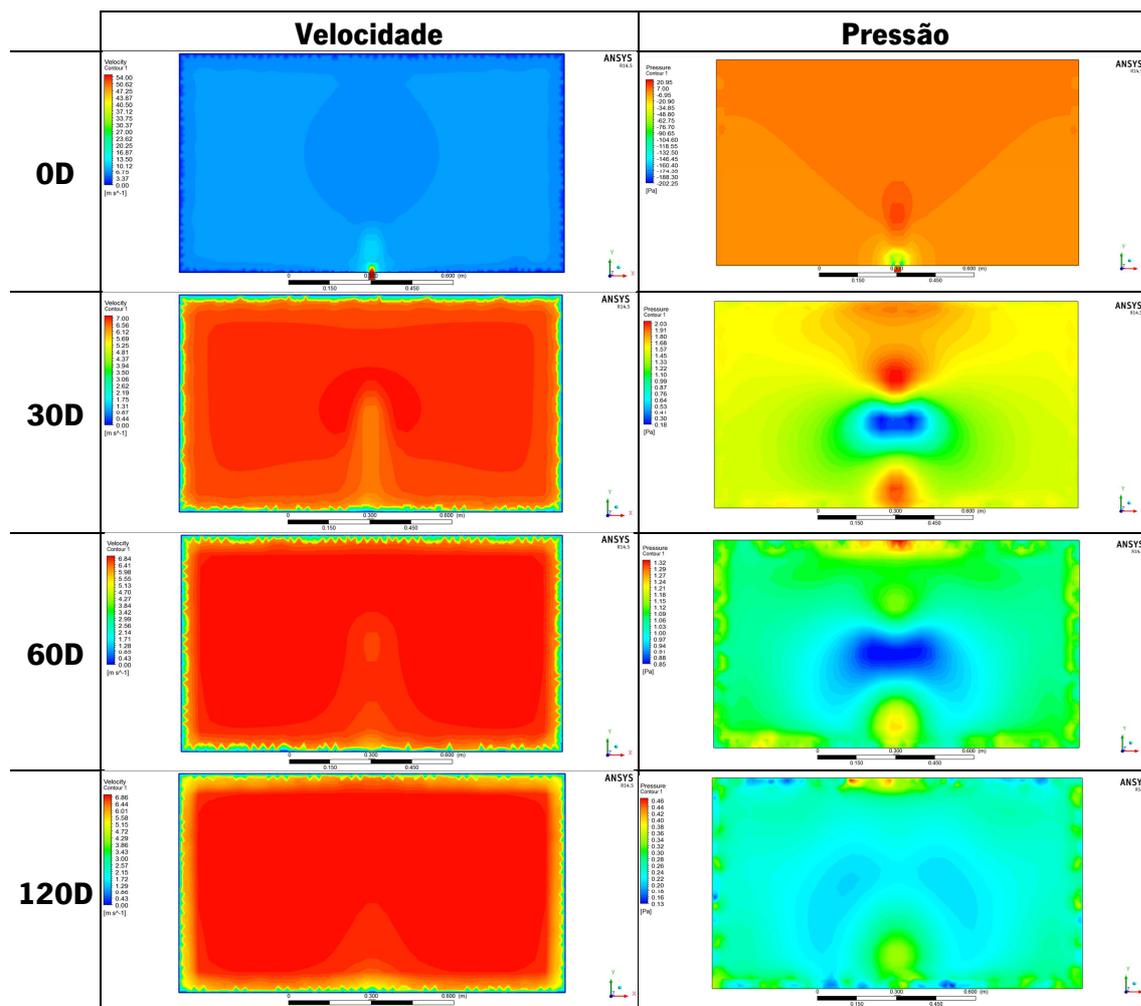


Figura 5.35 - Distribuição das velocidades e das pressões, para vários planos transversais

Na Figura 5.36 pode-se visualizar a distribuição das velocidades e pressões, a meia largura, bem como a meia altura do túnel aerodinâmico.

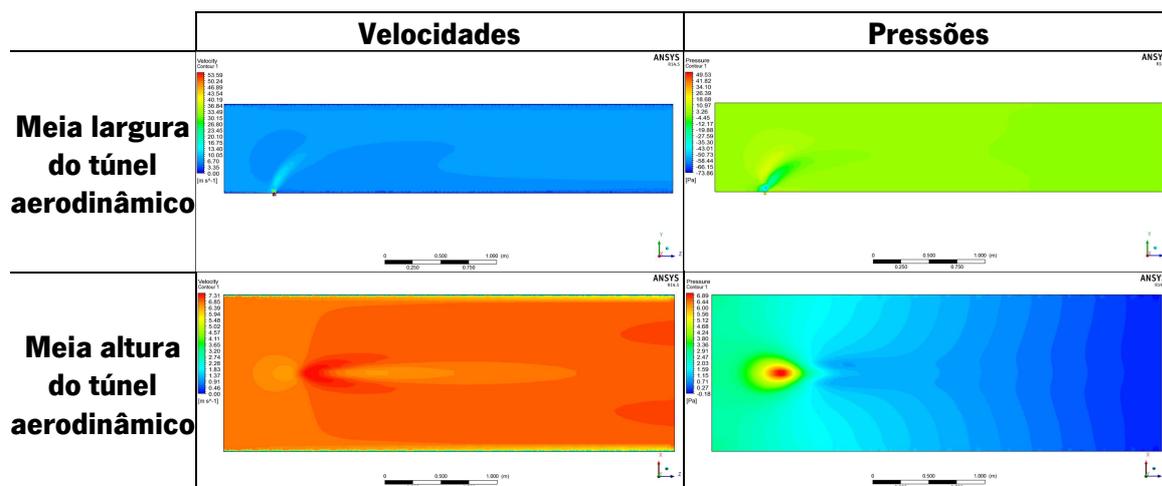


Figura 5.36 - Distribuição das velocidades e pressões, a meia largura, bem como a meia altura do túnel aerodinâmico

Na Figura 5.37 ilustra a distribuição dos vetores da velocidade, à meia largura do túnel aerodinâmico, na visão global, pormenorizada e pormenorizada com projeção, respetivamente.

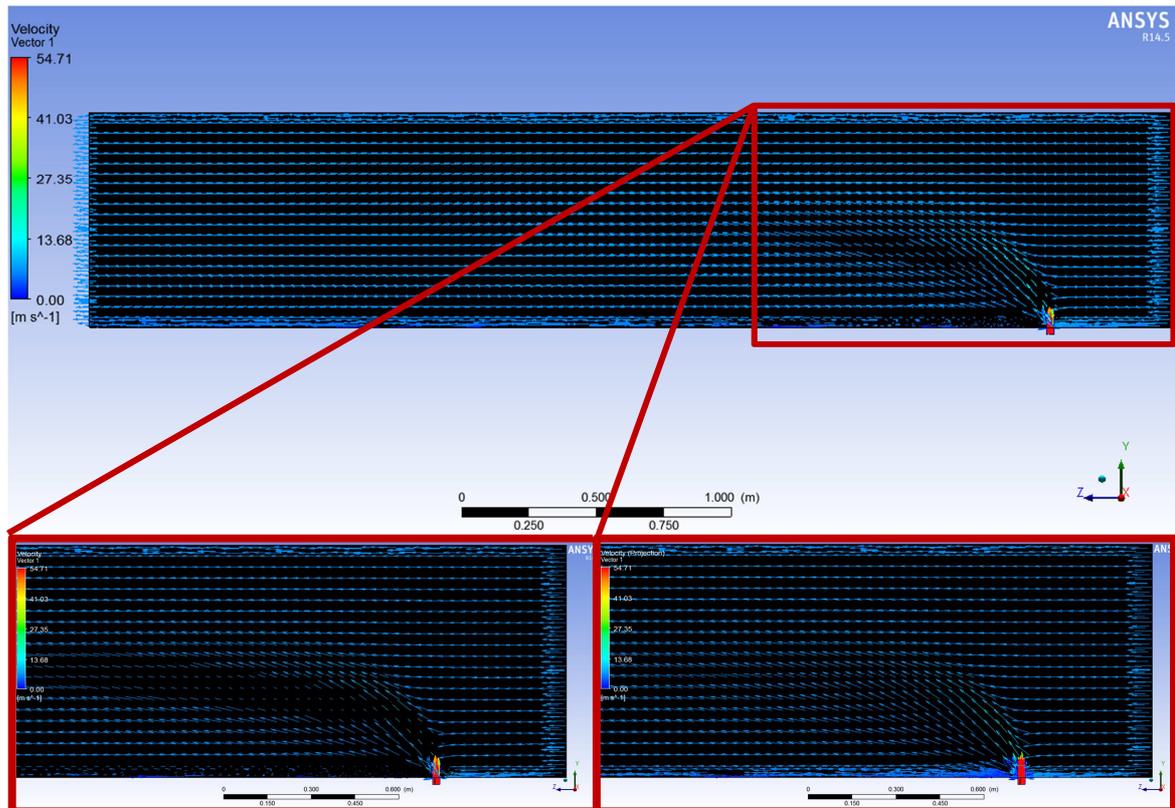


Figura 5.37 – Distribuição dos vetores da velocidade, à meia largura do túnel aerodinâmico, na visão global, pormenorizada e pormenorizada com projeção, respetivamente.

No *ANSYS* testou-se as condições de convecção natural que o tutorial do programa sugere. Este estudo teve como finalidade, apurar num caso simples, que as condições de convecção natural decorrem normalmente e aplicá-las a casos mais complexos, tal como, 1 jato e 13 jatos cruzados. O domínio consistiu num quadrado 5 x 5 m, com uma entrada de lado 400 mm, com o ar a entrar a 1 m/s. A malha utilizada, representada na Figura 5.38, tem 5401 elementos, uma qualidade ortogonal média 0,99 e um *skewness* médio de 0,026.

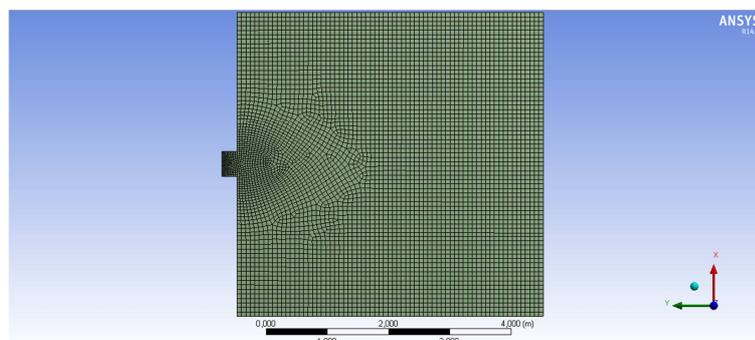


Figura 5.38 – Configuração da malha utilizada

O jato foi injetado a uma temperatura de 323,15 K num ambiente a 300 K. Para simular temperaturas, ativou-se a equação da energia, a força gravítica. O fluido foi definido como um gás ideal incompressível. Embora o ar seja um fluido compressível visto que varia o volume e a massa sob uma pressão, como as pressões não são significativas optou-se por esta via por simplificar o cálculo. Ao contrário do que acontecia até agora, a densidade é variável e depende da temperatura, tal como se pode visualizar na equação 5.6.

$$\rho = \frac{p_{op}}{\frac{R}{M_w} T} \quad 5.6$$

Onde ρ é a massa volúmica, a p_{op} é a pressão de operação, o M_w é a massa molecular do gás, o R é a constante universal do gás e o T é a temperatura. (FLUENT, 2012)

Na Figura 5.39 pode-se visualizar a distribuição dos vectores do escoamento que transmitem informação da direção, do sentido e da temperatura do mesmo, para a situação da convecção natural desligada. Verifica-se que os vetores que representam a injeção do jato, têm uma direção horizontal, ou seja o comportamento expectável à partida, na medida em que a simulação é conduzida com a condição da força gravítica desligada.

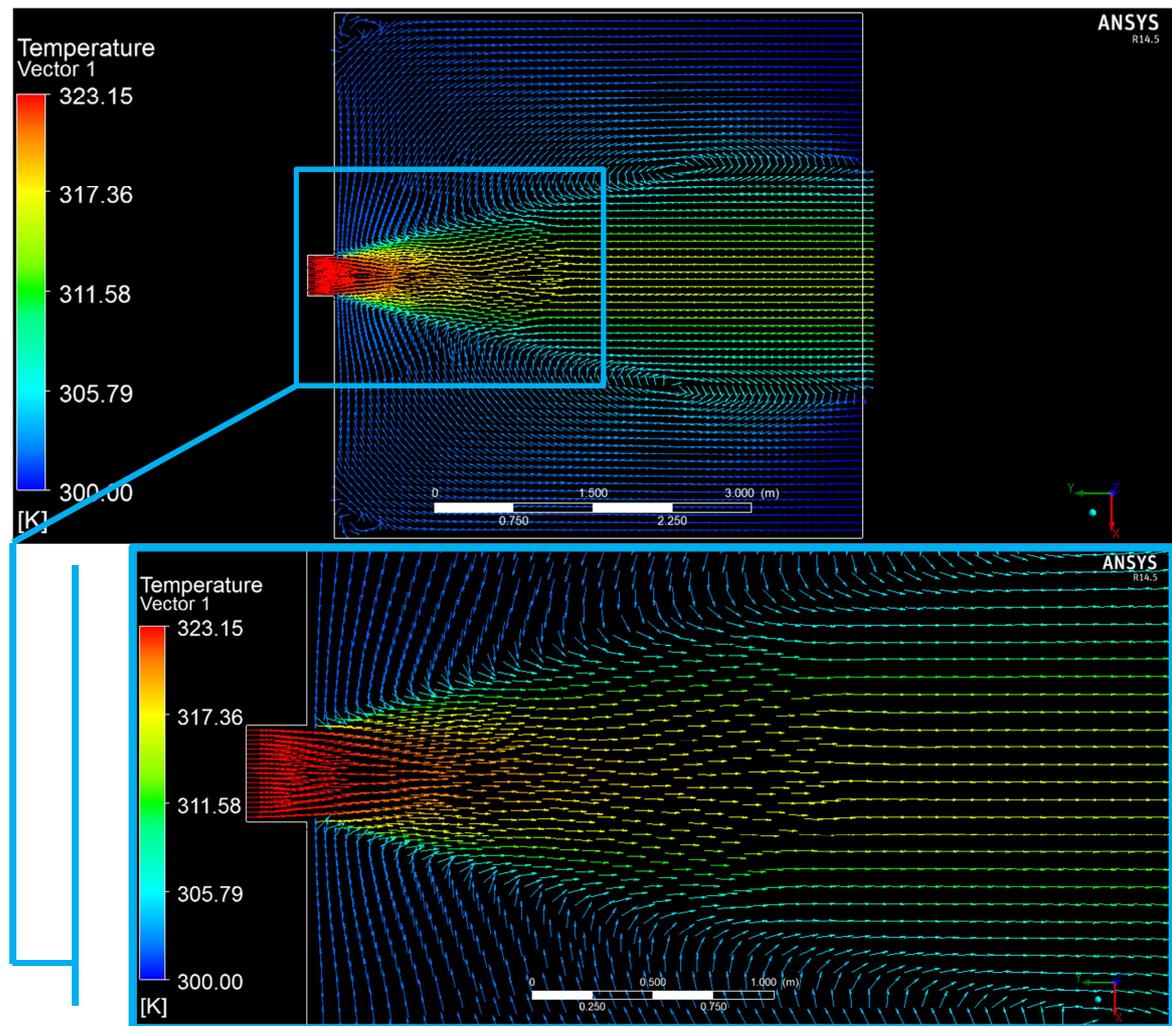


Figura 5.39 - Distribuição dos vetores do escoamento para convecção natural desativada

Na Figura 5.40 pode-se visualizar a distribuição dos vetores do escoamento que transmitem informação da direção, do sentido e da temperatura do mesmo, para a situação da convecção natural ligada. Verifica-se que os vetores que representam a injeção do jato, têm uma direção oblíqua e sentido contrário à força gravítica, e visualiza-se a distribuição das maiores temperaturas na região superior. Tal situação demonstra o fenómeno físico de convecção natural, em que o fluido mais quente, logo menos denso se move para regiões superiores, no sentido contrário á força da gravidade e o fluido menos quente, logo mais denso, para regiões inferiores.

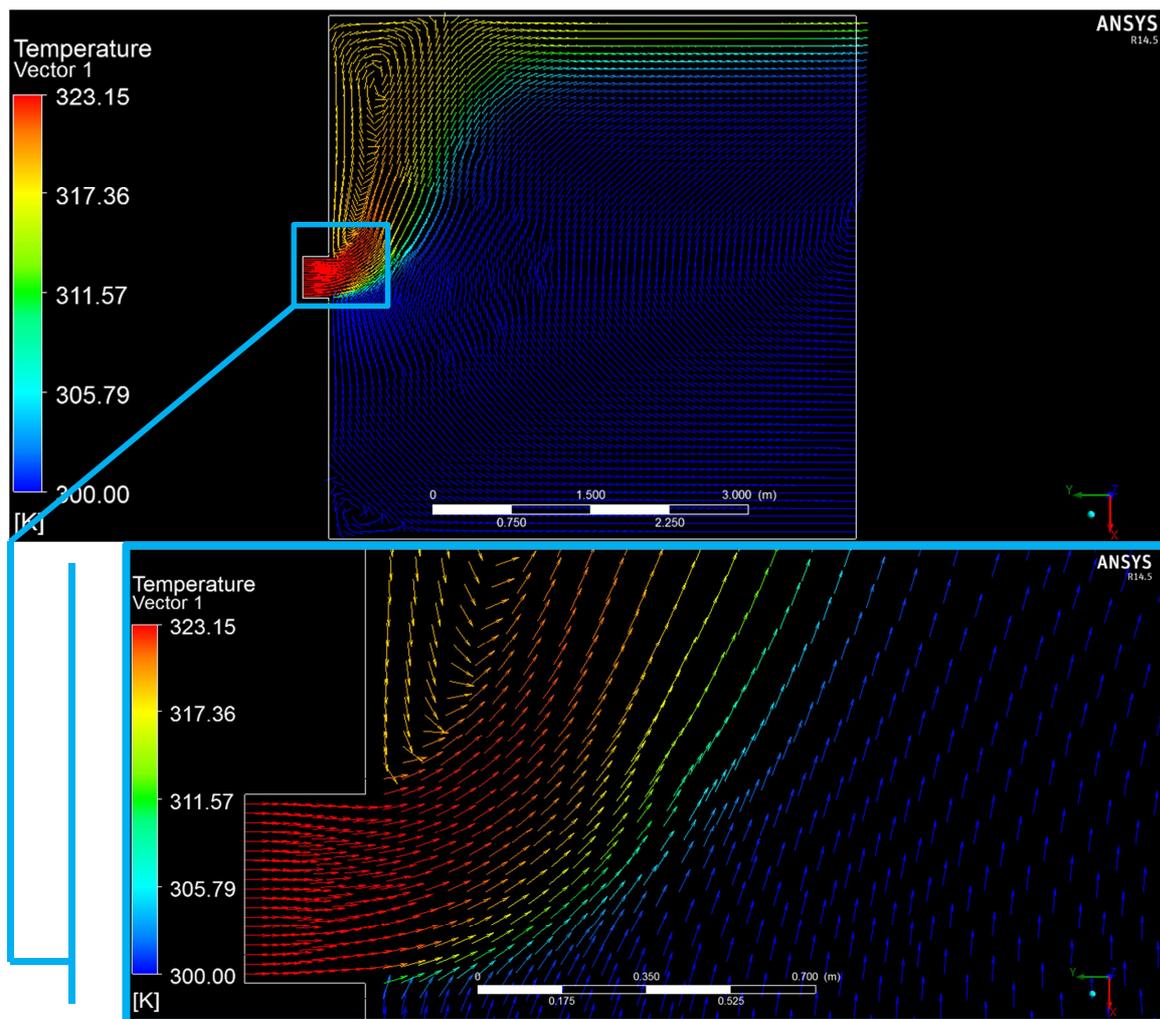


Figura 5.40 - Distribuição dos vetores do escoamento para convecção natural ativada

Na Figura 5.41 pode-se visualizar a distribuição de temperaturas para diferentes planos transversais, utilizando três temperaturas de injeção, tais como, 303.15 K, 313.15 K e 323.15 K, respectivamente. A temperatura injetada no túnel aerodinâmico subsônico é 293.15 K.

Constata-se que a diferença de 10 K entre os casos não provoca alterações na distribuição das temperaturas, mas já provoca alguma diferença, não muito significativa, no valor absoluto da mesma.

Os jatos injetados transversalmente no escoamento principal atuam como paredes ao escoamento que provêm do túnel aerodinâmico. No de 1 furo o efeito de “parede” é pouco significativo, porque apenas existe um furo disposto à largura da secção transversal. A OD pode-se visualizar a entrada do jato único a elevada temperatura no escoamento principal. A 30D verifica-se um pequeno alargamento da pluma e uma boa homogeneização, sendo a diferença de temperatura na ordem de 0,75K no caso de 303,15K e ligeiramente mais elevada nos restantes

casos. A 60D ocorre apenas um ligeiro alargamento e a 120 D a pluma abrange praticamente toda a seção transversal e a mistura e homogeneização é praticamente total, sendo a diferença de temperaturas inferior a 1K para todos os três casos.

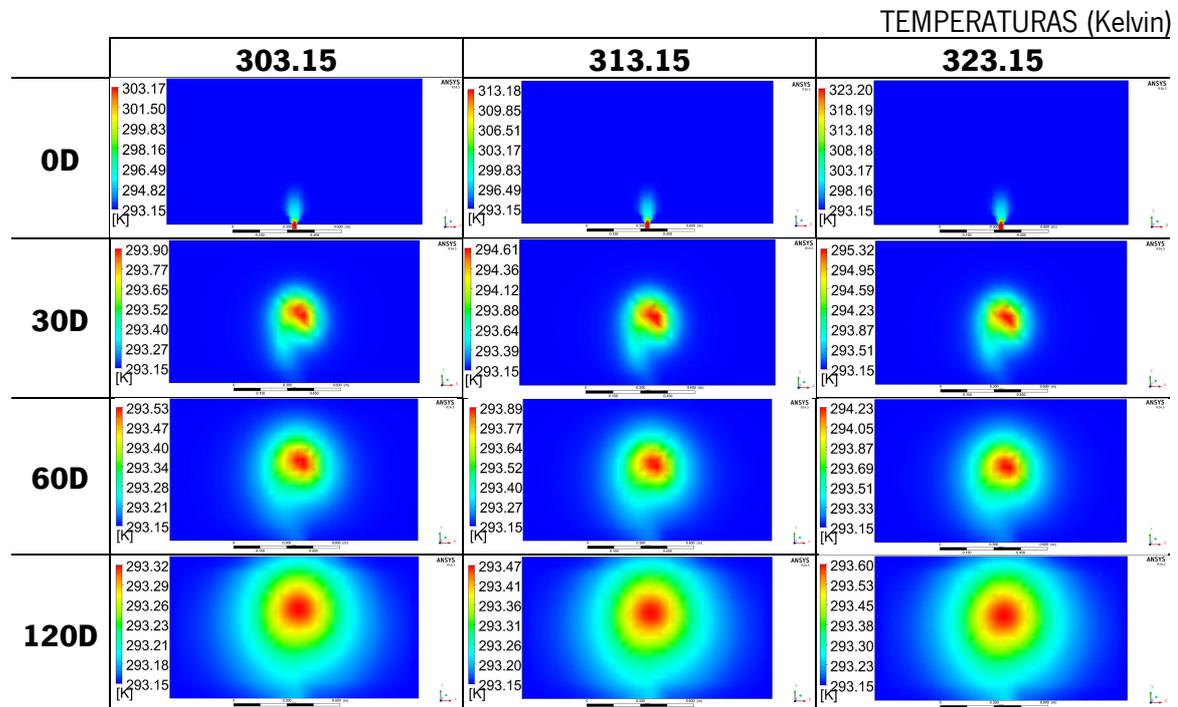


Figura 5.41 - Distribuição de temperaturas para diferentes planos transversais, utilizando três temperaturas de injeção, 303.15 K, 313.15 K e 323.15 K, respectivamente.

Na Figura 5.42 pode-se visualizar a distribuição de temperaturas para a meia largura e meia altura do túnel aerodinâmico, utilizando três temperaturas de injeção, tais como, 303.15 K, 313.15 K e 323.15 K, respectivamente.

Constata-se que a diferença de 10 K entre os casos não provoca alterações na distribuição das temperaturas, mas já provoca alguma diferença, não muito significativa, no valor absoluto da mesma. Na figura da meia largura e na meia altura verifica-se uma diferença abismal com o caso de 13 jatos, pois aqui a dispersão da pluma é muito menor, quer em altura pois não abrange o tecto e o chão, quer em largura pois não abrange as superfícies laterais.

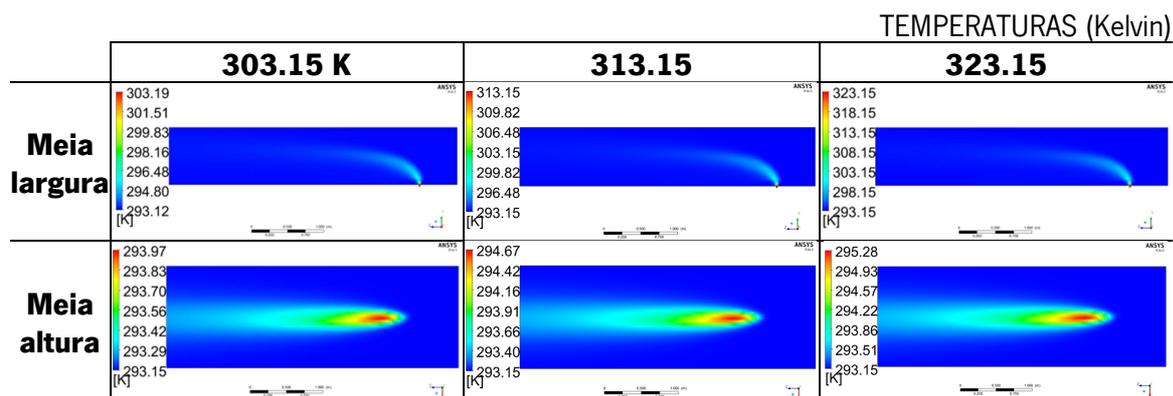


Figura 5.42 - Distribuição de temperaturas para a meia largura e meia altura do túnel aerodinâmico, utilizando três temperaturas de injeção, tais como, 303.15 K, 313.15 K e 323.15 K, respetivamente.

Na Figura 5.43 pode-se visualizar a distribuição de temperaturas para diferentes planos transversais, utilizando três temperaturas de injeção, tais como, 283.15 K, 323.15 K e 383.15 K, respetivamente. A temperatura injetada no túnel aerodinâmico subsônico é 293.15 K.

Aqui simulou-se mais dois casos, desta feita com uma diferença de 100K, o de 283.15 K que era mais frio que o escoamento principal e o de 383.15 K que era mais quente que o escoamento principal. Foi introduzido na comparação o caso de 323,15 K pois é quase um meio-termo entre os dois anteriores.

Não se verificam alterações significativas a 0 D, 30 D, 60 D, mas apenas a 120 D. Verifica-se que quanto menor a temperatura de injeção mais alta é a posição da pluma, sendo que a explicação mais plausível é que, como já foi visto nos gráficos da velocidade, o escoamento principal desloca-se e posicionasse debaixo da pluma e conforme o escoamento seja mais quente, logo menos denso, tende a deslocar-se para locais superiores, de acordo com o fenómeno da convecção natural, portanto arrasta e coloca a pluma em regiões mais elevadas.

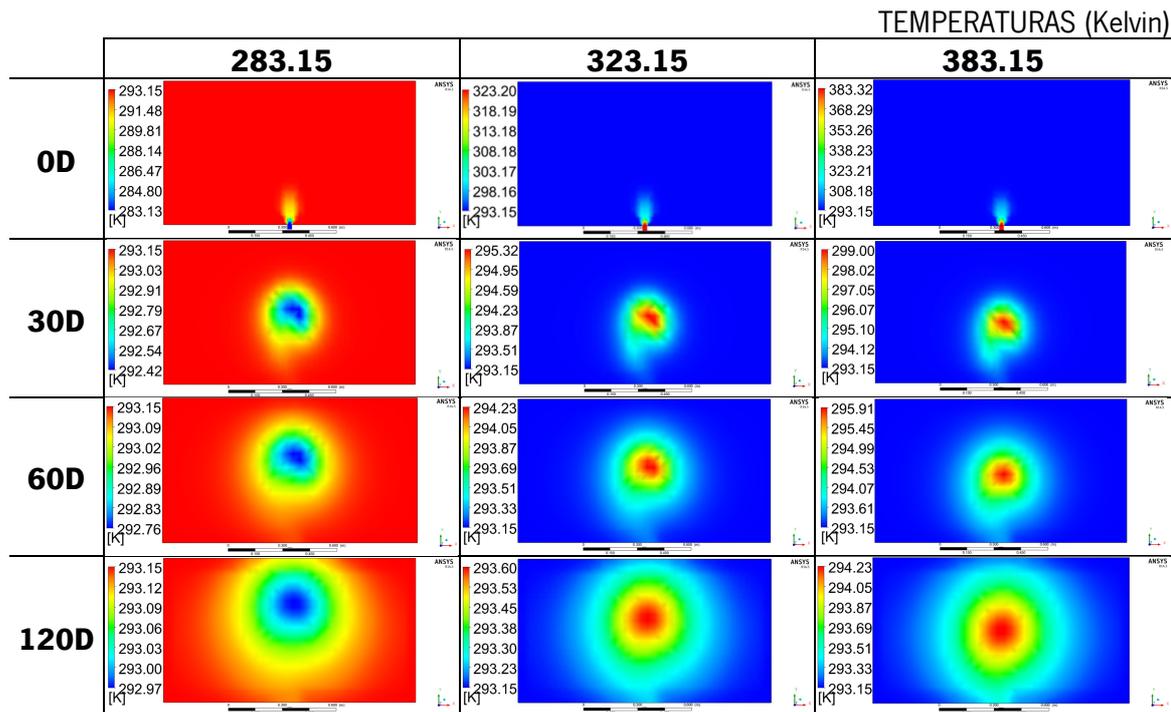


Figura 5.43 - Distribuição de temperaturas para diferentes planos transversais, utilizando três temperaturas de injeção, 283.15 K, 323.15 K e 383.15 K, respetivamente.

Na Figura 5.44 pode-se visualizar a distribuição de temperaturas para a meia largura e meia altura do túnel aerodinâmico, utilizando três temperaturas de injeção, tais como, 283.15 K, 323.15 K e 383.15 K, respetivamente. Para as figuras a meia largura os comportamento é semelhante, para as três temperaturas, excepto para a figura da meia altura, a explicação é a mesma indicada anteriormente.

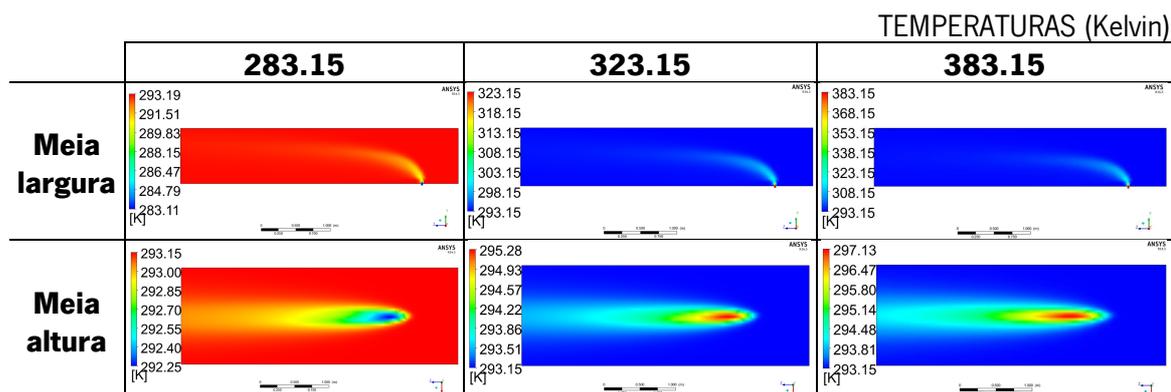


Figura 5.44 - Distribuição de temperaturas para a meia largura e meia altura do túnel aerodinâmico, utilizando três temperaturas de injeção, tais como, 283.15 K, 323.15 K e 383.15 K, respetivamente.

5.2.3 Comparação da Experiência com Simulação CFD

Nesta secção compara-se os dados obtidos da experiência com os dados da simulação *CFD*, através do programa *SURFER*, produzido pela *Golden Software*. Este permite visualizar plenamente contornos 2D e 3D.

De salientar que as medições levadas a cabo pelo tubo de Pitot total são imprecisas, devido á limitação intrínseca deste equipamento em escoamentos com níveis de turbulência e de gradientes de velocidade tão elevados. Também é necessário ter a atenção que a coordenada tem origem no centro do furo da injeção vertical.

1 Jacto Cruzado

5.2.3.1 Contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 30$

Na Figura 5.45 ilustra-se os contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 30$, obtidos através de Tubo de Pitot total.

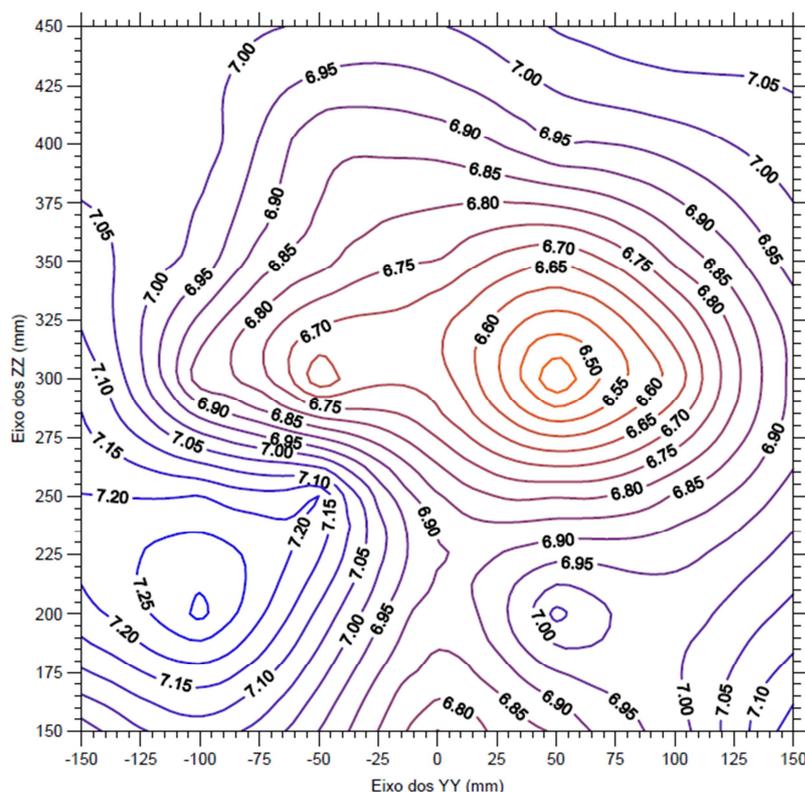


Figura 5.45 - Perfil de velocidades – 1 jato – 30 diâmetros – Pressão total – Experiência (Tabela B. 1) (Nunes, 2003)

Já na Figura 5.46 ilustra-se os contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 30$, obtidos através de sonda de fio quente vertical.

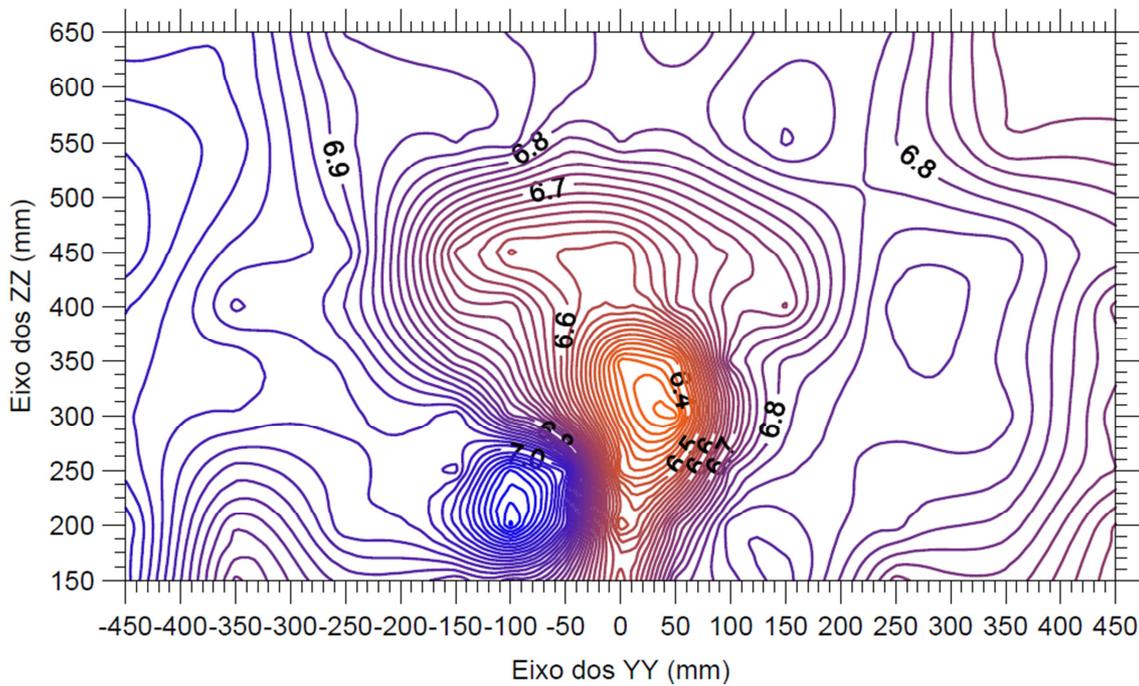


Figura 5.46 - Perfil de velocidades – 1 jato – 30 diâmetros – Fio quente vertical – Experiência (Tabela B. 2) (Nunes, 2003)

Relativamente à simulação *CFD*, os contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 30$, em 2D apresenta-se na Figura 5.47.

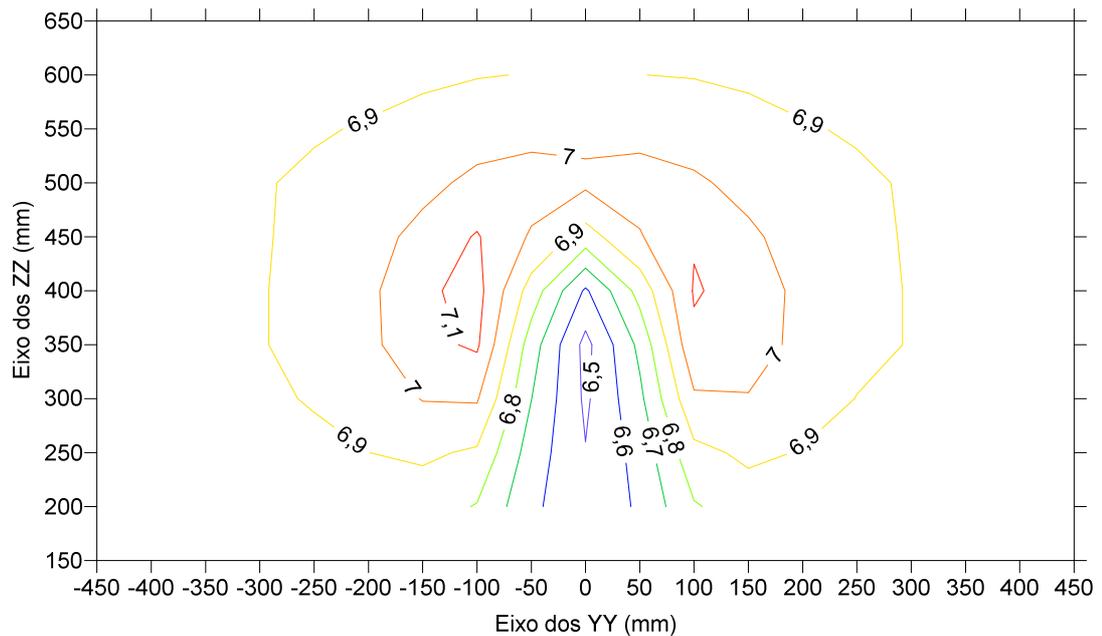


Figura 5.47 - Perfil de velocidades – 1 jato – 30 diâmetros – 2D – Simulação (Tabela B. 3)

Para a simulação *CFD*, os contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 30$, em 3D apresenta-se na Figura 5.48.

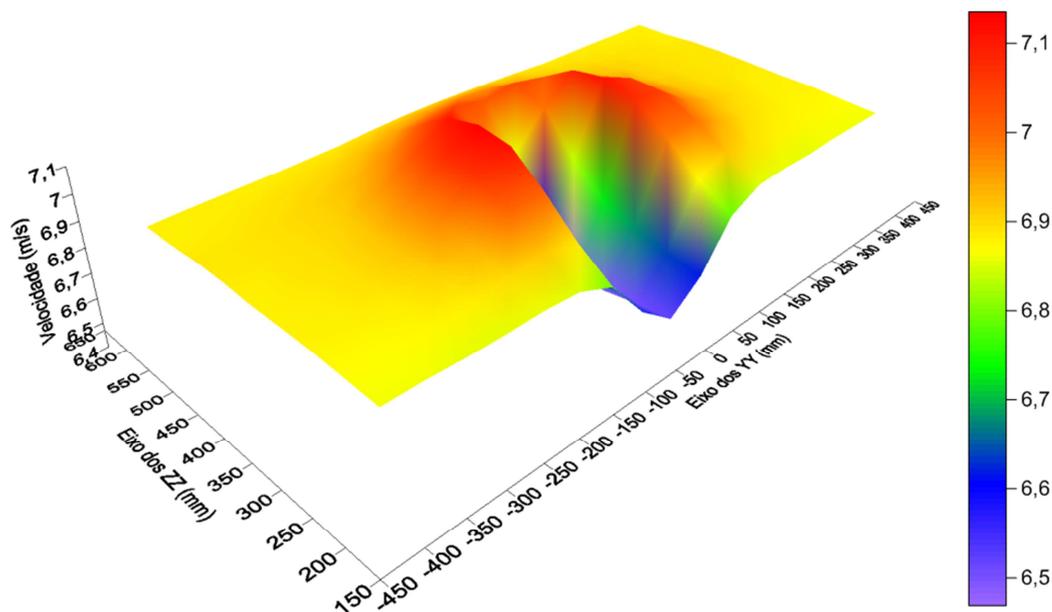


Figura 5.48 - Perfil de velocidades – 1 jato – 30 diâmetros – 3D – Simulação (Tabela B. 3)

Na Figura 5.45 verifica-se que para $Z = 300$ mm ($Z/D = 12$) encontram-se localizados um par de vórtices perfeitamente simétricos em relação ao plano central e distanciados entre si cerca de 100 mm. Almeida (1986) estudou um caso similar, onde o par de vórtices se encontrava a $z/D = 14$. Segundo os resultados da simulação do presente trabalho, Figura 5.47, o par encontrasse a $z/D = 16$, perfeitamente simétrico em relação ao plano central e distanciados entre si cerca de 200 mm. A única diferença é que são duas regiões de alta velocidade, ao passo que na experiência são de baixa velocidade. Ruggeri et al. (1950) apresenta uma equação semi-empírica para determinar a penetração de um jato transversal num escoamento livre e o resultado obtido é coincidente com o resultado da simulação, ou seja, o par de vórtices encontra-se a $z/D = 16$.

Os resultados da experiência demonstram que a transição entre a zona dos vórtices para a zona superior de escoamento não perturbado, não traduz numa alteração significativa da componente longitudinal da velocidade o que significa que a distância à injeção é tão elevada e que a homogeneização já se realizou. Na simulação *CFD*, Figura 5.47 e Figura 5.48, os resultados são idênticos à experiência, logo a transição é suave, e a transição é de 6.4 a 6.9 m/s.

Na experiência ainda é possível visualizar debaixo do vórtice, a $8,5D$ do chão, duas fortes componentes longitudinais da velocidade, um pouco distorcidas em relação ao plano de simetria e

à distância de cerca de $6D$, entre si. Tal resulta porque o escoamento principal interage e roda sobre o vórtice maior. Verifica-se que a pluma desenvolve-se ao invés de se diluir, o que à primeira vista seria de esperar. Na simulação *CFD* não se verificam fortes componentes longitudinais de velocidade no mesmo domínio.

Na Figura 5.46 em que se pode visualizar os resultados do fio quente vertical, as conclusões são semelhantes ao tubo de Pitot, excepto as diferenças relativas de intensidade dos dois vórtices e da sua difusão, sendo o direito o mais fraco e mais difuso.

5.2.3.2 Pressão estática – 1 jato – 30 diâmetros

É necessário salientar que as medições com tubo de Pitot total são bastante imprecisas neste tipo de escoamento, então na medição da pressão estática o efeito aumenta ainda mais. Foi utilizado não pela precisão que proporciona, mas para visualizar a distribuição da pressão ao longo do domínio. Importante referir que os gráficos de pressão apresentados de seguida apresentam-se em Pascal.

Na Figura 5.49 pode-se visualizar a distribuição da pressão estática, num plano à distância de $30D$ da saída da injeção, na experiência.

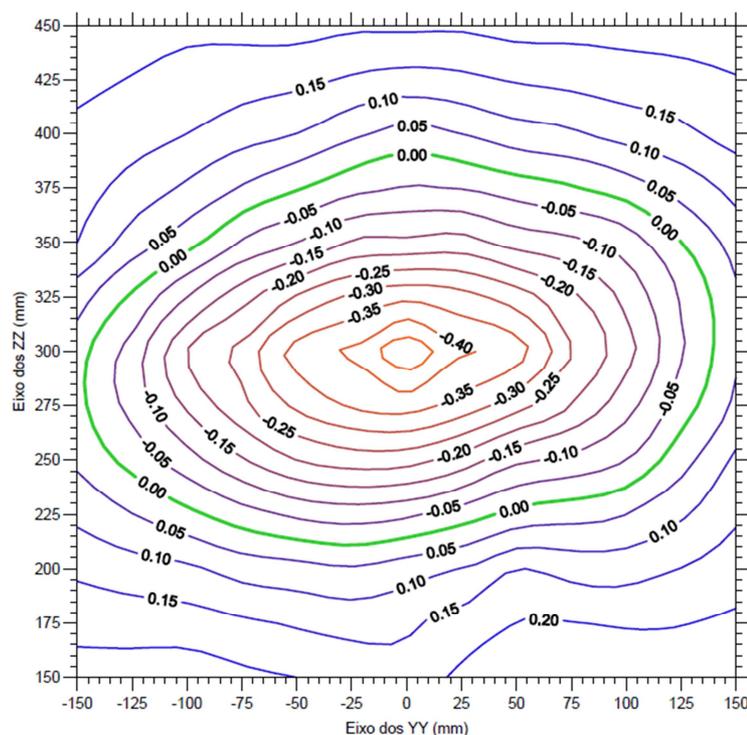


Figura 5.49 - Pressão estática – 1 jato – 30 diâmetros – Experiência (Tabela B. 4) (Nunes, 2003)

Na Figura 5.50 pode-se visualizar a distribuição da pressão estática, num plano à distância de 30D da saída da injeção, a duas dimensões, na simulação.

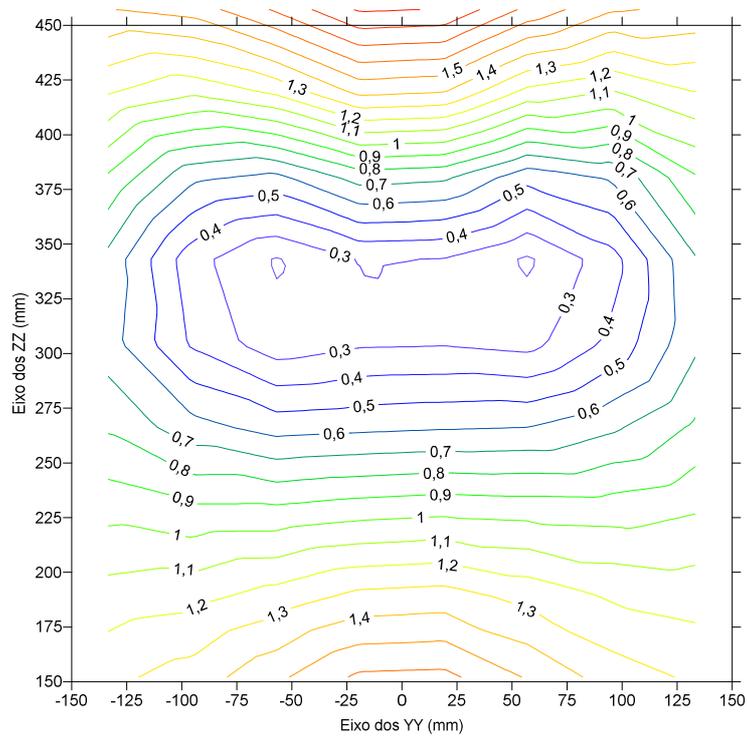


Figura 5.50 - Pressão estática – 1 jato – 30 diâmetros – 2D – Simulação (Tabela B. 5)

Na Figura 5.51 pode-se visualizar a distribuição da pressão estática, num plano à distância de 30D da saída da injeção, a três dimensões, na simulação.

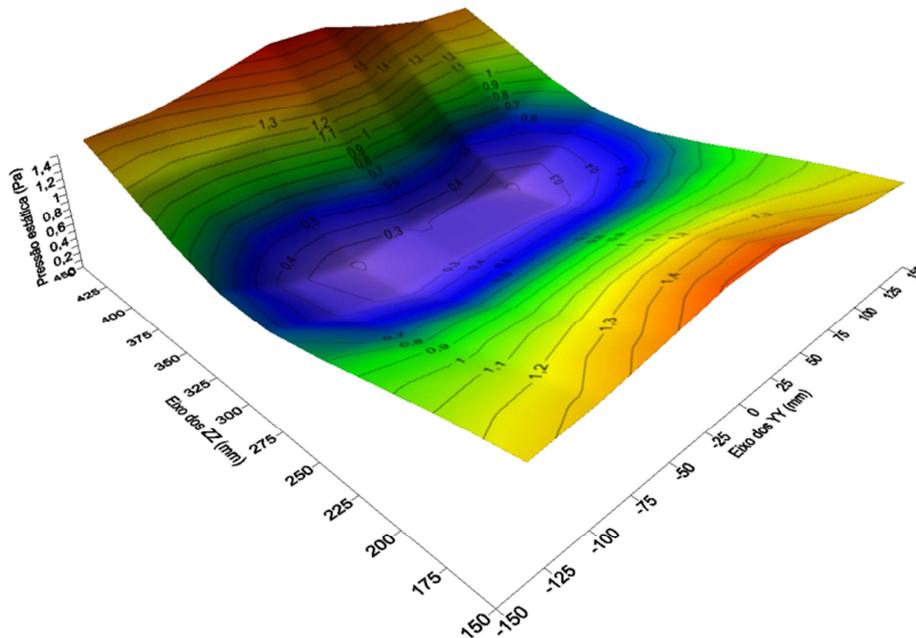


Figura 5.51 - Pressão estática – 1 jato – 30 diâmetros – 3D – Simulação (Tabela B. 5)

Na Figura 5.49 constata-se uma distribuição simétrica do campo, a existência de apenas um lócus de pressão máxima, ao invés de existirem dois. É invulgar a não existência de separação entre o escoamento central, de pressão estática inferior à da corrente não perturbada e as zonas exteriores de maior pressão. Especula-se que as fortes componentes verticais da velocidade, no plano central entre os vórtices, se sobreponham às da depressão nos “miolos” dos mesmos. Na simulação *CFD*, Figura 5.50 e Figura 5.51, verifica-se a existência de dois lócus, no centro do domínio considerado, afastados entre si $y/D = 5$. As menores pressões encontra-se no lócus, mas são negativas são de 0,3, ao passo que na experiência são de -0,40 e a máxima na zona exterior é de 1,5 e na experiência é de 0,20.

5.2.3.3 Contorno das isovelocidades para o plano $x/D = 60$

Na Figura 5.52 apresenta-se os contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 60$, obtidos através de sonda de fio quente vertical, na experiência.

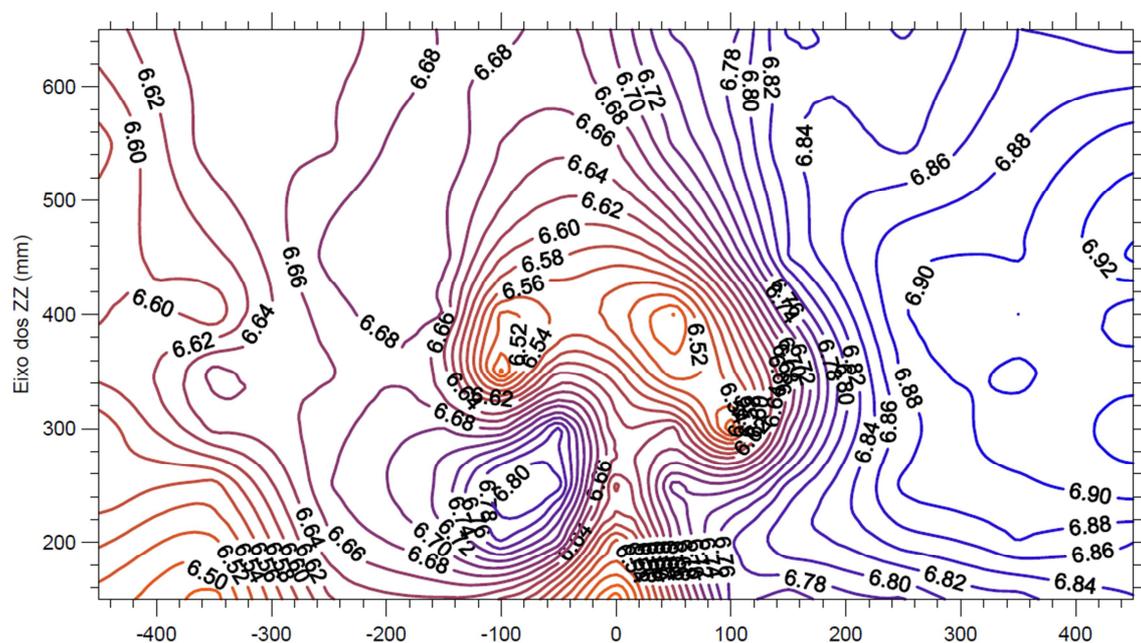


Figura 5.52 - Perfil de velocidades – 1 jato – 60 diâmetros – Fio quente vertical – Experiência (Tabela B. 6) (Nunes, 2003)

Na Figura 5.53 apresenta-se os contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 60$, obtidos através da simulação, em duas dimensões.

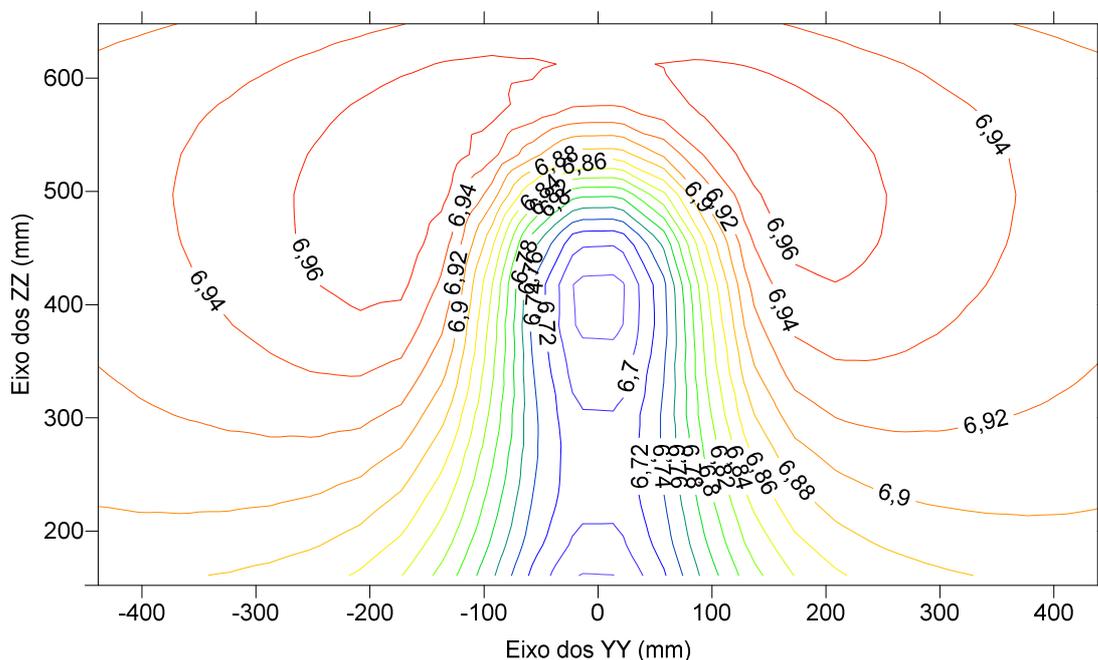


Figura 5.53 - Perfil de velocidades – 1 jato – 60 diâmetros – 2D – Simulação (Tabela B. 7)

Na Figura 5.54 apresenta-se os contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 60$, obtidos através da simulação, em três dimensões.

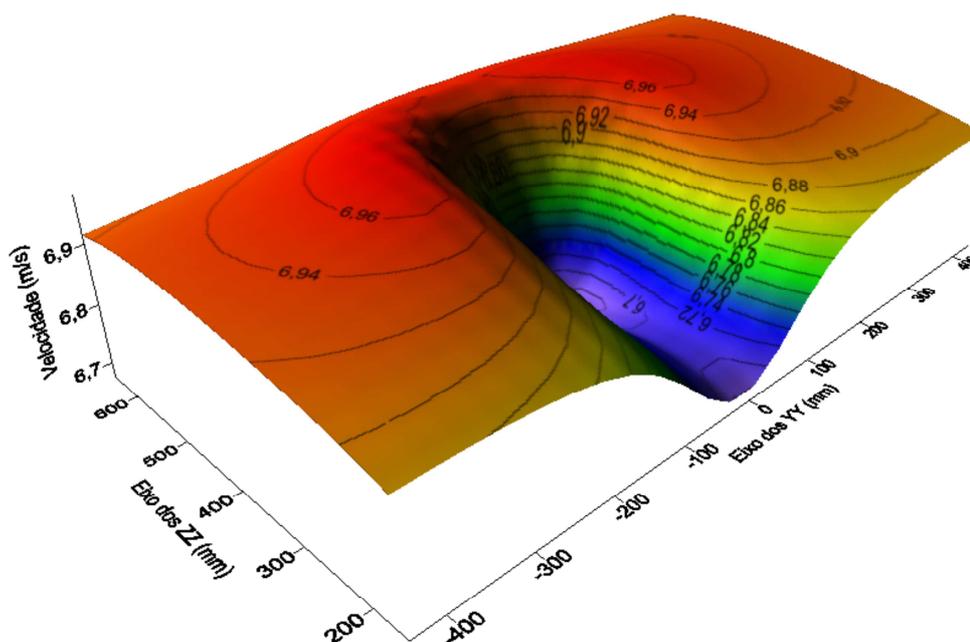


Figura 5.54 - Perfil de velocidades – 1 jato – 60 diâmetros – 3D – Simulação (Tabela B. 7)

Na experiência, Figura 5.52 verifica-se que o vórtice direito deforma-se e ocorre o aparecimento de dois lócus de baixas velocidades longitudinais. Na simulação *CFD*, Figura 5.53 e Figura 5.54, os valores são simétricos relativamente ao eixo que contém $y = 0$, só existe um lócus de baixa velocidade no centro do gráfico a $z/D = 16$, sendo a velocidade superior cerca de 0,2 m/s à experiência, e por fim, não existem vórtices para baixos valores de z .

5.3 13 Jatos Cruzados

5.3.1 Caso Experimental

A configuração e explicação do teste experimental realizado, são iguais às explicadas no capítulo de 1 jato cruzado. A única exceção é que a placa de furos tem 13 furos, ao invés de um único furo como pode ser visualizado na Figura 5.27.

5.3.2 Simulação *CFD*

5.3.2.1 Geometria

Na ferramenta de desenho do *FLUENT*, no *Desing Modeler*, desenhou-se a figura geométrica. Desenhou-se um paralelepípedo com comprimento de 4 metros e secção transversal de largura de 1,4 metros e altura de 0,8 metros. Desenhou-se um conjunto de tubos que representam a placa de furos. O desenho pode ser visualizado na Figura 5.55.

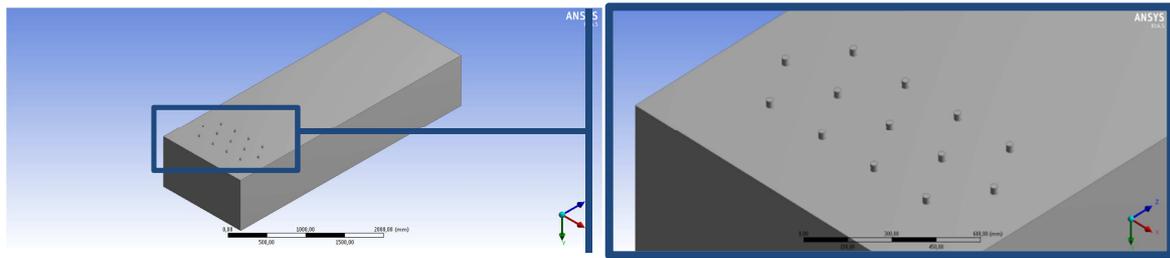


Figura 5.55 - Figura geométrica

5.3.2.2 Malha

De seguida procedeu-se à criação de malha para o modelo em estudo, tendo sido testadas três configurações diferentes de malha e comparados os resultados obtidos com os das experiências para encontrar a malha que reproduziria com mais fiabilidade os resultados experimentais. Foi testada uma malha “*hexacore*”, contituidas por cubos no interior e tetraedros na superfície (Figura 5.56), depois testou-se uma malha “*sweep*”, contituidas por prismas de face triangular e quadrada (Figura 5.57), por fim testou-se uma malha “*cutcell*”, contituidas por cubos perfeitamente alinhados entre si (Figura 5.58). Os resultados do teste da malha podem ser visualizados de seguida. Em que se escolhe a malha “*cutcell*” de 500 000 como a malha final, na medida em que aumentando o refinamento, não se obtém mudanças significativas na velocidade.

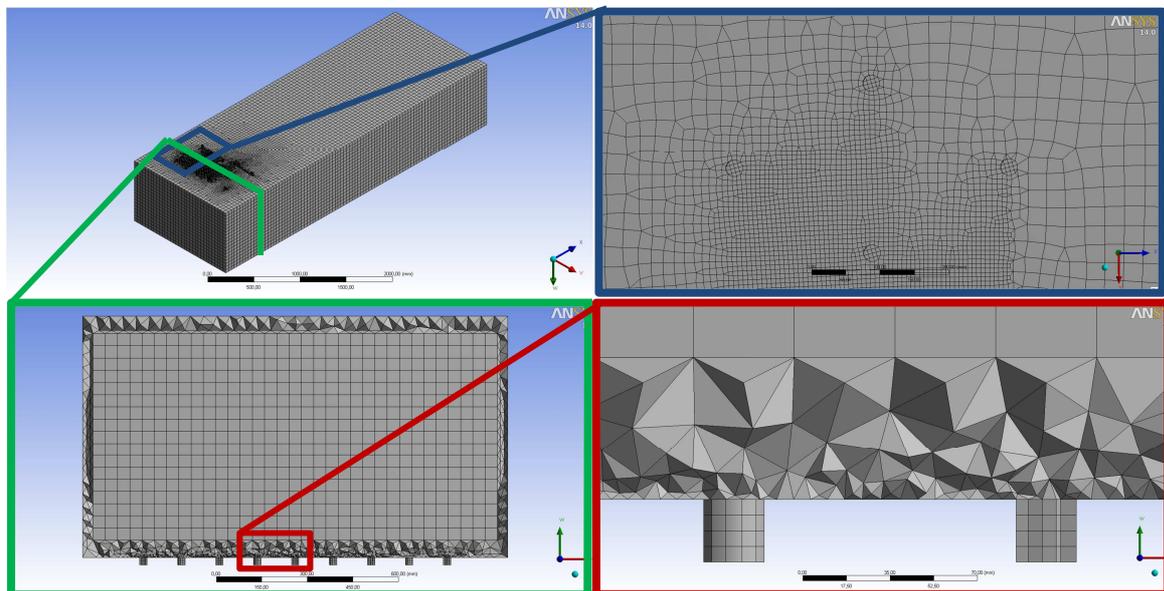


Figura 5.56 – Configuração da malha “*hexacore*”

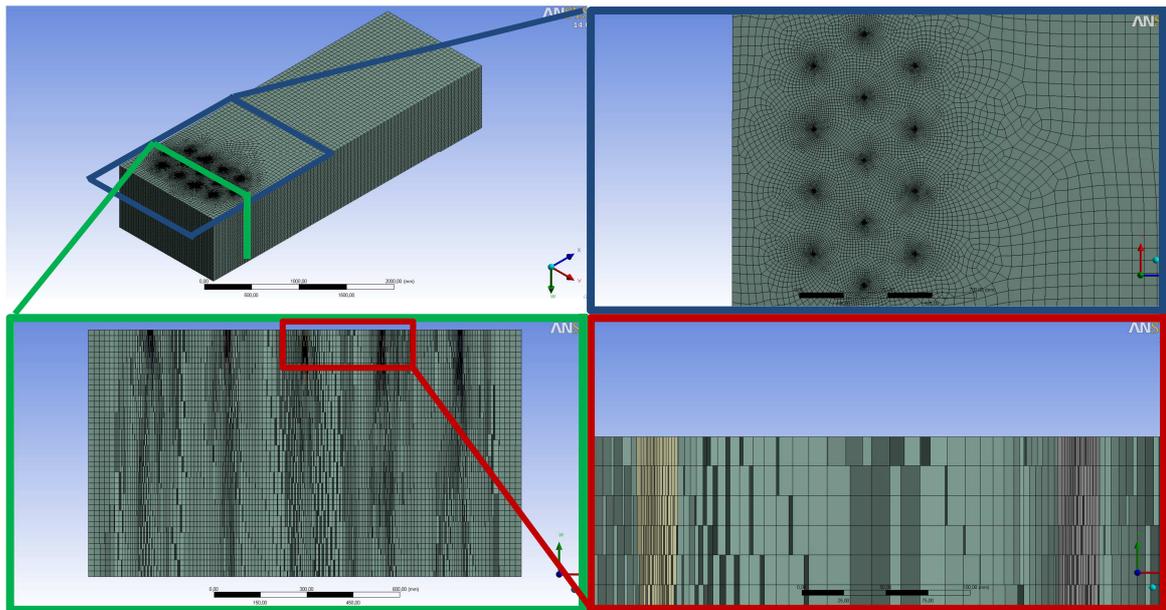


Figura 5.57 – Configuração da malha “sweep”

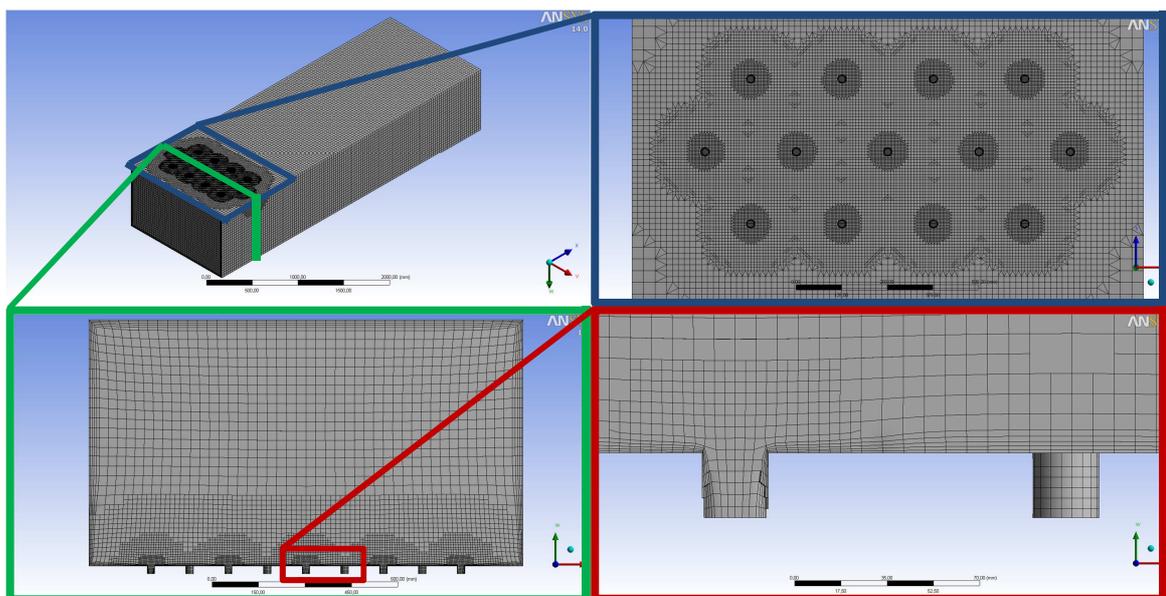


Figura 5.58 – Configuração da malha do “cutcell”

Da Figura 5.59 conclui-se que as malhas que apresentaram resultados muito próximos dos dados da experiência foram a “hexacore” e a “cutcell”. Optou-se pela opção “cutcell” em detrimento da “hexacore” porque, como consta da Tabela 5.6 apresenta excelentes valores de *skewness* e ortogonalidade. De seguida fez-se um refinamento de malha à configuração “cutcell” e conclui-se que a partir de 500 000 elementos a propriedade considerada tem uma variação pouco significativa. Esta malha tem 487 352 elementos e qualitativamente é quase perfeita, apresenta *Skewness* e qualidade ortogonal média de 0,062 e 0.97, respetivamente.

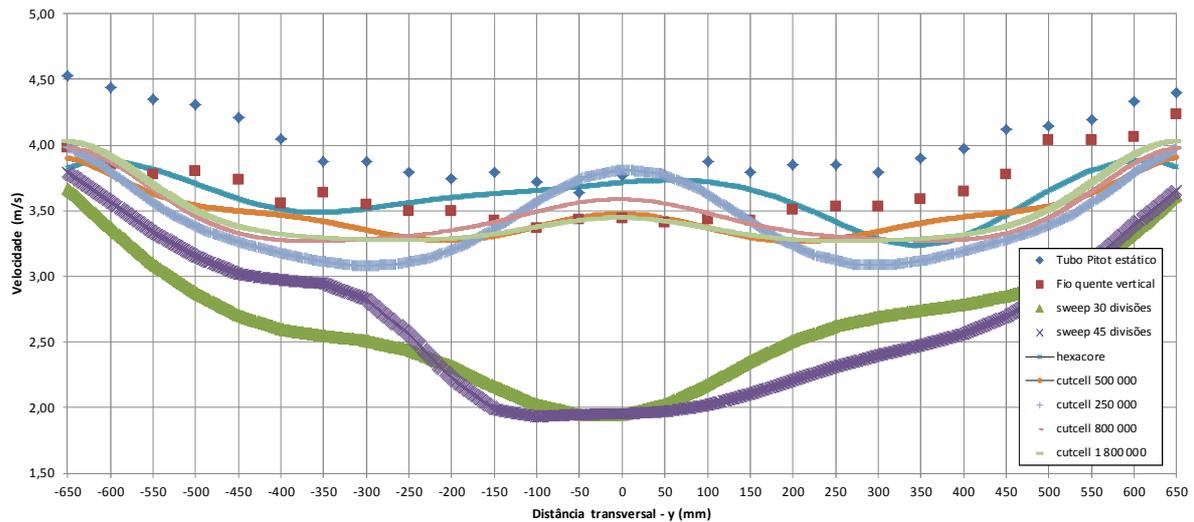


Figura 5.59 - Comparação de diferentes tipos de malha

Tabela 5.6 - Características de diferentes tipos de malha

Tipo de Malha	Nº de Elementos	Qualidade ortogonal média	Skewness médio
Hexagonal	335 261	0,77	0,32
Sweep 30 divisões	440 280	0,98	0,15
Sweep 45 divisões	660 420	0,98	0,15
Cutcell 250 000	275 487	0,95	0,084
Cutcell 500 000	487 352	0,97	0,062
Cutcell 800 000	817 553	0,97	0,057
Cutcell 1 800 000	1 827 069	0,99	0,035

5.3.2.3 Inputs do FLUENT

Uma vez definida a malha final, a próxima etapa foi configurar os *inputs* do *FLUENT*, para obter os resultados finais. As condições de fronteira e modelo de turbulência adotados estão resumidos na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – *Inputs* do *FLUENT* para 13 jatos cruzados

Modelo de turbulencia – Realizable k - ϵ – Standart wall functions			
		Tipo de condição	Input
Inlet	Saída do Tunel de Jatos 1º Plano	U (m/s)	50,88
		i (%)	3,86
		D (m)	0,025
	Saída do Tunel de Jatos 2º Plano	U (m/s)	25,44
		i (%)	4,21
		D (m)	0,025
	Saída do Tunel de Jatos 3º Plano	U (m/s)	12,72
		i (%)	4,59
		D (m)	0,025
	Saída do Tunel Subsónico	U (m/s)	3,18
		k	1
		ϵ	1
Outlet	Saída da camara de medições	<i>Pressure outlet</i> (Pa)	0
Wall	Paredes da camara de visualização e medição		

5.3.2.4 Critérios de paragem

O método iterativo foi terminado quando os resíduos da equação da continuidade e das componentes x, y e z foram inferiores a 10^{-4} e quando o *monitor* definido previamente convergiu. O *monitor* criado foi a velocidade média na face de saída do escoamento.

De seguida são apresentadas imagens dos perfis de velocidade e de pressão, para diversos planos, tais imagens não são comentadas, porque já são comentadas na comparação simulação/experiência e portanto servem de complemento de análise para a comparação, bem como para a distribuição das temperaturas.

5.3.2.5 Análise dos resultados obtidos

Na Figura 5.60 pode-se visualizar a distribuição das velocidades e das pressões, na secção transversal, para várias distâncias relativamente ao furo, respectivamente.

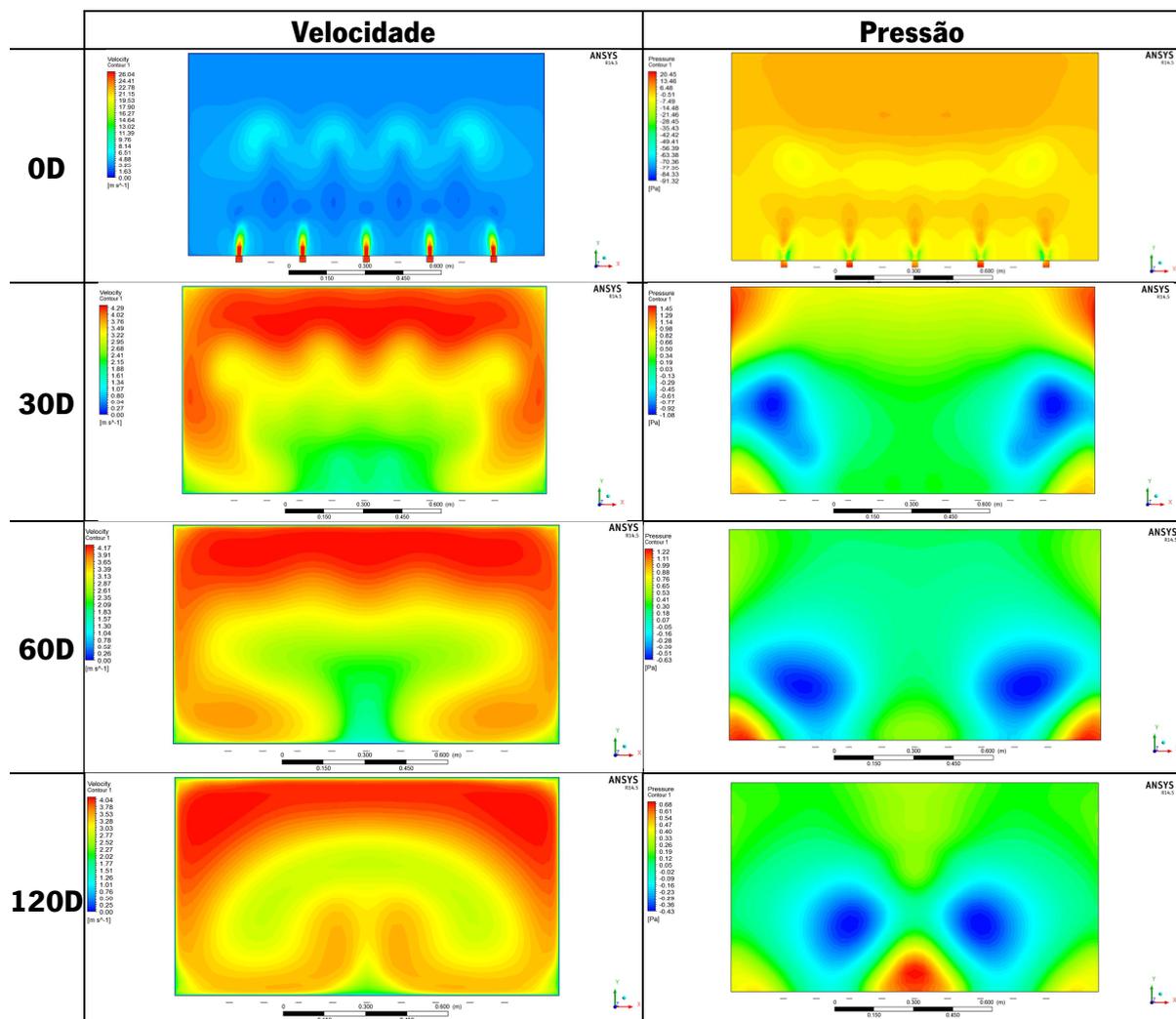


Figura 5.60 - Distribuição das velocidades e das pressões, para vários planos transversais

Na Figura 5.61 pode-se visualizar a distribuição das velocidades e pressões, a meia largura, bem como a meia altura do túnel aerodinâmico.

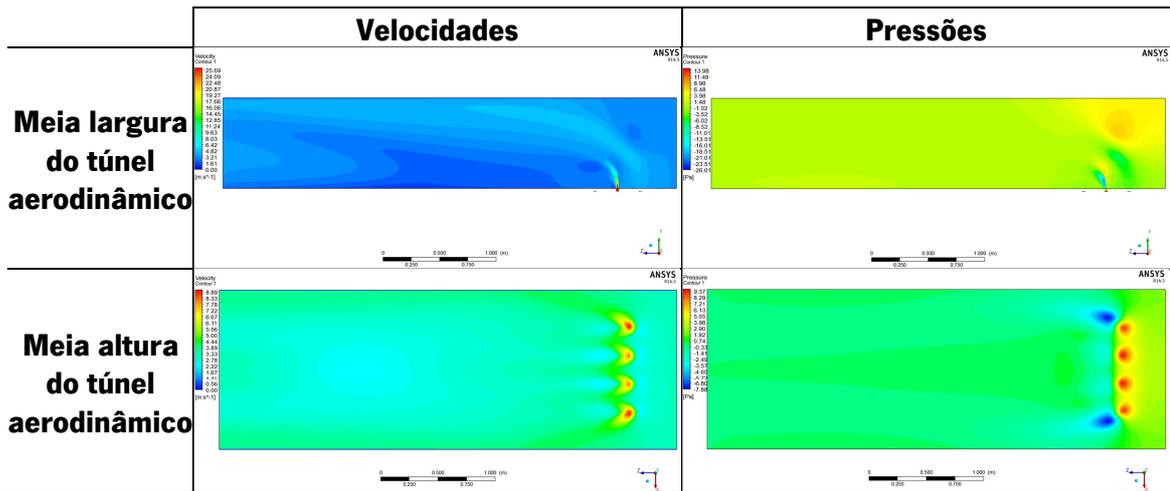


Figura 5.61 - Distribuição das velocidades e pressões, a meia largura, bem como a meia altura do túnel aerodinâmico

Na Figura 5.62 pode-se visualizar a distribuição dos vetores da velocidade, à meia largura do túnel aerodinâmico, através de uma visão global, e através de três vistas cada vez mais pormenorizadas, respetivamente.

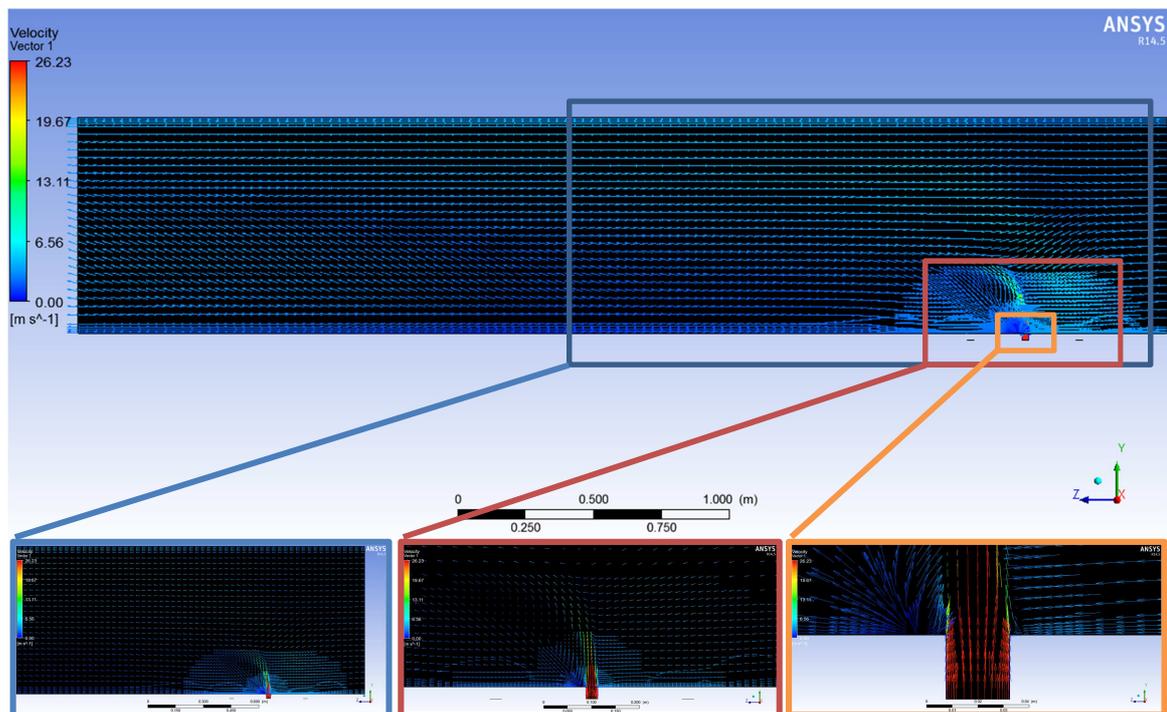


Figura 5.62 - Distribuição dos vetores da velocidade, à meia largura do túnel aerodinâmico, através de uma visão global, e através de três vistas cada vez mais pormenorizadas, respetivamente.

Na Figura 5.63 pode-se visualizar a distribuição de temperaturas para diferentes planos transversais, utilizando três temperaturas de injeção, tais como, 303.15 K, 313.15 K e 323.15 K, respetivamente. A temperatura de injeção no túnel aerodinâmico é 293.15 K. Os jatos injetados transversalmente no escoamento principal atuam como paredes ao escoamento que provêm do

túnel aerodinâmico. Neste caso de 13 furos mais do que de 1, o efeito de “parede” é mais significativo, porque existem mais furos dispostos à largura da secção transversal. A OD verifica-se a existência de 4 plumas que proveem da primeira fila de jatos e já surgem a cerca de meia altura do espaço. Pode-se visualizar a entrada dos 5 jatos da segunda fila a elevadas temperaturas no escoamento principal. A 30D verifica-se já uma dispersão e homogeneização total do fluido principal com o secundário, sendo a diferença de temperatura na ordem de 1K no caso de 303,15K e ligeiramente mais elevada nos restantes casos. Verifica-se a existência de 4 plumas a elevadas temperaturas no centro da secção que proveem da terceira fila de jatos que é lançada mais a jusante do que as restantes filas. A 60D a região de máxima temperatura é mais uniforme e a 120D constatasse que as menores temperaturas transitam das paredes para a meia largura da secção transversal, sendo que tal fenómeno é explicado porque o escoamento principal envolve a pluma e introduz-se no núcleo central desta, para se misturar.

Constata-se que a diferença de 10 K entre os casos não provoca alterações na distribuição das temperaturas, mas já provoca alguma diferença, não muito significativa, no valor absoluto da mesma.

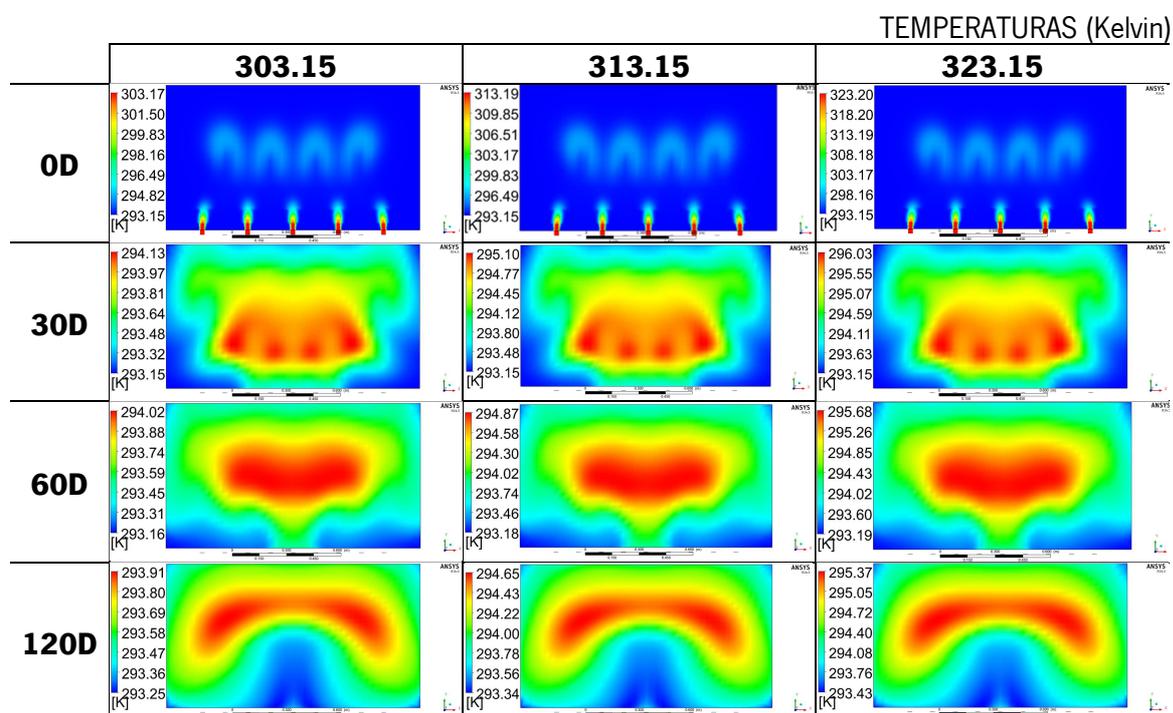


Figura 5.63 - Distribuição de temperaturas para diferentes planos transversais, utilizando três temperaturas de injeção, 303.15 K, 313.15 K e 323.15 K, respetivamente.

Na Figura 5.64 pode-se visualizar a distribuição de temperaturas para a meia largura e meia altura do túnel aerodinâmico, utilizando três temperaturas de injeção, tais como, 303.15 K,

313.15 K e 323.15 K, respetivamente. Constatase que a diferença de 10 K entre os casos não provoca alterações na distribuição das temperaturas, mas já provoca alguma diferença, não muito significativa, no valor absoluto da mesma. Na figura da meia largura e na meia altura verifica-se uma diferença abismal com o caso de jacto único, pois aqui a dispersão da pluma é muito maior, quer em altura pois abrange o tecto e o chão, quer em largura pois abrange as superfícies laterais.

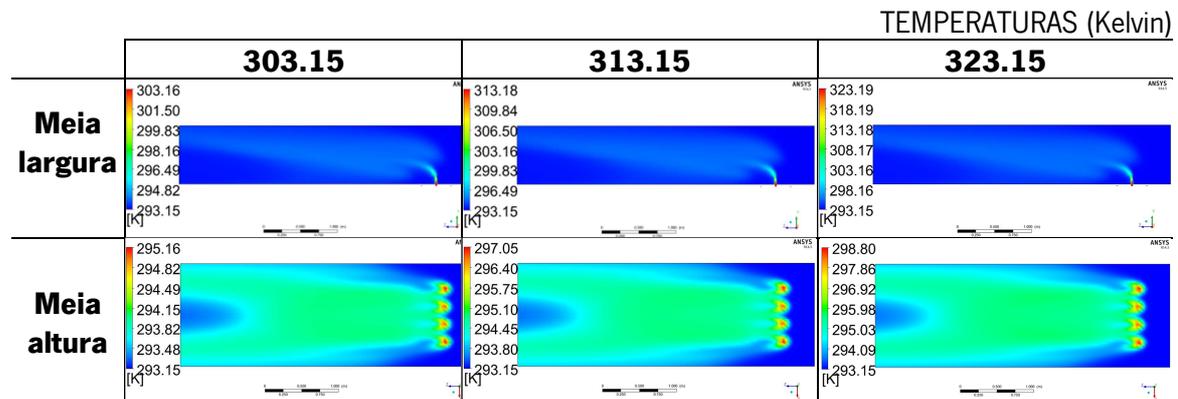


Figura 5.64 - Distribuição de temperaturas para a meia largura e meia altura do túnel aerodinâmico, utilizando três temperaturas de injeção, tais como, 303.15 K, 313.15 K e 323.15 K, respetivamente.

Na Figura 5.65 pode-se visualizar a distribuição de temperaturas para diferentes planos transversais, utilizando três temperaturas de injeção, tais como, 283.15 K, 323.15 K e 383.15 K, respetivamente. A temperatura de injeção no túnel aerodinâmico é 293.15 K.

Aqui simulou-se mais dois casos, desta feita com uma diferença de 100K, o de 283.15K que era mais frio que o escoamento principal e o de 383.15K que era mais quente que o escoamento principal. Foi introduzido na comparação o caso de 323,15K pois é quase um meio-termo entre os dois anteriores.

Não se verificam alterações significativas a 0D, 30D, 60D, mas apenas a 120D. Verifica-se que quanto menor a temperatura de injeção mais alta é a posição da pluma, sendo que a explicação mais plausível é que, como já foi visto nos gráficos da velocidade, o escoamento principal desloca-se e posicionasse debaixo da pluma e conforme o escoamento seja mais quente, logo menos denso, tende a deslocar-se para locais superiores, de acordo com o fenómeno da convecção natural e coloca a pluma em regiões mais elevadas.

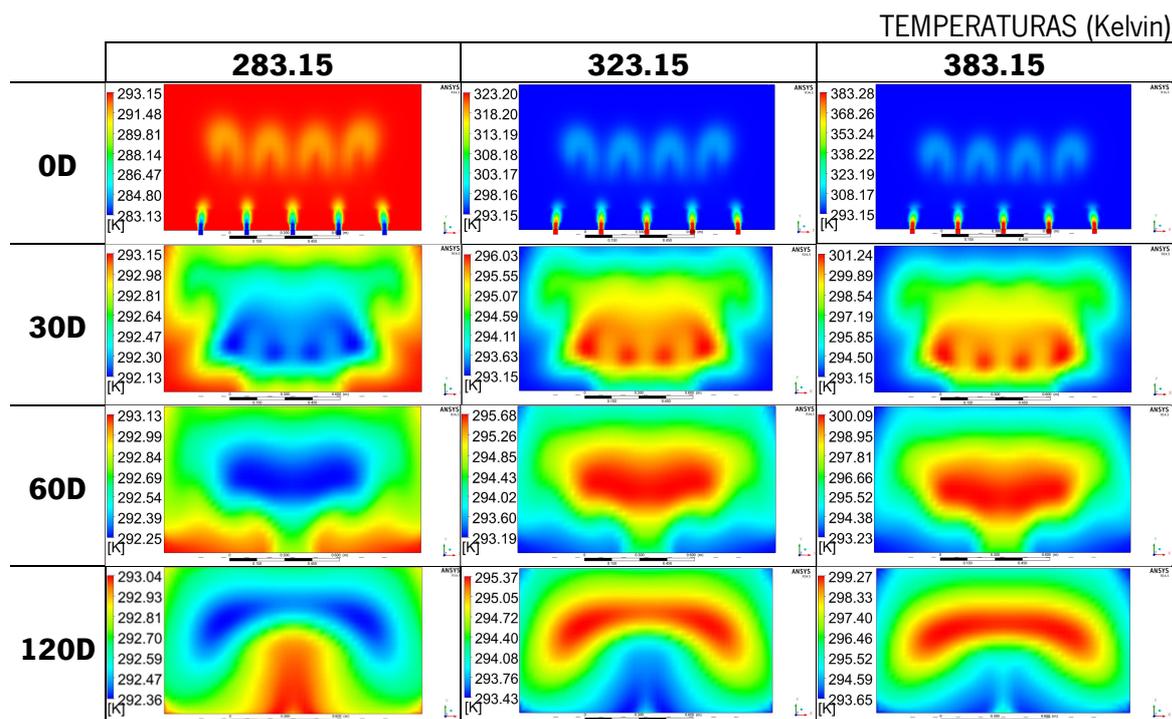


Figura 5.65 - Distribuição de temperaturas para diferentes planos transversais, utilizando três temperaturas de injeção, 283.15 K, 323.15 K e 383.15 K, respetivamente.

Na Figura 5.66 pode-se visualizar a distribuição de temperaturas para a meia largura e meia altura do túnel aerodinâmico, utilizando três temperaturas de injeção, tais como, 283.15 K, 323.15 K e 383.15 K, respetivamente. Para as figuras a meia largura o comportamento é semelhante, para as três temperaturas, excepto para a figura da meia altura, a explicação é a mesma indicada anteriormente.

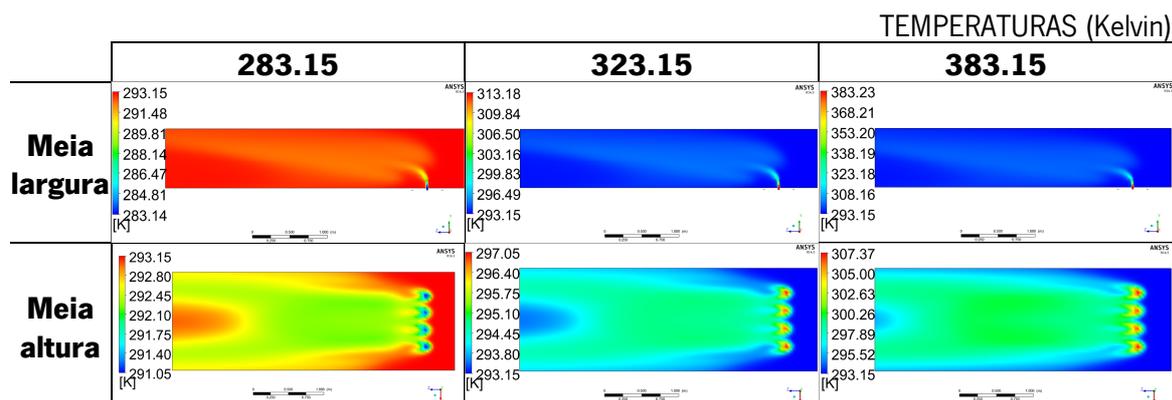


Figura 5.66 - Distribuição de temperaturas para a meia largura e meia altura do túnel aerodinâmico, utilizando três temperaturas de injeção, tais como, 283.15 K, 323.15 K e 383.15 K, respetivamente.

No trabalho levado a cabo por Nunes (2003) é aquecido o fluido injetado transversalmente no escoamento principal, através de resistências elétricas, e posteriormente, são registadas as

diferenças de temperatura com o ambiente, nos planos a 30D e a 120D a jusante da injeção, através da sonda 54N10 e 55P31, respetivamente. Embora as simulações da temperatura realizadas no presente trabalho não correspondam às da experiência, e conseqüentemente o valor absoluto da temperatura não possa ser comparável, o comportamento do escoamento já pode ser.

Na Figura 5.67 pode-se visualizar a diferença da temperatura no túnel para o ambiente, através do aquecimento dos 13 jatos, sendo as medições experimentais, feitas a 30 diâmetros a jusante da injeção, através de uma sonda 54N10.

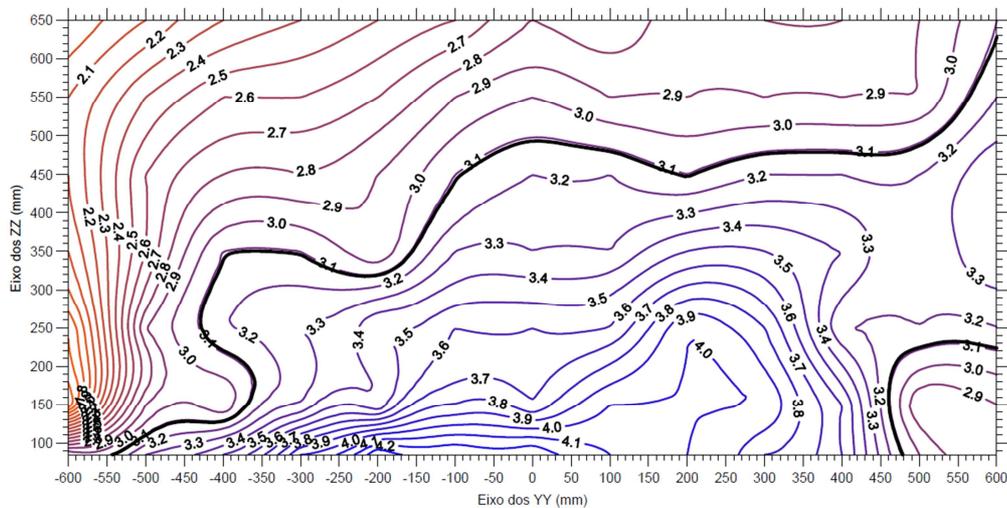


Figura 5.67 - Diferença da temperatura no túnel para o ambiente – Com aquecimento – 13 jatos – 30 diâmetros – 54N10 (Nunes, 2003)

Na Figura 5.68 pode-se visualizar a diferença da temperatura no túnel para o ambiente, através do aquecimento dos 13 jatos, sendo as medições experimentais, feitas a 120 diâmetros a jusante da injeção, através de uma sonda 55P31.

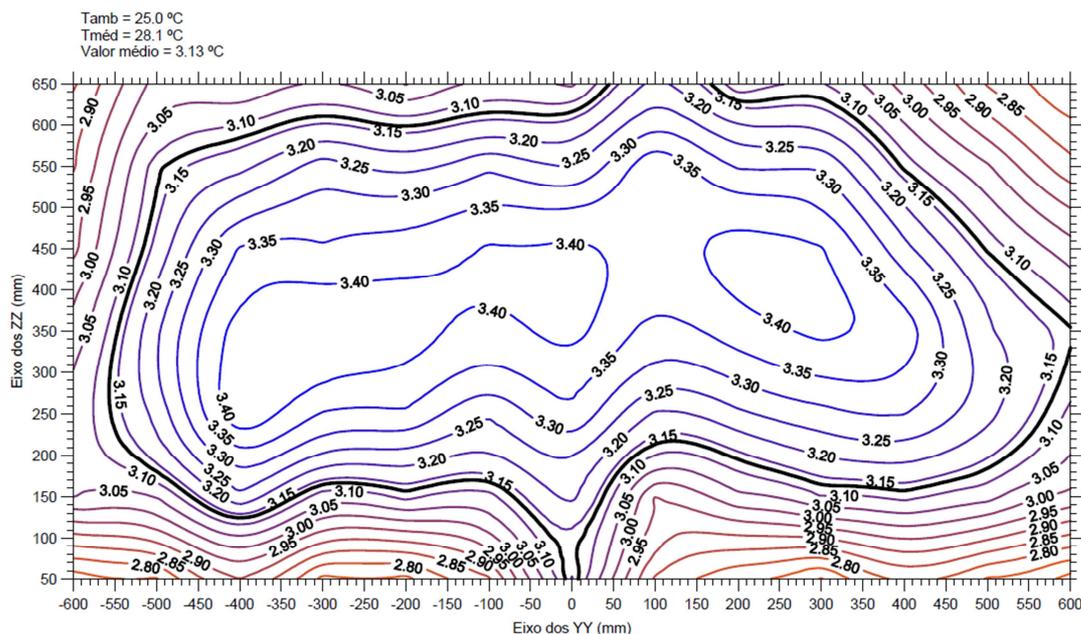


Figura 5.68 - Diferença da temperatura no túnel para o ambiente – Com aquecimento – 13 jatos – 120 diâmetros – 55P31 (Nunes, 2003)

As Figura 5.67 e Figura 5.68 mostram um aquecimento efetivo de todo o escoamento, para além do avaliado na Figura 5.14, das distribuições da velocidade. Na Figura 5.67, a 30D, no lado direito existe uma evolução muito elevada das isotérmicas, sendo que a explicação mais plausível seja por o ensaio ter sido conduzido da esquerda para a direita. Na Figura 5.68, a 120D, verifica-se um comportamento da interação semelhante ao apresentado na distribuição das velocidades e a ocorrência do aquecimento global de praticamente toda a grelha de medição. Os resultados da simulação são semelhantes no que concerne á dispersão do jato, contudo existe uma diferença que na experiência, na região central-inferior, existe uma zona de elevadas temperaturas, ao passo que na simulação são zonas das mais baixas temperaturas. Significa que, na simulação, o escoamento principal interagiu muito mais com o escoamento secundário, proporcionando a mistura da pluma no mesmo.

5.3.3 Comparação da Experiência com Simulação *CFD*

13 Jatos Cruzados

Toda a complexidade da estrutura do escoamento obtido nesta injeção está bem patente nos contornos de isovelocidades nos 3 planos transversais explorados, a 30, 60 e 120 diâmetros a jusante do plano central de injeção

5.3.3.1 Contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 30$

Na Figura 5.69 pode-se visualizar a distribuição dos contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 30$, medida essa, obtida recorrendo ao Tubo de Pitot estático.

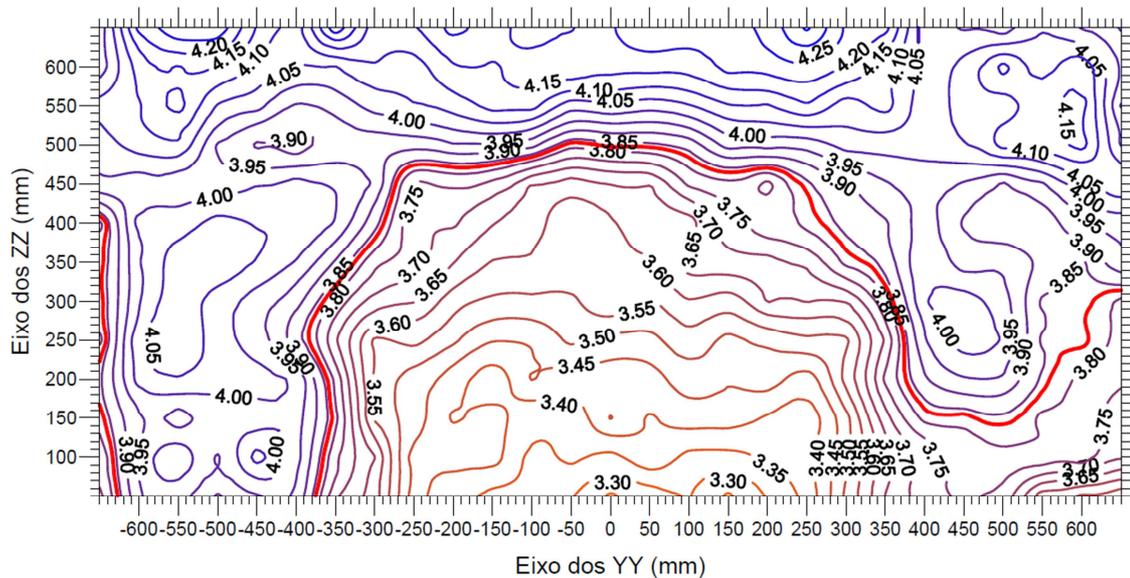


Figura 5.69 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 30 diâmetros – Pressão dinâmica – Experiência (Tabela B. 8) (Nunes, 2003)

Na Figura 5.70 pode-se visualizar a distribuição dos contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 30$, medida essa, obtida recorrendo à sonda DANTEC 54N10.

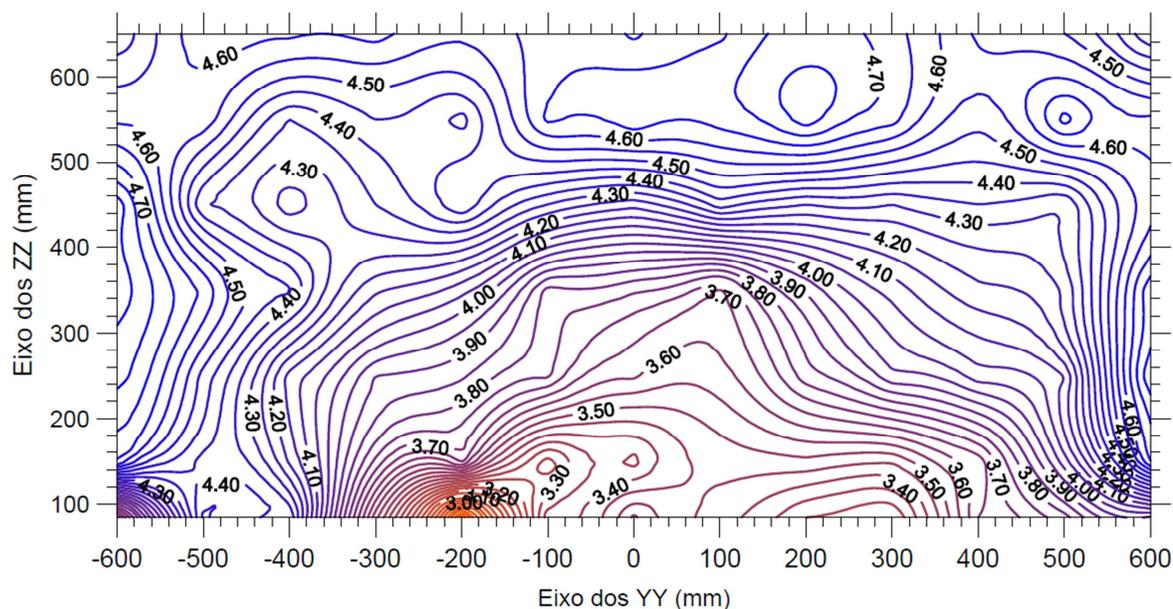


Figura 5.70 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 30 diâmetros – Sonda DANTEC 54N10 – Experiência (Tabela B. 9) (Nunes, 2003)

Na Figura 5.71 pode-se visualizar a distribuição dos contornos das isovelocidades, em duas dimensões, para o plano $x/D = 30$, para os dados obtidos da simulação.

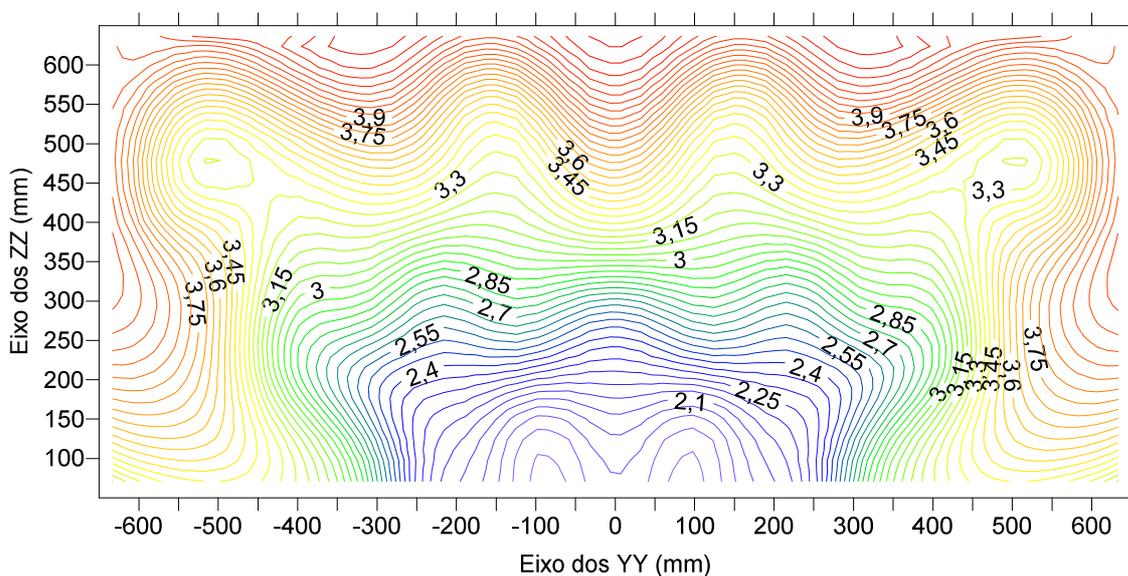


Figura 5.71 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 30 diâmetros – 2D – Simulação (Tabela B. 10)

Na Figura 5.72 pode-se visualizar a distribuição dos contornos das isovelocidades, em três dimensões, para o plano $x/D = 30$, para os dados obtidos da simulação.

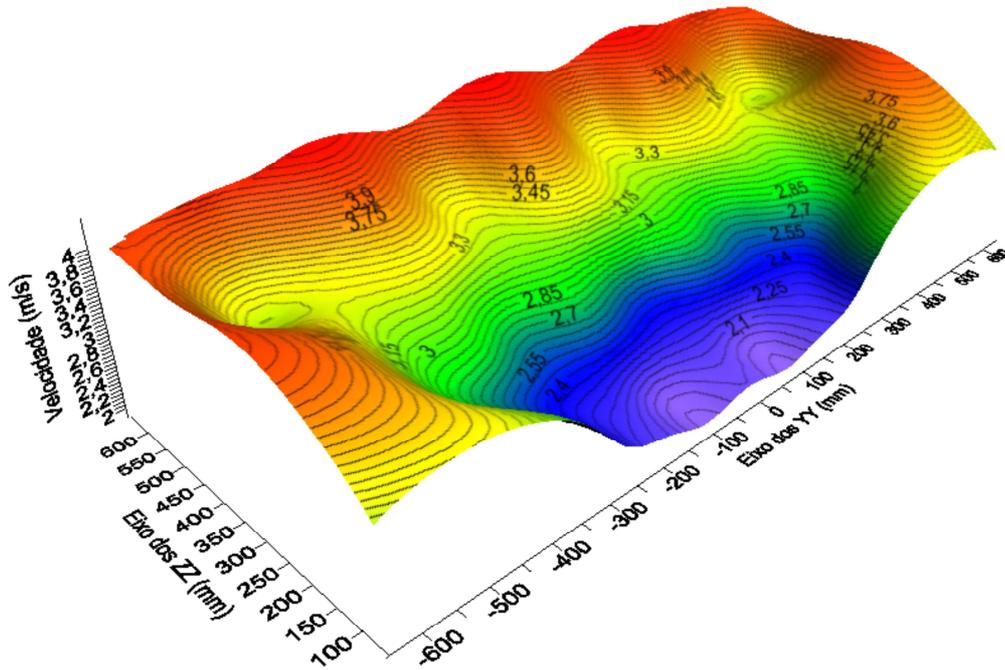


Figura 5.72 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 30 diâmetros – 3D – Simulação (Tabela B. 10)

Na Figura 5.69 identifica-se uma região central com uma largura de 750 mm e uma altura de 500 mm, região essa de velocidades inferiores à região exterior.

É interessante apreciar que um caudal de injeção tão pequeno relativamente ao da corrente principal, da ordem dos 5% deste, pode tão rapidamente interferir com a totalidade do campo, decorridos somente 0.75 diâmetros equivalentes da conduta. Conclui-se que ocorre uma rápida interferência entre campos e consequentemente uma homogeneização entre os dois caudais.

Na Figura 5.70 tem-se os dados obtidos através da sonda DANTEC 54N10. Por um lado, a resolução espacial desta sonda é inferior à do tubo Pitot estático utilizado e, por outro, o seu atravancamento é excessivo para este tipo de medições. Finalmente, a resposta da 54N10 em velocidade sempre foi, dos dados da experiência, em excesso, relativamente a valores obtidos com outras técnicas.

Na Simulação *CFD*, Figura 5.71 e Figura 5.72, também é possível visualizar uma região central com défice de velocidades, com uma largura 800 mm e altura de 400 mm, perfeitamente simétrica, em relação a um eixo imaginário que cruza $y = 0$. As velocidades desse núcleo diferem por defeito da experiência de tubo de Pitot total, em cerca de 1 unidade. Já na região superior as

velocidades são muito semelhantes. Destaca-se também a existência de dois pares de vórtices simétricos, um em $(Y=500;Z=475)$ e outro em $(Y=-500;Z=475)$

5.3.3.2 Contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 60$

Na Figura 5.73 pode-se visualizar a distribuição dos contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 60$, medida essa, obtida recorrendo ao Tubo de Pitot estático.

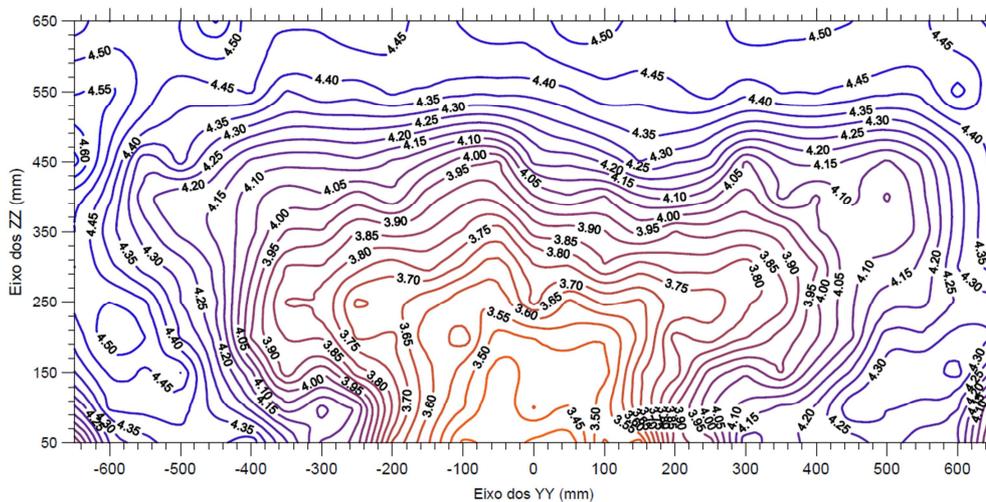


Figura 5.73 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 60 diâmetros – Pressão dinâmica – Experiência (Tabela B. 11) (Nunes, 2003)

Na Figura 5.74 pode-se visualizar a distribuição dos contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 60$, medida essa, obtida recorrendo à sonda DANTEC 54N10.

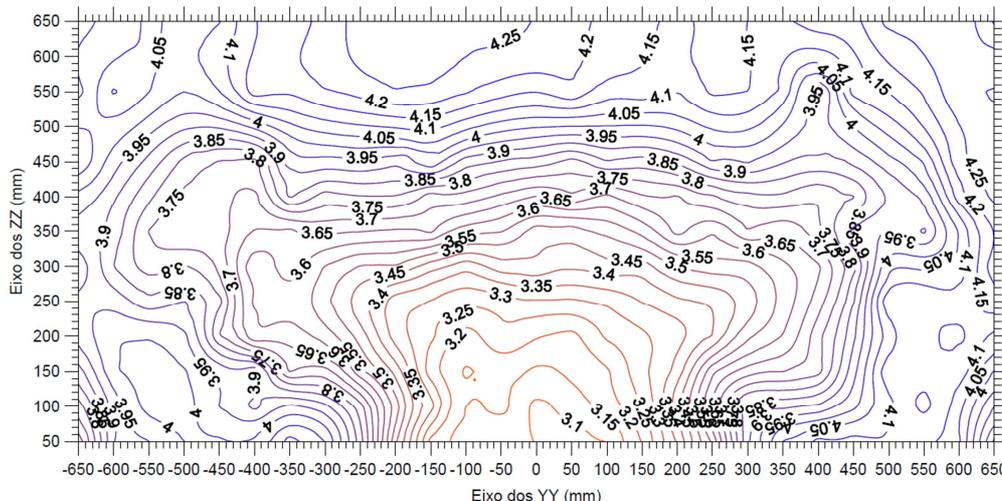


Figura 5.74 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 60 diâmetros – Fio quente Vertical – Experiência (Tabela B. 12) (Nunes, 2003)

Na Figura 5.75 pode-se visualizar a distribuição dos contornos das isovelocidades, em duas dimensões, para o plano $x/D = 60$, para os dados obtidos da simulação.

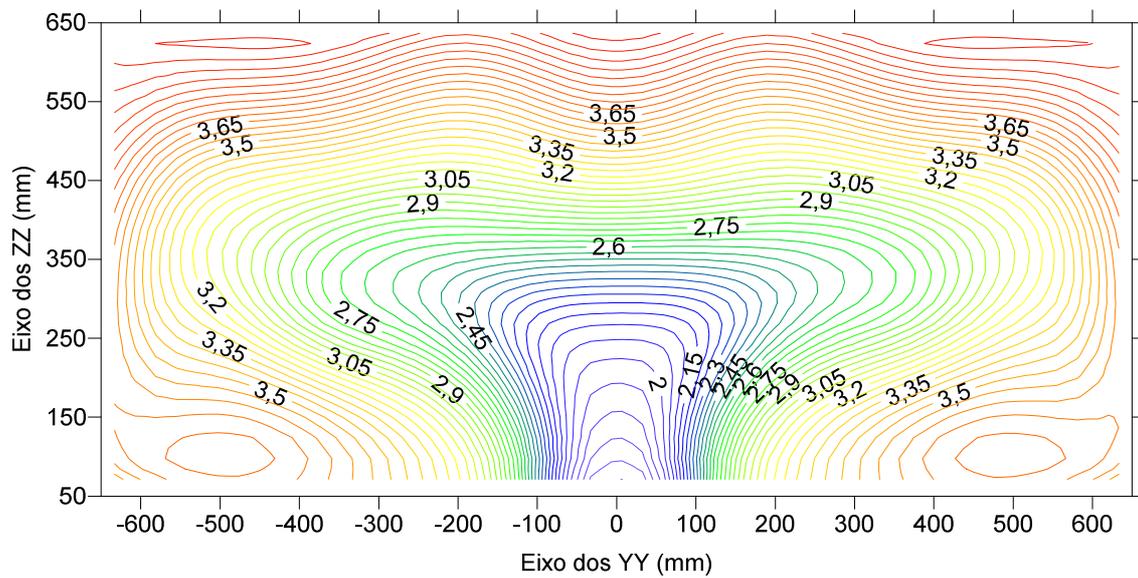


Figura 5.75 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 60 diâmetros – 2D – Simulação (Tabela B. 13)

Na Figura 5.76 pode-se visualizar a distribuição dos contornos das isovelocidades, em três dimensões, para o plano $x/D = 60$, para os dados obtidos da simulação.

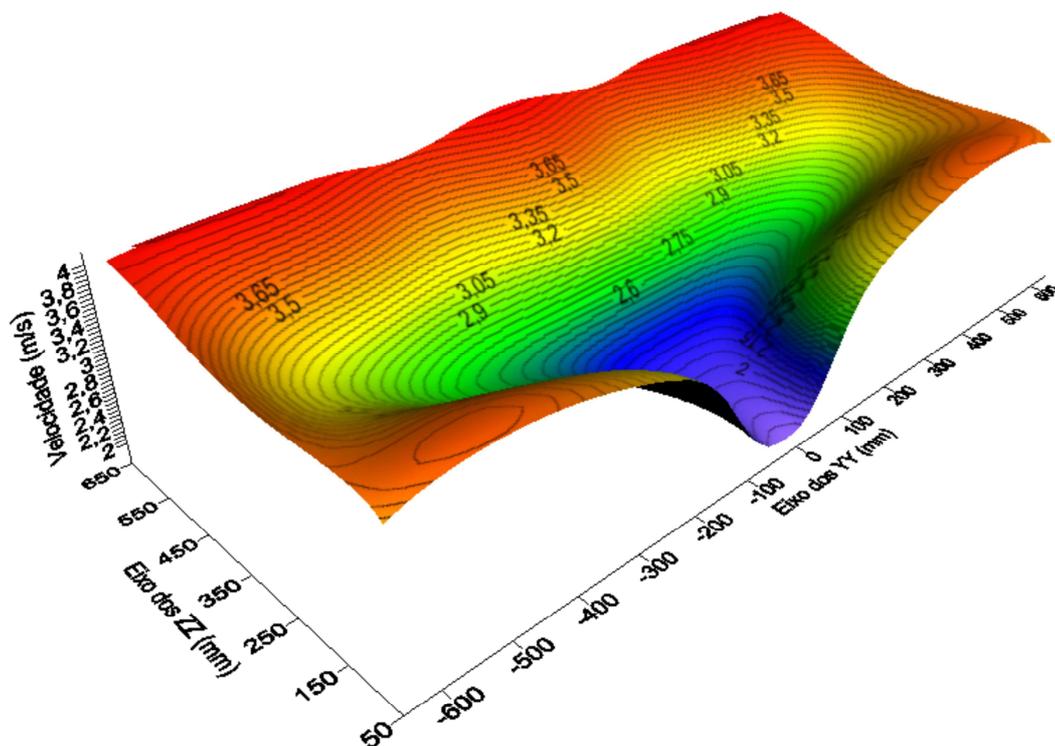


Figura 5.76 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 60 diâmetros – 3D – Simulação (Tabela B. 13)

A 60 diâmetros a jusante da injeção, o contorno corresponde à velocidade média de 4.12 ms^{-1} , calculada a partir das medições da pressão dinâmica local, segundo as curvas da Figura 5.73. Os resultados para o mesmo plano, a partir das medições com fio quente vertical, apresentados na Figura 5.74 mostram uma área de contorno da velocidade média (3.80 ms^{-1}) que condiz com o da pressão dinâmica média da figura anterior.

Constata-se que neste plano a velocidade inferior à média ocupa aproximadamente metade da grelha de medição. Se efetuar um comparativo com o plano obtido a 30 diâmetros o que mais se destaca é a diminuição do gradiente de velocidade, o que comprova que os fluidos homogeneizaram quase totalmente, e outro facto relevante é a organização das zonas de déficit de velocidade numa só forma de “cogumelo”.

Na Simulação *CFD*, Figura 5.75 e Figura 5.76, ilustra-se o comportamento da velocidade, sendo que as velocidades inferiores tendem a organizar-se numa único local, em forma de “cogumelo”, como evidenciado na experiência. A principal diferença é o valor absoluto da componente longitudinal da velocidade, que para baixas velocidades é menor em 1 unidade relativamente à experiência, e para altas velocidade é menor em cerca de 0,5 unidades. De salientar que o gráfico evidenciado tem um carácter perfeitamente simétrico em relação a $y = 0$.

5.3.3.3 Contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 120$

Na Figura 5.77 pode-se visualizar a distribuição dos contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 120$, medida essa, obtida recorrendo ao Tubo de Pitot estático.

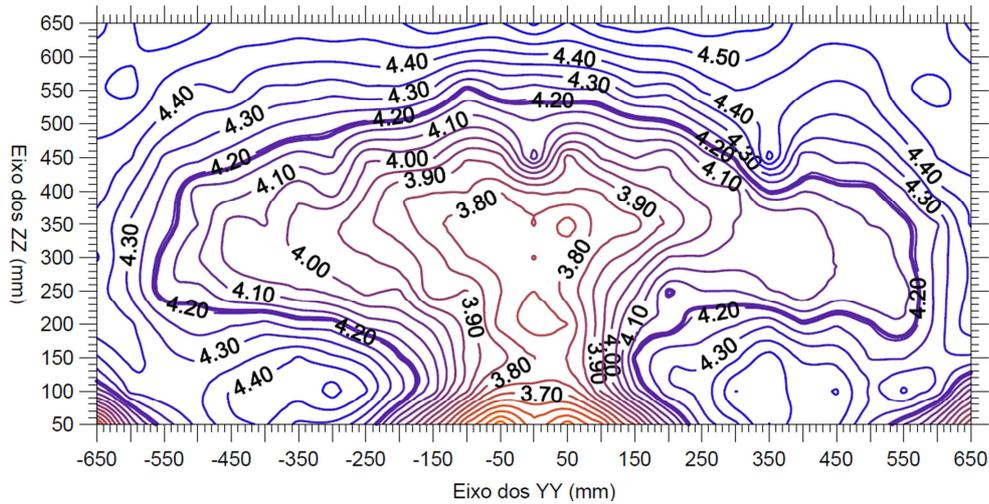


Figura 5.77 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 120 diâmetros – Pressão dinâmica – Experiência (Tabela B. 14)
(Nunes, 2003)

Na Figura 5.78 pode-se visualizar a distribuição dos contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 120$, medida essa, obtida recorrendo à sonda de fio quente vertical.

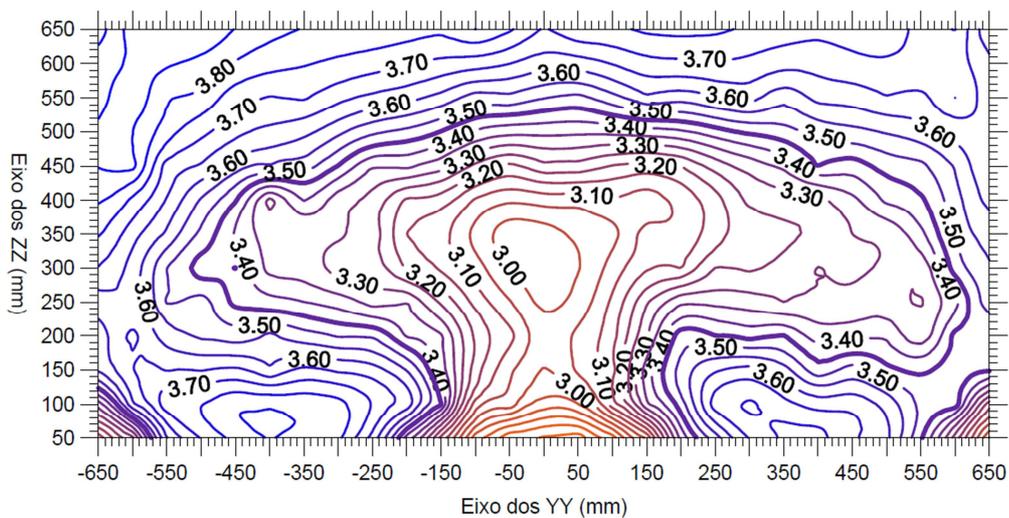


Figura 5.78 -.Perfil de velocidades – 13 jatos – 120 diâmetros – Fio quente Vertical – Experiência (Tabela B. 15)
(Nunes, 2003)

Na Figura 5.79 pode-se visualizar a distribuição dos contornos das isovelocidades, em duas dimensões, para o plano $x/D = 120$, para os dados obtidos da simulação.

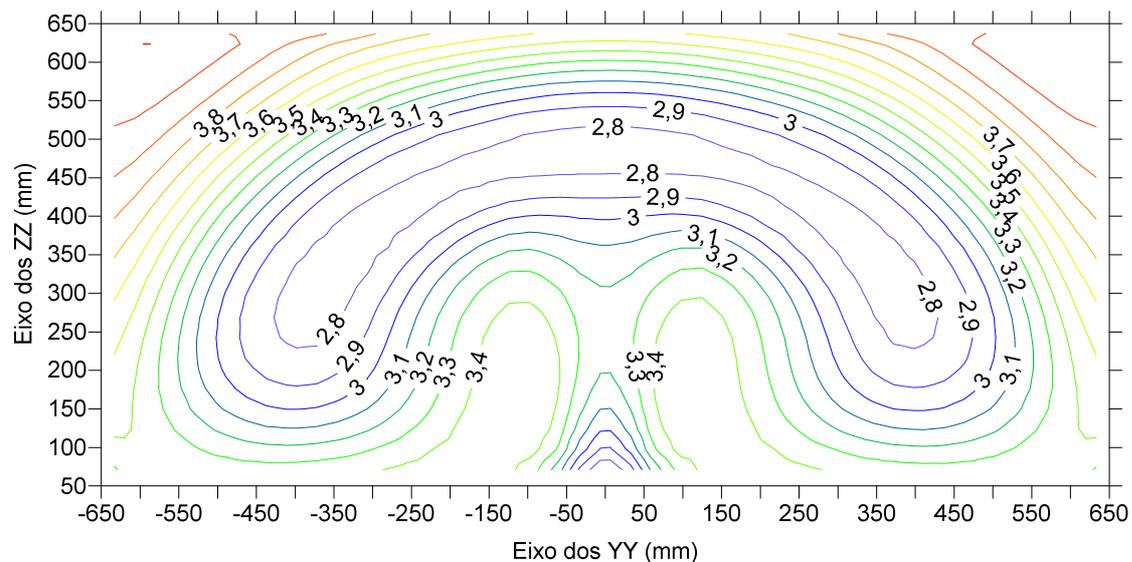


Figura 5.79 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 120 diâmetros – 2D – Simulação (Tabela B. 16)

Na Figura 5.80 pode-se visualizar a distribuição dos contornos das isovelocidades, em três dimensões, para o plano $x/D = 120$, para os dados obtidos da simulação.

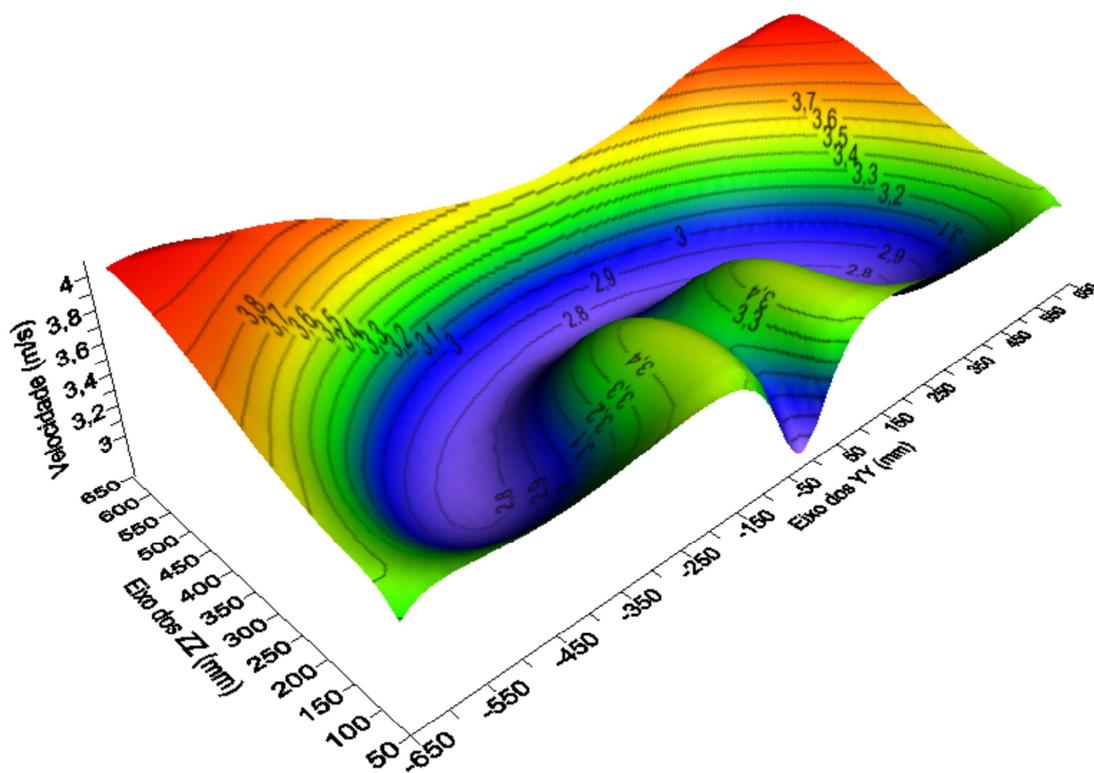


Figura 5.80 - Perfil de velocidades – 13 jatos – 120 diâmetros – 3D – Simulação (Tabela B. 16)

Na Figura 5.77 e Figura 5.78 mostram-se os contornos das isovelocidades para o plano $x/D = 120$, conforme medição em tubo de Pitot estático e anemometria de fio quente, respetivamente.

Ambos evidenciam o mesmo comportamento no que diz respeito à disposição das velocidades, só divergem nos resultados absolutos da velocidade. Com o último a ter valores inferiores ao primeiro.

Então este é talvez o facto mais notável de toda a investigação, aparentemente, decorridos 3 diâmetros equivalentes ao longo da conduta após a injeção (120D), a intensa ação de mistura e redistribuição de quantidade de movimento e de vorticidade faz coalescer as múltiplas regiões de contra-rotação em 2 zonas simetricamente dispostas relativamente ao plano central, ocupando praticamente toda a secção transversal, replicando a estrutura básica da injeção de jacto único.

A Simulação *CFD* representada na Figura 5.79 e Figura 5.80, demonstra um gradiente de velocidades perfeitamente simétrico em relação ao plano central. A primeira diferença que se destaca relativamente à experiência é a existência de baixas velocidades em zonas inferiores ($Y=-450; Z=200$), ou seja, as baixas velocidade dispõem-se em forma côncava na simulação, enquanto que na experiência as baixas velocidades dispõem-se em forma oval. Em termos de valores absolutos da componente longitudinal da velocidade os dados obtidos da simulação são semelhantes aos da experiência de sonda de fio quente vertical.

6 APONTAMENTOS FINAIS

6.1 Conclusões

O presente trabalho consistiu na simulação *CFD* do escoamento resultante da injeção transversal de um pequeno caudal de 13 jactos numa corrente uniforme a infinito, a partir da caracterização dos campos de velocidade e temperatura, em 3 planos transversais, situados a 30, 60 e 120 diâmetros a jusante da zona de injeção e os resultados foram posteriormente comparados com os dados obtidos do estudo experimental levado a cabo por Nunes (2003) no âmbito da tese de doutoramento. O principal foco foi a avaliação da extensão e da homogeneização dos dois fluxos, relevante, entre outros, no processo de correção dos parâmetros definidores de uma mistura de ar/vapor de água, em climatização.

Para além do programa principal, outros trabalhos complementares foram desenvolvidos no âmbito do estudo, começando por uma extensa revisão bibliográfica, da simulação *CFD* de cenários de climatização em espaços confinados, bem como, da simulação *CFD* da injeção jactos. Estas pesquisas serviram para detectar os parâmetros mais estudados e mais preponderantes, como também, para saber quais as condições a adoptar no programa *CFD*. Realizaram-se algumas simulações *CFD* preliminares de casos, ora teóricos, ora experimentais e compararam-se

os resultados, tendo em vista em adquirir competências e sensibilidade no manuseamento do programa, para aferição das técnicas a utilizar no programa principal.

Dos resultados obtidos ao longo de todo o esforço, apreciou-se a extensão da interação e a homogeneização dos dois fluxos e puderam extrair-se algumas conclusões significativas, encontrar-se outras tantas limitações e levantar-se algumas pistas para trabalho futuro sobre o tema. Um e outras são, agora, resumidamente apresentadas.

6.1.1 Estudos Preliminares

O primeiro estudo preliminar foi a simulação *CFD* de um escoamento laminar numa tubagem, foi possível perceber que o programa é bastante sensível ao refinamento da malha e esta deve ser mais refinada junto aos maiores gradientes de velocidade. Obteve-se resultados praticamente iguais aos dados teóricos à exceção da perda de carga, que variou ligeiramente.

O segundo estudo preliminar foi a simulação *CFD* de um escoamento turbulento numa tubagem, para $Re = 50\ 000$ e $Re = 500\ 000$. Foi necessário refinar muito a malha junto à parede, de acordo com o *y plus*, para capturar a região da subcamada viscosa. Os resultados obtidos foram comparados com um trabalho experimental de Laufer (1953) e obtiveram-se resultados muito próximos, à exceção da velocidade junto à parede, sendo que a condição de parede que forneceu melhores resultados foi a *standard-wall-function*.

O terceiro estudo preliminar foi a simulação *CFD* da injeção de um jato circular livre, o qual foi comparado com os dados experimentais obtidos por Nunes (2003). Foi bastante difícil obter-se uma aproximação fiel dos dados experimentais, testando várias configurações de malha e diversos modelos de turbulência, tendo obtido uma diferença máxima na velocidade axial grosseira, na ordem dos 10 m/s. Na região final a diferença era de apenas 5 m/s e a tendência da curva era semelhante. Por outras palavras, os valores absolutos da simulação divergiram um pouco do caso experimental, contudo o comportamento do fenómeno foi igual. Pode concluir-se que os resultados obtidos ilustram o que, normalmente, se encontra na literatura. As três principais zonas de pluma (cone potencial, zona de transição e escoamento completamente desenvolvido) foram identificadas. A semelhança dos perfis de velocidade adimensionais neste último e o seu percurso evolutivo desde a origem foram registados, verificando-se em concordância com os existentes

disponíveis. O mesmo aconteceu também com o decréscimo da velocidade máxima e os resultados da indução.

6.1.2 Injeção de Jato Único

O estudo preliminar consistiu na simulação *CFD* da injeção cruzada, de um jato único, o qual foi comparado com os dados experimentais obtidos por Nunes (2003). As comparações foram feitas em 2 planos transversais, a 30 e 60 diâmetros a jusante da injeção, para uma relação $R = U_j / U_\infty = 8$. Na definição dos parâmetros do programa, aconteceu um caso insólito, as condições de turbulência calculadas conforme a teoria forneceram piores resultados, que aquelas assumidas por defeito pelo programa. Portanto, optou-se pela utilização destas últimas. Depois procedeu-se ao refinamento da malha tendo sido obtida uma aproximação bastante próxima da experiência.

Na simulação à semelhança da experiência, verifica-se a encurvadura inicial da pluma, a existência de par de vórtices, a contorção do escoamento nas zonas mais afastadas da injeção, detecta-se que o fluido principal envolve a pluma, introduz-se pela região inferior para alimentá-la e ocorre a formação da extensa zona de mistura e a sua homogeneização.

Na simulação ao contrário da experiência, o par de vórtices existentes na região central tem valores de velocidade superiores à região periférica. Por outro lado na simulação não foram encontradas duas regiões de velocidade máxima abaixo daquele par, indicativas das fortes correntes de indução de fluido da corrente principal para alimentar a estrutura em contra-rotação.

A injeção transversal, mesmo com jato único, mostrou ser um processo eficaz de mistura, com a interação a alargar rapidamente a uma extensão significativa da secção transversal.

Na simulação à semelhança da experiência, após a primeira fase de alargamento rápido, a pluma altera-se e passa o par de vórtices a dominar o campo, não tendo sido possível, com as técnicas utilizadas, identificar, já a 30 diâmetros, um *locus* de velocidade máxima. Por isso, a taxa de alargamento da pluma decresce após a fase inicial.

Na simulação ao contrário da experiência não se verifica duas regiões de velocidades elevadas perfeitamente definidas, abaixo da estrutura de contra-rotação e simetricamente posicionadas relativamente ao plano central, alimentado pela corrente principal, a qual vai sendo assim induzida para o movimento de rotação. Por outro lado ao contrario da experiencia não se pode afirmar que, tão cedo quanto 30 diâmetros a jusante da injeção, já não é a pluma a misturar-se na corrente principal, mas está a ser arrastada para alimentar o movimento helicoidal dos dois vórtices.

6.1.3 Injeção Múltipla

A fase final do trabalho consistiu na simulação *CFD* da injeção de 13 jactos de 25 mm de diâmetro, agrupados em 3 linhas transversais de injeção a toda a largura da corrente, desfasados longitudinalmente, para as relações de injeção $R = 16, 8$ e 4 por linha, respetivamente de montante para jusante. Os resultados foram comparados com os dados experimentais obtidos por Nunes (2003). A comparação dos dados foi realizada, a partir dos valores das isovelocidades em 3 planos situados a 30, 60 e 120 diâmetros após a injeção.

Na simulação à semelhança da experiência, a interação entre o escoamento secundário e principal estende-se, desde logo a todo o campo, sendo a estrutura original das plumas progressiva e rapidamente dissipada, sendo difícil a sua identificação, mesmo a 30 diâmetros. Contudo, a diferença máxima na simulação foi de cerca de 1 m/s, ao passo que na experiência foi de 2 m/s.

A 120 diâmetros a jusante da injeção, também se obtiveram resultados semelhantes, já não é possível visualizar uma pluma individual, mas uma estrutura parecida com um jato único, com uma forma semelhante a uma árvore com copa larga, com o caule ladeado por duas regiões de elevada velocidade longitudinal, sendo esse mais alto na simulação. Tal fenómeno indica que o escoamento “exterior” é induzido lateralmente e de baixo para cima, para o interior da “copa” em contra-rotação, a qual redistribui posteriormente, a quantidade de movimento pelas restantes zonas do campo.

O caso estudado da injeção transversal de 13 jactos demonstra a coalescência dos 13 jatos numa única estrutura em todo o domínio e é semelhante ao estudo muito notório na comunidade científica, que aborda o enrolamento das folhas dos vórtices ao longo da envergadura de uma asa

finita em dois únicos vórtices marginais, em contra-rotação. Este método garante uma eficaz distribuição transversal das propriedades por todo o domínio, garantindo a excelência do método em processos de mistura rápida de um pequeno caudal numa corrente principal.

Um problema que é detetado é a longevidade do movimento em contra-rotação de um par de vórtices, como é reportado no trabalho da extensão na esteira de uma asa de um avião. Nesse sentido em algumas aplicações, será necessário, destruí-la mais a jusante.

Comparativamente com a alternativa de mistura das duas correntes em *plenum* comum, a injeção transversal mostra vantagens para pequenos caudais, por apresentar bons resultados com menos atravancamento e menores perdas de carga.

6.1.4 Temperaturas

A simulação *CFD* de temperatura para um jato mostrou que a 30D ocorre um alargamento da pluma que abrange quase metade da secção transversal e uma boa homogeneização, então a 120D ocorre o alargamento da pluma que abrange quase a totalidade da secção transversal e uma óptima homogeneização.

A simulação *CFD* de temperatura para 13 jatos mostrou que já a partir de 30D, ocorre um alargamento total da pluma e uma boa homogeneização.

Verifica-se que tanto para 1 e 13 jatos, quanto menor a temperatura injetada, mais alta é a posição da pluma a 120D a jusante da injeção, tal situação deve-se ao fenómeno da convecção natural.

6.2 Trabalhos Futuros

Sugiro, de modo a que os resultados das simulações *CFD* se aproximem mais do resultados da experiência, que se testem, outros modelos de turbulência, malhas com outro tipo de elementos e condições de turbulência com outros valores.

Pode-se utilizar o caso da injeção múltipla simulado e estudar o local aproximado em que ocorre a coalescência da vorticidade inicial, bem como, estudar a estrutura de contra-rotação, mais a jusante.

Podia-se fazer testes experimentais e simular em *CFD*, o cruzamento de jatos, com várias inclinações do jato secundário, uma placa com maior número de furos, vários caudais volúmicos de ar secundário, furos com diferentes diâmetros, diferentes medidas de atravancamento e estudar, a interação e homogeneização entre a mistura, secundária e principal.

REFERÊNCIAS

Alam, M.; Bala, B.; Huo, A. and Matin, M. (1991), *A model for the quality of life as a function of electrical energy consumption*, Elsevier, Volume 16, Issue 4, pp. 739 - 745.

Almeida, H. (1986), *Study of the interaction of a jet and a uniform stream using pulsed-wire anemometry*, PhD Thesis, University of London.

Altvater, E. (1995), *O preço da riqueza*, São Paulo, Editora UNESP.

ASHRAE (2001), *Handbook of fundamentals ASHRAE*.

ASHRAE (2005), *Handbook of fundamentals ASHRAE*.

ASHRAE (2009), *Handbook of fundamentals ASHRAE*.

Aziz, M.; Gad; Mohammed, E; M., I.; A., E. and Mohammed, R. (2012), *Experimental and numerical study of influence of air ceiling diffusers on room airflow characteristics*, Energy and Buildings, Volume 55, Issue 1, pp. 738 – 746.

Bellen, H. (2002), *Indicadores de sustentabilidade: uma análise comparativa*, Tese PhD, Universidade Federal de Santa Catarina.

Berg, J., Ormiston, S. and Soliman, H. (2006), *Prediction of the flow structure in a turbulent rectangular free jet*, International communications in heat and mass transfer, Volume 33, Issue 5, pp. 552 – 563.

Blazek, J. (2001), *Computational fluid dynamics: principles and applications*, Elsevier Science.

Caggese, O.; Gnaegi, G.; Hannema, G.; Terzis, A. and Ott, P. (2013), *Experimental and numerical investigation of a fully confined impingement round jet*, International journal of heat and mass transfer, Volume 65, pp. 873 – 882.

Catalina, T.; Virgone, J. and Kuznik, F. (2009), *Evaluation of thermal comfort using combined CFD and experimentation*, Building and Environment, Volume 44, Issue 1, pp. 1740 – 1750.

Cengel, Y. and Cimbala, J. (2006), *Flow in pipes*, McGraw – Hill, Inc, Issue 1.

Cengel, Y. and Ghajar, A. (2011), *Transferência de Calor e Massa*, McGraw – Hill, Inc, Issue 4.

Chougule , N.; Parishwad, G.; Gore, P.; Pagnis, S. and Sapali, S. (2011), *CFD analysis of multi-jet air impingement on flat plate*, Proceedings of the world congress on engineering, Issue 3, London, UK.

Date, A. (2005) *Introduction to computational fluid dynamics*, Cambridge University Press, UK.

Dumke, E. (2001), *Avaliação integrada da vila tecnológica de Curitiba*, Pós – Graduação, Curso de Arquitetura, UTP.

Einberg, G.; Hagstrom, K.; Mustakallio, P.; Kostela, H. and Holmberg, S. (2005), *CFD modelling of an industrial air diffuser-predicting velocity and temperature in the near zone*, Energy and Buildings, Volume 40, Issue 1.

Ferziger, J. H. and Peric, M. (2002), *Computational methods for fluid dynamics*, Springer, Issue 3.

FLUENT (2013), *ANSYS FLUENT User's Guide*, Fluent Inc.

Hirsch, C. (2007), *Numerical computation of internal and external flows*, Elsevier, Volume 1, Issue 2.

IPCC (2013), *Climate change 2013: The physical science basis*.

Kandakure, M. T.; Patkar, V. C. and Patwardhan, A. W. (2008), *Characteristics of turbulent confined jets*, Chemical Engineering and Processing, Volume 47, pp. 1234 – 1245.

Laufer, J. (1953), *The structure of turbulence in fully developed pipe flow*, Supersedes NACA TN 2954.

Li, Q.; Yoshino, H.; Moschida, A.; Lei, B.; Meng, Q.; Zhao, L. and Lun, Y. (2009), *CFD study of the thermal environment in an air-conditioned train station building*, Building and Environment, Volume 44, Issue 1.

Lo, L. J. and Novoselac, A. (2010), *Localized air-conditioning with occupancy control in an open office*, Building and Environment, Volume 42, Issue 1.

Magalhães, S.; Albuquerque, R. R.; Pinto, J. C. and Moreira, A. L. (2002), *Termorregulação*, Faculdade de Medicina, Universidade do Porto.

Markov, D. and Stankov, P. (2002), *Practical evaluation of the thermal comfort parameters*.

Nezu, L. and Tominaga, A. (2000), *Suirigaku*, Asakura Shoten, pp. 130 – 133.

Nunes, A. V. (2003), *Injecção e mistura de jactos em espaços confinados*, Tese PhD, Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Engenharia Mecânica, Guimarães.

Nunes, A. V. (2012), *Difusão do ar*, Universidade do Minho, Engenharia Mecânica, Guimarães.

Parvareh, A.; Rahimi, M.; Yarmohammadi, M. and Alsairafi, A. A. (2009), *Experimental and CFD study on the effect of jet position on reactant dispersion performance*, International communications in heat and mass transfer, Volume 36.

DGEG (2012), *Linhas de orientação para revisão dos planos nacionais de acção para as energias renováveis e para a eficiência energética*, Lisboa.

Ranade, V. V. (1996), *Towards better mixing protocols by designing spatially periodic flows - The case of a jet mixer*, Chemical Engineering Science, Volume 51, Issue 11, pp. 2637 – 2642.

Rossi, H. F.; Tibiriçá, Á. M.; Tibiriçá, A. C. e Campos, J. C. (2012), *Utilização de simulação CFD para análise de conforto térmico em um ambiente condicionado*, SIMMEC.

Ruas, Á. C. (2002), *Sistematização da avaliação de conforto térmico em ambientes edificados e sua aplicação num software*, Tese PhD, Universidade Estadual de Campinas.

Ruggeri, R. S.; Callaghan, E. E. and Bowden, D. T. (1950), *Penetration of air jets from circular, square and elliptical orifices directed perpendicularly to an air stream*, NACA, TN 2019.

Shi, Y.; Ray, M. B. and Mujumdar, A. S. (2002), *Computational study of impingement heat transfer under a turbulent slot jet*, Industrial and Engineering Chemistry, pp. 4643 – 4651.

Squire, H. B. (1950), *Jet flow and its effect on aircraft*, Aircraft Engineering, Volume 22.

Stamou, A. I.; Katsiris, I. and Schaelin, A. (2008), *Evaluation of thermal comfort in galatsi arena of the olympics*, Thermal Engineering, Volume 28. Issue 1, pp. 1740 – 1750.

Stoops, J. L. (2004), *A possible connection between thermal comfort and health*, Lawrence Berkeley National Laboratory.

Versteeg, H. K. and Malalaseka, W. (1995), *An introduction to computational fluids dynamics. The finite volume method*, Longman Scientific and Technical, England.

Wang, S. J. and Mujumdar, A. S. (2007), *Flow and mixing characteristics of multiple and multiset opposing jets*, Chemical Engineering and Processing, Volume 46, Issue 8, pp. 703 – 712.

WWF (2010), *Planeta Vivo Relatório 2010 (Biodiversidade, biocapacidade e desenvolvimento)*.

Anexos

Anexo A - Dados para Injeção Circular

Tabela A. 1 - Velocidades de um jato circular – Zonas próximas da tubeira

Nº Tomada	Dist. Eixo y (mm)	x - Distância ao longo da trajetória (m)										u (m/s)	
		0		0,1		0,2		0,4		0,5		0,7	0,7
		0	0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,4	0,4	0,5	0,5	0,7	0,7
1	-75					8,51	5,36	16,72	14,69	19,20	16,96	20,94	20,77
2	-70					12,13	7,58	19,58	16,96	21,22	18,96	22,54	22,43
3	-65					16,28	10,72	22,62	19,7	23,56	21,78	24,10	24,28
4	-60			14,89	6,57	21,72	15,63	25,67	22,75	26,07	25,44	25,61	23,68
5	-55			23,92	16,53	27,38	23,37	28,75	26,81	28,61	29,37	27,03	28,12
6	-50	0,00	52,26	34,15	32,4	33,13	31,72	31,92	31,72	31,11	31,72	28,37	30,57
7	-45	52,26	52,26	43,85	47,21	38,51	39,95	34,87	35,97	33,48	35,77	29,60	32,84
8	-40	52,26	52,26	49,28	52,26	42,64	46,9	37,69	39,4	35,66	38,85	30,72	34,54
9	-35	52,26	52,26	51,43	52,26	46,34	50,73	40,46	43,23	37,63	41,54	31,72	36,96
10	-30	52,26	52,26	52,03	52,26	48,84	51,99	42,78	46,59	39,36	44,06	32,60	39,77
11	-25	52,26	52,26	52,30	52,26	50,26	52,26	44,51	48,71	40,82	46,75	33,34	41,54
12	-20	52,26	52,26	52,39	52,26	51,37	52,26	45,40	50,3	42,01	48,56	33,96	43,4
13	-15	52,26	52,26	52,44	52,26	51,86	52,26	47,00	51,43	42,93	50,16	34,44	44,86
14	-10	52,26	52,26	52,46	52,26	52,05	52,26	47,81	51,99	43,57	51,15	34,77	46,13
15	-5	52,26	52,26	52,47	52,26	52,19	52,26	48,48	52,26	43,93	51,57	34,96	46,75
16	0	52,26	52,26	52,47	52,26	52,24	52,26	48,50	52,26	44,02	51,71	35,01	47,05
17	5	52,26	52,26	52,47	52,26	52,22	52,26	48,36	52,26	43,84	51,15	34,90	46,9
18	10	52,26	52,26	52,46	52,26	52,19	52,26	47,86	52,13	43,40	50,45	34,65	45,82
19	15	52,26	52,26	52,44	52,26	52,00	52,26	46,90	51,71	42,69	48,85	34,23	44,86
20	20	52,26	52,26	52,40	52,26	51,80	52,26	45,69	50,87	41,72	46,59	33,67	43,23
21	25	52,26	52,26	52,31	52,26	51,08	52,26	44,32	49,44	40,49	45,18	32,95	41,19
22	30	52,26	52,26	52,11	52,26	50,13	52,13	42,67	47,66	39,01	41,54	32,08	39,22
23	35	52,26	52,26	51,53	52,26	47,88	51,01	40,28	44,38	37,30	37,92	31,07	36,96
24	40	52,26	52,26	49,58	51,57	44,34	47,21	37,38	40,31	35,35	34,96	29,94	34,54
25	45	52,26	52,26	43,95	44,54	39,77	40,66	34,48	35,97	33,20	34,54	28,68	32,84
26	50	0,00	52,26	34,07	27,6	33,34	31,95	31,49	31,72	30,88	31,27	27,34	30,57
27	55			23,31	18,58	27,20	24,86	28,32	28,63	28,42	28,63	25,93	28,12
28	60			13,73	11,38	21,31	17,38	25,14	24,86	25,89	24,86	24,50	25,99
29	65					15,55	11,99	22,02	20,77	23,35	22,43	23,09	24,28
30	70					11,45	6,57	19,27	16,96	20,91	19,33	21,76	22,43
31	75					7,84	3,79	16,71	14,19	18,68	16,96	20,57	20,42

Tabela A. 2 - Velocidades adimensionais de um jato circular – Zonas próximas da tubeira

x/D - Distância adimensional ao longo da trajetória (número de diâmetros)										
	1,0	1,0	2,0	2,0	4,0	4,0	5,0	5,0	7,0	7,0
U_m	52,47	52,26	52,47	52,26	52,47	52,26	52,47	52,26	52,47	52,26
$U_m/2$	26,24	26,13	26,24	26,13	26,24	26,13	26,24	26,13	26,24	26,13
y_c	53,64	50,81	53,64	50,81	53,64	50,81	53,64	50,81	53,64	50,81

Velocidades e distâncias adimensionais																			
x/D - Distância adimensional ao longo da trajetória (número de diâmetros)																			
1,0		1,0		2,0		2,0		4,0		4,0		5,0		5,0		7,0		7,0	
y/y_c	u/U_m	y/y_c	u/U_m	y/y_c	u/U_m	y/y_c	u/U_m	y/y_c	u/U_m	y/y_c	u/U_m	y/y_c	u/U_m	y/y_c	u/U_m	y/y_c	u/U_m	y/y_c	u/U_m
-1,12	0,28	-1,18	0,13	-1,34	0,16	-1,39	0,10	-1,22	0,34	-1,29	0,28	-1,11	0,44	-1,28	0,33	-0,85	0,60	-1,12	0,44
-1,03	0,46	-1,08	0,32	-1,25	0,23	-1,29	0,15	-1,14	0,40	-1,20	0,32	-1,03	0,48	-1,19	0,37	-0,80	0,64	-1,04	0,48
-0,93	0,65	-0,98	0,62	-1,16	0,31	-1,20	0,21	-1,06	0,47	-1,11	0,38	-0,96	0,54	-1,11	0,42	-0,74	0,69	-0,97	0,52
-0,84	0,84	-0,89	0,90	-1,07	0,42	-1,11	0,30	-0,98	0,53	-1,03	0,44	-0,89	0,59	-1,02	0,49	-0,68	0,73	-0,90	0,50
-0,75	0,94	-0,79	1,00	-0,98	0,52	-1,02	0,45	-0,90	0,59	-0,94	0,51	-0,81	0,65	-0,94	0,57	-0,63	0,77	-0,82	0,60
-0,65	0,98	-0,69	1,00	-0,89	0,63	-0,92	0,61	-0,81	0,66	-0,86	0,61	-0,74	0,71	-0,85	0,61	-0,57	0,81	-0,75	0,65
-0,56	0,99	-0,59	1,00	-0,80	0,74	-0,83	0,76	-0,73	0,72	-0,77	0,69	-0,66	0,76	-0,77	0,69	-0,51	0,85	-0,67	0,70
-0,47	1,00	-0,49	1,00	-0,72	0,82	-0,74	0,90	-0,65	0,78	-0,69	0,75	-0,59	0,81	-0,68	0,75	-0,45	0,88	-0,60	0,73
-0,37	1,00	-0,39	1,00	-0,63	0,89	-0,65	0,97	-0,57	0,83	-0,60	0,83	-0,52	0,85	-0,60	0,80	-0,40	0,91	-0,52	0,79
-0,28	1,00	-0,30	1,00	-0,54	0,93	-0,55	0,99	-0,49	0,88	-0,51	0,89	-0,44	0,89	-0,51	0,85	-0,34	0,93	-0,45	0,85
-0,19	1,00	-0,20	1,00	-0,45	0,96	-0,46	1,00	-0,41	0,92	-0,43	0,93	-0,37	0,93	-0,43	0,90	-0,28	0,95	-0,37	0,88
-0,09	1,00	-0,10	1,00	-0,36	0,98	-0,37	1,00	-0,33	0,94	-0,34	0,96	-0,30	0,95	-0,34	0,94	-0,23	0,97	-0,30	0,92
0,00	1,00	0,00	1,00	-0,27	0,99	-0,28	1,00	-0,24	0,97	-0,26	0,98	-0,22	0,98	-0,26	0,97	-0,17	0,98	-0,22	0,95
0,09	1,00	0,10	1,00	-0,18	1,00	-0,18	1,00	-0,16	0,99	-0,17	0,99	-0,15	0,99	-0,17	0,99	-0,11	0,99	-0,15	0,98
0,19	1,00	0,20	1,00	-0,09	1,00	-0,09	1,00	-0,08	1,00	-0,09	1,00	-0,07	1,00	-0,09	1,00	-0,06	1,00	-0,07	0,99
0,28	1,00	0,30	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
0,37	1,00	0,39	1,00	0,09	1,00	0,09	1,00	0,08	1,00	0,09	1,00	0,07	1,00	0,09	0,99	0,06	1,00	0,07	1,00
0,47	1,00	0,49	1,00	0,18	1,00	0,18	1,00	0,16	0,99	0,17	1,00	0,15	0,99	0,17	0,98	0,11	0,99	0,15	0,97
0,56	0,99	0,59	1,00	0,27	1,00	0,28	1,00	0,24	0,97	0,26	0,99	0,22	0,97	0,26	0,94	0,17	0,98	0,22	0,95
0,65	0,98	0,69	1,00	0,36	0,99	0,37	1,00	0,33	0,94	0,34	0,97	0,30	0,95	0,34	0,90	0,23	0,96	0,30	0,92
0,75	0,94	0,79	0,99	0,45	0,98	0,46	1,00	0,41	0,91	0,43	0,95	0,37	0,92	0,43	0,87	0,28	0,94	0,37	0,88
0,84	0,84	0,89	0,85	0,54	0,96	0,55	1,00	0,49	0,88	0,51	0,91	0,44	0,89	0,51	0,80	0,34	0,92	0,45	0,83
0,93	0,65	0,98	0,53	0,63	0,92	0,65	0,98	0,57	0,83	0,60	0,85	0,52	0,85	0,60	0,73	0,40	0,89	0,52	0,79
1,03	0,44	1,08	0,36	0,72	0,85	0,74	0,90	0,65	0,77	0,69	0,77	0,59	0,80	0,68	0,68	0,45	0,86	0,60	0,73
1,12	0,26	1,18	0,22	0,80	0,76	0,83	0,78	0,73	0,71	0,77	0,69	0,66	0,75	0,77	0,67	0,51	0,82	0,67	0,70
				0,89	0,64	0,92	0,61	0,81	0,65	0,86	0,61	0,74	0,70	0,85	0,60	0,57	0,78	0,75	0,65
				0,98	0,52	1,02	0,48	0,90	0,58	0,94	0,55	0,81	0,65	0,94	0,55	0,63	0,74	0,82	0,60
				1,07	0,41	1,11	0,33	0,98	0,52	1,03	0,48	0,89	0,59	1,02	0,48	0,68	0,70	0,90	0,55
				1,16	0,30	1,20	0,23	1,06	0,45	1,11	0,40	0,96	0,53	1,11	0,43	0,74	0,66	0,97	0,52
				1,25	0,22	1,29	0,13	1,14	0,40	1,20	0,32	1,03	0,47	1,19	0,37	0,80	0,62	1,04	0,48
				1,34	0,15	1,39	0,07	1,22	0,34	1,29	0,27	1,11	0,42	1,28	0,33	0,85	0,59	1,12	0,43

Tabela A. 3 - Isovelocidades de um jato circular – Zonas próximas da tubeira

		<i>y/D</i> - Distâncias Adimensionais ao eixo															
		Isovelocidades															
		1,00	1,00	0,95	0,95	0,9	0,9	0,7	0,7	0,5	0,5	0,3	0,3	0,1	0,1	0	0
<i>x/D</i> - Distâncias adimensionais ao longo da trajetória	0,5	0,00	0,00	0,25	0,25	0,28	0,27	0,39	0,36	0,51	0,45	0,62	0,54	0,74	0,63	0,79	0,68
	1	0,00	0,00	0,24	0,24	0,27	0,27	0,40	0,38	0,52	0,49	0,65	0,59	0,78	0,70	0,84	0,76
	1,5	0,00	0,00	0,23	0,24	0,26	0,27	0,40	0,40	0,53	0,52	0,66	0,65	0,79	0,77	0,86	0,84
	2	0,00	0,00	0,22	0,23	0,25	0,26	0,40	0,39	0,54	0,51	0,68	0,63	0,82	0,75	0,89	0,81
	3	0,00	0,00	0,23	0,23	0,27	0,26	0,41	0,39	0,55	0,51	0,69	0,63	0,82	0,75	0,89	0,81
	4,0	0,00	0,00	0,27	0,23	0,30	0,26	0,43	0,39	0,56	0,51	0,70	0,63	0,83	0,75	0,89	0,81
	4,5	0,00	0,00	0,29	0,24	0,32	0,27	0,45	0,39	0,58	0,51	0,70	0,63	0,83	0,75	0,89	0,81
	5,0	0,00	0,00	0,32	0,24	0,35	0,27	0,47	0,39	0,59	0,51	0,71	0,63	0,83	0,75	0,89	0,81
	6,0	0,00	0,00	0,38	0,26	0,41	0,29	0,52	0,40	0,63	0,52	0,73	0,64	0,84	0,76	0,89	0,81
	7,0	0,00	0,00	0,44	0,29	0,47	0,32	0,56	0,43	0,66	0,54	0,75	0,65	0,85	0,76	0,89	0,81
	8	0,00	0,00	0,48	0,34	0,50	0,36	0,59	0,46	0,68	0,56	0,76	0,66	0,85	0,76	0,89	0,81

Tabela A. 4 - Perfil de velocidades – Jato circular Φ 100 mm e velocidade de 52.6 m/s

Velocidades de um jacto circular (m/s)										
Dist. Eixo jacto y (mm)	x - Distância ao longo da trajectória (m)									
	1	1	1,5	1,5	2	2	2,5	2,5	3	3
-375									4,00	4,48
-350							3,86	2,59	4,39	5,18
-325							4,39	3,66	4,81	5,18
-300					4,24	2,58	4,96	3,66	5,24	5,79
-275					5,11	2,58	5,54	5,17	5,66	5,79
-250					6,01	3,65	6,13	6,33	6,08	6,34
-225			5,52	2,58	6,91	5,17	6,69	7,31	6,47	6,85
-200			7,05	4,47	7,80	6,83	7,23	8,58	6,84	7,76
-175			8,71	6,33	8,66	8,17	7,72	9,32	7,17	8,18
-150			10,39	8,17	9,46	10,01	8,16	10,34	7,46	8,96
-125			12,00	11,26	10,19	12,39	8,54	11,27	7,71	9,68
-100	15,49	6,83	13,42	14,15	10,82	13,91	8,85	12,40	7,92	10,35
-75	19,51	12,66	14,59	17,33	11,33	15,71	9,10	13,18	8,08	10,98
-50	22,60	19,16	15,43	20,99	11,70	17,33	9,27	13,92	8,19	11,28
-25	24,73	26,22	15,92	23,39	11,93	18,45	9,38	14,16	8,26	11,57
0	25,55	36,72	16,02	24,64	12,01	18,98	9,41	14,40	8,28	12,14
25	24,76	26,09	15,77	24,10	11,92	18,45	9,37	14,40	8,25	11,86
50	22,36	18,98	15,18	21,46	11,68	17,14	9,25	14,16	8,17	11,57
75	18,85	12,66	14,30	18,81	11,29	14,61	9,06	13,18	8,04	10,98
100	15,28	6,33	13,19	15,06	10,76	12,66	8,80	12,13	7,87	10,35
125			11,91	11,84	10,11	10,65	8,48	10,97	7,65	9,68
150			10,49	9,31	9,35	9,31	8,09	10,34	7,39	9,33
175			8,96	7,31	8,52	7,75	7,64	9,32	7,09	8,96
200			7,29	5,17	7,63	6,33	7,15	8,18	6,76	8,18
225			5,40	3,65	6,72	5,78	6,61	7,76	6,39	7,32
250				3,65	5,82	4,47	6,04	6,84	5,99	6,85
275					4,96	2,58	5,45	5,17	5,57	6,34
300					4,16	2,58	4,86	5,17	5,14	6,34
325							4,29	4,48	4,72	5,18
350							3,76	3,66	4,30	5,18
375									3,92	4,48

Tabela A. 5 - 1ª Adimensionalização de um jato circular - $x/D \geq 10$ diâmetros

		<i>u/U</i> - Velocidades adimensionais									
		<i>x/D</i> - Distância adimensional ao longo da trajetória (número de diâmetros)									
		10,0	10,0	15,0	15,0	20,0	20,0	25,0	25,0	30,0	30,0
<i>y/D</i> - Distância adimensional ao eixo	-3,75									0,08	0,09
	-3,5							0,07	0,05	0,08	0,10
	-3,25							0,08	0,07	0,09	0,10
	-3					0,08	0,05	0,09	0,07	0,10	0,11
	-2,75					0,10	0,05	0,11	0,10	0,11	0,11
	-2,5					0,11	0,07	0,12	0,12	0,12	0,12
	-2,25			0,10	0,05	0,13	0,10	0,13	0,14	0,12	0,13
	-2			0,13	0,09	0,15	0,13	0,14	0,16	0,13	0,15
	-1,75			0,17	0,12	0,16	0,16	0,15	0,18	0,14	0,16
	-1,5			0,20	0,16	0,18	0,19	0,16	0,20	0,14	0,17
	-1,25			0,23	0,21	0,19	0,24	0,16	0,21	0,15	0,18
	-1	0,29	0,13	0,26	0,27	0,21	0,26	0,17	0,24	0,15	0,20
	-0,75	0,37	0,24	0,28	0,33	0,22	0,30	0,17	0,25	0,15	0,21
	-0,5	0,43	0,36	0,29	0,40	0,22	0,33	0,18	0,26	0,16	0,21
	-0,25	0,47	0,50	0,30	0,44	0,23	0,35	0,18	0,27	0,16	0,22
	0	0,49	0,70	0,30	0,47	0,23	0,36	0,18	0,27	0,16	0,23
	0,25	0,47	0,50	0,30	0,46	0,23	0,35	0,18	0,27	0,16	0,23
	0,5	0,43	0,36	0,29	0,41	0,22	0,33	0,18	0,27	0,16	0,22
	0,75	0,36	0,24	0,27	0,36	0,21	0,28	0,17	0,25	0,15	0,21
	1	0,29	0,12	0,25	0,29	0,20	0,24	0,17	0,23	0,15	0,20
	1,25			0,23	0,23	0,19	0,20	0,16	0,21	0,15	0,18
	1,5			0,20	0,18	0,18	0,18	0,15	0,20	0,14	0,18
	1,75			0,17	0,14	0,16	0,15	0,15	0,18	0,13	0,17
	2			0,14	0,10	0,15	0,12	0,14	0,16	0,13	0,16
2,25			0,10	0,07	0,13	0,11	0,13	0,15	0,12	0,14	
2,5				0,07	0,11	0,09	0,11	0,13	0,11	0,13	
2,75					0,09	0,05	0,10	0,10	0,11	0,12	
3					0,08	0,05	0,09	0,10	0,10	0,12	
3,25							0,08	0,09	0,09	0,10	
3,5							0,07	0,07	0,08	0,10	
3,75							0,00	0,07	0,07	0,09	

Tabela A. 6 - 2ª Adimensionalização de um jato circular - $x/D \geq 10$ diâmetros

x/D - Distância adimensional ao longo da trajetória (número de diâmetros)																				
10,0		10,0		15,0		15,0		20,0		20,0		25,0		25,0		30,0		30,0		
y/y_c	u/U_{max}	y/yc	u/Umax	y/yc	u/U_{max}	y/yc	u/Umax													
-0,85	0,61	-1,91	0,19	-1,19	0,34	-1,86	0,10	-1,22	0,35	-2,05	0,14	-1,14	0,41	-1,46	0,18	-1,04	0,48	-1,23	0,37	
-0,64	0,76	-1,43	0,34	-1,06	0,44	-1,65	0,18	-1,12	0,43	-1,87	0,14	-1,06	0,47	-1,35	0,25	-0,97	0,53	-1,14	0,43	
-0,43	0,88	-0,95	0,52	-0,93	0,54	-1,44	0,26	-1,02	0,50	-1,70	0,19	-0,98	0,53	-1,25	0,25	-0,90	0,58	-1,06	0,43	
-0,21	0,97	-0,48	0,71	-0,79	0,65	-1,24	0,33	-0,92	0,58	-1,53	0,27	-0,90	0,59	-1,14	0,36	-0,83	0,63	-0,98	0,48	
0,00	1,00	0,00	1,00	-0,66	0,75	-1,03	0,46	-0,82	0,65	-1,36	0,36	-0,82	0,65	-1,04	0,44	-0,76	0,68	-0,90	0,48	
0,21	0,97	0,48	0,71	-0,53	0,84	-0,82	0,57	-0,71	0,72	-1,19	0,43	-0,73	0,71	-0,94	0,51	-0,69	0,73	-0,82	0,52	
0,43	0,88	0,95	0,52	-0,40	0,91	-0,62	0,70	-0,61	0,79	-1,02	0,53	-0,65	0,77	-0,83	0,60	-0,62	0,78	-0,74	0,56	
0,64	0,74	1,43	0,34	-0,26	0,96	-0,41	0,85	-0,51	0,85	-0,85	0,65	-0,57	0,82	-0,73	0,65	-0,55	0,83	-0,65	0,64	
0,85	0,60	1,91	0,17	-0,13	0,99	-0,21	0,95	-0,41	0,90	-0,68	0,73	-0,49	0,87	-0,62	0,72	-0,48	0,87	-0,57	0,67	
		0,00	1,00	0,00	1,00	-0,31	0,94	-0,51	0,83	-0,41	0,91	-0,52	0,78	-0,42	0,90	-0,49	0,74	-0,49	0,74	
		0,13	0,98	0,21	0,98	-0,20	0,97	-0,34	0,91	-0,33	0,94	-0,42	0,86	-0,35	0,93	-0,41	0,80	-0,41	0,80	
		0,26	0,95	0,41	0,87	-0,10	0,99	-0,17	0,97	-0,24	0,97	-0,31	0,92	-0,28	0,96	-0,33	0,85	-0,33	0,85	
		0,40	0,89	0,62	0,76	0,00	1,00	0,00	1,00	-0,16	0,99	-0,21	0,97	-0,21	0,98	-0,21	0,98	-0,25	0,90	
		0,53	0,82	0,82	0,61	0,10	0,99	0,17	0,97	-0,08	1,00	-0,10	0,98	-0,14	0,99	-0,14	0,99	-0,16	0,93	
		0,66	0,74	1,03	0,48	0,20	0,97	0,34	0,90	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	-0,07	1,00	-0,08	0,95	
		0,79	0,65	1,24	0,38	0,31	0,94	0,51	0,77	0,08	1,00	0,10	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	
		0,93	0,56	1,44	0,30	0,41	0,90	0,68	0,67	0,16	0,98	0,21	0,98	0,07	1,00	0,07	1,00	0,08	0,98	
		1,06	0,45	1,65	0,21	0,51	0,84	0,85	0,56	0,24	0,96	0,31	0,92	0,14	0,99	0,16	0,95	0,16	0,95	
		1,19	0,34	1,86	0,15	0,61	0,78	1,02	0,49	0,33	0,94	0,42	0,84	0,21	0,97	0,25	0,90	0,25	0,90	
				2,06	0,15	0,71	0,71	1,19	0,41	0,41	0,90	0,52	0,76	0,28	0,95	0,33	0,85	0,33	0,85	
						0,82	0,64	1,36	0,33	0,49	0,86	0,62	0,72	0,35	0,93	0,41	0,80	0,41	0,80	
						0,92	0,56	1,53	0,30	0,57	0,81	0,73	0,65	0,42	0,89	0,49	0,77	0,49	0,77	
						1,02	0,48	1,70	0,24	0,65	0,76	0,83	0,57	0,48	0,86	0,57	0,74	0,57	0,74	
						1,12	0,41	1,87	0,14	0,73	0,70	0,94	0,54	0,55	0,82	0,65	0,67	0,65	0,67	
						1,22	0,35	2,05	0,14	0,82	0,64	1,04	0,48	0,62	0,77	0,74	0,60	0,74	0,60	
										0,90	0,58	1,14	0,36	0,69	0,72	0,82	0,56	0,82	0,56	
										0,98	0,52	1,25	0,36	0,76	0,67	0,90	0,52	0,90	0,52	
										1,06	0,46	1,35	0,31	0,83	0,62	0,98	0,52	0,98	0,52	
										1,14	0,40	1,46	0,25	0,90	0,57	1,06	0,43	1,06	0,43	
														0,97	0,52	1,14	0,43	1,14	0,43	
															1,04	0,47	1,23	0,37	1,23	0,37

Tabela A. 7 - Isovelocidades de um jato circular

		y/D - Distâncias Adimensionais ao eixo											
		Isovelocidades											
		0,9	0,9	0,7	0,7	0,5	0,5	0,3	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0
x/D - Distâncias adimensionais ao longo da trajetória	10	0,43	0,09	0,82	0,26	1,27	0,52	1,73	0,81	2,19	1,05	2,42	1,17
	12,5	0,51	0,34	0,94	0,70	1,30	1,05	1,74	1,45	2,21	1,97	2,43	2,10
	15	0,71	0,43	1,37	0,85	2,01	1,21	2,53	1,74	3,17	2,34	3,49	2,59
	17,5	0,90	0,51	1,62	1,04	2,20	1,45	3,02	1,94	3,78	2,50	4,16	2,75
	20	0,98	0,51	1,78	0,92	2,45	1,47	3,32	2,27	4,15	2,86	4,57	3,17
	22,5	1,08	0,57	1,98	1,28	2,72	1,95	3,67	2,76	4,59	3,72	5,05	4,12
	25,0	1,26	0,80	2,26	1,57	3,07	2,40	4,22	3,30	5,28	4,15	5,81	4,58
	27,5	1,29	0,46	2,39	1,19	3,28	2,12	4,50	3,18	5,63	4,19	6,20	4,67
	30,0	1,45	0,77	2,62	1,90	3,61	3,06	5,10	4,10	6,39	5,23	7,04	5,79

Anexo B - Dados para Injeção Transversal

Tabela B. 1 - Dados para o perfil de velocidades – 1 jato – 30 diâmetros – Pressão total

Altura ao chão do túnel principal - z (mm)		Distância Transversal - v (mm)												ΔH (mmH.O)		u (m/s)			
		-150		-100		-50		0 - CL		50		100		150					
		ΔH	u	ΔH	u	ΔH	u	ΔH	u	ΔH	u	ΔH	u	ΔH	u	ΔH	u	ΔH	u
150	3.00	7.0	3.09	7.1	2.98	6.9	2.81	6.7	2.90	6.9	3.00	7.0	3.18	7.2					
200	3.18	7.2	3.30	7.3	3.10	7.1	2.90	6.9	3.08	7.1	3.00	7.0	3.08	7.1					
250	3.20	7.2	3.20	7.2	3.20	7.2	2.90	6.9	2.85	6.8	2.90	6.9	3.00	7.0					
300	3.15	7.1	2.87	6.8	2.70	6.6	2.75	6.7	2.53	6.4	2.70	6.6	2.95	6.9					
350	3.09	7.1	3.01	7.0	2.87	6.8	2.81	6.7	2.73	6.7	2.86	6.8	3.00	7.0					
400	3.04	7.0	3.05	7.0	2.90	6.9	2.91	6.9	2.98	6.9	3.00	7.0	3.05	7.0					
450	3.05	7.0	3.04	7.0	3.02	7.0	3.02	7.0	3.07	7.1	3.10	7.1	3.08	7.1					

Tabela B. 2 - Dados para o perfil de velocidades – 1 jato – 30 diâmetros – Fio quente vertical

Altura ao chão do túnel principal - z (mm)		Distância Transversal - y (mm)																		ΔV (volt)		u (m/s)									
		-450		-350		-250		-150		-100		-50		0 - CL		50		100		150		250		350		450					
		ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u		
150	1,86	7,03	1,85	6,78	1,85	6,87	1,85	6,84	1,85	6,85	1,85	6,76	1,84	6,57	1,85	6,81	1,85	6,85	1,85	6,89	1,85	6,89	1,85	6,83	1,85	6,79	1,85	6,68			
200	1,86	7,04	1,85	6,82	1,85	6,94	1,86	7,00	1,86	7,18	1,86	6,96	1,84	6,50	1,85	6,71	1,85	6,87	1,85	6,86	1,85	6,86	1,85	6,83	1,85	6,79	1,85	6,68			
250	1,86	6,99	1,85	6,89	1,85	6,93	1,85	6,93	1,86	7,13	1,86	7,01	1,84	6,45	1,84	6,50	1,85	6,79	1,85	6,84	1,85	6,84	1,85	6,82	1,85	6,82	1,85	6,74			
300	1,86	6,98	1,86	6,96	1,86	6,94	1,86	6,96	1,85	6,80	1,84	6,65	1,84	6,40	1,83	6,31	1,85	6,67	1,85	6,81	1,85	6,81	1,85	6,85	1,85	6,85	1,85	6,73			
350	1,86	6,99	1,86	6,97	1,85	6,94	1,85	6,79	1,85	6,73	1,84	6,59	1,83	6,35	1,84	6,40	1,85	6,75	1,85	6,80	1,85	6,80	1,85	6,86	1,85	6,83	1,85	6,75			
400	1,86	7,00	1,85	6,91	1,85	6,90	1,85	6,69	1,85	6,69	1,84	6,60	1,84	6,57	1,84	6,64	1,85	6,71	1,85	6,70	1,85	6,87	1,85	6,87	1,85	6,84	1,85	6,73			
450	1,86	7,04	1,86	6,95	1,85	6,93	1,84	6,64	1,84	6,58	1,84	6,58	1,84	6,56	1,84	6,64	1,85	6,68	1,85	6,73	1,85	6,85	1,85	6,85	1,85	6,85	1,85	6,79			
550	1,86	7,02	1,86	6,99	1,85	6,88	1,85	6,86	1,85	6,85	1,85	6,77	1,85	6,80	1,85	6,79	1,85	6,83	1,85	6,86	1,85	6,80	1,85	6,80	1,85	6,72	1,85	6,73			
650	1,86	6,96	1,86	6,98	1,85	6,86	1,85	6,85	1,85	6,84	1,85	6,83	1,85	6,81	1,85	6,78	1,85	6,81	1,85	6,83	1,85	6,82	1,85	6,82	1,85	6,71	1,85	6,71			

Tabela B. 3 - Dados para o perfil de velocidades – 1 jato – 30 diâmetros – Simulação (dados truncados)

Altura ao chão do túnel principal - z (mm)		Distância Transversal - v (mm)												u (m/s)	
		-439	-362	-248	-133	-95	-57	19	57	95	133	248	362	439	
152	6.85	6.85	6.84	6.79	6.74	6.63	6.53	6.63	6.74	6.79	6.84	6.85	6.85		
190	6.86	6.86	6.85	6.83	6.77	6.64	6.52	6.64	6.77	6.83	6.85	6.86	6.86		
267	6.87	6.87	6.89	6.96	6.92	6.70	6.50	6.69	6.90	6.95	6.89	6.87	6.87		
305	6.88	6.88	6.91	7.04	7.02	6.75	6.48	6.73	6.99	7.02	6.90	6.88	6.88		
343	6.88	6.88	6.92	7.11	7.11	6.80	6.46	6.78	7.07	7.08	6.92	6.88	6.88		
381	6.88	6.89	6.92	7.13	7.14	6.87	6.49	6.84	7.11	7.10	6.92	6.89	6.88		
457	6.88	6.89	6.91	7.05	7.11	7.06	6.89	7.04	7.09	7.04	6.91	6.89	6.88		
533	6.88	6.89	6.90	6.94	6.97	6.99	7.00	6.99	6.97	6.94	6.90	6.89	6.88		
648	6.87	6.87	6.87	6.87	6.87	6.87	6.87	6.87	6.87	6.87	6.87	6.87	6.87		

Tabela B. 4 - Pressões estáticas – 1 jato – 30 diâmetros – Experiência

		Pressões estáticas (Pa)						
		Distância Transversal - y (mm)						
		-150	-100	-50	0 - CL	50	100	150
Altura ao chão do túnel principal - z (mm)	150	0,22	0,23	0,20	0,17	0,25	0,24	0,23
	200	0,14	0,11	0,07	0,08	0,15	0,13	0,18
	250	0,04	-0,08	-0,20	-0,22	-0,11	-0,05	0,11
	300	0,02	-0,20	-0,38	-0,49	-0,38	-0,17	0,04
	350	0,15	0,02	-0,10	-0,16	-0,13	-0,08	0,07
	400	0,19	0,15	0,10	0,03	0,08	0,12	0,17
	450	0,23	0,21	0,22	0,21	0,22	0,22	0,22

Tabela B. 5 - Pressões estáticas – 1 jato – 30 diâmetros – Simulação (dados truncados)

		Pressões estáticas (Pa)						
		Distância Transversal - y (mm)						
		-133	-95	-57	19	57	95	133
Altura ao chão do túnel principal - z (mm)	152	1,27	1,34	1,48	1,63	1,49	1,35	1,28
	190	1,14	1,16	1,23	1,33	1,26	1,18	1,16
	267	0,79	0,64	0,56	0,59	0,60	0,68	0,82
	305	0,64	0,38	0,24	0,29	0,26	0,42	0,68
	343	0,67	0,34	0,19	0,29	0,18	0,36	0,69
	419	1,21	1,12	1,21	1,40	1,16	1,09	1,20
	457	1,50	1,54	1,71	1,89	1,67	1,51	1,48

Tabela B. 6 - Dados para o perfil de velocidades – 1 jato – 60 diâmetros – Fio quente vertical

		Distância Transversal - y (mm)																								ΔV (volt)		u (m/s)	
		-450		-350		-250		-150		-100		-50		0 - CL		50		100		150		250		350		450		ΔV	u
		ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u		
Altura ao chão do túnel principal - z (mm)	150	1,84	6,51	1,84	6,47	1,84	6,62	1,84	6,64	1,84	6,62	1,84	6,55	1,84	6,45	1,84	6,61	1,85	6,76	1,85	6,75	1,85	6,78	1,85	6,81	1,85	6,84		
	200	1,84	6,54	1,84	6,52	1,84	6,66	1,85	6,70	1,85	6,78	1,85	6,71	1,84	6,53	1,85	6,68	1,85	6,78	1,85	6,81	1,85	6,85	1,85	6,88	1,85	6,86		
	250	1,84	6,58	1,84	6,55	1,85	6,68	1,85	6,73	1,85	6,82	1,85	6,81	1,84	6,60	1,85	6,73	1,85	6,71	1,85	6,79	1,85	6,88	1,85	6,90	1,85	6,91		
	300	1,84	6,57	1,84	6,65	1,85	6,67	1,85	6,70	1,85	6,68	1,85	6,78	1,84	6,62	1,84	6,65	1,84	6,48	1,85	6,70	1,85	6,87	1,85	6,91	1,85	6,93		
	350	1,84	6,61	1,85	6,67	1,84	6,66	1,84	6,65	1,84	6,48	1,84	6,62	1,84	6,59	1,84	6,51	1,84	6,55	1,84	6,66	1,85	6,88	1,85	6,89	1,85	6,91		
	400	1,84	6,60	1,84	6,58	1,85	6,67	1,85	6,68	1,84	6,52	1,84	6,55	1,84	6,53	1,84	6,48	1,84	6,60	1,85	6,74	1,85	6,90	1,85	6,92	1,85	6,88		
	450	1,84	6,60	1,84	6,62	1,85	6,69	1,85	6,69	1,84	6,60	1,84	6,58	1,84	6,57	1,84	6,60	1,85	6,70	1,85	6,82	1,85	6,90	1,85	6,90	1,86	6,94		
	550	1,84	6,57	1,84	6,65	1,84	6,66	1,85	6,70	1,84	6,66	1,84	6,65	1,84	6,66	1,85	6,72	1,85	6,77	1,85	6,84	1,85	6,83	1,85	6,88	1,85	6,91		
	650	1,84	6,61	1,84	6,66	1,84	6,65	1,85	6,68	1,85	6,69	1,85	6,67	1,85	6,70	1,85	6,76	1,85	6,77	1,85	6,84	1,85	6,82	1,85	6,86	1,85	6,85		

Tabela B. 7 - Dados para o perfil de velocidades – 1 jato – 60 diâmetros – Simulação (dados truncados)

		Distância Transversal - y (mm)												u (m/s)		
		-439	-362	-248	-133	-95	-57	19	57	95	133	248	362	439	ΔV	u
		ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV	u	ΔV		
Altura ao chão do túnel principal - z (mm)	152	6,88	6,88	6,86	6,81	6,76	6,71	6,67	6,71	6,76	6,81	6,86	6,88	6,88		
	190	6,89	6,89	6,88	6,83	6,78	6,73	6,70	6,73	6,78	6,83	6,88	6,89	6,89		
	267	6,91	6,91	6,91	6,86	6,81	6,74	6,71	6,74	6,80	6,86	6,91	6,91	6,91		
	305	6,91	6,92	6,93	6,88	6,82	6,74	6,70	6,74	6,81	6,88	6,93	6,92	6,91		
	343	6,92	6,93	6,94	6,90	6,83	6,74	6,69	6,74	6,82	6,90	6,94	6,93	6,92		
	419	6,93	6,94	6,96	6,93	6,85	6,74	6,67	6,73	6,84	6,92	6,96	6,94	6,93		
	457	6,93	6,94	6,96	6,95	6,87	6,77	6,70	6,77	6,87	6,94	6,96	6,94	6,93		
	572	6,93	6,94	6,95	6,97	6,97	6,95	6,94	6,95	6,96	6,97	6,95	6,94	6,93		
	648	6,91	6,92	6,93	6,94	6,95	6,95	6,95	6,95	6,95	6,94	6,93	6,92	6,91		

Tabela B. 8 - Dados para o perfil de velocidades – 13 jatos – 30 diâmetros – Pressão dinâmica

		Distância Transversal - y (mm)																									u (m/s)	
		-650	-600	-550	-500	-450	-400	-350	-300	-250	-200	-150	-100	-50	0 - CL	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
		Altura ao chão do túnel principal - z (mm)	50	3,73	3,94	3,97	3,89	3,94	3,94	3,71	3,62	3,42	3,36	3,33	3,33	3,30	3,24	3,27	3,30	3,24	3,30	3,36	3,51	3,65	3,73	3,76	3,73	3,57
100	3,76		3,97	4,05	3,94	4,07	3,97	3,76	3,65	3,42	3,42	3,42	3,33	3,36	3,33	3,39	3,33	3,33	3,36	3,39	3,48	3,62	3,71	3,76	3,79	3,79	3,79	3,71
150	3,81		3,94	3,92	3,97	3,97	3,97	3,81	3,54	3,48	3,39	3,42	3,36	3,36	3,45	3,39	3,42	3,42	3,39	3,36	3,48	3,68	3,81	3,81	3,84	3,79	3,79	3,71
200	3,84		4,02	4,05	4,02	4,02	4,00	3,79	3,54	3,48	3,42	3,36	3,45	3,42	3,42	3,42	3,48	3,45	3,48	3,42	3,57	3,76	3,89	3,94	3,94	3,84	3,79	3,76
250	3,79		4,05	4,10	4,02	3,97	3,87	3,71	3,54	3,57	3,51	3,45	3,45	3,51	3,48	3,48	3,54	3,48	3,51	3,54	3,54	3,71	3,94	4,02	4,00	3,84	3,84	3,79
300	3,81		4,00	4,07	4,02	3,97	3,92	3,79	3,68	3,65	3,57	3,54	3,54	3,54	3,60	3,54	3,60	3,57	3,65	3,65	3,65	3,79	4,00	4,02	3,97	3,84	3,84	3,79
350	3,81		4,00	4,07	4,10	4,05	4,00	3,89	3,76	3,73	3,65	3,60	3,60	3,57	3,60	3,60	3,68	3,68	3,68	3,71	3,81	3,87	4,00	3,92	3,94	3,89	3,84	3,94
400	3,79		4,02	4,02	4,07	4,05	4,05	4,00	3,87	3,71	3,71	3,65	3,62	3,57	3,60	3,62	3,62	3,73	3,79	3,81	3,87	3,89	3,97	3,89	3,87	3,87	3,94	3,97
450	4,00		3,97	3,97	3,97	4,00	4,02	4,00	3,94	3,73	3,76	3,73	3,65	3,62	3,65	3,65	3,76	3,79	3,73	3,84	3,89	3,94	3,97	3,94	3,89	3,94	4,02	4,10
500	4,02		4,07	4,10	3,94	3,89	3,87	3,92	3,92	3,92	3,94	3,94	3,92	3,81	3,84	3,84	3,87	3,97	3,97	3,97	4,02	4,02	4,02	4,05	4,12	4,12	4,17	4,00
550	4,07		4,10	4,17	4,05	4,02	3,94	3,97	4,02	4,05	4,07	4,12	4,12	4,02	4,05	4,02	4,05	4,10	4,10	4,14	4,07	4,12	4,02	4,07	4,07	4,12	4,17	3,94
600	3,97		4,12	4,14	4,14	4,10	4,05	4,05	4,10	4,07	4,14	4,14	4,17	4,19	4,17	4,17	4,17	4,22	4,22	4,24	4,19	4,12	4,02	4,07	4,17	4,07	4,14	3,94
650	3,97		4,22	4,29	4,29	4,14	4,07	4,29	4,12	4,14	4,22	4,17	4,12	4,14	4,19	4,24	4,22	4,22	4,26	4,36	4,24	4,22	4,02	4,00	3,97	4,05	4,00	3,79

Tabela B. 9 - Dados para o perfil de velocidades – 13 jatos – 30 diâmetros – DANTEC 54N10

		Distância Transversal - y (mm)											u (m/s)	
		-600	-500	-400	-300	-200	-100	0	100	200	300	400	500	600
		Altura ao chão do túnel principal - z (mm)	85	3,52	4,46	4,40	3,47	2,56	3,38	3,56	3,43	3,30	3,25	3,65
150	4,67		4,38	4,19	3,74	3,68	3,22	3,33	3,47	3,49	3,46	3,62	4,03	4,67
250	4,77		4,48	4,13	3,90	3,86	3,76	3,61	3,58	3,78	3,94	4,03	4,10	4,80
350	4,83		4,64	4,46	4,16	4,07	3,78	3,76	3,64	3,91	4,07	4,19	4,26	4,74
450	4,83		4,35	4,22	4,35	4,50	4,30	4,22	4,38	4,30	4,30	4,35	4,30	4,58
550	4,59		4,59	4,35	4,45	4,38	4,66	4,69	4,67	4,78	4,67	4,51	4,72	4,61
650	4,46		4,64	4,61	4,62	4,56	4,62	4,59	4,64	4,72	4,67	4,54	4,50	4,30

Tabela B. 10 - Dados para o perfil de velocidades – 13 jatos – 30 diâmetros – Simulação (dados truncados)

		Distância Transversal - y (mm)																								u (m/s)	
		-650	-598	-546	-494	-442	-390	-338	-286	-234	-182	-130	-78	-26	26	78	130	182	234	286	338	390	442	494	546	598	650
Altura ao chão do túnel principal - z (mm)	57	2,98	3,20	3,30	3,34	3,32	3,20	2,99	2,58	2,18	2,06	1,94	1,87	1,96	1,96	1,87	1,93	2,05	2,17	2,57	2,98	3,20	3,32	3,34	3,30	3,20	2,98
	97	3,30	3,45	3,50	3,47	3,37	3,19	2,94	2,55	2,22	2,10	1,96	1,90	1,99	1,99	1,90	1,95	2,09	2,21	2,55	2,94	3,19	3,38	3,48	3,50	3,45	3,30
	154	3,62	3,69	3,67	3,55	3,30	3,00	2,71	2,42	2,26	2,18	2,05	2,00	2,07	2,08	2,00	2,04	2,17	2,25	2,42	2,72	3,01	3,31	3,56	3,67	3,69	3,62
	202	3,83	3,84	3,77	3,56	3,16	2,82	2,61	2,44	2,36	2,34	2,30	2,24	2,22	2,22	2,24	2,29	2,33	2,36	2,44	2,60	2,83	3,18	3,58	3,77	3,85	3,83
	251	3,97	3,95	3,83	3,57	3,13	2,84	2,73	2,62	2,52	2,52	2,56	2,49	2,40	2,40	2,50	2,56	2,51	2,51	2,61	2,72	2,84	3,14	3,58	3,83	3,95	3,98
	299	4,07	4,00	3,85	3,58	3,19	2,97	2,94	2,82	2,68	2,70	2,78	2,73	2,64	2,64	2,74	2,77	2,69	2,67	2,81	2,92	2,96	3,20	3,59	3,85	4,00	4,07
	347	4,10	3,96	3,77	3,55	3,27	3,11	3,10	3,02	2,90	2,90	2,97	2,98	2,97	2,97	2,98	2,96	2,89	2,89	3,01	3,09	3,10	3,27	3,55	3,77	3,96	4,10
	404	4,08	3,83	3,54	3,42	3,30	3,24	3,27	3,27	3,19	3,13	3,14	3,22	3,32	3,31	3,21	3,13	3,12	3,18	3,26	3,26	3,23	3,30	3,41	3,53	3,83	4,08
	453	4,04	3,73	3,35	3,27	3,30	3,35	3,43	3,47	3,39	3,27	3,24	3,38	3,55	3,55	3,37	3,23	3,27	3,39	3,46	3,42	3,34	3,29	3,27	3,34	3,73	4,04
	501	4,02	3,74	3,37	3,29	3,40	3,54	3,68	3,72	3,58	3,37	3,34	3,55	3,80	3,79	3,54	3,34	3,38	3,59	3,71	3,67	3,53	3,39	3,29	3,38	3,75	4,02
	549	4,01	3,86	3,58	3,52	3,67	3,86	4,00	4,00	3,80	3,54	3,53	3,80	4,06	4,06	3,80	3,54	3,55	3,80	4,00	4,00	3,85	3,67	3,53	3,60	3,87	4,02
	598	4,01	4,01	3,90	3,87	4,01	4,16	4,25	4,23	4,06	3,85	3,86	4,09	4,27	4,27	4,09	3,87	3,86	4,06	4,23	4,25	4,16	4,02	3,89	3,92	4,02	4,01
	646	3,97	4,10	4,13	4,16	4,24	4,30	4,34	4,33	4,27	4,19	4,20	4,30	4,37	4,37	4,30	4,21	4,19	4,27	4,34	4,34	4,30	4,24	4,17	4,14	4,10	3,97

Tabela B. 11 - Dados para o perfil de velocidades – 13 jatos -60 diâmetros – Pressão dinâmica

		Distância Transversal - y (mm)																									u (m/s)		
		-650	-600	-550	-500	-450	-400	-350	-300	-250	-200	-150	-100	-50	0 - CL	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
		Altura ao chão do túnel principal - z (mm)																											
Altura ao chão do túnel principal	- z (mm)	50	3,97	4,28	4,35	4,42	4,42	4,46	4,28	4,12	4,05	3,72	3,58	3,41	3,44	3,41	3,38	3,58	3,50	3,90	3,95	4,26	4,19	4,26	4,24	4,31	4,24	4,24	3,95
		100	4,21	4,44	4,44	4,44	4,35	4,26	4,09	4,19	4,12	3,82	3,64	3,53	3,44	3,53	3,47	3,55	3,72	3,92	4,07	4,14	4,19	4,24	4,37	4,33	4,31	4,28	4,00
		150	4,37	4,49	4,46	4,53	4,31	4,14	3,90	4,02	3,85	3,77	3,64	3,55	3,44	3,50	3,50	3,50	3,72	3,79	4,00	4,07	3,97	4,12	4,24	4,37	4,35	4,40	4,21
		200	4,44	4,57	4,53	4,37	4,26	3,97	3,87	3,87	3,72	3,74	3,58	3,66	3,50	3,53	3,55	3,53	3,64	3,85	3,79	3,87	3,95	4,02	4,12	4,31	4,28	4,35	4,33
		250	4,49	4,53	4,49	4,33	4,24	4,00	3,82	3,82	3,66	3,69	3,64	3,58	3,58	3,74	3,61	3,69	3,66	3,74	3,74	3,82	3,85	4,02	4,12	4,21	4,21	4,28	4,31
		300	4,53	4,44	4,35	4,31	4,21	4,05	3,87	3,87	3,79	3,74	3,79	3,72	3,64	3,77	3,77	3,87	3,79	3,85	3,85	3,79	3,90	3,97	4,12	4,14	4,19	4,33	4,40
		350	4,53	4,40	4,31	4,21	4,17	4,09	3,97	3,97	3,87	3,90	3,87	3,82	3,74	3,90	3,90	3,92	4,00	3,92	3,95	3,92	3,95	4,07	4,12	4,09	4,14	4,31	4,42
		400	4,55	4,44	4,24	4,19	4,19	4,09	4,05	4,07	4,00	4,07	3,95	3,90	3,90	4,02	4,07	4,02	4,12	4,14	4,09	4,00	4,14	4,07	4,14	4,07	4,17	4,31	4,42
		450	4,70	4,51	4,28	4,40	4,26	4,17	4,14	4,14	4,17	4,12	4,07	4,00	3,97	4,19	4,19	4,24	4,33	4,28	4,26	4,07	4,17	4,19	4,17	4,12	4,19	4,33	4,44
		550	4,57	4,59	4,51	4,44	4,46	4,49	4,37	4,42	4,40	4,44	4,42	4,40	4,40	4,40	4,42	4,46	4,44	4,46	4,51	4,44	4,49	4,49	4,46	4,44	4,44	4,55	4,44
	650	4,44	4,53	4,49	4,53	4,64	4,49	4,49	4,49	4,49	4,51	4,51	4,44	4,49	4,51	4,49	4,57	4,55	4,51	4,53	4,51	4,55	4,53	4,53	4,51	4,49	4,44	4,42	

Tabela B. 12 - Dados para o perfil de velocidades – 13 jatos -60 diâmetros – Fio quente vertical

		Distância Transversal - y (mm)																									u (m/s)		
		-650	-600	-550	-500	-450	-400	-350	-300	-250	-200	-150	-100	-50	0 - CL	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	
		Altura ao chão do túnel principal - z (mm)																											
Altura ao chão do túnel principal	- z (mm)	50	3,62	3,90	3,95	4,00	4,01	4,01	4,12	4,05	3,83	3,46	3,18	3,12	3,13	3,10	3,08	3,10	3,20	3,36	3,56	3,89	4,05	4,11	4,12	4,10	4,11	4,06	3,79
		100	3,72	3,92	4,02	4,02	3,95	3,88	3,96	3,91	3,77	3,53	3,32	3,15	3,17	3,09	3,13	3,18	3,25	3,43	3,67	3,88	3,89	3,91	3,99	4,08	4,16	4,07	3,90
		150	3,83	3,99	4,01	4,01	3,93	3,94	3,70	3,72	3,56	3,43	3,22	3,14	3,17	3,14	3,17	3,19	3,29	3,37	3,59	3,67	3,70	3,73	3,93	4,14	4,13	4,13	4,00
		200	3,92	3,99	4,00	3,96	3,75	3,61	3,63	3,58	3,48	3,33	3,26	3,18	3,25	3,21	3,19	3,26	3,29	3,33	3,40	3,54	3,60	3,74	3,89	4,07	4,14	4,16	4,09
		250	3,94	3,93	3,86	3,90	3,82	3,59	3,59	3,51	3,42	3,32	3,30	3,26	3,27	3,29	3,29	3,31	3,35	3,39	3,41	3,47	3,57	3,68	3,84	4,15	4,14	4,11	4,18
		300	3,98	3,85	3,77	3,80	3,74	3,55	3,64	3,55	3,50	3,50	3,42	3,37	3,43	3,44	3,41	3,44	3,42	3,50	3,53	3,53	3,59	3,64	3,78	4,04	4,03	4,06	4,23
		350	3,92	3,88	3,75	3,71	3,73	3,65	3,64	3,67	3,65	3,64	3,66	3,57	3,55	3,47	3,47	3,51	3,57	3,67	3,60	3,70	3,66	3,74	3,92	3,96	3,89	4,06	4,20
		400	3,98	3,91	3,81	3,74	3,72	3,69	3,86	3,77	3,80	3,80	3,72	3,73	3,69	3,65	3,69	3,64	3,69	3,69	3,74	3,78	3,79	3,75	3,80	3,91	3,96	4,18	4,26
		450	4,09	3,97	3,88	3,79	3,75	3,73	3,93	3,93	3,94	3,91	4,00	3,87	3,85	3,83	3,78	3,85	3,83	3,86	3,95	3,96	3,91	3,89	3,91	3,98	4,05	4,24	4,26
		550	3,98	4,11	4,05	4,00	4,05	4,18	4,16	4,20	4,22	4,25	4,24	4,21	4,17	4,15	4,19	4,12	4,13	4,10	4,16	4,15	4,09	3,88	4,12	4,15	4,21	4,29	4,30
	650	3,99	4,01	4,06	4,03	4,05	4,15	4,17	4,21	4,27	4,28	4,26	4,25	4,27	4,25	4,21	4,19	4,17	4,13	4,17	4,15	4,14	4,18	4,18	4,26	4,26	4,29	4,19	

Tabela B. 13 - Dados para o perfil de velocidades – 13 jatos -60 diâmetros – Simulação (dados truncados)

		Distância Transversal - y (mm)																									u (m/s)		
		-650	-598	-546	-494	-442	-390	-338	-286	-234	-182	-130	-78	-26	26	78	130	182	234	286	338	390	442	494	546	598	650		
Altura ao chão do túnel principal - z (mm)	57	3,31	3,52	3,60	3,64	3,64	3,61	3,54	3,44	3,31	3,12	2,74	2,10	1,73	1,72	2,06	2,71	3,11	3,31	3,44	3,54	3,61	3,65	3,64	3,61	3,52	3,31		
	97	3,55	3,67	3,71	3,73	3,71	3,65	3,56	3,44	3,30	3,11	2,75	2,19	1,83	1,82	2,16	2,73	3,10	3,30	3,45	3,57	3,66	3,71	3,73	3,71	3,67	3,55		
	154	3,63	3,64	3,64	3,65	3,61	3,53	3,42	3,30	3,14	2,92	2,58	2,15	1,91	1,91	2,13	2,56	2,92	3,15	3,31	3,43	3,54	3,62	3,65	3,64	3,64	3,63		
	202	3,65	3,58	3,52	3,49	3,41	3,29	3,16	3,04	2,90	2,69	2,39	2,10	1,97	1,97	2,09	2,38	2,69	2,91	3,06	3,18	3,30	3,41	3,49	3,51	3,57	3,65		
	251	3,66	3,51	3,39	3,30	3,17	3,00	2,87	2,77	2,65	2,48	2,26	2,11	2,06	2,06	2,10	2,25	2,48	2,66	2,79	2,89	3,02	3,17	3,30	3,38	3,50	3,66		
	299	3,67	3,46	3,28	3,15	2,98	2,81	2,69	2,61	2,52	2,41	2,30	2,24	2,22	2,21	2,23	2,29	2,40	2,52	2,61	2,69	2,81	2,98	3,14	3,27	3,46	3,68		
	347	3,70	3,45	3,23	3,09	2,95	2,81	2,71	2,64	2,59	2,55	2,51	2,49	2,48	2,48	2,48	2,50	2,53	2,57	2,62	2,69	2,80	2,94	3,08	3,23	3,45	3,70		
	404	3,75	3,52	3,29	3,15	3,06	2,97	2,89	2,84	2,81	2,81	2,83	2,85	2,86	2,86	2,84	2,82	2,79	2,79	2,81	2,87	2,95	3,04	3,14	3,28	3,52	3,76		
	453	3,82	3,63	3,42	3,31	3,24	3,19	3,13	3,08	3,05	3,05	3,10	3,15	3,18	3,18	3,14	3,08	3,04	3,03	3,06	3,12	3,17	3,23	3,30	3,42	3,63	3,83		
	549	3,98	3,93	3,85	3,80	3,78	3,75	3,69	3,61	3,53	3,52	3,58	3,67	3,74	3,74	3,67	3,57	3,52	3,53	3,60	3,69	3,75	3,78	3,80	3,85	3,93	3,98		
	646	4,05	4,12	4,15	4,17	4,18	4,17	4,13	4,07	4,02	4,01	4,05	4,11	4,15	4,15	4,11	4,05	4,01	4,02	4,08	4,13	4,17	4,18	4,17	4,15	4,12	4,05		

Tabela B. 14 - Dados para o perfil de velocidades – 13 jatos - 120 diâmetros – Pressão dinâmica

		Distância Transversal - y (mm)																										u (m/s)
		-650	-600	-550	-500	-450	-400	-350	-300	-250	-200	-150	-100	-50	0 - CL	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
		Altura ao chão do túnel principal - z (mm)																										
Altura ao chão do túnel principal	50	3,69	4,08	4,25	4,34	4,41	4,43	4,37	4,37	4,27	4,06	3,85	3,61	3,44	3,61	3,5	3,61	3,83	4,08	4,3	4,37	4,48	4,39	4,39	4,27	4,18	4,03	3,77
	100	4,15	4,34	4,37	4,37	4,43	4,46	4,43	4,5	4,43	4,3	4,15	3,93	3,75	3,75	3,75	3,93	4,15	4,32	4,34	4,48	4,46	4,39	4,43	4,32	4,39	4,32	4,06
	150	4,32	4,39	4,34	4,32	4,34	4,39	4,43	4,39	4,34	4,23	4,13	3,96	3,9	3,83	3,83	3,96	4,23	4,32	4,3	4,37	4,46	4,37	4,37	4,27	4,27	4,32	4,32
	200	4,41	4,39	4,3	4,25	4,27	4,3	4,25	4,25	4,15	4,13	4,06	3,96	3,8	3,75	3,77	3,96	4,15	4,18	4,25	4,27	4,32	4,23	4,27	4,23	4,18	4,3	4,41
	250	4,39	4,32	4,18	4,2	4,13	4,11	4,08	4,06	4,01	4,03	3,88	3,93	3,83	3,77	3,85	3,96	4,06	4,23	4,18	4,18	4,13	4,08	4,15	4,13	4,15	4,3	4,39
	300	4,43	4,32	4,2	4,13	4,06	4,03	4,03	4,01	3,98	3,96	3,9	3,83	3,8	3,83	3,8	3,9	3,96	4,08	4,08	4,11	4,11	4,11	4,13	4,13	4,2	4,3	4,39
	350	4,41	4,32	4,25	4,18	4,06	4,08	4,01	3,98	3,93	3,9	3,83	3,8	3,77	3,83	3,75	3,85	3,85	3,93	4,01	4,08	4,08	4,08	4,15	4,18	4,2	4,27	4,43
	400	4,46	4,37	4,27	4,15	4,15	4,11	4,03	4,11	3,98	3,88	3,88	3,88	3,83	3,88	3,88	3,88	3,96	4,01	4,06	4,06	4,23	4,18	4,2	4,2	4,27	4,41	4,46
	450	4,46	4,43	4,32	4,3	4,25	4,2	4,15	4,18	4,03	4,06	4,03	3,93	3,96	4,2	3,9	4,03	4,08	4,03	4,15	4,23	4,5	4,25	4,3	4,3	4,39	4,48	4,5
	550	4,52	4,55	4,46	4,41	4,43	4,37	4,37	4,34	4,37	4,37	4,32	4,2	4,27	4,25	4,27	4,27	4,37	4,34	4,43	4,48	4,46	4,43	4,41	4,43	4,52	4,55	4,5
650	4,46	4,52	4,57	4,55	4,5	4,52	4,5	4,52	4,5	4,52	4,57	4,55	4,52	4,59	4,52	4,59	4,61	4,59	4,61	4,59	4,59	4,5	4,5	4,5	4,48	4,5	4,41	

Tabela B. 15 - Dados para o perfil de velocidades – 13 jatos - 120 diâmetros – Fio quente vertical

		Distância Transversal - y (mm)																										u (m/s)
		-650	-600	-550	-500	-450	-400	-350	-300	-250	-200	-150	-100	-50	0 - CL	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
		Altura ao chão do túnel principal - z (mm)																										
Altura ao chão do túnel principal	50	3,07	3,24	3,60	3,70	3,77	3,80	3,77	3,76	3,63	3,38	3,14	2,87	2,76	2,74	2,72	2,83	3,01	3,37	3,53	3,65	3,71	3,72	3,66	3,61	3,46	3,23	2,94
	100	3,32	3,59	3,73	3,75	3,80	3,79	3,79	3,77	3,70	3,63	3,45	3,07	3,03	2,93	2,95	3,13	3,34	3,47	3,68	3,71	3,67	3,63	3,64	3,58	3,49	3,48	3,17
	150	3,56	3,65	3,65	3,65	3,66	3,60	3,66	3,64	3,62	3,55	3,37	3,17	3,06	3,00	3,06	3,13	3,38	3,52	3,59	3,62	3,57	3,46	3,52	3,46	3,44	3,48	3,46
	200	3,57	3,66	3,57	3,54	3,52	3,56	3,52	3,49	3,49	3,39	3,36	3,19	3,12	3,02	3,06	3,13	3,29	3,48	3,45	3,43	3,45	3,37	3,38	3,39	3,31	3,47	3,46
	250	3,62	3,64	3,50	3,53	3,44	3,42	3,40	3,38	3,33	3,35	3,24	3,13	3,05	2,98	3,02	3,11	3,24	3,34	3,33	3,33	3,30	3,31	3,31	3,33	3,29	3,38	3,53
	300	3,70	3,63	3,50	3,42	3,45	3,33	3,33	3,27	3,28	3,20	3,14	3,08	2,99	2,98	3,00	3,07	3,14	3,15	3,25	3,24	3,26	3,30	3,29	3,31	3,31	3,47	3,55
	350	3,76	3,67	3,59	3,49	3,40	3,33	3,32	3,31	3,28	3,15	3,12	3,04	2,97	2,98	3,01	3,03	3,12	3,11	3,18	3,23	3,24	3,25	3,30	3,31	3,39	3,52	3,57
	400	3,81	3,74	3,65	3,54	3,45	3,28	3,40	3,32	3,28	3,19	3,18	3,09	3,06	3,07	3,07	3,10	3,07	3,12	3,18	3,26	3,28	3,28	3,34	3,41	3,44	3,53	3,62
	450	3,85	3,87	3,68	3,65	3,58	3,55	3,53	3,45	3,36	3,36	3,32	3,24	3,19	3,24	3,23	3,20	3,18	3,20	3,27	3,32	3,36	3,45	3,42	3,47	3,49	3,55	3,65
	550	3,83	3,88	3,80	3,79	3,72	3,70	3,71	3,67	3,64	3,62	3,58	3,53	3,54	3,50	3,48	3,53	3,59	3,57	3,60	3,62	3,56	3,62	3,62	3,65	3,64	3,70	3,62
650	3,78	3,87	3,88	3,89	3,85	3,82	3,80	3,79	3,79	3,77	3,76	3,80	3,76	3,69	3,74	3,74	3,76	3,76	3,76	3,74	3,73	3,71	3,72	3,74	3,68	3,70	3,55	

Tabela B. 16 - Dados para o perfil de velocidades – 13 jatos - 120 diâmetros – Simulação (dados truncados)

		Distância Transversal - y (mm)																									u (m/s)	
		-650	-598	-546	-494	-442	-390	-338	-286	-234	-182	-130	-78	-26	26	78	130	182	234	286	338	390	442	494	546	598	650	
Altura ao chão do túnel principal - z (mm)	57	3,07	3,34	3,38	3,38	3,38	3,39	3,41	3,43	3,44	3,44	3,37	3,10	2,69	2,67	3,09	3,36	3,43	3,44	3,42	3,40	3,38	3,37	3,38	3,38	3,34	3,07	
	97	3,28	3,38	3,33	3,27	3,23	3,23	3,26	3,32	3,39	3,44	3,47	3,37	3,00	2,99	3,36	3,46	3,44	3,38	3,31	3,26	3,22	3,23	3,27	3,33	3,38	3,29	
	154	3,44	3,37	3,23	3,09	3,01	2,99	3,03	3,14	3,27	3,40	3,48	3,44	3,20	3,18	3,44	3,48	3,40	3,27	3,14	3,03	2,98	3,00	3,08	3,22	3,37	3,44	
	202	3,50	3,38	3,18	3,00	2,88	2,85	2,90	3,04	3,21	3,36	3,46	3,45	3,27	3,26	3,44	3,47	3,37	3,22	3,05	2,91	2,84	2,87	2,99	3,18	3,38	3,50	
	251	3,57	3,42	3,19	2,97	2,83	2,78	2,82	2,97	3,16	3,33	3,44	3,42	3,28	3,27	3,42	3,45	3,35	3,18	2,99	2,84	2,78	2,82	2,96	3,19	3,42	3,57	
	299	3,64	3,49	3,25	3,01	2,84	2,76	2,77	2,89	3,08	3,26	3,37	3,35	3,24	3,23	3,35	3,38	3,28	3,11	2,92	2,79	2,77	2,84	3,00	3,25	3,49	3,64	
	347	3,73	3,59	3,36	3,11	2,92	2,80	2,76	2,81	2,94	3,10	3,22	3,22	3,15	3,15	3,22	3,24	3,13	2,97	2,83	2,77	2,80	2,91	3,10	3,36	3,59	3,73	
	404	3,83	3,72	3,53	3,29	3,08	2,91	2,81	2,78	2,80	2,88	2,96	2,98	2,97	2,97	2,99	2,97	2,90	2,82	2,78	2,81	2,90	3,06	3,28	3,52	3,72	3,83	
	453	3,90	3,84	3,68	3,48	3,27	3,08	2,93	2,84	2,79	2,78	2,79	2,80	2,80	2,81	2,80	2,80	2,79	2,79	2,83	2,92	3,06	3,26	3,47	3,68	3,84	3,91	
	549	4,02	4,02	3,96	3,84	3,70	3,55	3,40	3,28	3,17	3,08	3,01	2,97	2,94	2,94	2,96	3,00	3,06	3,15	3,26	3,39	3,53	3,69	3,84	3,95	4,02	4,02	
646	4,05	4,11	4,10	4,06	4,00	3,93	3,86	3,80	3,76	3,72	3,69	3,66	3,64	3,64	3,66	3,68	3,71	3,75	3,79	3,85	3,93	4,00	4,06	4,10	4,11	4,05		