



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

BRUNO FONSECA REBELLO E FELIPE MARINHO CARONI

**CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO NO TÚNEL DE VENTO
E ACESSÓRIOS DO LABORATÓRIO DE MÁQUINAS DE FLUXO**

VITÓRIA

2013

BRUNO FONSECA REBELLO

FELIPE MARINHO CARONI

**CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO NO TÚNEL DE VENTO
E ACESSÓRIOS DO LABORATÓRIO DE MÁQUINAS DE FLUXO**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Ramos

VITÓRIA

2013

BRUNO FONSECA REBELLO
FELIPE MARINHO CARONI

CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO NO TÚNEL DE VENTO E ACESSÓRIOS DO LABORATÓRIO DE MÁQUINAS DE FLUXO

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 19 de março de 2013.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Rogério Ramos
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Márcio Ferreira Martins
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Rogério Silveira de Queiroz
Universidade Federal do Espírito Santo

A nossos pais, família, amigos e professores.

“O sucesso é uma consequência e não um objetivo.”

Gustave Flaubert

RESUMO

O túnel de vento instalado no *Laboratório de Máquinas de Fluxo* da UFES é utilizado para reproduzir instalações de gás de queima (*flare*). A qualificação desse túnel de vento acontece por meio da caracterização de seu escoamento tanto por resultados experimentais quanto por simulações numéricas via CFD. O presente trabalho compara resultados experimentais, relatados em trabalhos anteriores, com novos resultados numéricos. Perfis de velocidade experimentais e numéricos no trecho reto do túnel de vento são comparados em posições estratégicas de medição de vazão. A influência do medidor ótico de vazão intrusivo, Photon, é analisada via resultados numéricos e experimentais. Além disso, o mapeamento experimental do campo de velocidades na entrada do túnel de vento, próximo ao bocal de entrada, é realizado com auxílio de um anemômetro. Uma simulação para determinar a influência do bocal de entrada no escoamento foi feita para avaliação de sua influência no desenvolvimento do escoamento no túnel de vento e análise comparativa com resultados experimentais. Os resultados indicam desvios significativos entre os resultados experimentais e numéricos ao simular o escoamento no trecho reto do túnel de vento. O desvio relativo variou de 6,02% a 7,68%. Porém, a similaridade na forma do perfil de velocidades foi notável. Uma alteração significativa do perfil de velocidades na posição de medição de vazão por ultrassom foi percebida através da simulação da influência do medidor intrusivo, Photon, no escoamento. Por fim, conclui-se que o bocal de entrada contribui para o desenvolvimento do escoamento no túnel de vento por promover um perfil de velocidades na entrada próximo a um perfil uniforme, com desvios médio de 2,36%.

Palavras-Chave: túnel de vento, bocal de entrada, perfis de velocidade, dinâmica dos fluidos computacional.

ABSTRACT

The wind tunnel installed at the Laboratory of Machine Flow UFES is used to reproduce burning gas (flare) plants. The qualification of this wind tunnel is through the characterization of its flow by both experimental results and numerical simulations via CFD. The present study compares the experimental results reported in previous studies with new numerical results. Velocity profiles in experimental and numerical straight section of the wind tunnel are compared in strategic positions of flow measurement. The influence of intrusive optical flow meter, Photon, is analyzed via numerical and experimental results. Furthermore, the experimental mapping of velocity field in the wind tunnel entrance, near the inlet nozzle, is performed with the aid of an anemometer. A simulation to determine the influence of the inlet nozzle on the flow was made in order to evaluate its influence on the flow development in the wind tunnel and comparative analysis with experimental results. The results indicate significant deviations between the experimental and numerical results by simulating the flow in the straight section of the wind tunnel. The relative deviation ranged from 6.02% to 7.68%. However, the similarity in shape of the velocity profile was remarkable. A significant change in the velocity profile at the position of ultrasonic flow measurement was perceived by simulating the influence of intrusive flow meter, Photon, in the flow. Finally, it is concluded that the intake nozzle contributes to the flow development in the wind tunnel to promote a velocity profile at the entrance near a uniform profile, with average deviation of 2.36%.

Keywords: wind tunnel, intake nozzle, velocity profiles, computational fluid dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Gás de <i>flare</i> sendo queimado em uma plataforma de exploração de petróleo e gás.....	20
Figura 2.2 - Leituras típicas de Temperatura em linhas de <i>flare</i> (°C) [6]	25
Figura 3.1 - Configuração e montagem do túnel de vento.	27
Figura 3.2- (a) Detalhe do inversor de frequência; (b) Computador com <i>software</i> instalado.	28
Figura 3.3– (a) Bocal instalado na entrada da tubulação; (b) Perfil do bocal. ...	29
Figura 3.4 – (a) Detalhe da junção do plenum à tubulação de 8” com colarinho de lona e cinta da catraca; (b) Tela retificadora de fluxo instalada à jusante do rotor, na extremidade do duto de saída.....	29
Figura 3.5 – Posicionamento e distâncias dos medidores de vazão no túnel de vento.	30
Figura 3.6 – Modo de instalação do medidor Photon em tubulações de 6 a 32 polegadas.....	30
Figura 3.7 – Retificador de fluxo instalado em uma extremidade da tubulação.	31
Figura 4.1 – Representação de uma medição de velocidade pontual em um escoamento turbulento.	34
Figura 4.2 - Discretização unidimensional. Adaptada de [3].....	39
Figura 5.1 – (a) Geometria do trecho reto e (b) Perfil $\frac{1}{4}$	50
Figura 5.2 - Arranjo dos blocos e arestas para o trecho reto.	52
Figura 5.3 – Visão frontal da seção de entrada do tubo mostrando as malhas geradas: (a) Malha 1, (b) Malha 2, (c) Malha 3, (d) Malha 4 e (e) Malha 5.	54
Figura 5.4 - Superfícies onde foram impostas condições de contorno para o caso trecho reto.....	54
Figura 5.5 – Perfil da componente <i>u</i> da velocidade a partir de pontos experimentais.	55
Figura 5.6 – Comparação entre o perfil da componente <i>u</i> da velocidade a partir dos pontos experimentais e o perfil traçado através da técnica de Shape-Preserving.	56

Figura 5.7 – Perfil obtido através da técnica <i>Shape-Preserving</i> dividido em trapézios através de linhas originadas nos pontos experimentais.....	57
Figura 5.8 – (a) Comportamento da componente u da velocidade ao longo do eixo x ; (b) Perfis de velocidade u na posição do medidor Photon; (c) Perfis de velocidade u na posição do medidor Ultrassônico; (d) Perfis de velocidade u na posição do tubo de Pitot.....	59
Figura 5.9 – Teste de malha para o trecho reto: (a) Perfis da velocidade u na seção do medidor Photon; (b) Perfis da velocidade u na seção do medidor Photon; e (c) Perfis da velocidade u na seção do tubo de Pitot.	61
Figura 5.10 – Análise dos perfis de velocidade u alterando-se os limites da abscissa.	62
Figura 5.11 – Perfis de velocidade u ao longo do tubo para o caso do trecho reto.....	64
Figura 5.12 – Análise dos desvios relativos para o caso do trecho reto.....	65
Figura 5.13 – Comparação entre o perfil de velocidade u desenvolvido de De Chant e o desenvolvido numérico.	66
Figura 5.14 - Comparação entre os perfis da velocidade u numérico e experimental na posição do Photon e o desenvolvido (80D).	67
Figura 5.15 – Comparação entre os perfis da velocidade u numérico na posição do medidor ultrassônico e o desenvolvido (80D).....	68
Figura 5.16 – Comparação entre os perfis da velocidade u numérico e experimental na posição do Pitot e o desenvolvido (80D).....	69
Figura 5.17 – Desenvolvimento da componente u da velocidade ao longo do centro do tubo para o caso do trecho reto.....	70
Figura 5.18 – Desenvolvimento da componente v da velocidade ao longo do centro do tubo para o caso do trecho reto.....	71
Figura 5.19 – Desenvolvimento da componente w da velocidade ao longo do centro do tubo para o caso do trecho reto.....	71
Figura 6.1 – Plano de simulação A-A'	74
Figura 6.2 – (a) Croqui e (b) imagem ilustrativa da geometria simulada	75
Figura 6.3 – Divisão dos blocos para geração da malha.....	76

Figura 6.4 – Malhas geradas na região do Photon: (a) Malha 1; (b) Malha 2; (c) Malha 3; e (d) Malha 4.	77
Figura 6.5 – Perfil de entrada para o caso do medidor Photon.	79
Figura 6.6 – Perfis da componente u da velocidade na posição do medidor Photon.	80
Figura 6.7 – Perfis da componente u da velocidade na posição do medidor ultrassônico.	81
Figura 6.8 – Perfis da componente u da velocidade na posição do tubo de Pitot.	81
Figura 6.9 – Perfis de velocidade u ao longo de seções da geometria.	83
Figura 6.10 – Análise de desvios relativos.	84
Figura 6.11 – Comparação entre o perfil de velocidade u desenvolvido a 50D e o perfil proposto por De Chant.	85
Figura 6.12 – Comparação entre o perfil desenvolvido e o perfil na seção de medição de vazão por ultrassom.	86
Figura 6.13 – Comparação entre os perfis da velocidade u numérico e experimental na posição do Pitot e o desenvolvido (50D).	88
Figura 6.15 – Comportamento da componente u da velocidade na linha axial para o caso do medidor Photon.	89
Figura 6.16 – Comportamento da componente v da velocidade na linha axial para o caso do medidor Photon.	90
Figura 6.16 - Linhas de correntes na região logo após a posição de instalação do medidor.	90
Figura 7.1 – Mapeamento da velocidade na entrada de uma tubulação com flange [35].	91
Figura 7.2 – Aparato experimental utilizado.	92
Figura 7.3 – Posições de medição do anemômetro.	93
Figura 7.4 – Curva de variação da velocidade na Linha E e polinômio correspondente à linha de tendência para a rotação de 1200 rpm.	96
Figura 7.5 – Mapeamento do campo de velocidade na região de entrada do túnel de vento para a rotação de 700 rpm.	97

Figura 7.6 – Mapeamento do campo de velocidade na região de entrada do túnel de vento para a rotação de 950 rpm.....	97
Figura 7.7 – Mapeamento do campo de velocidade na região de entrada do túnel de vento para a rotação de 1200 rpm.....	98
Figura 8.1 – Perfil do bocal desenhado.....	100
Figura 8.2 – (a) Domínio em todo o seu comprimento e (b) região de entrada.	101
Figura 8.3 – Divisão da geometria em blocos e indicação de arestas.....	101
Figura 8.4 – Malhas na região do bocal de entrada do túnel de vento: (a) Malha 1, (b) Malha 2; (c) Malha 3; (d) Malha 4; (e) Malha 5 e (f) o zoom da região de transição entre o bocal e o tubo para a Malha 5.	103
Figura 8.5 - Indicação das superfícies especificadas como condição de contorno para o caso do túnel de vento com bocal.	105
Figura 8.6 – Teste de malha para o caso do túnel de vento com bocal: (a) perfis da velocidade u na posição do medidor Photon; (b) perfis da velocidade u na posição do medidor ultrassônico; e (c) perfis da velocidade u na posição do tubo de Pitot.	108
Figura 8.7 – Perfis da velocidade u ao longo do tubo.	109
Figura 8.8 – Análise dos desvios relativos para o caso do túnel de vento com bocal.....	110
Figura 8.9 – Comparação entre perfil de velocidade u desenvolvido a 80D e o perfil proposto por De Chant.	111
Figura 8.10 – Comparação entre os perfis da velocidade u numérico e experimental na posição do Photon e o desenvolvido (80D) para o caso do túnel de vento com bocal.	112
Figura 8.11 – Comparação entre os perfis da velocidade u numérico na posição do medidor ultrassônico e o desenvolvido (80D) para o caso do túnel de vento com bocal.....	113
Figura 8.12 – Comparação entre os perfis da velocidade u numérico e experimental na posição do Pitot e o desenvolvido (80D).....	115
Figura 8.13 – Desenvolvimento da componente u da velocidade ao longo do centro do tubo para o caso do túnel de vento com bocal.	116

Figura 8.14 – Desenvolvimento da componente v da velocidade ao longo do centro do tubo para o caso do túnel de vento com bocal.	116
Figura 8.15 – Comparação entre o perfil numérico na entrada da tubulação e o perfil uniforme.....	118
Figura 8.16 - Velocidade do escoamento ao longo do bocal e na entrada da tubulação.....	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Dimensionamento do túnel de vento.....	27
Tabela 4.1 – Valores das constantes do modelo $\kappa - \varepsilon$ padrão	37
Tabela 4.2 – Parâmetros usados nas simulações.....	43
Tabela 5.1 – Parâmetros especificados para geração das malhas.	53
Tabela 5.2 - Condições de contorno para o caso do trecho reto.....	54
Tabela 5.3 - Aplicação da Regra do Trapézio e convergência para a rotação de 1200 rpm.	57
Tabela 5.4 - Resultado das velocidades uniformes equivalentes e do <i>Número de Reynolds</i> para cada rotação de trabalho do túnel de vento.	57
Tabela 5.5 - Síntese do teste de malha para o trecho reto na posição do medidor Photon.	63
Tabela 5.6 – Desvios relativos entre os comprimentos analisados.	65
Tabela 5.7 – Desvios relativos entre pontos do perfil desenvolvido de De Chant e desenvolvido numérico em 80D.	66
Tabela 5.8 – Desvio relativo entre os perfis da velocidade u numérico e experimental na posição do Photon e o desenvolvido (80D).	67
Tabela 5.9 – Desvio relativo entre os perfis da velocidade u na posição do medidor ultrassônico e o desenvolvido (80D).....	68
Tabela 5.10 – Desvio relativo entre os perfis da velocidade u numérico e experimental na posição do Photon e o desenvolvido (80D).	70
Tabela 6.1 – Principais dimensões da geometria simulada	75
Tabela 6.2 – Grau de refinamento e número total de nós das malhas.....	77
Tabela 6.3 – Condições de contorno para o caso do medidor Photon.....	78
Tabela 6.4 – Desvios relativos entre o perfil experimental e o proposto por De Chant.....	79
Tabela 6.5 - Síntese do teste de malha para o caso do medidor Photon na posição do Photon.....	82
Tabela 6.6 – Perfis de velocidade u ao longo do tubo para o caso do medidor Photon.....	83
Tabela 6.7 – Desvios relativos entre pontos do perfil desenvolvido de De Chant e desenvolvido numérico em 50D.	85

Tabela 6.8 – Desvio relativo entre os perfis de velocidade u numérico na posição do medidor ultrassônico e desenvolvido numérico.	87
Tabela 6.9 – Desvio relativo entre os perfis da velocidade u numérico e experimental na posição do Pitot e o desenvolvido (50D).....	88
Tabela 7.1 – Valores médios da velocidade para as três rotações.	94
Tabela 7.2 – Velocidades máximas medidas no ponto O para cada rotação...	95
Tabela 7.3 – Valores de “x” encontrados para a Linha E de acordo com os percentuais da velocidade máxima.	96
Tabela 8.1 - Especificações de cada malha segundo a Figura 8.3.	104
Tabela 8.2 - Condições de contorno para o caso do túnel de vento com bocal.	105
Tabela 8.3 - Síntese do teste de malha para o túnel de vento com bocal na posição do medidor Photon.....	108
Tabela 8.4 - Desvios relativos entre os comprimentos analisados para o caso do túnel de vento com bocal.....	110
Tabela 8.5 – Desvios relativos entre pontos do perfil desenvolvido de De Chant e desenvolvido numérico em 80D.	111
Tabela 8.6 – Desvio relativo entre os perfis da velocidade u numérico e experimental na posição do Photon e o desenvolvido (80D) para o caso do túnel de vento com bocal.	112
Tabela 8.7 - Desvio relativo entre os perfis da velocidade u numérico na posição do medidor ultrassônico e o desenvolvido (80D) para o caso do túnel de vento com bocal.	114
Tabela 8.8 – Desvio relativo entre os perfis da velocidade u numérico e experimental na posição do Pitot e o desenvolvido (80D).....	115
Tabela 8.9 – Desvio relativo entre o perfil numérico na entrada da tubulação e o perfil uniforme.....	118

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Motivação.....	17
1.2	Objetivos do trabalho	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Sobre o gás de tocha ou gás de <i>flare</i>	20
2.2	Projeto de túnel de vento	21
2.3	Similaridade entre o escoamento no túnel de vento e <i>flare</i>	23
3	CONFIGURAÇÃO E MONTAGEM DO TÚNEL DE VENTO	27
4	MODELAGEM MATEMÁTICA E MÉTODO NUMÉRICO.....	32
4.1	Modelagem matemática	32
4.1.1	Equações de Conservação	32
4.1.2	Equações de Reynolds	34
4.1.3	Hipótese de Boussinesq	35
4.1.4	Modelo $k-\epsilon$ de turbulência	36
4.2	Métodos numéricos	37
4.2.1	O método dos volumes finitos.....	37
4.2.2	Equações discretizadas	39
4.2.3	Esquema de discretização do CFX.....	41
4.2.4	Algoritmo pressão – velocidade	42
4.3	Parâmetro de simulação e condições de contorno	42
4.3.1	Condições de entrada.....	43
4.3.2	Condições de parede.....	44
4.3.3	Condições de simetria	44
4.3.4	Condições de saída	45
4.4	Instalações computacionais	46
4.5	Considerações sobre erros numéricos e incertezas	47
4.6	ANSYS 13.0 e CFX.....	47
4.6.1	Desenho da geometria.....	47
4.6.2	Geração da malha	47
4.6.3	Pré-processamento.....	48

4.6.4	Processamento	48
4.6.5	Pós-processamento	49
5	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO TRECHO RETO	50
5.1	Apresentação do caso	50
5.2	Geração da malha.....	50
5.3	Condições de contorno	54
5.4	Teste de sensibilidade das malhas	59
5.5	Resultados e discussões	63
6	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INTERFERÊNCIA DO MEDIDOR PHOTON	
	73	
6.1	Apresentação do caso	73
6.2	Geração de malha.....	75
6.3	Condições de contorno	77
6.4	Teste de sensibilidade das malhas	80
6.5	Resultados e discussões	82
7	LEVANTAMENTO EXPERIMENTAL DO CAMPO DE VELOCIDADES NA	
	ENTRADA DO TÚNEL DE VENTO	91
7.1	Objetivo.....	91
7.2	Aparato Experimental.....	91
7.3	Procedimento Experimental	92
7.4	Resultados e Discussões.....	93
8	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO TÚNEL DE VENTO COM BOCAL	99
8.1	Apresentação do caso	99
8.2	Geração da malha.....	101
8.3	Condições de Contorno	104
8.4	Teste de sensibilidade de malhas.....	106
8.5	Resultados e discussões	109
9	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	120
	ANEXO A.....	126
	ANEXO B.....	131
	ANEXO C.....	139

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O regime monopolista do setor petrolífero brasileiro – concessão, exploração e produção – era realidade desde 1953 regido pela Lei 2.004 [1]. Nesse período, o controle e medição dos produtos extraídos nos processos operacionais eram atividades secundárias, pois todo processo era dominado por uma só empresa, que era responsável pela medição, arrecadação e distribuição de tributos ao Estado. Em 1997, foi estabelecida a Lei do Petróleo (9.478, 1997) [2] que decretava o fim desse monopólio. A partir desse momento, aumentou-se a importância da medição correta de volume e massa dessa nobre matéria-prima. Essa relevância está relacionada ao maior rigor de fiscalização, a questões ambientais (controle de queima dos gases), a questões técnicas (correto balanço de massa dos principais componentes extraídos do reservatório) e questões financeiras como a distribuição e arrecadação de royalties entre governos, assunto esse que é motivo de uma batalha de interesses no senado federal.

A regulação técnica das condições, dos procedimentos e dos requisitos mínimos de sistemas de medição de vazão de petróleo e gás natural, visando resultados precisos e padronizados, inclusive identificando e classificando medidor de vazão operacional e medidor fiscal, foi “normatizada” através da publicação da Portaria Conjunta ANP/INMETRO N^o1 [3] no ano de 2000. Dentre os objetivos da portaria estão:

1. Regulamentação da medição de petróleo e gás natural na área de exploração, produção e transporte;
2. Aprovar o Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás Natural;
3. Estabelecer os requisitos mínimos para os sistemas de medição de petróleo e gás;
4. Definir: medidores, calibração e incertezas.

Uma das técnicas estudadas e utilizadas há alguns anos na medição de vazão de queima de gás natural, ou “gás de *flare*”, é a medição ultrassônica. Porém, com as novas descobertas relacionadas às reservas no pré-sal, tal tecnologia de medição de vazão está sendo reavaliada, devido às grandes concentrações de CO₂ encontradas nessas reservas, componente este que reconhecidamente causa uma grande atenuação nas ondas ultrassônicas.

Existem outros fatores que devem ser considerados para uma correta medição. A restrição de espaço é uma realidade em plataformas de petróleo. Como consequência, as tubulações instaladas possuem pequenos trechos retos seguidos de curvas. Além disso, outras influências como válvulas, joelhos e flanges, os chamados acidentes de linha, podem ser prejudiciais à medição. Tais fatores influenciam o perfil de velocidades do escoamento (distribuição dos vetores de velocidade em uma dada seção transversal do tubo) que, por conseguinte, influencia na medição de vazão. O medidor ultrassônico, por exemplo, apresenta uma maior incerteza quando o perfil de velocidades não está completamente desenvolvido na seção de medição, isto é, se no trecho onde o medidor for instalado o perfil de velocidades ainda varia. Essa incerteza pode resultar em valores consideráveis quando trata-se de *Royalties*. Dessa forma, é fundamental que essas incertezas sejam mensuradas e, se possível, reduzidas.

A descoberta dos três primeiros campos do pré-sal, Tupi, Iara e Parque das Baleias, saltou as reservas brasileiras comprovadas, de 14 bilhões de barris para 33 bilhões. Além dessas citadas, existe a estimativa de novas reservas de 50 a 100 bilhões de barris [4].

Outra motivação para o estudo é o fato de que, em 2010, produtoras de óleo e gás no Brasil, foram obrigadas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Bio-Combustíveis (ANP), a reduzir em mais de 50% a queima atual de gás natural em suas plataformas até o ano de 2015 [5].

Todos os fatores acima citados ratificaram a necessidade de um estudo científico para uma correta medição e avaliação dos gases de *flare*. Por ser

inviável um estudo em campo (plataformas de petróleo), devido ao risco operacional, possibilidade de perda de produtividade, acesso remoto, custo operacional e logístico, faz-se necessário este estudo em laboratórios. Para tal, túneis de vento são instalados para a realização de experimentos e, em paralelo, simulações do escoamento desses gases em diversas condições viabilizando pesquisas nesta área.

1.2 Objetivos do trabalho

As motivações apresentadas guiaram este trabalho aos seguintes objetivos:

- a) Realizar simulações numéricas que representem o escoamento no trecho reto do túnel de vento através do *software* comercial *CFX*;
- b) Simular numericamente, por intermédio do *CFX*, a influência do medidor óptico de vazão em um escoamento completamente desenvolvido;
- c) Mapear o campo de velocidades próximo à entrada hidrodinâmica do túnel de vento;
- d) Realizar e discutir simulações numéricas no *CFX* que caracterizem a influência do bocal de entrada no escoamento do túnel de vento;
- e) Estimar em que posição do túnel de vento o escoamento é considerado completamente desenvolvido de acordo com os resultados numéricos;
- f) Comparar os perfis de velocidade dos diferentes casos simulados em posições de medição de vazão do túnel de vento com as medições experimentais realizadas por Silva F. C. [6].

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No começo da revisão bibliográfica, é descrito o que é o gás de *Flare*, algumas de suas características de escoamento, operação, condição tecnológica atual e os desafios tecnológicos.

Dando sequência, serão descritos a fundamentação teórica e técnica que nos permite adotar a premissa de utilização de ar ambiente como fluido de trabalho devido ao fato do mesmo ter um comportamento semelhante ao escoamento de gás de *flare*, citando as semelhanças hidrodinâmicas existentes.

A partir desses conceitos, serão apresentados os túneis de vento abordando suas características, tipos, aplicações e instalações.

2.1 Sobre o gás de tocha ou gás de *flare*

Queimadores de gás (gás de tocha ou gás de *flare*) são dispositivos de combustão a gás utilizados em instalações industriais como refinarias de petróleo, indústrias químicas, fábricas de processamento de gás natural, bem como em locais de produção de petróleo ou gás, *onshore* e *offshore* (Figura 2.1).



Figura 2.1 - Gás de *flare* sendo queimado em uma plataforma de exploração de petróleo e gás.

Em plantas industriais, chamas são utilizadas para queimar o gás inflamável liberado por válvulas de alívio de pressão durante as paradas da planta ou sobrepressão, por exemplo. Os queimadores também são frequentemente utilizados para a combustão planejada de gases durante períodos relativamente curtos [4].

Normalmente, o óleo de petróleo bruto extraído e produzido a partir de poços de petróleo tanto em terra quanto *offshore*, possui gás natural associado que também é trazido à superfície. Em algumas regiões exploradoras com uma infraestrutura deficitária de transporte de gases, grandes quantidades de gás associado são queimados como resíduos ou gás inutilizável. Essa queima representa um risco para a saúde humana e também uma fonte poluidora, contribuindo significativamente com as emissões mundiais de dióxido de carbono (CO₂).

Quantificando a informação acima, a quantidade de queima de gás associado ao petróleo representa cerca de $4,0 \times 10^8$ toneladas de dióxido de carbono emitidos anualmente equivalente a cerca de 1,2% das emissões mundiais. A medição de vazão desses gases nos possibilita estimar as emissões de gases de efeito estufa oriundas da exploração de poços de petróleo.

Outra característica crítica desses gases é que eles escoam tipicamente à baixa pressão (aproximadamente a 0,7 bar) e apresentam níveis de impurezas consideráveis [7]. Essas condições normalmente resultam em baixas vazões dificultando o uso de medidores de vazão mais modernos.

Um grande desafio na medição de vazão de gás de *flare* é a possível presença de contaminantes agressivos (H₂S, HF e CO) e a alta faixa de operação de medição necessária (cerca de 4000:1).

2.2 Projeto de túnel de vento

Fluido em movimento está presente em diversos processos industriais e suas características têm sido objeto de estudo há vários anos. Uma forma de estudar tal comportamento é simulando condições conhecidas através de túneis de vento.

Túnel de vento é um conjunto de diversos equipamentos com o objetivo de estudar o efeito do ar ao passar por objetos sólidos ou o escoamento de um fluido dentro de uma tubulação. Isso é possível graças ao trabalho de um ventilador que sopra ou aspira um fluido. São muito utilizados em laboratórios para determinação de parâmetros em projetos de aviões, automóveis, navios, edifícios, pontes e etc. [4].

Anteriormente à construção dos primeiros túneis de vento, foram discutidas várias possibilidades de configuração dos mesmos para efetuar testes de parâmetros em escala. A partir da década de 1930, quando a influência da turbulência sobre a camada limite tornou-se evidente, deu-se maior ênfase aos túneis aerodinâmicos com baixa turbulência e instabilidade. No fim da década de 1970, pesquisadores começaram estudos a fim de ter uma melhor compreensão dos componentes do túnel. Em seu estudo, Mehta [8] tinha como objetivo tornar as construções desses componentes mais científicas. Ele estudou os ventiladores e difusores [8], telas [9] e *honeycombs* [10].

O fluxo de ar criado pelos ventiladores é em si altamente turbulento devido ao movimento da pá do ventilador e assim não é o ideal para medições precisas. Para corrigir esse problema, retificadores de fluxo são utilizados para suavizar o fluxo de ar turbulento. Em outros casos, pode-se utilizar difusores ou bocais no túnel com o objetivo de uniformizar o perfil de velocidades e, assim, obter um desenvolvimento mais rápido. Outros fatores podem influenciar o escoamento em um túnel de vento. Para o caso de medição de vazão, por exemplo, o próprio medidor altera o escoamento e também a presença de curvas, válvulas, joelhos e flanges, os chamados acidentes de linha.

Devido aos efeitos de viscosidade, a seção transversal de um túnel é preferencialmente circular em vez de retangular, pois neste último haverá uma turbulência devido aos cantos. Uma seção circular proporciona um fluxo mais suave [4].

O objeto de teste é instrumentado para medir as forças geradas pelo fluxo de ar, ou o fluxo de ar pode ser visualizado como fumaça para analisar o

escoamento em torno do objeto. Aeronaves e veículos em tamanhos reais já foram testados em túnel de vento. Porém, essas instalações são caras para operar e manter, sendo muitas vezes substituídas por modelagem computacional.

Os túneis de vento podem ser classificados em:

- Baixas velocidades;
- Altas velocidades;
- Supersônicos: possuem Número de Mach próximo de 1;
- Hipersônicos: possuem Número de Mach muito superior a 1.

E ainda em:

- Circuito fechado: o escoamento circula no tubo em forma de anel;
- Circuito aberto: em uma das extremidades do túnel está o gerador de corrente de ar e na outra é o local de saída do ar.

2.3 Similaridade entre o escoamento no túnel de vento e *flare*

Muitas vezes é possível realizar estudos em escalas ou condições reais. Diversos motivos levam a essa restrição: questões de segurança, logística, tecnológica ou custo. Dessa forma, faz-se necessária a utilização de equipamentos, ambientes e técnicas que retratem a realidade de uma forma mais fiel possível.

Em casos de testes em equipamentos sob condições controladas, a técnica de similaridade de escoamentos ou semelhança dinâmica é muito utilizada.

Dessa forma, é possível simular o comportamento de grandes estruturas como aviões, navios, edifícios e plataformas através de protótipos em escala. Estes são testados em túnel de vento ou outros equipamentos. Os resultados obtidos podem ser extrapolados utilizando técnicas de similaridade entre o escoamento real e simulado por exemplo.

A similaridade entre dois escoamentos (escoamento de *flare* e túnel de vento, para o nosso caso) implica em [11]:

- Semelhança Geométrica
- Semelhança Térmica
- Semelhança Cinética
- Semelhança Dinâmica

Na realidade, o termo “*semelhança geométrica*” se refere a:

- Geometria da seção dos tubos: Circular em ambos os casos.
- Razão entre comprimento e diâmetro expresso em número de diâmetros: Nesse caso, os tubos de polipropileno do túnel de vento atendem plenamente a aplicação.
- Rugosidade relativa das paredes: Os tubos de polipropileno do túnel de vento atendem esta aplicação por possuir baixa rugosidade devido ao acabamento interno.

Apesar dos diâmetros do tubo *flare* e do túnel de vento não serem exatamente iguais, essa diferença não impõe restrição técnica de similaridade como mostrado acima.

A semelhança térmica também não exige que as temperaturas devam ser exatamente as mesmas. Essa condição indica que a distribuição de temperaturas ao longo dos túneis deve ser semelhante. O critério térmico é respeitado, pois é considerada distribuição homogênea de temperatura no túnel de vento e a Figura 2.1 mostra que as distribuições de temperatura em linhas de *flare* instaladas em plataformas possuem característica semelhante a considerada.

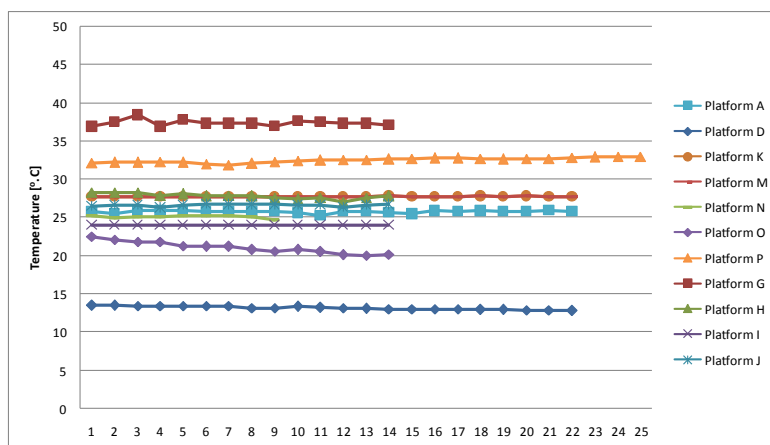


Figura 2.2 - Leituras típicas de Temperatura em linhas de *flare* (°C) [6]

Analogamente, a semelhança cinética exige que os escoamentos apresentem a mesma distribuição de velocidades. A forma mais simples de se obter essa condição é fazer com que o escoamento seja completamente desenvolvido em ambos os casos. Sabe-se que é muito difícil que o escoamento em *flare* seja completamente desenvolvido devido à presença de acidentes de linha e a dificuldade de se levantar os perfis de velocidade em campo. Já em túneis de vento, pode-se adquirir essa condição com ajuda de dispositivos (bocal e retificadores de fluxo, por exemplo). A verificação do escoamento completamente desenvolvido pode ser realizada através de diversas medições ao longo do comprimento do túnel de vento ou com simulações computacionais.

Finalmente, a semelhança dinâmica exige a comparação dos efeitos das propriedades fluidodinâmicas dos escoamentos em *flare* e túnel de vento, principalmente a compressibilidade dos escoamentos e as relações entre efeitos viscosos e de inércia. Em nosso caso, essa semelhança é obtida por análise dimensional utilizando o Teorema de *Buckingham-Pi* e implica na igualdade dos seguintes parâmetros adimensionais:

- Número de Mach: $Ma = \frac{V}{a}$
- Número de Reynolds: $Re = \frac{V.D}{\nu}$

- Trecho reto para desenvolvimento do escoamento: $L_{cd} = \frac{L}{D}$

Onde:

V : Velocidade média do escoamento [m/s];

a : Velocidade termodinâmica do som no escoamento [m/s];

D : Diâmetro interno da tubulação [m];

ν : Viscosidade dinâmica do fluido [m²/s].

Sabendo que $Ma < 0,3$ em ambos os casos e $Re_{flare} \approx Re_{túnel}$, tal condição também é satisfeita.

Salgado e Ramos [12] avaliaram a viabilidade do modelo de gás perfeito para análise das propriedades termofísicas de gás natural em *flare*. Nesse trabalho, eles compararam as propriedades termodinâmicas simuladas pela “AGA report n.º10” [13] às propriedades obtidas através da modelagem por gases perfeitos. De acordo com os autores, uma maior concentração de metano no gás de *flare*, diminui a diferença nestas propriedades. Assim terão comportamento mais próximo aos gases perfeitos a $T=20^{\circ}\text{C}$ e $P=1$ bar, condições operacionais típicas em *flare*.

3 CONFIGURAÇÃO E MONTAGEM DO TÚNEL DE VENTO

O túnel de vento do *Laboratório de Máquinas de Fluxo da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)* é fabricado em polipropileno com montagem conforme Figura 3.1 e dimensionamento conforme Tabela 3.1. Um trecho da tubulação, que comporta o medidor ultrassônico (L_{2-3}), é fabricado em aço.

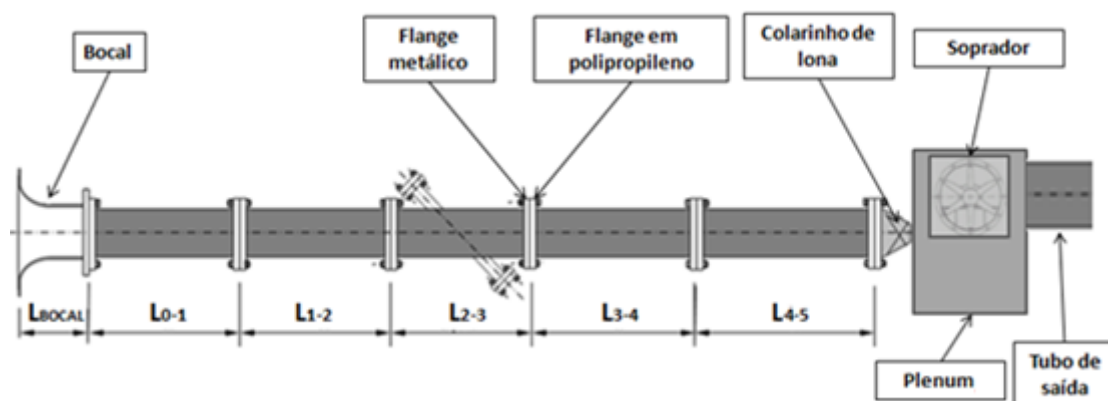


Figura 3.1 - Configuração e montagem do túnel de vento.

Tabela 3.1 - Dimensionamento do túnel de vento.

Trechos do Túnel de Vento					
	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3-4	4-5
L(mm)	2250(12.4Di)	2250(12.4Di)	1500(8.2Di)	2235(12.3Di)	1800(10Di)
Φ_{nom} (mm)	8"	8"	8"	8"	8"
Φ_{int} (mm)	182	182	184	182	182
L_{flange} (mm)	20	20	12	20	20

O ar é aspirado através da ação de um soprador com potência de 15 HP, instalado à jusante da tubulação, após o *plenum*. O soprador, que é composto por um motor de indução e um rotor, é acionado por um inversor de frequência da WEG modelo CFW 09 (Figura 3.2-a). Este é um dispositivo capaz de gerar uma tensão e frequência trifásicas ajustáveis, com a finalidade de controlar a rotação de um motor de indução trifásico com o princípio de controle vetorial, variando a tensão e a frequência, de modo a otimizar o torque para qualquer condição de rotação (baixa ou alta), ou seja, garantindo um torque constante a qualquer faixa de rotação, evitando um escoamento pulsante no interior do

túnel de vento. O controle desse inversor é feito por intermédio de um software (Figura 3.2-b) de projeto gráfico de sistemas (*LabVIEW*) que oferece a engenheiros e cientistas as ferramentas necessárias para criar e implementar sistemas de medição e controle por meio de uma integração de *hardware* e *software*.

O laboratório também está equipado com um controlador lógico programável da *Telemecanique* modelo TWDLCAA24DRF, que possibilitará interligar os instrumentos tais como, inversor de frequência, medidor ótico Photon, tubo de Pitot e o supervisor para controle do processo por meio de protocolos de comunicação industriais (MODBUS RTU – RS 485).

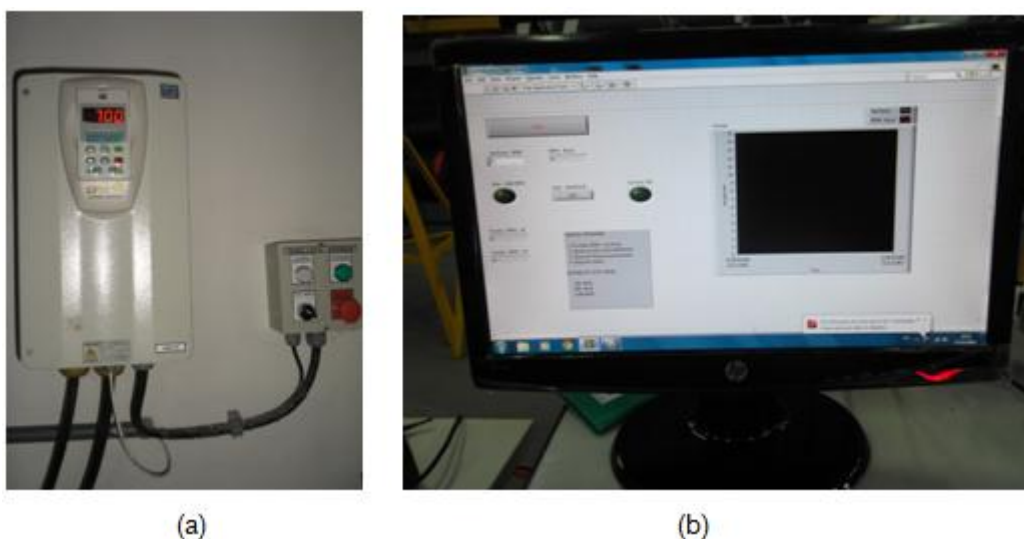


Figura 3.2- (a) Detalhe do inversor de frequência; (b) Computador com *software* instalado.

À montante dos tubos está instalado um bocal em fibra de vidro, conforme Figura 3.3. A função deste componente é reduzir a turbulência do escoamento na entrada da tubulação, direcionar e uniformizar o perfil de entrada. Dessa forma, tem-se uma condição de entrada mais favorável ao desenvolvimento do perfil de velocidades.

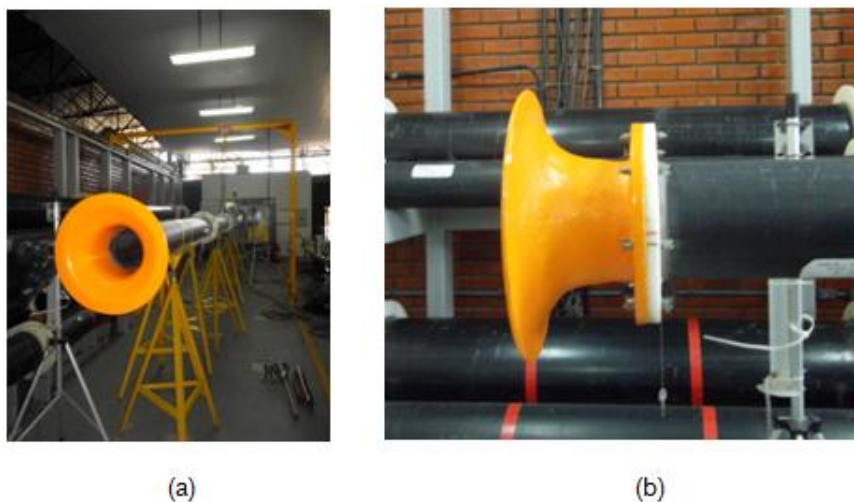


Figura 3.3– (a) Bocal instalado na entrada da tubulação; (b) Perfil do bocal.

Em cada extremidade de um trecho da tubulação encontra-se um flange para permitir o acoplamento e alinhamento do túnel. Esses flanges são fabricados em nylon (exceto para o trecho em aço) e possuem encaixe tipo macho-fêmea de forma a garantir o alinhamento da montagem.

À jusante da tubulação, tem-se instalado um colarinho de lona hermeticamente vedado com uma cinta de catraca conforme Figura 3.4-a. Após o *plenum*, um duto de 20” permite a saída do ar escoado. Uma tela retificadora de fluxo (Figura 3.4-b) é instalada na extremidade deste duto para reduzir as flutuações no escoamento dentro da tubulação devido à influência da circulação de ar externo, em baixas vazões.



Figura 3.4 – (a) Detalhe da junção do plenum à tubulação de 8” com colarinho de lona e cinta da catraca; (b) Tela retificadora de fluxo instalada à jusante do rotor, na extremidade do duto de saída.

O túnel de vento possui três medidores de vazão instalados em seu comprimento, são eles: medidor por dispersão a laser (A), ultrassônico (B) e tubo de Pitot (C) conforme indicados na Figura 3.5.

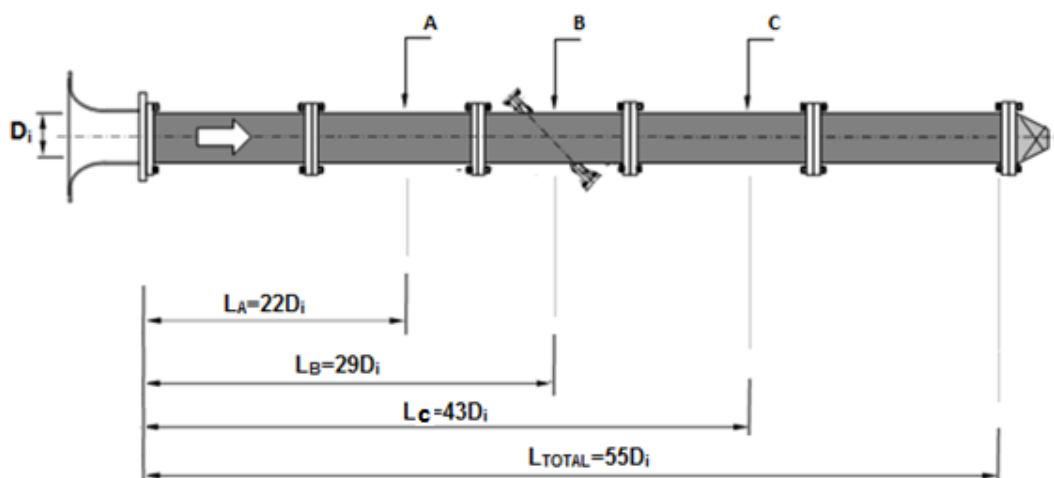


Figura 3.5 – Posicionamento e distâncias dos medidores de vazão no túnel de vento.

O medidor por dispersão a laser, também chamado de medidor Photon, utiliza a velocimetria ótica como fundamento da medição de vazão. O aparelho instalado no túnel é do tipo Laser de dois focos (Laser-Two-Focus - L2F). É classificado como um medidor de vazão intrusivo, ou seja, o seu modo de instalação interfere diretamente nos perfis de velocidade de um escoamento. A Figura 3.6 ilustra o seu modo de instalação para tubulações entre 6 e 32 polegadas. O leitor pode obter maiores informações sobre essa tecnologia em [6].

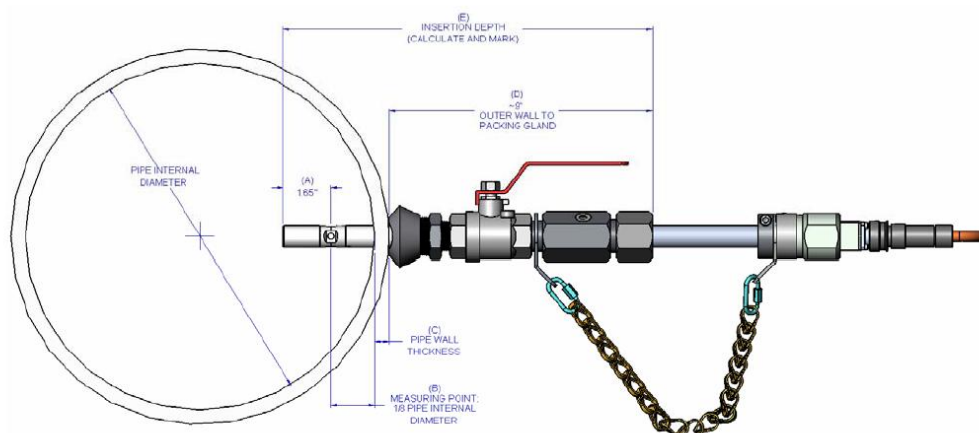


Figura 3.6 – Modo de instalação do medidor Photon em tubulações de 6 a 32 polegadas.

O medidor ultrassônico mede o tempo de trânsito através de transdutores que emitem e recebem pulsos ultrassônicos e posteriormente faz o uso de cálculos para determinar a vazão. O histórico, funcionamento e as formulações utilizadas podem ser encontrados em [14].

O tubo de Pitot é um instrumento capaz de determinar a pressão dinâmica através da diferença medida entre a pressão total e a pressão estática do fluido escoado, transversalmente à direção do escoamento, sendo, portanto, apto a medir o perfil de velocidades transversal ao tubo. Maiores detalhes e informações sobre esta técnica estão descritos em [6].

São instalados dois retificadores de fluxo semelhantes em cada extremidade da tubulação (Figura 3.7). Esses componentes contribuem com a melhoria no desenvolvimento do perfil de velocidades e nos resultados de medição global de vazão, porém aumentam a perda de carga.



Figura 3.7 – Retificador de fluxo instalado em uma extremidade da tubulação.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA E MÉTODO NUMÉRICO

A disponibilidade e acessibilidade de *hardwares* de alta performance e de *softwares* relacionados à Dinâmica de Fluidos Computacional (DFC) justificam o aumento significativo de estudos com a utilização de simulações numéricas. As interfaces usuário-máquina dos *softwares* mais amigáveis, o nível de detalhe dos resultados comparados aos de experimentos e a capacidade de estudar sistemas dos mais diferentes níveis de complexidade são alguns dos motivos para a maior adoção dessa ferramenta tanto pela academia quanto pela indústria.

Nas seções seguintes serão abordadas equações que modelam o escoamento dos fluidos, o método numérico utilizado, as condições de contorno adotadas para solução das equações, além da apresentação das instalações computacionais utilizadas ao longo deste trabalho.

4.1 Modelagem matemática

4.1.1 Equações de Conservação

As equações governantes de um escoamento são oriundas das leis de conservação da física – a conservação da massa e a segunda lei de Newton. Considerando o fluido incompressível e newtoniano, as equações de conservação que representam seu escoamento são as seguintes:

Equação de Conservação da Massa ou Equação da Continuidade

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (4.1)$$

Em que:

- ρ é a massa específica do fluido [Kg/m^3];
- u_i é a componente da velocidade na direção i [m/s];
- x_i é a coordenada cartesiana na direção i [m];
- t é o tempo [s].

Equação de Conservação de Momento (Navier-Stokes)

$$\rho \left[\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (4.2)$$

Em que:

- u_j é a componente da velocidade na direção j [m/s];
- x_j é a coordenada cartesiana na direção j [m];
- p é a pressão estática do fluido [N/m^2];
- μ é a viscosidade dinâmica do fluido [Pa.s].

O conjunto de equações de conservação forma um sistema de quatro equações: a da continuidade mais as equações de conservação de momento nas três coordenadas cartesianas – x , y e z . Nessas equações, tem-se quatro variáveis desconhecidas: a pressão estática do fluido, p , e as três componentes da velocidade – u , v e w . A partir desse sistema é possível obter soluções analíticas exatas (apenas para casos simples de escoamentos laminares) ou numéricas por meio da *Simulação Numérica Direta* (DNS) [16]. A resolução das equações governantes por meio de DNS não inclui nenhum tipo de modelagem da turbulência. Porém, quando devidamente implementados, gera resultados com boa confiabilidade experimental para casos laminares e turbulentos.

A turbulência é um fenômeno que acontece em escoamentos com altos números de Reynolds, em que as forças de inércia se sobressaem às forças viscosas. Caracterizado pela constante alteração da velocidade e da pressão com o tempo em regiões do escoamento, esse fenômeno é considerado caótico e complexo. Os fenômenos turbulentos acontecem em ranges de escalas de tempo e comprimento amplos. Alguns deles acontecem em escalas tão mínimas que não poderiam ser detectados nem pelas malhas mais refinadas.

Devido a essas características, soluções para esse tipo de escoamento por meio de DNS demandariam uma capacidade computacional além da existente

nos dias atuais. Vista a necessidade de prever efeitos da turbulência de forma menos dispendiosa, surgiram os modelos de turbulência. Os modelos de turbulência são meios computacionais de fechar o sistema de equações que incluem as equações de conservação e as três equações de Reynolds.

4.1.2 Equações de Reynolds

A figura abaixo descreve uma possível leitura da velocidade em um escoamento turbulento.

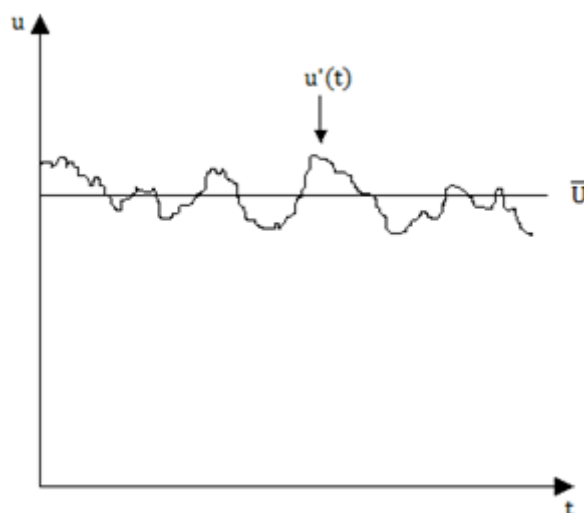


Figura 4.1 – Representação de uma medição de velocidade pontual em um escoamento turbulento.

Essa natureza inconstante de um escoamento turbulento impede cálculos que descrevam o completo movimento de todas as partículas fluidas. A partir desse fato, Reynolds [17] propõe a decomposição da componente da velocidade $u(t)$ em um valor médio, \bar{U} , e em uma componente da flutuação, $u'(t)$, escrevendo-se:

$$u_i(t) = \bar{U}_i + u'_i(t) \quad (4.4)$$

O mesmo é imposto às outras componentes da velocidade, v e w , e à pressão, p , passando a caracterizar o escoamento turbulento através de valores médios das propriedades do escoamento (\bar{U} , \bar{V} , \bar{W} e \bar{P}) e propriedades estatísticas de suas flutuações (u' , v' , w' e p').

Substituindo essas novas variáveis nas equações de continuidade (4.1) e momento (4.2), e considerando um escoamento em regime permanente, obtém-se um grupo de outras quatro equações [18]. A Equação (4.5) representa equação da continuidade em sua nova forma e a (4.6) representa o conjunto das três equações de Reynolds ou RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes).

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.5)$$

$$\left[\rho \bar{U}_i \frac{\partial (\bar{U}_j)}{\partial x_i} \right] = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \bar{U}_i' \bar{U}_j' \right] \quad (4.6)$$

Em relação à equação de conservação da quantidade de movimento (4.2), obtém-se um termo adicional proveniente da turbulência, $-\rho \bar{U}_i' \bar{U}_j'$, também conhecido como *tensor das tensões de Reynolds*, τ_{Tij} .

$$\tau_{Tij} = -\rho \bar{U}_i' \bar{U}_j' = -\rho_j \begin{bmatrix} u'u' & u'v' & u'w' \\ v'u' & v'v' & v'w' \\ w'u' & w'v' & w'w' \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Com esse termo adicional tem-se mais seis variáveis, as *tensões de Reynolds*. Agora são quatro equações e dez variáveis desconhecidas. Tornou-se necessário, então, prever essas tensões de Reynolds para que se conseguisse fechar o sistema em quatro equações e quatro incógnitas. Para isso, surgiram os modelos de turbulência baseados nas equações de Reynolds, que por meio de procedimentos computacionais predizem os termos do tensor das tensões de Reynolds.

4.1.3 Hipótese de Boussinesq

Foi proposto por Boussinesq [19], em 1877, que as tensões de Reynolds poderiam ser associadas às taxas médias de deformação. Assim:

$$\tau_{Tij} = -\rho u'_i u'_j = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \kappa \delta_{ij} \quad (4.8)$$

Em que:

- μ_T é a viscosidade turbulenta [m/s];
- κ é a energia cinética turbulenta [m^2/s];
- δ_{ij} é o delta de Kronecker;

A viscosidade turbulenta (μ_T) [20] não é uma propriedade molecular, mas uma propriedade do escoamento. Sua forma de representação varia de acordo com os modelos de turbulência. Uma vez definida a viscosidade turbulenta, tem-se que a viscosidade efetiva (μ_{ef}) é:

$$\mu_{ef} = \mu_T + \mu \quad (4.9)$$

4.1.4 Modelo $k-\varepsilon$ de turbulência

Visto que o modelo $\kappa-\varepsilon$ padrão [21,22,23] consegue reproduzir o efeito de fenômenos no escoamento de forma razoável e com um baixo tempo computacional em relação a modelos de turbulência mais sofisticados, ele se tornou uma ferramenta bastante difundida e utilizada dentro dos softwares de DFC.

O modelo assume a viscosidade turbulenta sendo:

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (4.10)$$

Em que:

- C_μ é a constante adimensional do modelo;
- κ é a energia cinética turbulenta [m^2/s^2];
- ε é a dissipação da energia cinética turbulenta [m^2/s^3].

A fim de obter a solução do sistema das equações (4.5), (4.6), (4.8) e (4.10), as soluções para κ e ε ainda são necessárias. Considerando o regime permanente, Jones e Launder [22] propõem duas equações extras de transporte para essas incógnitas:

$$\rho \bar{U}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \right] + P_\kappa - \rho \varepsilon \quad (4.11)$$

$$\rho \bar{U}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{\varepsilon}{\kappa} (C_{\varepsilon 1} P_\kappa - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (4.12)$$

Onde:

- P_κ representa a produção de energia cinética turbulenta por forças viscosas.

Para escoamentos incompressíveis, é sabido que:

$$P_\kappa = \mu_T \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.13)$$

A Tabela 4.1 mostra os valores das constantes do modelo [21].

Tabela 4.1 – Valores das constantes do modelo $K - \varepsilon$ padrão

C_μ	σ_κ	σ_ε	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$
0,09	1,00	1,30	1,44	1,92

4.2 Métodos numéricos

O *software* utilizado neste trabalho utiliza o método dos volumes finitos para resolver os sistemas algébricos das equações governantes discretizadas. Essa seção apresenta a fundamentação teórica básica do Método dos Volumes Finitos assim como outros detalhes importantes.

4.2.1 O método dos volumes finitos

O método dos volumes finitos baseia-se em aplicar as equações de conservação, apresentadas na última seção, em volumes de controle.

Primeiramente, considera-se convecção-difusão estacionária de uma propriedade ϕ . Este processo pode ser representado pela equação de transporte [15]:

$$\text{div}(\rho \phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + S_\phi \quad (4.14)$$

Onde:

- div é o operador divergência, definido para um vetor ϕ como $\frac{\partial \phi}{\partial x}$;
- grad é o operador gradiente, definido para um escalar ϕ como $\text{grad} \phi = \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \hat{e}_i$ e para um vetor ϕ_i como $\text{grad} \phi_i = \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \hat{e}_i \hat{e}_j$, onde \hat{e}_i e \hat{e}_j são os vetores unitários na direção i e j , respectivamente;
- u é o vetor de velocidade [m/s];
- ϕ é a propriedade sendo transportada a qual as unidades podem variar;
- Γ é o coeficiente de difusão o qual sua unidade depende de ϕ ;
- S_ϕ é o termo de fonte que depende de ϕ .

Integrando a Equação (4.14) no volume de controle, tem-se:

$$\int_{VC} \text{div}(\rho \phi u) dV = \int_{VC} \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) dV + \int_{VC} S_\phi dV \quad (4.15)$$

Onde:

- VC representa o volume de controle;
- dV é o elemento de volume infinitesimal.

Aplicando o teorema da Divergência [24] na Equação 4.15:

$$\int_A (\rho u \phi) n dA = \int_A (\Gamma \text{grad} \phi) n dA + \int_{CV} S_\phi dV \quad (4.16)$$

Essa equação representa o balanço do fluxo em um volume de controle. Os termos no lado esquerdo representam a taxa de fluxo convectivo e do lado direito a taxa de fluxo difusivo e a geração ou destruição da propriedade ϕ dentro do volume de controle.

Deve-se, agora, dividir o domínio em volumes de controle onde a equação acima possa ser aplicada. Essa divisão é denominada discretização e será brevemente apresentada na próxima seção.

4.2.2 Equações discretizadas

Considera-se o transporte de uma propriedade ϕ em um domínio unidimensional em que os valores de ϕ nas fronteiras A e B são conhecidos, como mostrado na Figura 4.2.

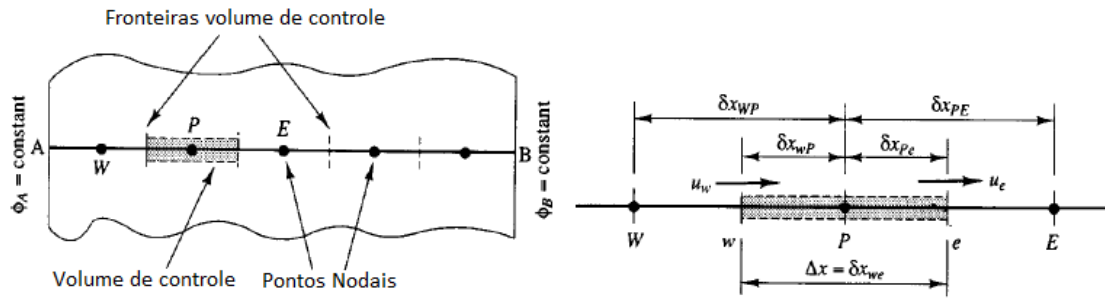


Figura 4.2 - Discretização unidimensional. Adaptada de [3].

O domínio mostrado na Figura 4.2 possui cinco pontos nodais que são o centro de cada volume de controle. Nossa atenção é focada no ponto P, os pontos vizinhos são chamados de W e E e as faces do volume de controle de w e e.

As distâncias entre W e P, e entre P e E são δx_{WP} e δx_{PE} , respectivamente. A espessura do volume de controle é $\Delta x = \delta x_{we}$.

Aplicando a Equação (4.16) no volume de controle do ponto nodal P, é obtida a equação discretizada no ponto nodal:

$$(\rho u A \phi)_e - (\rho u A \phi)_w = \left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w + S_\phi \Delta V \quad (4.17)$$

Onde:

- os subíndices indicam a face na qual as propriedades são calculadas;
- u é a velocidade na direção x [m/s];
- A é uma área da seção da superfícies do volume de controle [m^2];
- S_ϕ é o valor médio da fonte sob o volume de controle;
- ΔV é o volume [m^3].

Considerando condições de regime permanente e o mesmo processo de integração na equação de continuidade (4.1), tem-se:

$$(\rho u A)_e - (\rho u A)_w = 0 \quad (4.18)$$

Neste trabalho, a viscosidade dinâmica (μ , que faz o papel do coeficiente de difusão Γ), a densidade (ρ) e a área de seção transversal (A) são constantes e conhecidas. Porém, ainda é necessário saber os valores de u , ϕ e $\frac{\partial \phi}{\partial x}$ nas faces leste (w) e oeste (e).

Quando a propriedade ϕ na Equação (4.14) for substituída pelas componentes de velocidade (u , v e w), equações de momento em regime estacionário são obtidas. No entanto, o termo de pressão na Equação (4.2) aparece na equação (4.14) como parte do termo de fonte. De fato, o termo do gradiente de pressão “forma o principal termo de fonte na maioria dos escoamentos de importância para a engenharia” [15]. No sistema algébrico formado pelas Equações (4.17) e (4.18), cada componente de velocidade possui uma equação de transporte associada a ela além de estar presente nos termos da equação da continuidade. Por outro lado, a pressão possui um papel complexo nesse sistema pela ausência de uma equação para ela. Na próxima seção, é mostrada a aproximação usada pelo *CFX* para a sistemática de interpolação e solução da pressão.

4.2.3 Esquema de discretização do CFX

O CFX oferece, para os modelos de turbulência menos robustos, três métodos para interpolação dos termos de advecção em torno do ponto nodal. São eles: *upwind*, *high resolution* e *specified blend factor*. Normalmente, o CFX interpola as propriedades como mostrado na Equação (4.19) [25].

$$\phi_f = \phi_{up} + \beta grad\phi.\vec{\Delta r} \quad (4.19)$$

Onde:

- ϕ_f é o valor da propriedade ϕ na face;
- ϕ_{up} é o valor da propriedade ϕ à montante do ponto nodal;
- β é o “blend factor”;
- $grad\phi$ é o gradiente da propriedade ϕ cujo tratamento depende do método escolhido;
- \vec{r} é o vetor com sentido de origem à montante para o ponto nodal.

Escolher o método *upwind* equivale a $\beta = 0$ na Equação (4.19), ou seja, “o valor convectivo de ϕ em uma face do volume de controle é levado a ser igual ao valor do nó à montante” [15]. *Upwind* é, então, um método de precisão de primeira ordem e, apesar de simples e muito utilizado, ele normalmente causa falsa difusão numérica [7]. Os erros de discretização utilizando o *upwind* podem ser reduzidos escolhendo valores para β entre 0 e 1. Para $\beta = 1$ a precisão alcança a segunda ordem. Normalmente, aumentar β resulta em aumento da precisão. Porém também gera soluções irreais (oscilações locais) por ser não-dissipativo.

O método *high resolution* é similar ao método de “Diminuição Total da Variação” (ou Total Variation Diminishing) [15]. A maior diferença entre o método *high resolution* e os outros dois está no fato dele procurar o melhor fator de mistura β para cada nó. Para maiores informações sobre estes métodos e suas peculiaridades, o leitor pode acessar a referência [15, 25].

É notável que no *CFX*, equações de turbulência sempre usam método de advecção *upwind* de primeira-ordem, independente do método escolhido para as equações de momento [7].

Neste trabalho, o método de advecção utilizado para solução das equações de momento foi o *high resolution* devido às vantagens já citadas.

4.2.4 Algoritmo pressão – velocidade

Como comentado no fim da seção 4.2.2, devido ao fato da pressão e velocidade ter que satisfazer tanto a equação de momento quanto a de continuidade, a ausência de uma equação para a pressão é considerada um problema.

O *CFX* oferece algoritmo de acoplamento pressão-velocidade. Neste tipo, as equações de momento e continuidade (baseada na pressão) são resolvidas simultaneamente. Diferentes técnicas de discretização para o gradiente de pressão e fluxo de massa são necessários, e o sistema discretizado resultante deve ser colocado junto em uma única matriz de equação.

4.3 Parâmetro de simulação e condições de contorno

As equações relacionadas ao escoamento do fluido podem ser fechadas (numericamente) pela especificação de condições em superfícies externas do domínio do fluido. Essas condições de contorno são responsáveis, em grande parte, pelos resultados obtidos. Como mostrado acima, a modelagem é baseada em equações diferenciais e condições de contorno são necessárias para a solução das mesmas. As Equações (4.5) e (4.6) juntamente com as equações de turbulência permitem obter os resultados para o escoamento estudado.

O *CFX* apresenta seis tipos de condição de contorno. Serão mostradas a seguir as condições de contorno utilizadas em nossas simulações. São elas: condição de entrada, parede, simetria e saída.

Posteriormente, no estudo de cada caso, serão apresentados os valores para cada condição e detalhes pertinentes.

O fluido utilizado no presente trabalho foi ar seco. As principais propriedades desse fluido provenientes do banco de dados do *CFX* são mostradas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros usados nas simulações.

Massa molar [kg/kmol]	28,96
Viscosidade dinâmica [kg/m/s]	1,83E-05
Massa específica [kg/m³]	1,185
Pressão de referência [atm]	1
Temperatura de referência [°C]	25

4.3.1 Condições de entrada

As condições de entrada para a equação de momento são normalmente velocidade ou pressão. O *CFX*, porém, oferece outras opções como a vazão mássica. Como tem-se dados experimentais da velocidade de entrada da tubulação (vide capítulo 7) e também devido ao fato de condições de entrada uniforme e de perfil desenvolvido serem objetos de estudo, em todos os casos as serem simulados neste trabalho utiliza-se velocidade como condição de entrada. O perfil assumido foi sempre normal ao plano de entrada.

Como será detalhado adiante, foram estudados três casos diferentes: entrada com perfil de velocidades uniforme, com perfil de velocidades adquirido experimentalmente e perfil de velocidades desenvolvido. Para este último, a condição de entrada adotada segue a moderna abordagem analítica de De Chant [27], conforme equação:

$$u = U_{\max} \left[\left(\frac{y}{R} \right)^{-1/4} \times \operatorname{sen} \left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{y}{R} \right)^{1/2} \right) \right]^{1/2} \quad (4.20)$$

A condição de entrada relacionada à turbulência, k e ε , também deve ser especificada. Os usuários do programa possuem duas opções nesse caso. A primeira é especificar um valor para cada uma dessas variáveis:

$$k|_{\text{entrada}} = k|_{\text{espec}} \quad (4.21)$$

e

$$\varepsilon|_{entrada} = \varepsilon|_{espec} \quad (4.22)$$

Na outra opção, os valores de k e ε devem ser calculados em função dos parâmetros descritos na seção 4.1.4.

O guia do usuário do *CFX* [28] sugere que, caso o usuário não tenha informações sobre a turbulência do escoamento na entrada, ele utilize a intensidade de turbulência de 5% (condição de entrada da turbulência). Esse valor representa um nível médio de turbulência e, quando definido, automaticamente, impõe a razão μ_T/μ igual a 10.

4.3.2 Condições de parede

Paredes são contornos sólidos (impermeáveis) para o escoamento do fluido. Em todos os casos estudados, considera-se a parede estacionária sem deslizamento. Com isso, os componentes da velocidade são nulos na parede.

$$\bar{u}|_{wall} = \bar{v}|_{wall} = \bar{w}|_{wall} = 0 \quad (4.23)$$

4.3.3 Condições de simetria

Muitas vezes, um problema físico tem a característica de que o fluxo é simétrico sobre algum(ns) plano(s) físico(s). Um problema é simétrico em relação a um plano quando o fluxo de um lado do plano é uma imagem de espelho do fluxo no lado oposto. Por definição, uma condição de contorno de simetria refere-se a uma superfície planar de fronteira.

Um caso específico pode ter mais do que um plano de simetria. Em nosso caso, por exemplo, o escoamento em um tubo pode apresentar simetria sobre dois planos independentes (90° em relação ao outro). O domínio computacional pode, portanto, ser limitado a um quarto do tubo, usando duas superfícies como plano de simetria.

“Esta condição tanto reduz o esforço computacional quanto ajuda na convergência” [29]. Matematicamente, as condições impostas nessas superfícies de contorno são [29]:

$$\frac{\partial u_i^{par}}{\partial n} = 0 \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (4.25)$$

$$u_i^{perp} = 0 \quad (4.26)$$

Onde:

- u_i^{par} e u_i^{perp} são os componentes da velocidade paralelo e perpendicular, respectivamente, a superfície de contorno;
- ϕ representa as variáveis escalar: p , k , e ε ;
- n representa a direção normal à superfície.

4.3.4 Condições de saída

Parâmetros de saída para as equações de momento são dadas por condições de pressão. Nessa condição, caso adote-se a *pressão estática*, sabe-se que o CFX considera-a constante em todo plano de saída. O programa também permite usar a *pressão estática média*. Esta opção aceita variações na pressão mas garante que o valor médio no plano de saída é igual ao valor especificado.

Condição de escoamento completamente desenvolvido é desejado nas condições de saída para que os gradientes de todas as variáveis (exceto a pressão) seja zero na direção do escoamento. Gradiente-zero é muito comum em códigos DFC. Essa condição clássica é descrita pelas Equações (4.27) a (4.29).

$$\left. \frac{\partial \bar{u}}{\partial n} \right|_{saída} = \left. \frac{\partial \bar{v}}{\partial n} \right|_{saída} = \left. \frac{\partial \bar{w}}{\partial n} \right|_{saída} = 0 \quad (4.27)$$

$$\left. \frac{\partial k}{\partial n} \right|_{saída} = 0 \quad (4.28)$$

$$\left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} \right|_{saída} = 0 \quad (4.29)$$

Como a condição de gradiente-zero implica em escoamento desenvolvido, a localização da saída é muito importante para não gerar resultados irreais. É possível que o perfil de velocidade ainda mude na direção do escoamento e então um estudo de sensibilidade deve ser feito para comprovar que a solução não é afetada pela localização da saída.

Neste trabalho, a premissa de escoamento desenvolvido na saída foi adotada para todos os casos. Por conseguinte, adotou-se condição de pressão estática média. Porém, não se sabe ao certo se o escoamento no túnel de vento possui essa característica na sua saída (55D). Dessa forma, após algumas tentativas e conclusões, que serão mostradas posteriormente, decidiu-se simular o túnel de vento com um comprimento de 100D. Dimensão esta que nos assegura que o escoamento está desenvolvido na saída da tubulação [30] e, assim, adotar um valor de pressão como condição de saída.

4.4 Instalações computacionais

As simulações computacionais deste trabalho foram executadas em computadores instalados no Laboratório de Fenômenos de Transporte Computacionais (LFTC) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Iniciou-se o trabalho, simulando em máquinas individuais, dotadas de processadores Quad Core 2.4 GHz, 4 GB de memória RAM e 8 MB de memória cache. Em determinado momento do trabalho, essas máquinas não eram suficientes para execuções de algumas de nossas simulações, devido principalmente ao grau de refinamento de algumas das malhas. Logo, passou-se a utilizar o cluster que se encontrava instalado no mesmo local. Ele era composto de oito máquinas com as mesmas configurações das máquinas individuais, totalizando 32 processadores e 32 GB de memória RAM disponíveis.

4.5 Considerações sobre erros numéricos e incertezas

Versteeg e Malalasekera [15] reportaram a importância de reconhecer e quantificar os erros e incertezas no modelo de DFC. Os autores sugerem duas etapas: verificação e validação. A primeira envolve erros e a segunda, incertezas. Alguns aspectos da verificação são *round-off error*, *erro iterativo de convergência* e *erro de discretização*. Round-off error é imposto pela precisão da sua simulação, que, em todos os casos, foi especificado com double precision (ou dupla precisão). Erros iterativos de convergência são dados pelo critério de convergência, que foi especificado como 10^{-8} em todos os casos. Erros de discretização são consequências dos métodos de interpolação e serão comentados nos capítulos a seguir.

4.6 ANSYS 13.0 e CFX

Esta seção mostra o procedimento usual e as principais etapas para se obter resultados de problemas simulados com o pacote *ANSYS 13.0*, sendo um dos softwares que o compõe, o *CFX*.

4.6.1 Desenho da geometria

O primeiro passo é a geração da geometria do problema. Esta deve ser representada em escala real e definida como o volume de controle do problema, ou o domínio. Ou seja, representa o espaço no qual fluido escoar. O programa permite ao usuário utilizar o *software* que consta no pacote *ANSYS 13.0 (Design Modeler)* ou importar geometrias de outros *softwares*.

4.6.2 Geração da malha

Após definir a geometria, inicia-se a etapa de geração de malha. Esta etapa tem como objetivo dividir o domínio em vários volumes nos quais serão aplicadas as equações na etapa de processamento (vide seção 4.6.4) até atingir o critério de convergência determinado no pré-processamento (vide seção 4.6.3).

Existem, de uma forma geral, dois tipos de malhas, as estruturadas e as não-estruturadas. A primeira é caracterizada por ter sempre o mesmo número de

elementos vizinhos e os mais comuns são os quadriláteros e hexaédricos. Já nas não-estruturadas, cada elemento pode ter um número diferente de vizinhos e o formato deles podem ser diferentes. Nestas, os mais comuns são os elementos tetraédricos e prismas. Todas as malhas geradas neste projeto foram estruturadas.

4.6.3 Pré-processamento

O pré-processamento, feito por meio do *CFX-Pre*, é a etapa na qual são definidas características do problema e condições de contorno. Informações essas necessárias para que o processamento (seção 4.6.4) ocorra. Nesta etapa são definidos diversos parâmetros em relação

É possível definir o estado do fluido, além de propriedades como viscosidade e massa específica, pressão e temperatura de referência, usando modelos de fluidos padrões do banco de dados de materiais do *CFX-Pre*. Pode-se escolher o regime do escoamento (transiente ou permanente, subsônico ou supersônico, compressível ou incompressível) e o modelo de turbulência (k - ϵ , RNG k - ϵ , k - ω , dentre outros).

As condições de contorno são definidas nesta etapa. Elas fecham o sistema de equações e variáveis para o processamento, impondo condições de entrada, saída, simetria, parede e etc. Assim como as propriedades, pode-se especificar a velocidade na entrada do domínio, a rugosidade das paredes, a temperatura das faces presentes na geometria e etc.

Pode-se controlar a convergência através da determinação do número máximo de iterações e o critério de convergência pode ser adotado como sendo o resíduo nas equações governantes.

4.6.4 Processamento

O processamento é a etapa responsável pela resolução numérica do problema. Para isso, conta com algoritmos capazes de resolver equações com os parâmetros já definidos. O *CFX-Solver* permite o processamento em máquinas

com mais de um núcleo de processamento e também possui uma interface gráfica que permite acompanhar a resolução em tempo real.

4.6.5 Pós-processamento

O pós-processamento é feito com o *CFX-Post* e permite, basicamente, a análise dos resultados. É possível criar planos, linhas, linhas de corrente, vetores, animações, gráficos 2D ou 3D, superfícies sobre os quais propriedades e parâmetros podem ser analisados. O *CFX-Post* possibilita exportação de dados e imagens.

5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO TRECHO RETO

5.1 Apresentação do caso

O primeiro caso estudado foi o trecho reto do túnel de vento. A geometria consiste em uma tubulação de 182 mm de diâmetro interno com trecho reto de 100D, isto é, comprimento equivalente a cem diâmetros. Essa terminologia de usar dimensões da tubulação em função do diâmetro é comum tanto na indústria quanto na literatura e o motivo do comprimento simulado ser maior do que o real (55D), como consta na Tabela 3.1, será informado na seção 5.3. Devido ao fato de se tratar de uma geometria simétrica em relação a dois planos (90° em relação ao outro), desenhou-se a geometria do domínio (Figura 5.1), através do programa *DesignModeler*, como sendo $\frac{1}{4}$ da geometria real a fim de reduzir o esforço computacional.

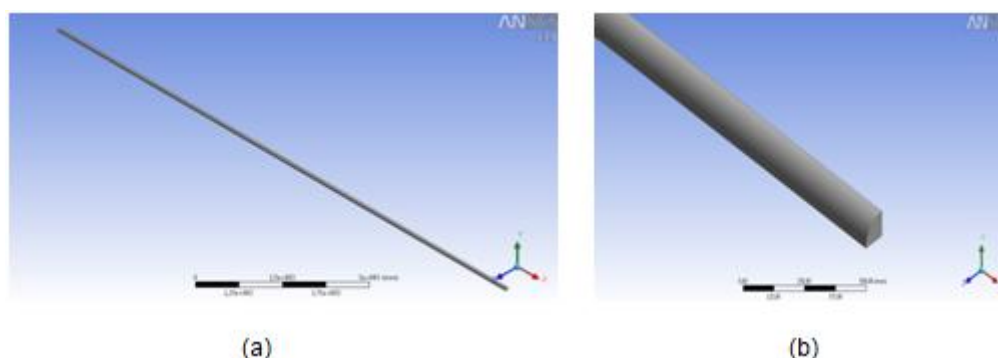


Figura 5.1 – (a) Geometria do trecho reto e (b) Perfil $\frac{1}{4}$.

5.2 Geração da malha

Uma malha é dita mais fina ou refinada quanto maior for o número de nós que a formam. O objetivo de se obter uma malha mais fina é tentar diminuir, a um grau satisfatório, a influência de erros numéricos presentes na discretização das equações governantes no resultado da simulação. Quanto mais refinada for a malha, maior o número de nós e elementos presentes nela. Porém, não é apenas esse fator que indica a qualidade da malha. É importante, também, que se observe a transição entre os elementos de controle. O ideal é que esta transição seja suave, sem grandes diferenças dimensionais entre os

elementos. Diferenças essas que agregam erros ao resultado e as iterações fazem com que estes erros se propaguem.

O teste de malha visa determinar uma malha “satisfatória” com o menor número de nós possível, ou seja, um menor esforço computacional. Isso é possível ao gerar diferentes malhas para o domínio, desde uma mais grosseira até uma mais fina, e analisar os resultados obtidos com cada uma delas. Chegará um momento em que uma maior qualidade da malha, ou seja, um maior refinamento, não é justificável, pois a partir daquele ponto as malhas apresentam resultados muito parecidos, garantindo a confiabilidade da solução.

A partir disso, foram geradas cinco malhas para este caso com o auxílio do software *ICEM CFD* [31]. Vale lembrar que durante o período de desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado diversas vezes o software incluso no pacote *ANSYS*, o *Meshing*. Porém, após geração de malhas em diferentes geometrias, teve-se dificuldades para controlar alguns parâmetros fundamentais para adquirir uma malha de boa qualidade. Outro ponto negativo foi o tempo demandado para criar novas malhas, muito maior comparado ao do outro programa. Foi nos apresentado, então, o *ICEM CFD* e a partir disso, trabalhou-se apenas com ele. Todas as malhas utilizadas neste trabalho foram geradas através dele.

As malhas são hexaédricas e foram geradas com a técnica de *multi-block* [15] por oferecer maior flexibilidade e controle dos elementos.

Para este primeiro caso, maiores detalhes do processo de geração das malhas assim como o teste de sensibilidade, ou teste de malha, são mostrados.

A Figura 5.2 mostra o arranjo dos blocos gerados. A ideia é dividir o domínio em três blocos (blocos 1, 2 e 3). Essa divisão é resultado do uso de uma ferramenta chamada *O-Grid*. Esta permite modificar um bloco em diversos sub-blocos permitindo adequar a malha ao formato da geometria (1/4 de círculo no caso) garantindo uma melhor distribuição dos elementos. O *software* usado também oferece diversas opções de *Mesh Law* para cada aresta, uma ferramenta que permite escolher a forma de distribuição dos nós em uma

aresta. Neste caso, foi utilizada a “*Uniform*” (os nós ao longo da aresta estão uniformemente distribuídos) para as arestas L_2 e L_3 e o “*Geometric 1*” (os nós ao longo da aresta crescem de acordo com uma taxa de crescimento especificada) para as arestas L_1 . O motivo da escolha deste último método para essas arestas é devido aos fenômenos viscosos que ocorrem próximo a parede. Nessas regiões, deve-se haver um maior refinamento da malha, pois existe uma maior variação das propriedades do fluido, inclusive da velocidade. Tem-se, agora, controle do número de nós de todas as arestas. É possível, assim, variar o número e tamanho dos elementos em cada aresta do domínio.

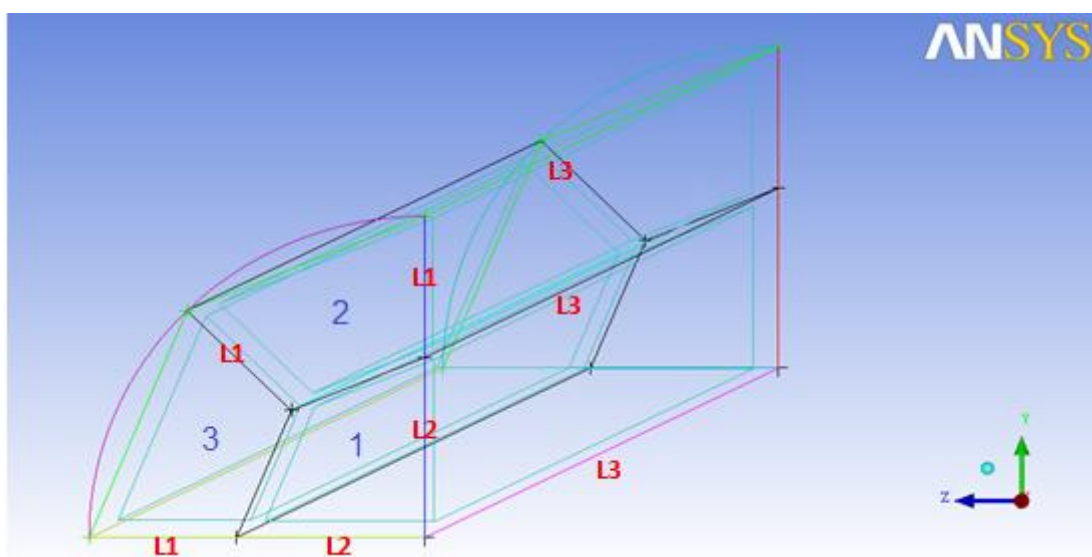


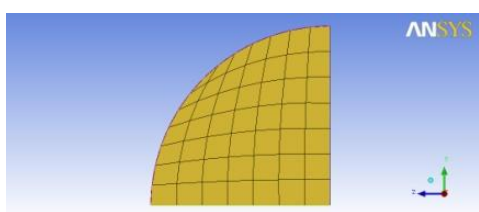
Figura 5.2 - Arranjo dos blocos e arestas para o trecho reto.

A Tabela 5.1 mostra os valores do comprimento, número de nós, *Mesh Law*, *Spacing 1* (tamanho do primeiro elemento da aresta) e *Ratio 1* (taxa de crescimento dos elementos na aresta) para cada aresta em cada malha além do número total de nós.

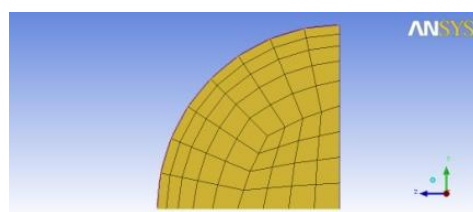
Tabela 5.1 – Parâmetros especificados para geração das malhas.

L1	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5	Malha 6
Comprimento (mm)	-	40	40	40	40	40
Número de nós	-	6	9	12	17	22
Mesh Law	-	Geometric1	Geometric1	Geometric1	Geometric1	Geometric1
Spacing 1 (mm)	-	4,5	2,8	2	1,4	0,9
Ratio 1(mm)	-	1,29	1,16087	1,11408	1,07	1,06919
L2	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5	Malha 6
Comprimento (mm)	91	51	51	51	51	51
Número de nós	9	5	7	9	12	13
Mesh Law	Uniform	Uniform	Uniform	Uniform	Uniform	Uniform
Spacing 1 (mm)	13	12,75	8,5	6,375	4,63636	4,25
Ratio 1(mm)	1	1	1	1	1	1
L3	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5	Malha 6
Comprimento (mm)	18200	18200	18200	18200	18200	18200
Número de nós	1400	1450	2100	2850	3900	4300
Mesh Law	Uniform	Uniform	Uniform	Uniform	Uniform	Uniform
Spacing 1 (mm)	13	12,56	8,67	6,38	4,66	4,23
Ratio 1(mm)	1	1	1	1	1	1
Número Total de Nós	89600	101500	321300	763800	1996800	2984200

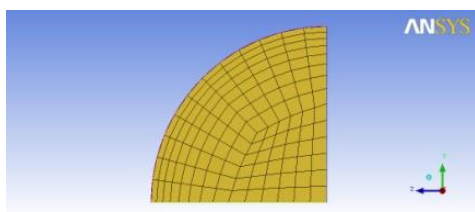
As malhas cujos parâmetros estão indicados na Tabela 5.1, são ilustradas na Figura 5.3.



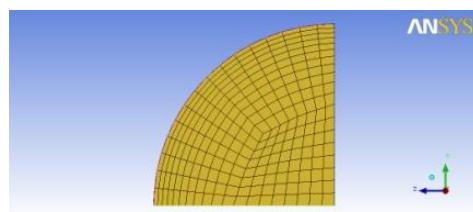
(a)



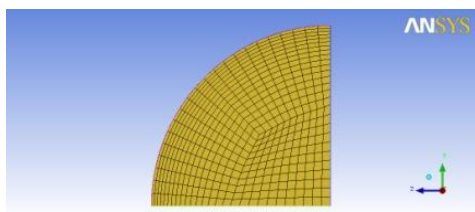
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.3 – Visão frontal da seção de entrada do tubo mostrando as malhas geradas: (a) Malha 1, (b) Malha 2, (c) Malha 3, (d) Malha 4 e (e) Malha 5.

A Figura 5.3 mostra o maior refinamento nas regiões próximas à parede, devido aos efeitos da camada limite.

5.3 Condições de contorno

As condições de contorno para este caso estão descritas na Tabela 5.2. Esta indica as superfícies (de acordo com a Figura 5.4) nas quais foram impostas as condições de contorno, além dos parâmetros adotados e seus valores.

Tabela 5.2 - Condições de contorno para o caso do trecho reto.

Condição de contorno	Superfície (s)	Parâmetro	Valor
Entrada	S1	Velocidade uniforme	20,82 m/s
Parede	S2	-	-
Simetria	S3, S4	-	-
Saída	S5	Pressão estática média	1 atm

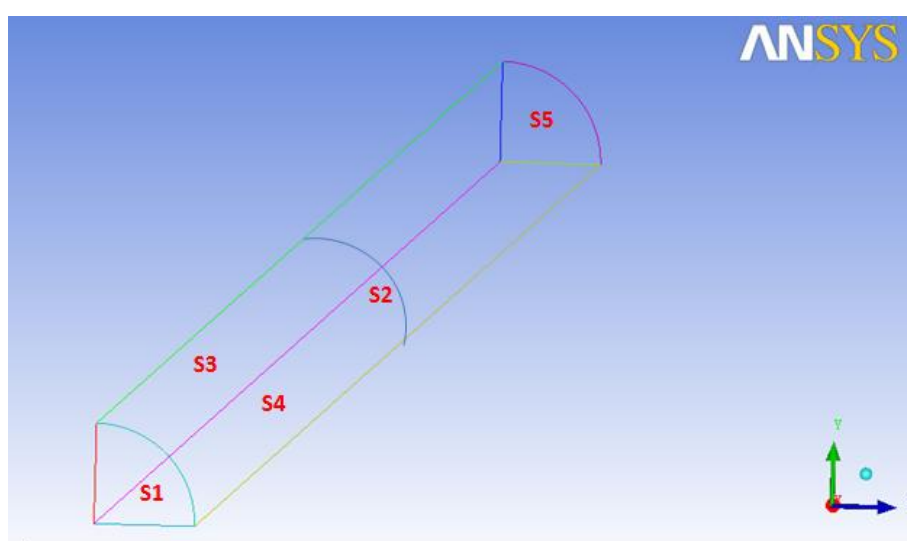


Figura 5.4 - Superfícies onde foram impostas condições de contorno para o caso trecho reto.

O valor especificado para a velocidade uniforme como condição de entrada tem fundamento experimental. Silva [6], em seu estudo, fez diversas medições do perfil de velocidades ao longo do túnel de vento. Uma delas foi realizada com auxílio do tubo de Pitot instalado na tubulação. A partir desse resultado, foi possível determinar o valor da velocidade uniforme correspondente ao perfil levantado experimentalmente. Para isso, foi utilizado o *software MATLAB*. Primeiramente, plotou-se a curva referente às medições feitas na seção de instalação do tubo de Pitot para a rotação de 1200 rpm, como mostra a Figura 5.5. Depois, ajustou-se uma curva aos pontos através de um método de interpolação disponível no *MATLAB*, chamado *Shape-Preserving*, conforme Figura 5.6.

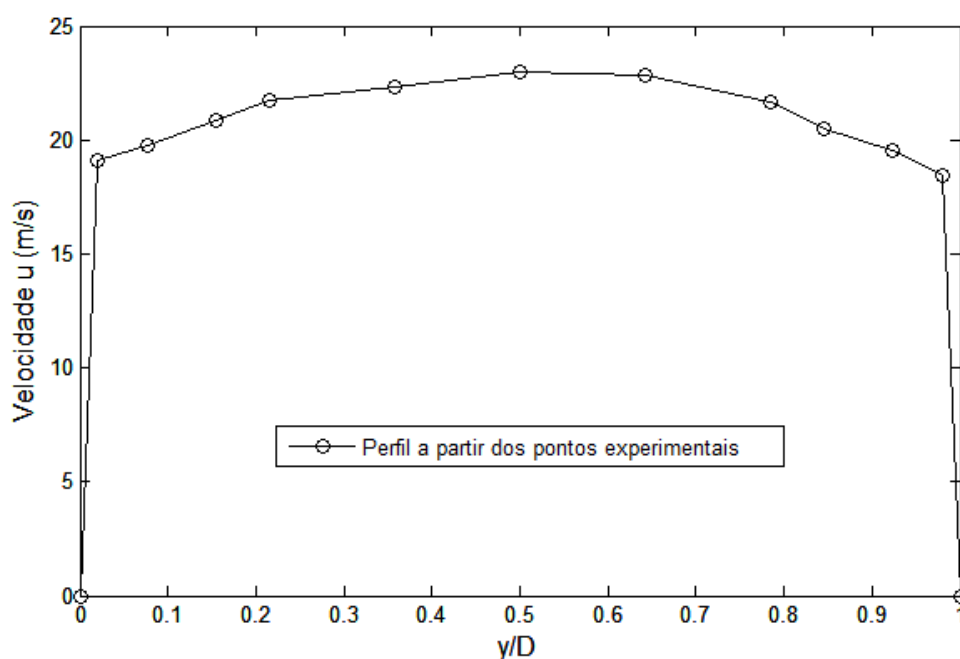


Figura 5.5 – Perfil da componente u da velocidade a partir de pontos experimentais.

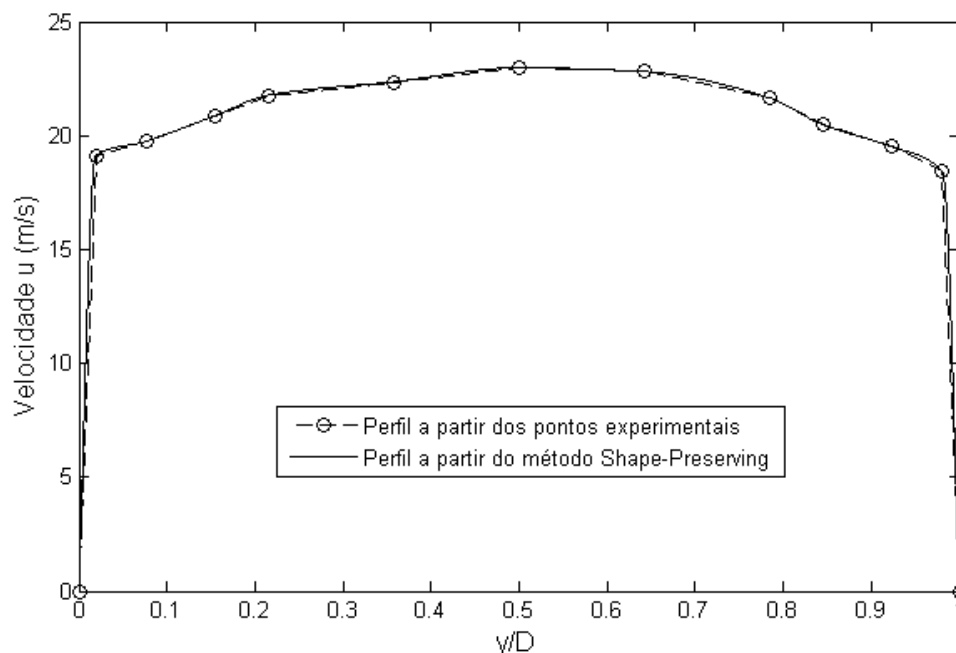


Figura 5.6 – Comparação entre o perfil da componente u da velocidade a partir dos pontos experimentais e o perfil traçado através da técnica de Shape-Preserving.

A curva gerada através do *Shape-Preserving* revela-se mais próxima de um perfil real de velocidades quando comparada à curva sem aplicação da técnica. Esse fato fez com que ela fosse utilizada para o cálculo da velocidade média do perfil (U_{med}). Para efetuar esse cálculo foi aplicado à curva o método de integração numérica chamado Regra dos Trapézios o qual consiste em dividir a área abaixo da curva em diversos trapézios para calculá-la, como mostra a Figura 5.7. Primeiramente, dividiu-se a curva usando os doze pontos experimentais e calculou-se a área. Para que se diminuísse o erro de cálculo da área abaixo do gráfico consequente do método utilizado, dividiu-se a curva em mais pontos (i) até que atingísse a convergência, conforme Tabela 5.3. O mesmo processo foi realizado para as rotações baixa (700 rpm) e média (950 rpm). Tem-se, agora, a velocidade média correspondente aos perfis levantados experimentalmente para cada rotação de trabalho do túnel de vento. A partir desses valores, é possível calcular o *Número de Reynolds* (Re) para cada rotação. Os resultados das velocidades médias e Re são mostrados pela Tabela 5.4.

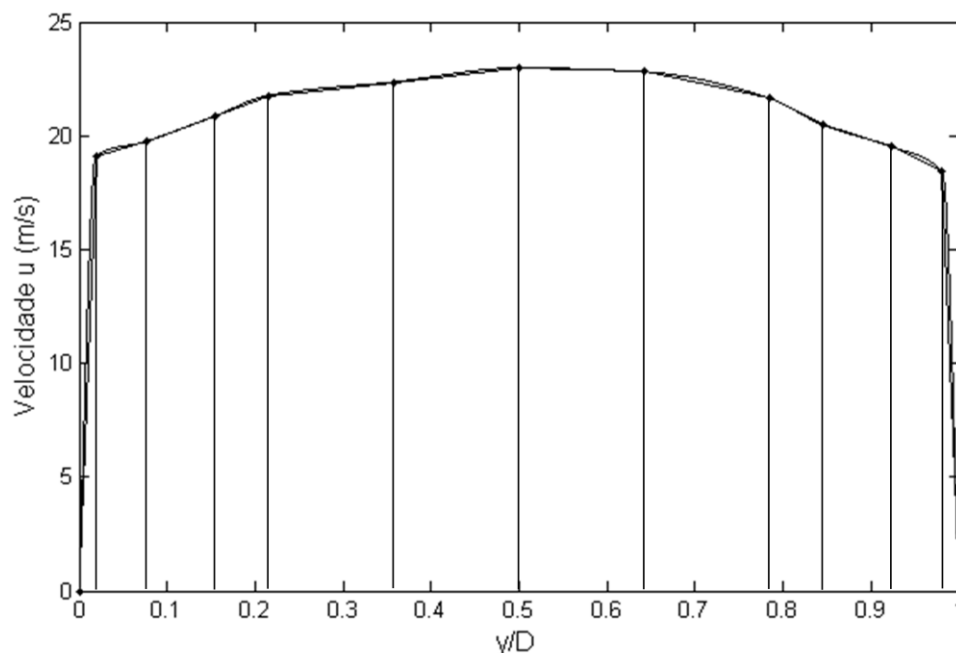


Figura 5.7 – Perfil obtido através da técnica *Shape-Preserving* dividido em trapézios através de linhas originadas nos pontos experimentais.

Tabela 5.3 - Aplicação da Regra do Trapézio e convergência para a rotação de 1200 rpm.

i	12	10^2	10^3	10^4	10^5
U_{med} (m/s)	21,0786	21,174	21,1964	21,1966	21,1966

Tabela 5.4 - Resultado das velocidades uniformes equivalentes e do *Número de Reynolds* para cada rotação de trabalho do túnel de vento.

n (rpm)	700	950	1200
U_{med} (m/s)	14,828	17,943	21,197
Re	$1,747 \times 10^5$	$2,113 \times 10^5$	$2,497 \times 10^5$

Durante um período do estudo fora utilizados dados experimentais de pressão como condição de saída e simulara-se o trecho reto com o comprimento real (55D) quando um professor experiente na área de *CFD* questionou sobre a adoção de uma condição de pressão como saída no *CFX*. Para ele, o programa assumia uma condição de escoamento completamente desenvolvido na saída caso adotada essa propriedade como parâmetro. A partir deste questionamento, foi mantida a condição de pressão, mas alterou-se o valor da

mesma na saída (0,8; 0,9 e 1 atm). Os resultados do teste de sensibilidade da condição de contorno são mostrados na Figura 5.8. Para nossa surpresa, o comportamento da componente u da velocidade ao longo do comprimento do domínio e os perfis de velocidade nas seções dos medidores de vazão eram exatamente os mesmos para todos os valores de pressão. Após pesquisas em literaturas [7] [28] e fórum científico [32] foi confirmado que adotar uma condição de pressão na saída significa impor uma condição de gradiente-zero (exceto a pressão), ou seja, de escoamento completamente desenvolvido. A partir dessa premissa, foi adotado, para todas as simulações, um comprimento de $100D$, pois é garantido que, para o trecho reto, o escoamento é desenvolvido [30] e pode-se utilizar pressão como condição de saída. Para os outros casos simulados, essa mesma premissa foi adotada por ser uma hipótese viável.

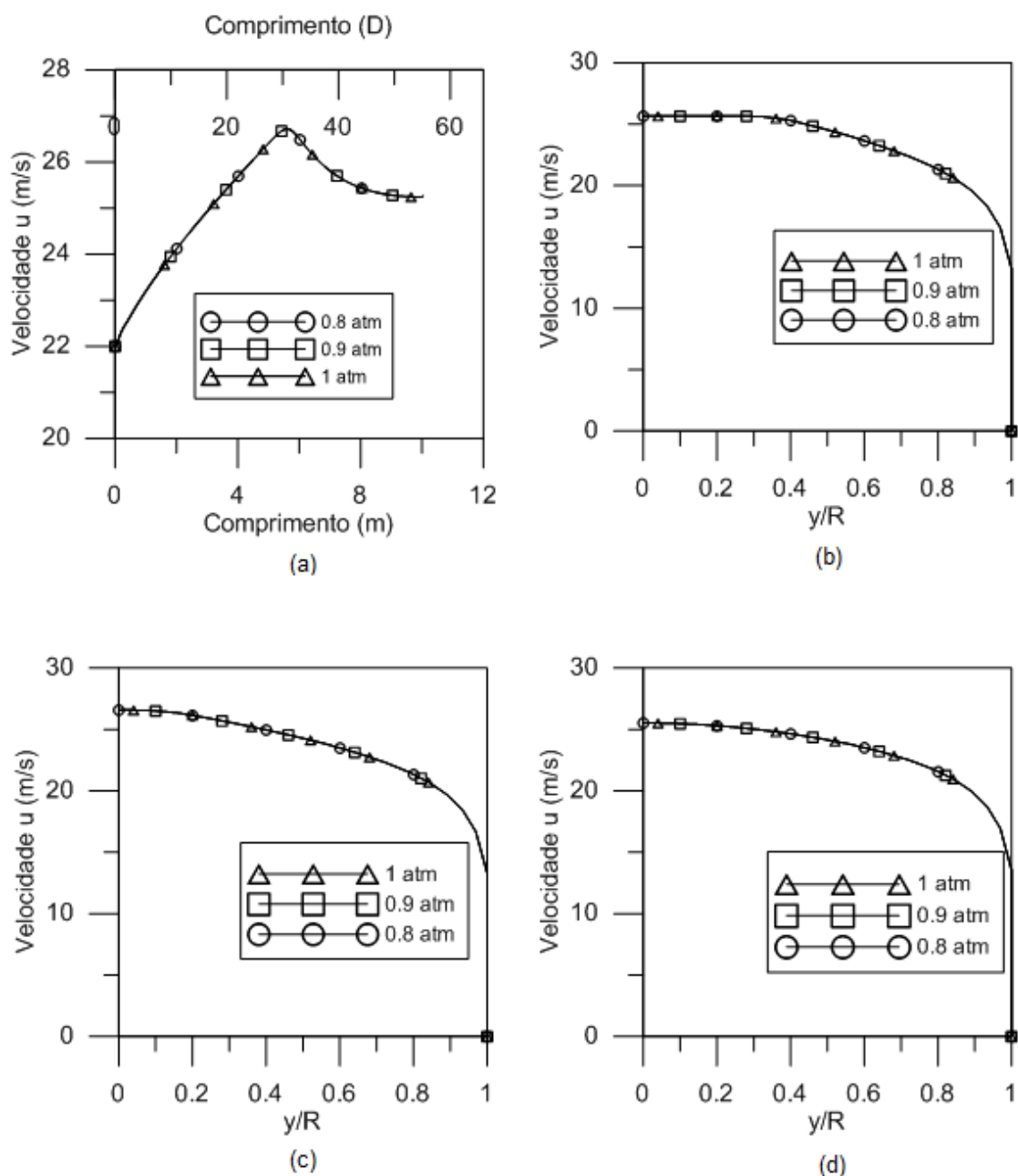


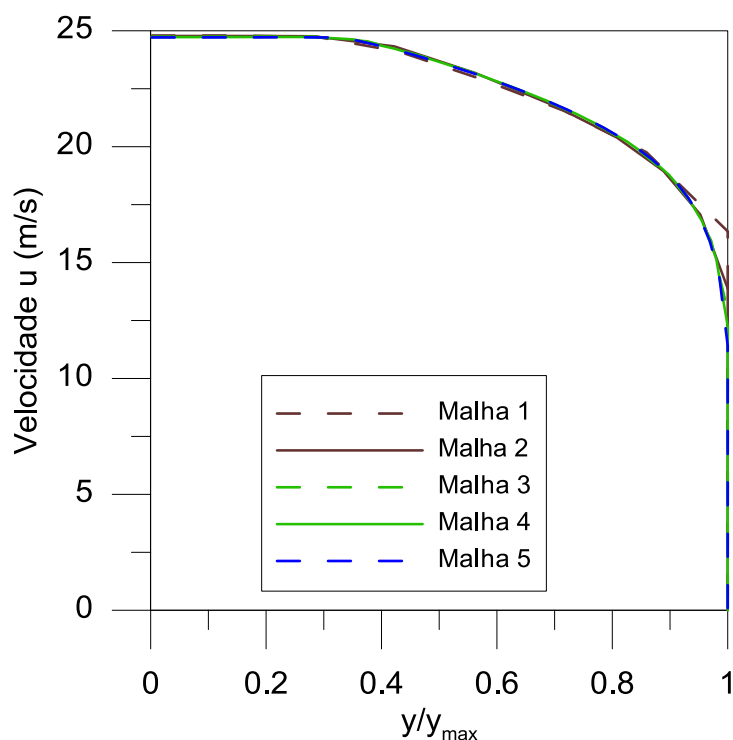
Figura 5.8 – (a) Comportamento da componente u da velocidade ao longo do eixo x ; (b) Perfis de velocidade u na posição do medidor Photon; (c) Perfis de velocidade u na posição do medidor Ultrassônico; (d) Perfis de velocidade u na posição do tubo de Pitot.

5.4 Teste de sensibilidade das malhas

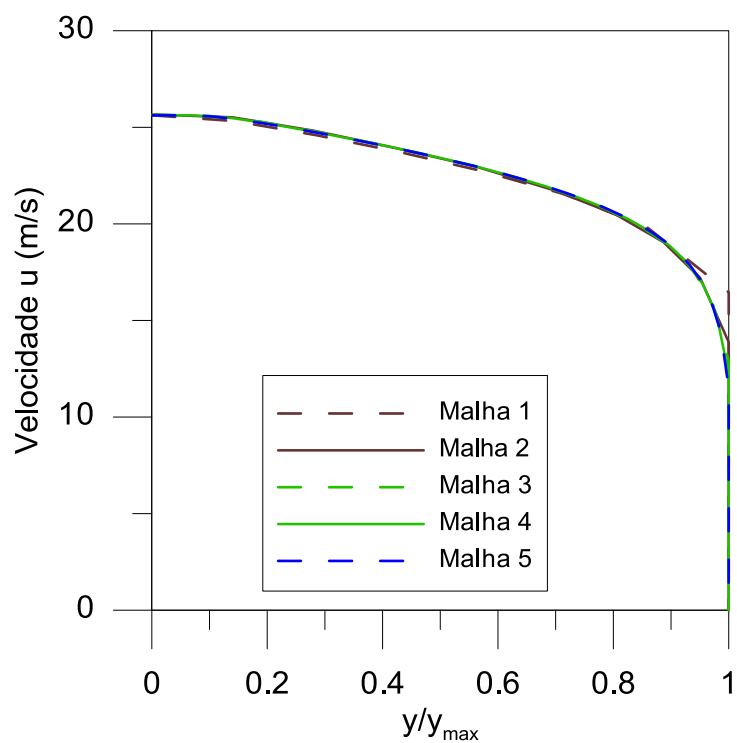
O capítulo anterior mostrou o Método dos Volumes Finitos, o qual divide o domínio em diversos volumes de controle onde equações linearizadas são resolvidas. É fundamental saber a influência do tamanho dos volumes de controle (ou refinamento da malha) nos resultados. Essa influência pode ser

mensurada através de testes de sensibilidade das malhas, ou teste de malha. O objetivo é mostrar a redução desses erros de acordo com o grau de refinamento da malha que foi controlado através do número de nós (pontos nodais).

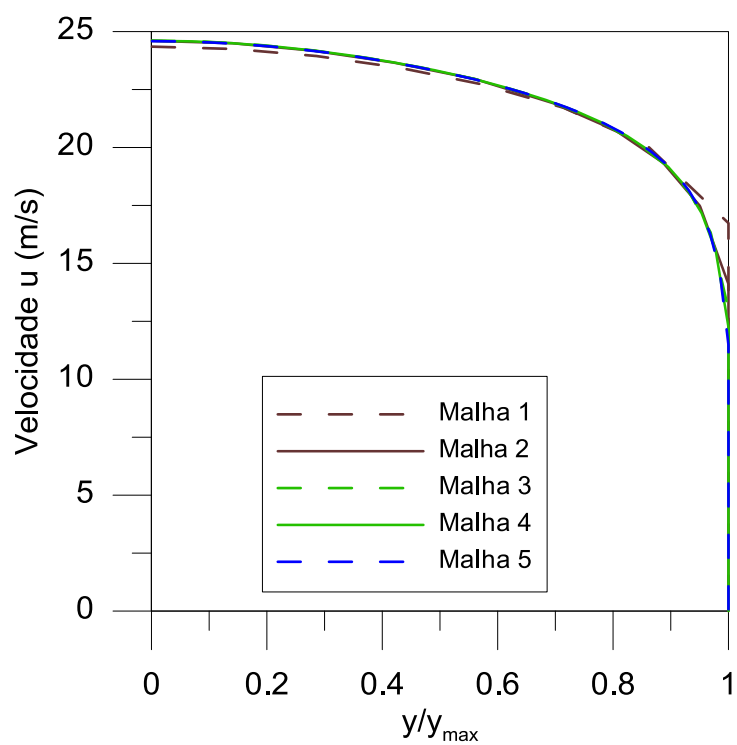
O teste de sensibilidade utiliza um ou mais parâmetros para comparação entre as malhas. O principal parâmetro deste trabalho é a componente u da velocidade nas três seções de medição de vazão do túnel de vento, as seções do medidor Photon (22D), medidor ultrassônico (29D) e tubo de Pitot (43D). Assim, foi comparado o perfil de velocidades nessas três posições a fim de determinar a malha convergida. A Figura 5.9 mostra o perfil de velocidades nessas seções para as cinco malhas.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.9 – Teste de malha para o trecho reto: (a) Perfis da velocidade u na seção do medidor Photon; (b) Perfis da velocidade u na seção do medidor Photon; e (c) Perfis da velocidade u na seção do tubo de Pitot.

Vale lembrar que o domínio da simulação foi de $\frac{1}{4}$ do tubo e, assim, o perfil apresentado representa a componente u da velocidade apenas no raio, não em todo diâmetro. Ao se analisar o conjunto de imagens, o leitor pode concluir que a malha 2 apresenta resultados muito próximos da malha 3 e, portanto, poder-se-ia considerá-la como convergida. Porém, com um breve estudo e comparando valores de alguns parâmetros em outras seções do domínio, conclui-se que a análise visual possui incertezas. Como exemplo, ao se restringir o eixo das abscissas da Figura 5.9-a, nota-se uma diferença mais clara nos perfis gerados, conforme Figura 5.10.

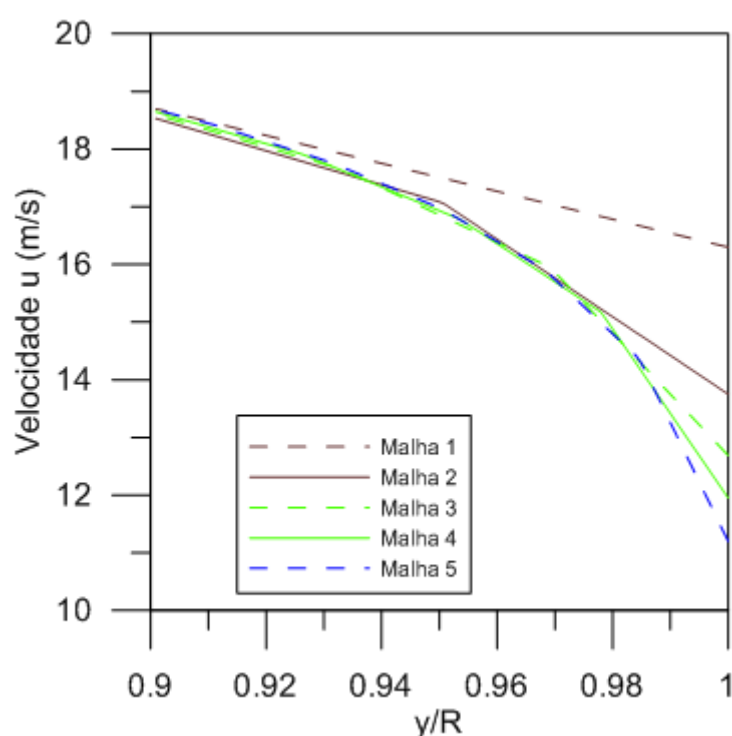


Figura 5.10 – Análise dos perfis de velocidade u alterando-se os limites da abscissa.

Então, para determinar a malha convergida, adotou-se o seguinte procedimento (a Tabela 5.5 mostra, sinteticamente para a posição do medidor Photon, o resultado da metodologia adotada):

- Exportou-se, para o programa *Microsoft Excel*, dados de uma linha, correspondente ao raio, com cem pontos e os respectivos valores da componente u da velocidade em cada ponto para as cinco malhas;

- Calcularam-se os desvios das velocidades entre as malhas subsequentes para cada ponto;
- Calculou-se a média dos desvios para cada malha;
- Determinou-se como valor aceitável desvio médio igual a 0,3%;
- A malha que atendesse esse critério para todas as três seções é considerada a malha convergida.

Tabela 5.5 - Síntese do teste de malha para o trecho reto na posição do medidor Photon.

Teste de Malha na posição do medidor Photon para o caso do trecho reto									
Pontos	u (m/s)					Desvio (%)			
	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5	Malhas 2 - 1	Malhas 3 - 2	Malhas 4 - 3	Malhas 4 - 3
1	16,299	13,749	13,007	11,949	11,198	18,55%	5,71%	8,85%	6,71%
2	16,544	14,428	14,096	13,429	13,276	14,67%	2,35%	4,97%	1,15%
3	16,788	15,106	15,184	14,908	14,816	11,14%	0,52%	1,85%	0,62%
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	23,380	23,550	23,197	23,520	23,511	0,72%	1,52%	1,37%	0,04%
50	23,464	23,633	23,252	23,601	23,589	0,71%	1,64%	1,48%	0,05%
51	23,549	23,715	23,306	23,682	23,665	0,70%	1,76%	1,59%	0,07%
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
98	24,794	24,776	24,603	24,728	24,714	0,07%	0,71%	0,51%	0,06%
99	24,794	24,776	24,607	24,728	24,714	0,07%	0,69%	0,49%	0,06%
100	24,794	24,777	24,607	24,728	24,715	0,07%	0,69%	0,49%	0,06%
Média						0,99%	1,60%	1,46%	0,16%

O teste na íntegra encontra-se no Anexo A.

Conforme Tabela 5.5 e Anexo A, a Malha 4 possui desvio médio menor do que o critério, sendo assim, a malha convergida. Portanto, os resultados relatados na próxima seção foram extraídos da solução numérica obtida para essa malha.

5.5 Resultados e discussões

Todas as simulações numéricas devem ser validadas para que a comunidade científica e a indústria possam utilizar os resultados da modelagem de maneira confiável. A melhor forma de se fazer é comparar os resultados numéricos obtidos com resultados experimentais ou relatados em outras fontes. Essa

análise também permite realizar melhorias na simulação numérica assim como no processo real.

F. C. Silva [6], como já dito, realizou diversos experimentos no túnel de vento estudado. Um dos objetivos do seu trabalho era determinar o perfil de velocidades nas seções onde se encontram os medidores de vazão utilizando a técnica do tubo de Pitot. A seguir, serão apresentados os resultados e comparações pertinentes.

Para determinar o comprimento de desenvolvimento, analisaram-se os perfis de velocidade u ao longo do tubo: 20D, 40D, 60D, 80D e 100D. Na Figura 5.11 são mostrados os perfis nas diferentes posições. Os desvios relativos entre os perfis subsequentes em quatro pontos na direção radial constam na Tabela 5.6. Como pode ser notado, o desvio máximo de 1,79% ocorre entre 20D e 40D. Nota-se também uma tendência de redução desses desvios com o aumento do comprimento. Para melhor ilustrar esse fato, a Figura 5.12 mostra os desvios relativos para todos os comprimentos e posições analisados.

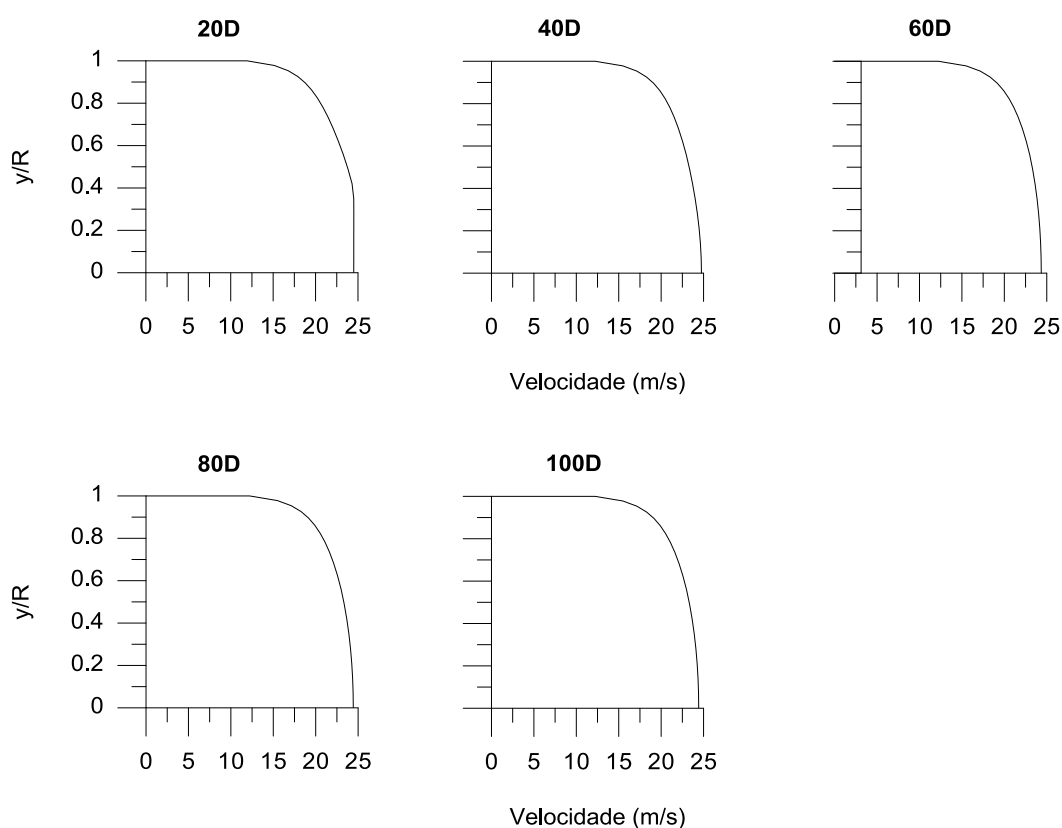


Figura 5.11 – Perfis de velocidade u ao longo do tubo para o caso do trecho reto.

Tabela 5.6 – Desvios relativos entre os comprimentos analisados.

y/R	u (m/s)		Desvio relativo	u (m/s)		Desvio relativo	u (m/s)		Desvio relativo	u (m/s)		Desvio relativo
	20D	40D		40D	60D		60D	80D		80D	100D	
0	24,489	27,73	0,99%	27,73	24,339	1,58%	24,339	24,417	0,32%	24,417	24,412	0,02%
0,3	24,495	24,349	0,60%	24,349	24,096	1,04%	24,096	24,157	0,26%	24,157	24,154	0,02%
0,5	23,716	23,291	1,79%	23,291	23,277	0,06%	23,277	23,297	0,08%	23,297	23,293	0,02%
0,8	21,288	21,395	0,51%	21,395	21,491	0,45%	21,491	21,469	0,10%	21,469	21,47	0,00%

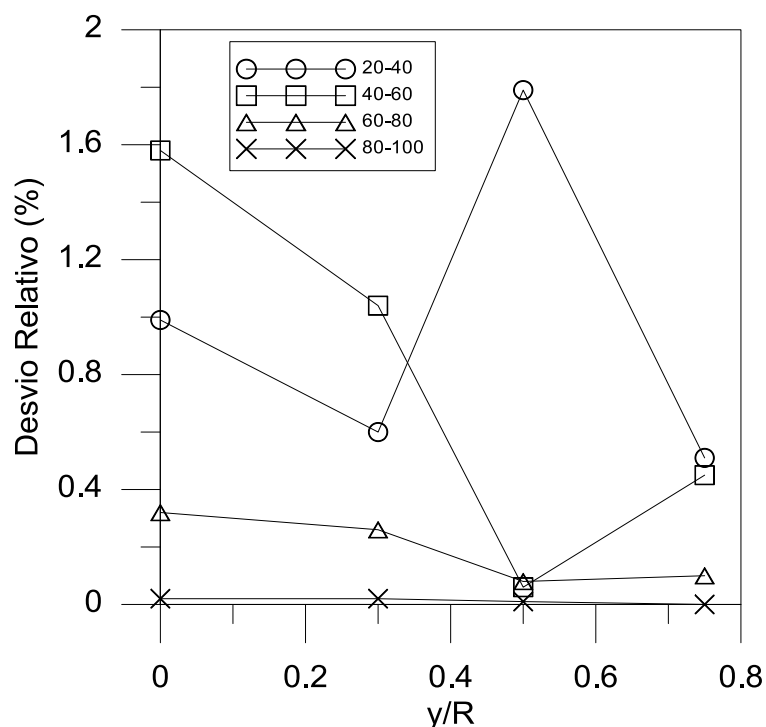


Figura 5.12 – Análise dos desvios relativos para o caso do trecho reto.

De acordo com a Figura 5.12 e a Tabela 5.6, pode-se considerar que no comprimento de 80D, tem-se um perfil desenvolvido aceitável já que o desvio relativo máximo é de 0,02%. A comparação do perfil neste comprimento com o perfil desenvolvido analítico de De Chant é apresentado na Figura 5.13 e a Tabela 5.7 indica os desvios relativos entre esses. Nota-se, portanto, uma grande semelhança entre os perfis de velocidade, fato esse que valida a adoção do perfil no comprimento de 80D como desenvolvido para futuras comparações.

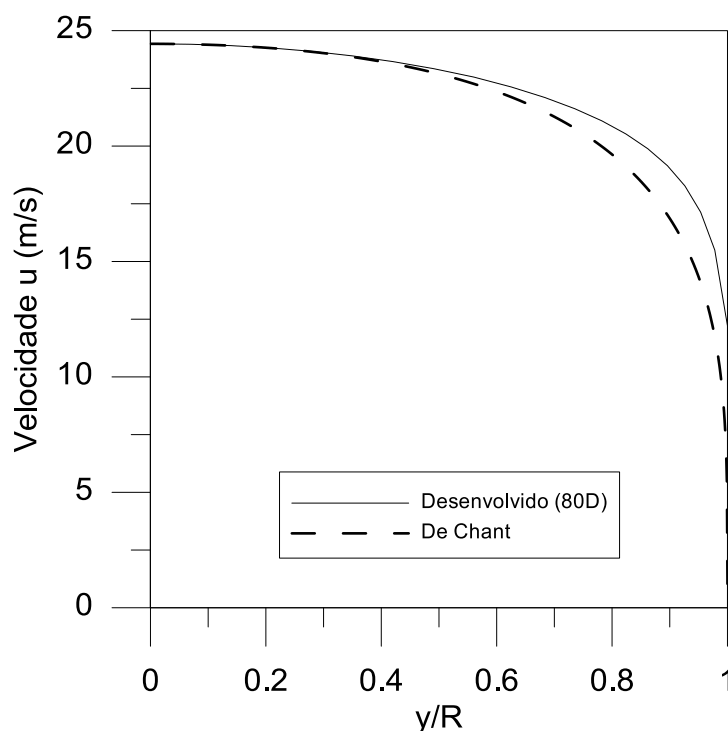


Figura 5.13 – Comparação entre o perfil de velocidade u desenvolvido de De Chant e o desenvolvido numérico.

Tabela 5.7 – Desvios relativos entre pontos do perfil desenvolvido de De Chant e desenvolvido numérico em 80D.

y/R	u (m/s)		Desvio Relativo Desenvolvido 80D / De Chant
	Desenvolvido (80D)	De Chant	
0	24,417	24,400	0,07%
0,25	24,157	24,129	0,12%
0,50	23,297	23,097	0,86%
0,75	21,469	20,518	4,43%

Conforme Figura 5.13 e Tabela 5.7, nota-se um maior desvio relativo na região próxima à parede. Esse mesmo resultado foi relatado por Martins e Ramos [30], fato esse que ratifica a adoção do perfil desenvolvido em 80D como o perfil desenvolvido de referência para comparações.

A Figura 5.14 compara o perfil de velocidade u , tanto experimental quanto numérico, na seção do medidor Photon, além do perfil numérico considerado desenvolvido. A Tabela 5.8 mostra os desvios relativos entre esses perfis de velocidade.

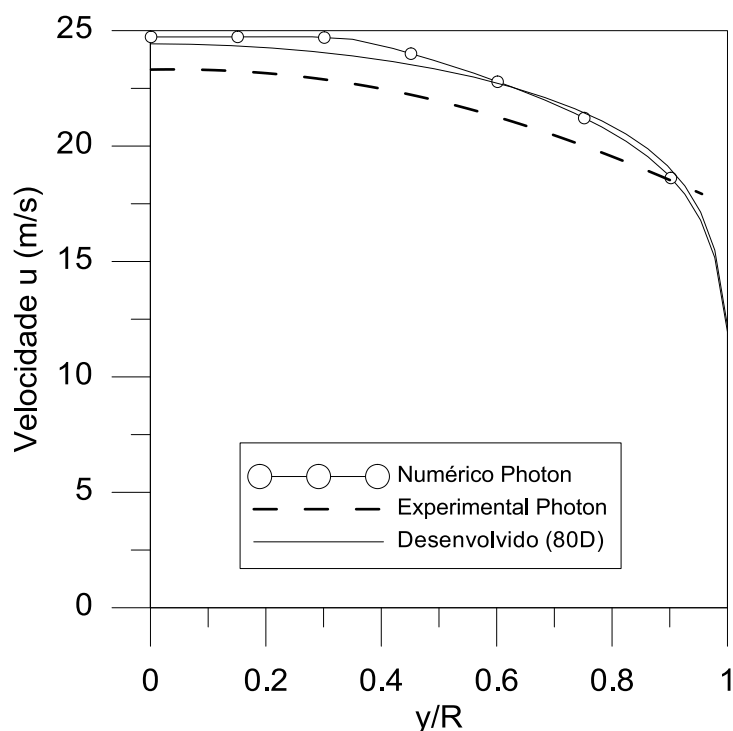


Figura 5.14 - Comparação entre os perfis da velocidade u numérico e experimental na posição do Photon e o desenvolvido (80D).

Tabela 5.8 – Desvio relativo entre os perfis da velocidade u numérico e experimental na posição do Photon e o desenvolvido (80D).

y/R	u (m/s)			Desvio Relativo Numérico Photon / Desenvolvido (80D)	Desvio Relativo Numérico Photon / Experimental Photon
	Numérico Photon	Desenvolvido (80D)	Experimental Photon		
0	24.714	24.417	23.31	1.22%	6.02%
0.25	24.720	24.157	23.04	2.33%	7.29%
0.5	23.627	23.297	21.94	1.42%	7.68%
0.75	21.254	21.469	20.02	1.00%	6.16%

Quando comparados os desvios relativos entre o perfil numérico na posição do Photon e o desenvolvido em 80D, nota-se um desvio máximo de 2,33% e mínimo de 1%. Conclui-se então que existe uma proximidade razoável entre os perfis. Analisando o perfil numérico na Figura 5.14 pode-se verificar que não houve o desenvolvimento completo da camada limite.

Ao comparar os desvios relativos entre o perfil numérico e o experimental na posição do Photon, nota-se um desvio máximo 7,68% e mínimo de 6,02%. Essa maior discrepância deve-se a possíveis erros experimentais, pequeno

número de pontos de medição de velocidade na técnica do tubo de Pitot e a adoção da condição de entrada de velocidade uniforme.

A Figura 5.15 compara o perfil de velocidade u obtido numericamente na seção do medidor ultrassônico com perfil desenvolvido em 80D. A Tabela 5.9 mostra os desvios relativos entre esses perfis de velocidade. Nota-se desvio relativo máximo de 4,91% e mínimo de 0,95%. A região de maior diferença é a região central do tubo.

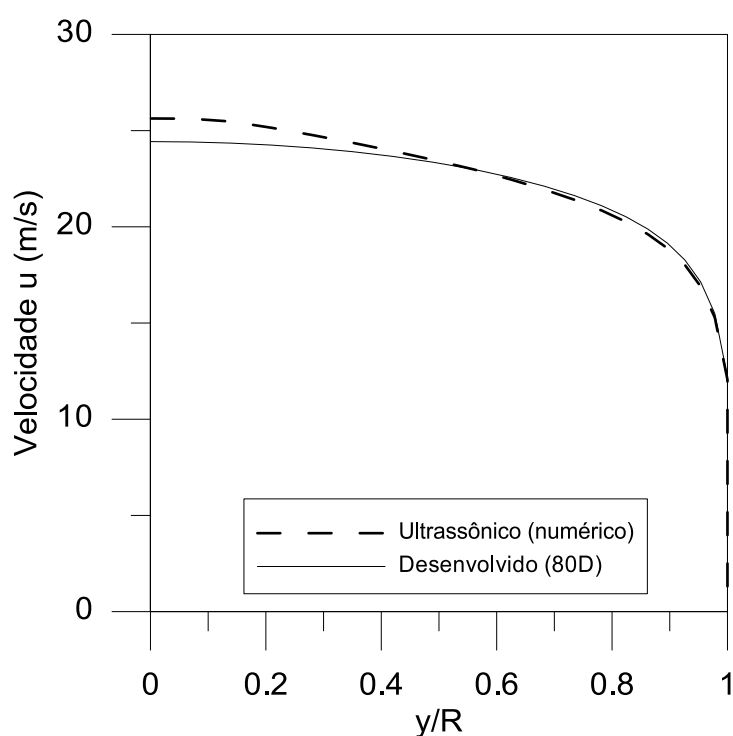


Figura 5.15 – Comparação entre os perfis da velocidade u numérico na posição do medidor ultrassônico e o desenvolvido (80D).

Tabela 5.9 – Desvio relativo entre os perfis da velocidade u na posição do medidor ultrassônico e o desenvolvido (80D).

y/R	u (m/s)		Desvio Relativo Numérico ultrassônico / Desenvolvido (80D)
	Numérico ultrassônico	Desenvolvido (80D)	
0	25.616	24.417	4.91%
0.25	24.913	24.157	3.13%
0.5	23.401	23.297	0.45%
0.75	21.243	21.469	1.05%

A Figura 5.16 compara o perfil de velocidade u , tanto experimental quanto numérico, na seção do tubo de Pitot, além do perfil simulado considerado desenvolvido. A Tabela 5.10 mostra os desvios relativos entre esses perfis de velocidade.

Quando comparados os desvios relativos entre o perfil numérico na posição do Pitot e o desenvolvido em 80D, nota-se um desvio máximo de 0,7% e mínimo de 0,1%. O perfil numérico nesta posição é o mais próximo do desenvolvido em relação aos perfis obtidos nas posições dos outros medidores.

Ao comparar os desvios relativos entre o perfil numérico e o experimental na posição do Pitot, nota-se um desvio máximo 6,84% e mínimo de 6,51%. Nota-se uma diferença na magnitude da velocidade u , porém as formas das curvas que caracterizam os dois perfis são bastante semelhantes. Essa diferença de magnitude se deve aos mesmos motivos citados para a posição do medidor Photon.

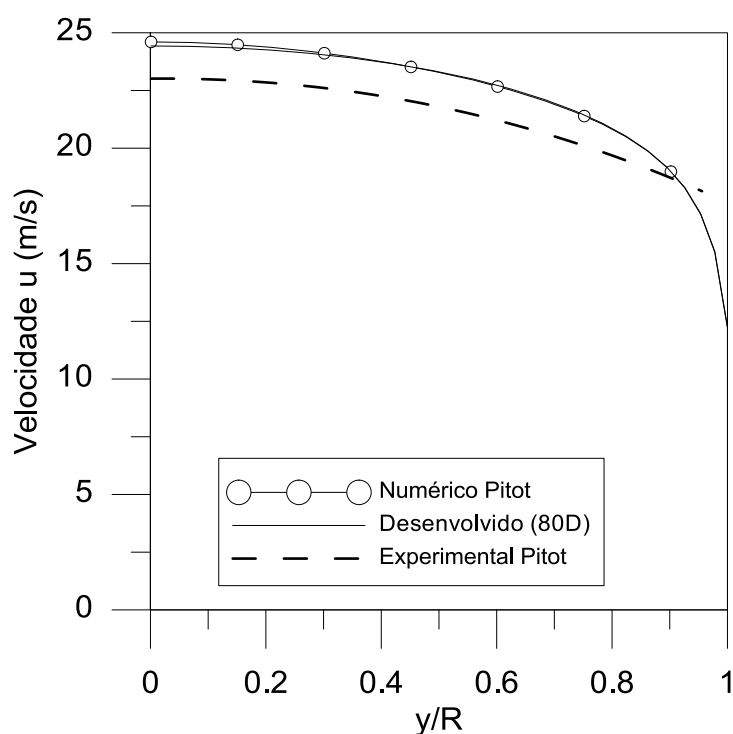


Figura 5.16 – Comparação entre os perfis da velocidade u numérico e experimental na posição do Pitot e o desenvolvido (80D).

Tabela 5.10 – Desvio relativo entre os perfis da velocidade u numérico e experimental na posição do Photon e o desenvolvido (80D).

y/R	u (m/s)			Desvio Relativo Numérico Pitot / Desenvolvido (80D)	Desvio Relativo Numérico Pitot / Experimental Pitot
	Numérico Pitot	Desenvolvido (80D)	Experimental Pitot		
0	24.587	24.417	23.014	0.70%	6.84%
0.25	24.253	24.157	22.743	0.40%	6.64%
0.50	23.273	23.297	21.797	-0.10%	6.77%
0.75	21.425	21.469	20.115	-0.20%	6.51%

As Figuras 5.17, 5.18 e 5.19 mostram o desenvolvimento das componentes da velocidade ao longo do domínio.

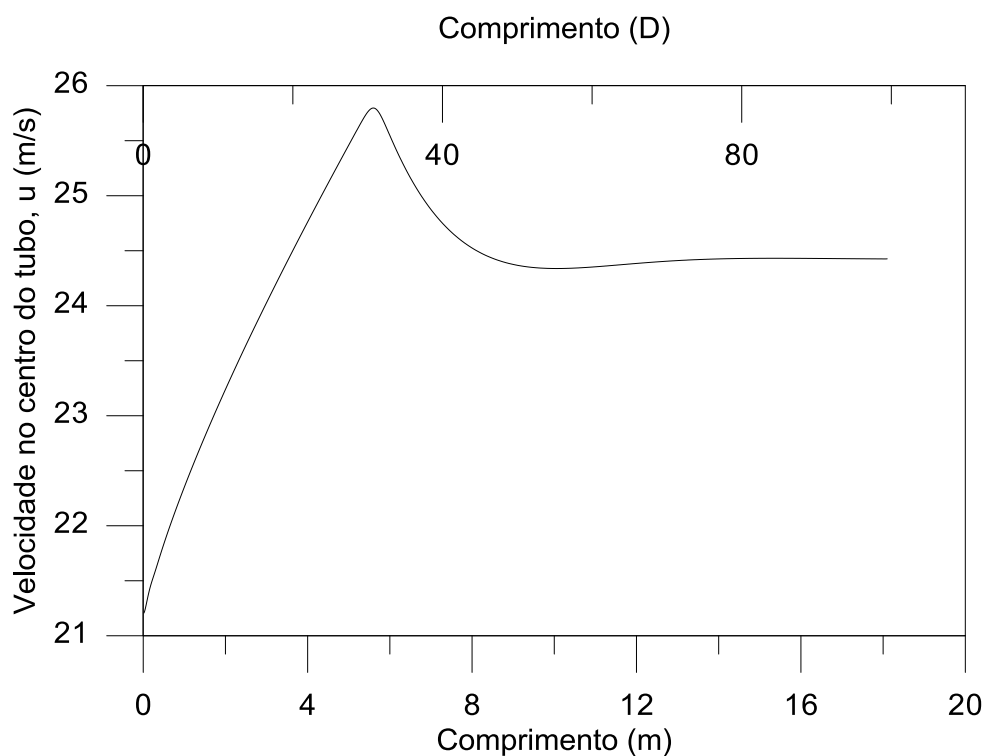


Figura 5.17 – Desenvolvimento da componente u da velocidade ao longo do centro do tubo para o caso do trecho reto.

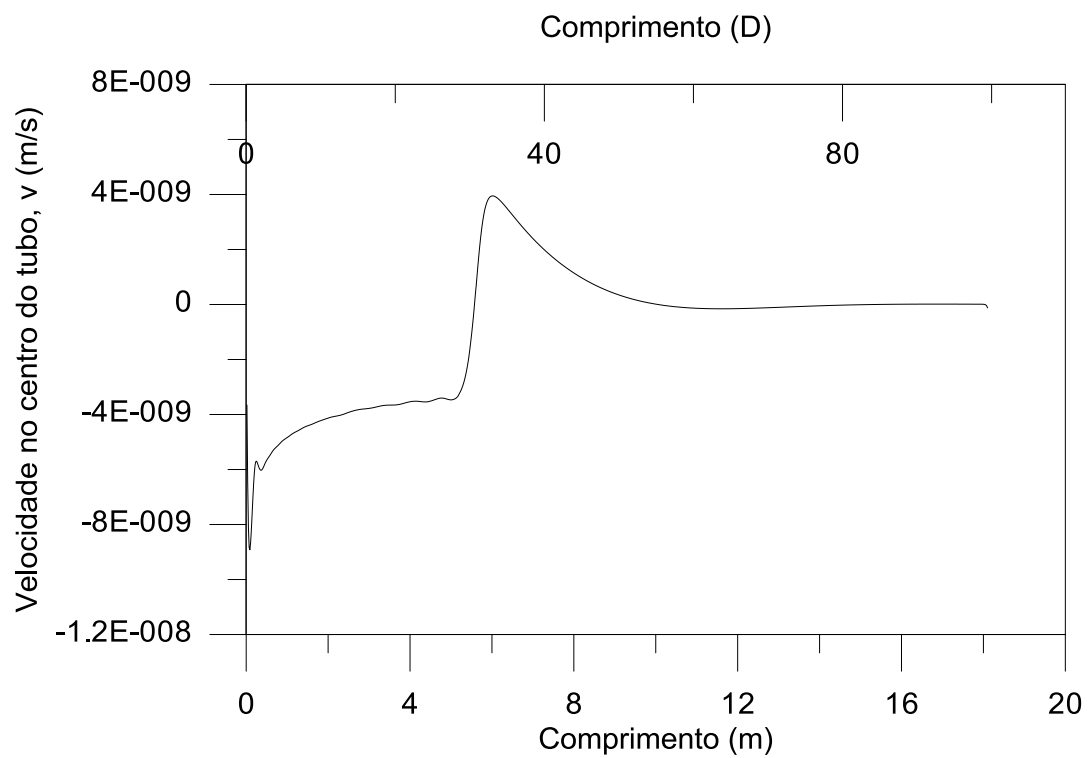


Figura 5.18 – Desenvolvimento da componente v da velocidade ao longo do centro do tubo para o caso do trecho reto.

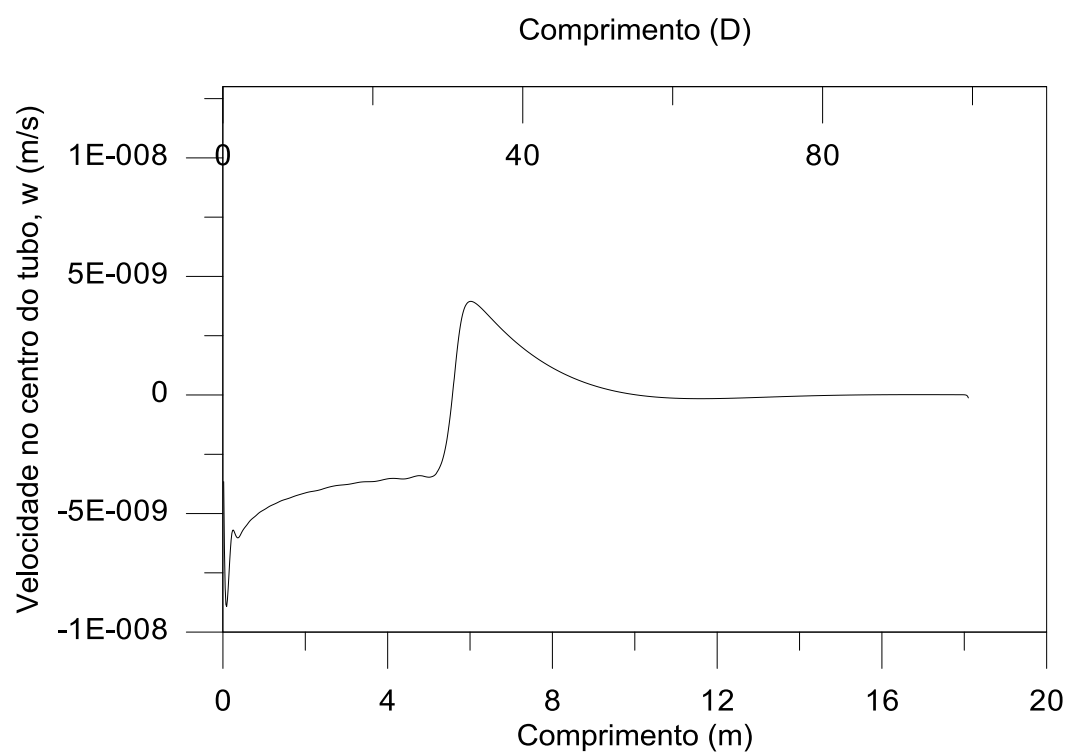


Figura 5.19 – Desenvolvimento da componente w da velocidade ao longo do centro do tubo para o caso do trecho reto.

A Figura 5.17 ratifica o comportamento da componente u da velocidade ao longo do centro do tubo relatada numericamente por Martins e Ramos [30] e experimentalmente por J. Doherty, et al [33].

As Figuras 5.18 e 5.19 mostram que o comportamento das componentes v e w de velocidade é o mesmo. Nota-se, também, que a ordem é de 10^{-9} e se estabilizam para um valor nulo aproximadamente em $60D$.

6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INTERFERÊNCIA DO MEDIDOR PHOTON

6.1 Apresentação do caso

O medidor Photon é classificado como um medidor de vazão intrusivo interferindo nos perfis de velocidade do escoamento. Seu modo de instalação é mostrado na Figura 3.6.

No túnel de vento do Laboratório de Máquinas de Fluxo da UFES o medidor foi instalado a 22D da entrada. Outros dois medidores de vazão estão instalados após o medidor Photon: O medidor ultra-sônico e o tubo de Pitot, a 29D e 43D da entrada, respectivamente. Uma das funções do medidor Photon nos estudos que são realizados no túnel de vento é calibrar o tubo de Pitot para que este trabalhe com menores níveis de incerteza. Porém, a interferência do medidor Photon no escoamento do túnel de vento pode influenciar as medições realizadas pelo tubo de Pitot e consequentemente falsear a calibração. Motivados por esse fato, decidiu-se estudar a influência do medidor Photon em um escoamento completamente desenvolvido através de simulações numéricas.

Ao iniciar o planejamento das simulações, era necessário decidir entre simular o escoamento em três ou duas dimensões (3D ou 2D). A simulação em 3D é a que melhor reflete os fenômenos que acontecem nesse tipo de escoamento que é similar ao escoamento em torno de um cilindro parcialmente inserido em uma tubulação. Porém, baseados em experiências anteriores na geração de malhas para diferentes geometrias, sabe-se que a complexidade de geração de malha para esse tipo de geometria era muito grande. Devido a esse fator, decidiu-se por realizar as simulações em 2D.

Decididos a simular em 2D, teve-se que definir qual plano deveria ser simulado. Optou-se, então, por simular o plano A-A' ilustrado pela Figura 6.1, por esse ser o plano de maior dimensão com intrusão do medidor e compreendido na região mais próxima da seção de medições do tubo de Pitot ,B-B'.

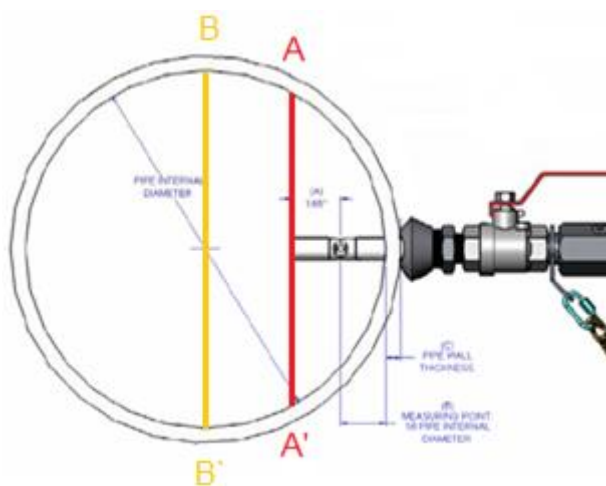


Figura 6.1 – Plano de simulação A-A'

Definido o plano de simulação, a geometria foi desenhada no software *Design Modeler*. Em razão do objetivo do estudo, a geometria, ilustrada pelas Figuras 6.2 (a) e (b), resume-se em um trecho, L_A , de $8d$, tal que d é o diâmetro do medidor Photon e um trecho, L_B , de $100D$, sendo D o diâmetro interno da tubulação.

O comprimento final foi determinado $100D$, devido ao *CFX* impor a condição de escoamento desenvolvido quando se determina uma condição de pressão na saída, conforme abordagem na seção 5.3.

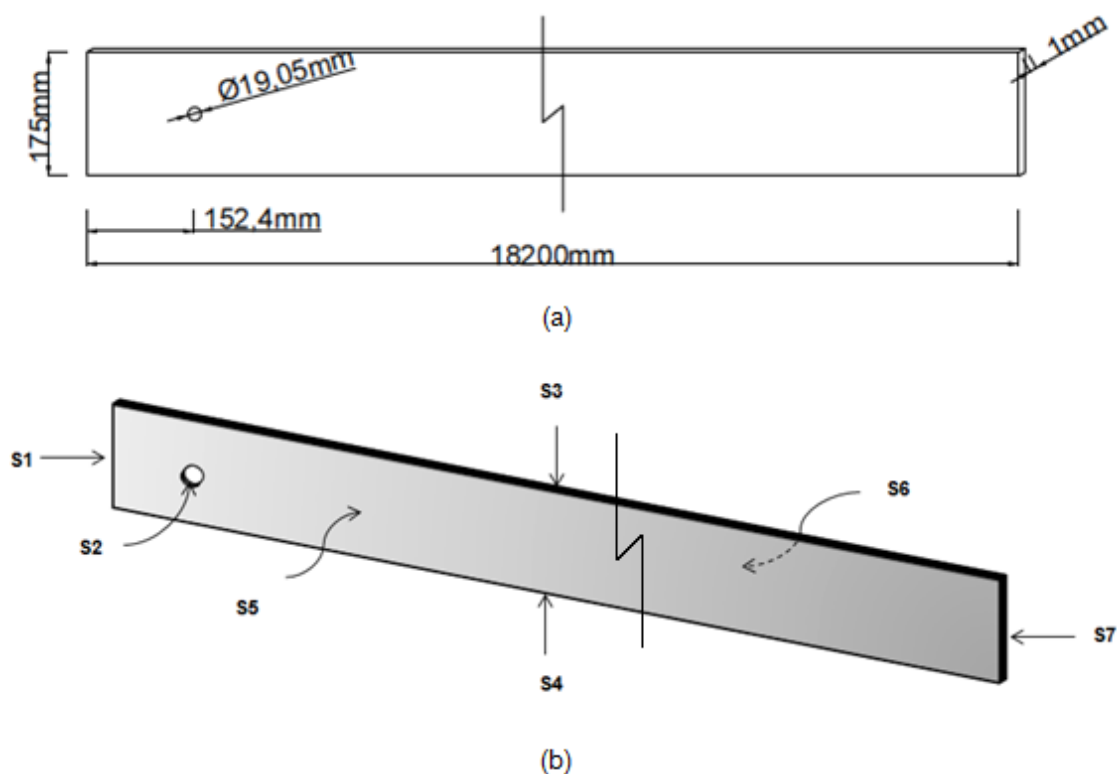


Figura 6.2 – (a) Croqui e (b) imagem ilustrativa da geometria simulada

Ainda em relação à geometria, sabe-se que o CFX não simula em 2D. Por isso, resolveu-se desenhar a geometria em forma de paralelepípedo com espessura de 1 mm na qual fosse gerado apenas um elemento, criando um “falso 2D”.

Abaixo segue a Tabela 6.1 com as principais dimensões da geometria.

Tabela 6.1 – Principais dimensões da geometria simulada

Diâmetro do Photon (d)	19,05 mm
Trecho L_A	152,4 mm (8d)
Trecho L_B	18200 mm (100D)
Espessura (w)	1 mm

6.2 Geração de malha

Novamente, foi utilizado o *software ICEM CFD* para gerar a malha para a geometria desenhada assim como a técnica de *Multiblock*. A geometria foi dividida em diversos blocos para que se tivesse um maior controle da malha nas regiões mais críticas do escoamento. Essas regiões são a parede e as

regiões próximas ao medidor Photon onde fenômenos turbulentos predominam, demandando um maior refinamento das malhas.

A divisão de blocos é mostrada pela Figura 6.3. Os blocos em torno do cilindro foram gerados pela ferramenta *O-Grid* do *software*, enquanto os outros foram gerados pela técnica comum de *Multiblock*. A forma de divisão dos blocos foi baseada no artigo científico de Omori et al [34].

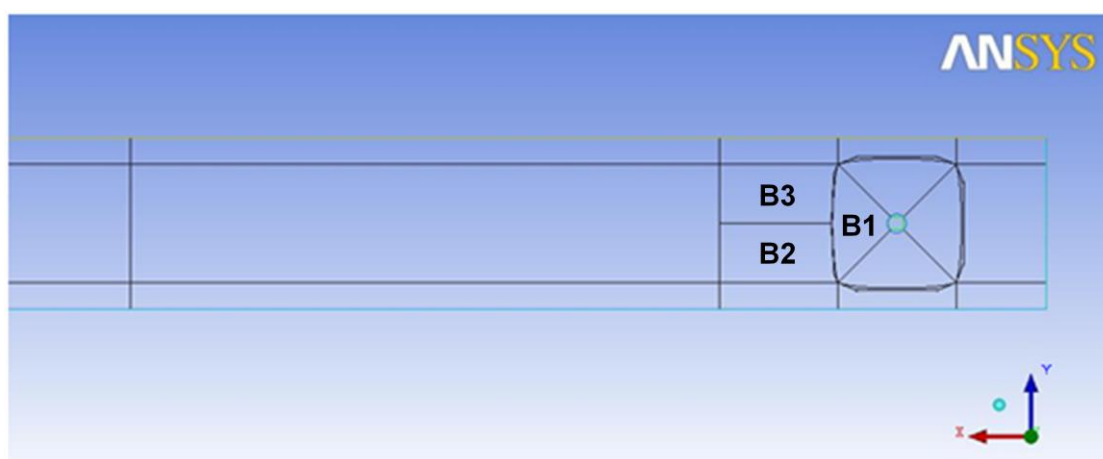


Figura 6.3 – Divisão dos blocos para geração da malha.

A partir dessa divisão, foi iniciada a distribuição dos pontos nodais da malha. Nas regiões próximas à parede (região considerada crítica) distribuiu-se os nós através da *Mesh Law* nomeada *Geometric* para que tivesse os menores elementos mais próximos da parede e os maiores na região central do escoamento. Nos blocos ao redor do medidor utilizou-se a mesma *Mesh Law* anterior para que tivesse os menores elementos mais próximos da superfície cilíndrica. Em conjunto, Foi utilizada a técnica *Refinement* para os blocos ao redor dessa mesma superfície. A função da técnica é dividir os elementos de um determinado bloco gerando pontos nodais extras a fim de aumentar o grau de refinamento naquela região e, por conseguinte, predizer de forma mais precisa os efeitos da turbulência em torno da região cilíndrica. Para maiores informações sobre essa técnica seguir referência [31]. A Figura 6.4 mostra as quatro malhas geradas na região mais crítica da geometria. A partir dessa região mais refinada, a malha foi distribuída uniformemente até o final do

domínio. Manteve-se apenas um grau de refinamento maior nas regiões próximas às paredes.

A Tabela 6.2 indica o grau, os blocos (conforme Figura 6.3) em que foi utilizada a técnica Refinement, além do número total de nós de cada malha. O estudo de sensibilidade é mostrado na seção 6.4 deste trabalho.

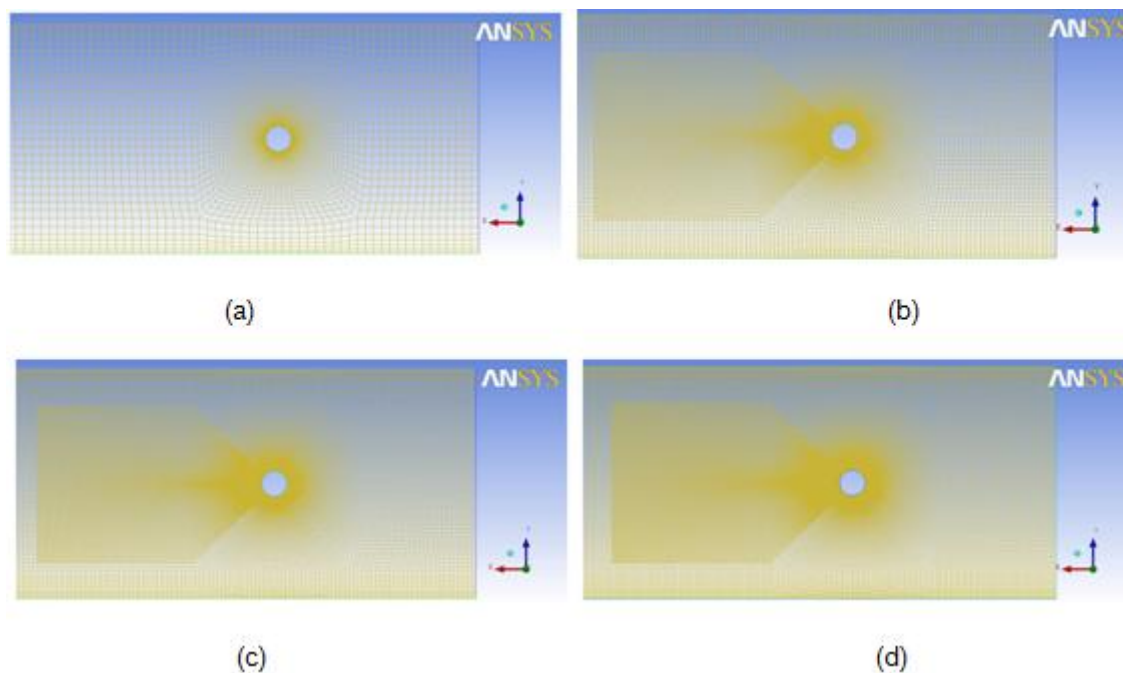


Figura 6.4 – Malhas geradas na região do Photon: (a) Malha 1; (b) Malha 2; (c) Malha 3; e (d) Malha 4.

Tabela 6.2 – Grau de refinamento e número total de nós das malhas.

Malha	1			2			3			4		
Bloco	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3
Grau de Refinement	-	-	-	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Número Total de Nós	210994			660849			1078073			1596153		

6.3 Condições de contorno

A geometria possui um total de sete superfícies. Em todas elas são determinadas condições de contorno para que sejam resolvidas as equações governantes do escoamento ao longo do domínio. A Tabela 6.4 indica as

superfícies (de acordo com a Figura 6.2 (a)) nas quais foram impostas as condições de contorno, além dos parâmetros adotados e seus valores.

Tabela 6.3 – Condições de contorno para o caso do medidor Photon.

Condição de contorno	Superfície(s)	Parâmetro	Valor
Entrada	S1	Perfil de velocidades de um escoamento completamente desenvolvido proposto por De Chant cujo parâmetro principal é a velocidade máxima do perfil.	23,51 m/s (U_{max})
Parede	S2, S3, S4	-	-
Simetria	S5, S6	-	-
Saída	S7	Pressão estática média	1 atm

No plano de entrada, a condição de contorno ideal seria o perfil experimental obtido por Silva [6]. Porém, o CFX não oferece como opção utilizar valores de velocidade em determinados pontos do plano de entrada e assim levantar um perfil de entrada. Tem-se como opção determinar o perfil de entrada através de uma equação ou usar resultados numéricos. De acordo com resultados experimentais obtidos por Silva [6] e comparação de desvios conforme Tabela 6.4, a definição do perfil de entrada pelo analítico de De Chant [27] (Equação (4.20)) é uma aproximação razoável e, portanto, será utilizada como condição de entrada para este caso.

Para isso, determinou-se um perfil desenvolvido da componente u da velocidade, considerando $v=0$ e $w=0$. Conforme a Equação (4.20), esse perfil é função da velocidade máxima, U_{max} . Este valor foi estabelecido de acordo com dados experimentais fornecidos por Silva [6].

Em seu experimento, Silva mediu, com um tubo de Pitot, a velocidade no centro da tubulação, na seção transversal de instalação do Photon, com o ventilador girando na sua capacidade máxima de 1200 rpm. A velocidade medida foi de 23,51 m/s. O perfil de entrada é ilustrado pela Figura 6.5.

Tabela 6.4 – Desvios relativos entre o perfil experimental e o proposto por De Chant.

y/y_{\max}	u (m/s)		Desvio Relativo De Chant/ Experimental Photon
	Experimental Photon	De Chant	
-0.848	19.46	17.825	-8.40%
-0.69	20.82	20.593	-1.09%
-0.57	21.66	21.768	0.50%
-0.286	22.43	23.161	3.26%
0	23.51	23.510	0.00%
0.286	22.88	23.161	1.23%
0.57	21.26	21.768	2.39%
0.69	20.41	20.593	0.90%
0.848	18.73	17.825	-4.83%

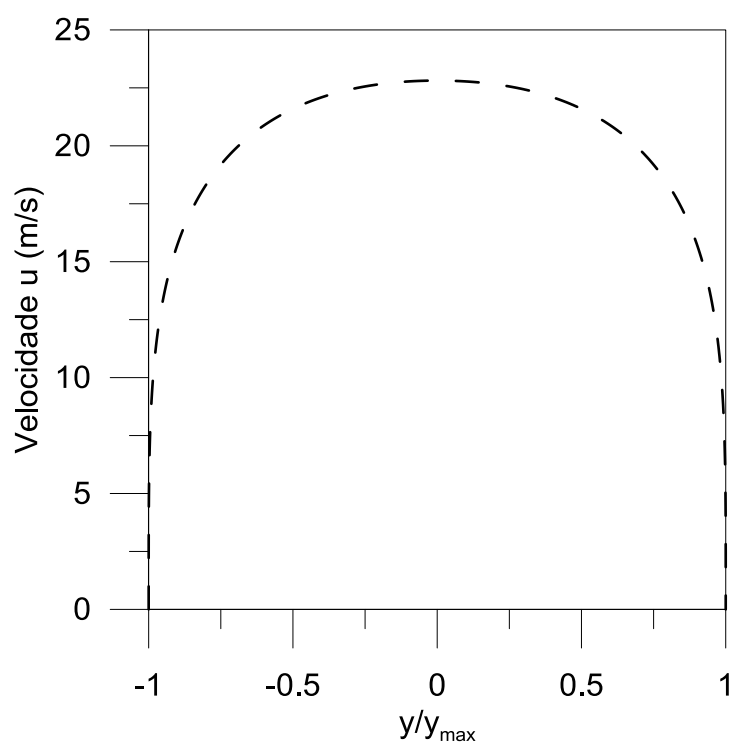


Figura 6.5 – Perfil de entrada para o caso do medidor Photon.

Nas superfícies de parede e na superfície do medidor Photon adotou-se a condição *Wall* (parede, em inglês) disponível no *CFX*. No plano de saída, adotou-se a mesma condição da simulação do trecho reto: pressão estática média do fluido igual a 1 atm.

Já nas superfícies laterais da geometria foi adotada a condição de simetria. Impondo essa condição, pode-se considerar uma simulação de um paralelepípedo infinito na direção z , atravessado por um cilindro infinito também na direção z . Como o túnel de vento não possui o medidor Photon atravessado totalmente na seção de medição (ver Figura 6.1) é sabido que a condição simulada é ainda mais reversa do que a condição real de escoamento. Logo, a expectativa é de que a interferência real do Photon no escoamento seja menor do que a interferência revelada pelos resultados das simulações.

6.4 Teste de sensibilidade das malhas

Para o teste de sensibilidade das malhas geradas é utilizada a mesma metodologia e critério descritos na seção 5.4 em que foram comparados os perfis de velocidade u gerados nas três posições de medição de vazão do túnel de vento: medidor Photon (22D), ultrassônico (29D) e tubo de Pitot (43D).

Nas Figuras 6.6, 6.7 e 6.8 tem-se a comparação gráfica entre os perfis de velocidade u nas posições dos três medidores de vazão de acordo com cada uma das quatro malhas geradas.

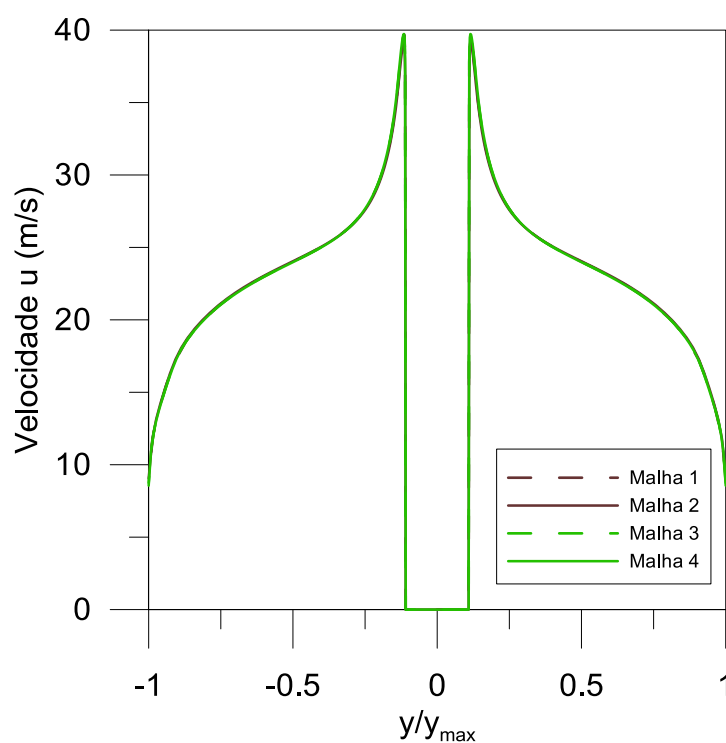


Figura 6.6 – Perfis da componente u da velocidade na posição do medidor Photon.

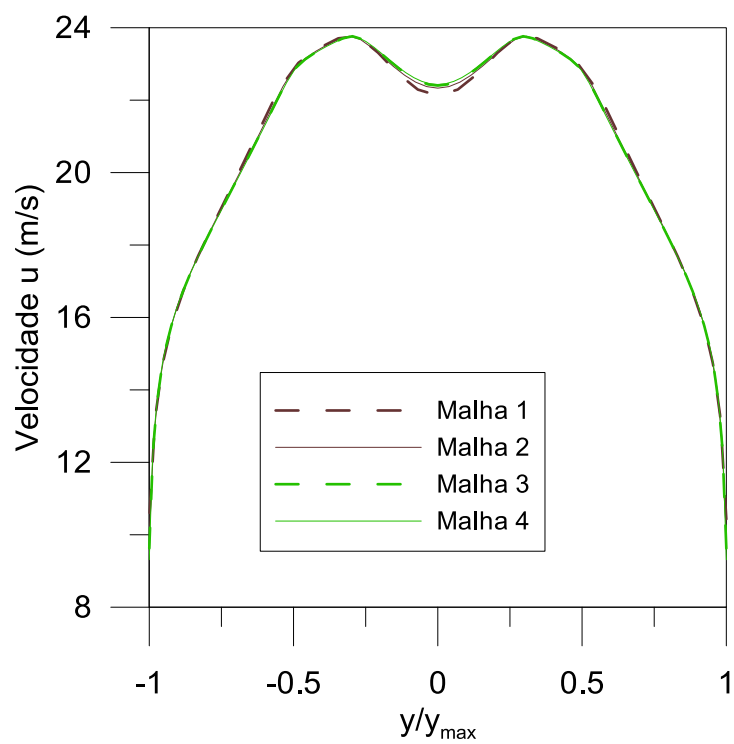


Figura 6.7 – Perfis da componente u da velocidade na posição do medidor ultrassônico.

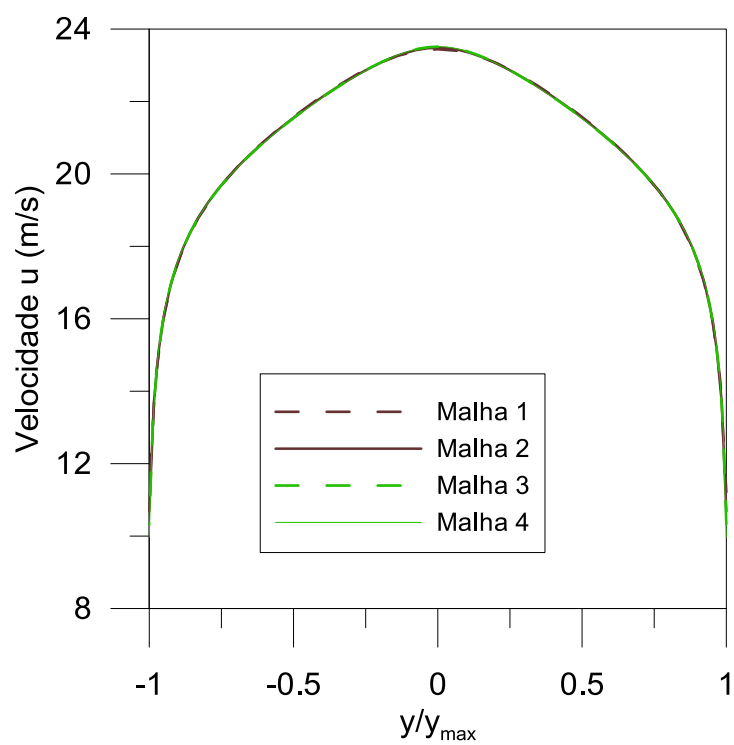


Figura 6.8 – Perfis da componente u da velocidade na posição do tubo de Pitot.

O teste de sensibilidade realizado possui a mesma metodologia para o caso anterior, descrita na seção 5.4. Dessa forma, a Tabela 6.5 mostra parte da análise feita com as comparações quantitativas dos desvios entre os perfis de velocidade u para cada malha na posição do medidor Photon.

Tabela 6.5 - Síntese do teste de malha para o caso do medidor Photon na posição do Photon.

Pontos	u (m/s)				Desvio relativo (%)		
	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malhas 2-1	Malhas 3-2	Malhas 4-3
1	9,372	9,046	8,749	8,555	3,60%	3,40%	2,27%
2	12,465	12,537	12,501	12,479	-0,58%	0,29%	0,18%
3	14,112	14,203	14,107	14,077	-0,64%	0,68%	0,21%
-	-	-	-	-	-	-	-
30	24,892	24,910	24,878	24,865	-0,07%	0,13%	0,05%
31	25,119	25,133	25,106	25,095	-0,05%	0,11%	0,05%
32	25,362	25,371	25,350	25,341	-0,04%	0,08%	0,04%
-	-	-	-	-	-	-	-
88	14,112	14,203	14,107	14,077	-0,64%	0,68%	0,21%
89	12,465	12,537	12,501	12,479	-0,58%	0,29%	0,18%
90	9,372	9,046	8,749	8,555	3,60%	3,40%	2,27%
Média					0,37%	0,41%	0,17%

Conforme critério adotado de 0,3%, a Malha 3 é considerada convergida. O teste de sensibilidade completo é mostrado no Anexo A.

6.5 Resultados e discussões

Um dos objetivos da simulação era determinar a posição em que o escoamento se torna desenvolvido novamente. Para isso fez-se o estudo dos desvios relativos, assim como feito para o trecho reto, porém analisando a componente u velocidade em sete pontos igualmente espaçados em 6 diferentes seções da geometria: 20D, 30D, 40D, 50D, 60D e 70D. A Figura 6.9 compara graficamente os perfis de velocidade nessas seções e a Tabela 6.6 mostra a análise quantitativa dos desvios entre os perfis.

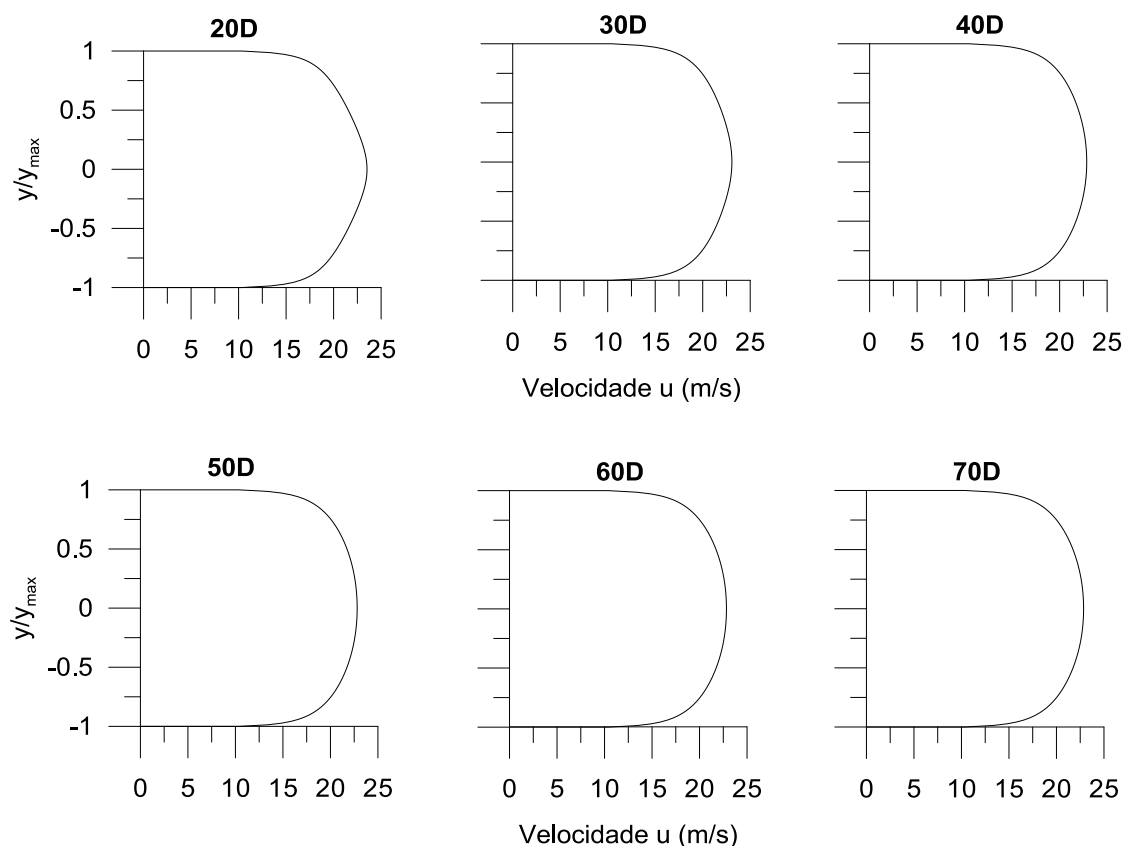


Figura 6.9 – Perfis de velocidade u ao longo de seções da geometria.

Tabela 6.6 – Perfis de velocidade u ao longo do tubo para o caso do medidor Photon.

y/y_{\max}	u (m/s)		Desvio relativo	u (m/s)		Desvio relativo	u (m/s)		Desvio relativo
	20D	30D		30D	40D		40D	50D	
0,75	19,662	19,929	1,36%	19,929	20,036	0,54%	20,036	20,052	0,08%
0,5	21,540	21,646	0,49%	21,646	21,718	0,33%	21,718	21,741	0,11%
0,25	22,887	22,669	-0,95%	22,669	22,575	-0,41%	22,575	22,564	-0,05%
0	23,519	23,074	-1,89%	23,074	22,852	-0,96%	22,852	22,814	-0,17%
-0,25	22,887	22,669	-0,95%	22,669	22,575	-0,41%	22,575	22,564	-0,05%
-0,5	21,540	21,646	0,49%	21,646	21,718	0,33%	21,718	21,741	0,11%
-0,75	19,662	19,929	1,36%	19,929	20,036	0,54%	20,036	20,052	0,08%

y/y_{\max}	u (m/s)		Desvio relativo	u (m/s)		Desvio relativo
	50D	60D		60D	70D	
0,75	20,052	20,034	-0,09%	20,034	20,018	-0,08%
0,5	21,741	21,746	0,02%	21,746	21,742	-0,02%
0,25	22,564	22,581	0,07%	22,581	22,596	0,07%
0	22,814	22,833	0,08%	22,833	22,856	0,10%
-0,25	22,564	22,581	0,07%	22,581	22,596	0,07%
-0,5	21,741	21,746	0,02%	21,746	21,742	-0,02%
-0,75	20,052	20,034	-0,09%	20,034	20,018	-0,08%

De acordo com os resultados mostrados na Tabela 6.6, conclui-se que nos trechos 20D-30D, 30D-40D e 40D-50D se tem uma redução gradual dos desvios nos diferentes pontos de análise dos perfis, apresentando desvios de 0,10% a 1,38%. Já quando é comparado o perfil de 50D com o de 60D e este com o de 70D, percebe-se que os desvios relativos não ultrapassam mais os 0,10%, mantendo-se em valores baixos e constantes. Uma análise gráfica dos desvios relativos é mostrada pela Figura 6.10.

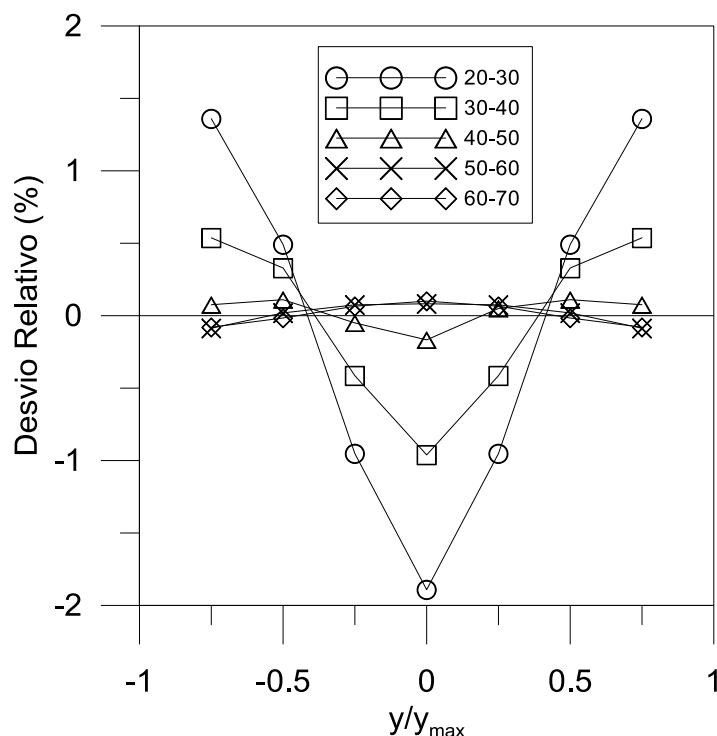


Figura 6.10 – Análise de desvios relativos.

O gráfico mostra que as curvas dos desvios entre 50D-60D e 60D-70D se tornam quase que coincidentes. A manutenção desses pequenos valores de desvios ao longo de um trecho de 20D (entre 50D e 70D), nos leva a concluir que na posição de 50D tem-se um perfil de velocidades desenvolvido aceitável.

Na figura abaixo tem-se o perfil desenvolvido obtido comparado ao perfil proposto por De Chant [27] e a Tabela 6.7 mostra os desvios entre eles.

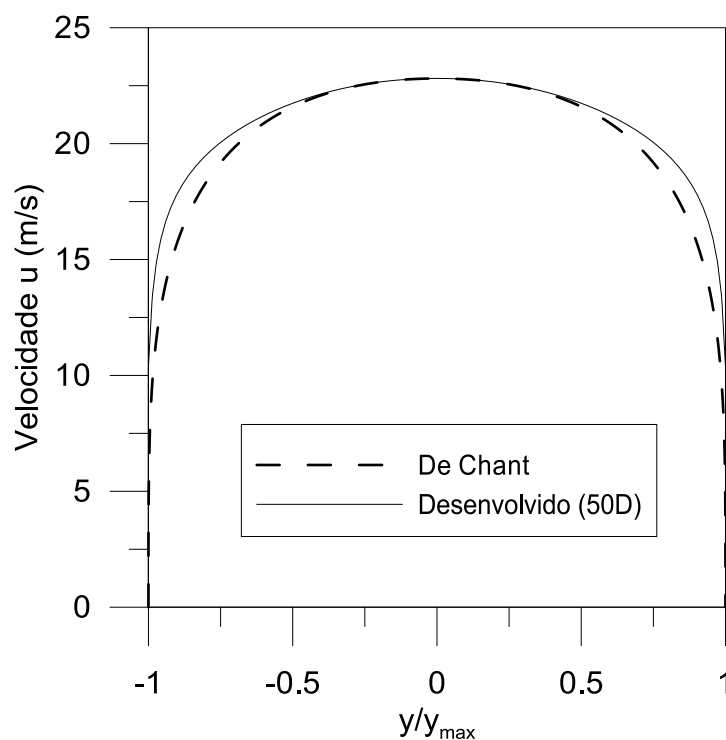


Figura 6.11 – Comparação entre o perfil de velocidade u desenvolvido a 50D e o perfil proposto por De Chant.

Tabela 6.7 – Desvios relativos entre pontos do perfil desenvolvido de De Chant e desenvolvido numérico em 50D.

y/y_{\max}	u (m/s)		Desvio relativo Desenvolvido (50D)/ De Chant
	De Chant	Desenvolvido (50D)	
0,75	19,184	20,052	4.52%
0,5	21,595	21,741	0.68%
0,25	22,561	22,564	0.01%
0	22,814	22,814	0.00%
-0,25	22,561	22,564	0.01%
-0,5	21,595	21,741	0.68%
-0,75	19,184	20,052	4.52%

Conforme Figura 6.11 e Tabela 6.7, nota-se maior desvio na região próxima à parede. Esse mesmo resultado foi relatado por Martins e Ramos [30] e para o caso anterior (Seção 5.5), fato esse que ratifica a definição do perfil em 50D como desenvolvido de referência para comparações.

Analisando os resultados em relação ao túnel de vento instalado no *Laboratório de Máquinas de Fluxo da UFES*, por este ter um trecho inicial de 22D até a posição de instalação do medidor Photon, pode-se concluir que o perfil de velocidades tornar-se-ia desenvolvido na posição de 72D do túnel (já que é necessário um trecho de 50D após o medidor Photon para que o perfil de velocidades se torne desenvolvido), caso a condição real fosse de escoamento desenvolvido na posição do medidor. Porém, o túnel de vento possui um trecho reto de 55D, conforme mostra a Figura 3.5.

É comparado o perfil desenvolvido obtido (50D) com os perfis de velocidade nas seções de medição de vazão por ultrassom e por tubo de Pitot. A Figura 6.12 mostra a comparação gráfica entre o perfil desenvolvido e o perfil numérico na seção do medidor ultrassônico.

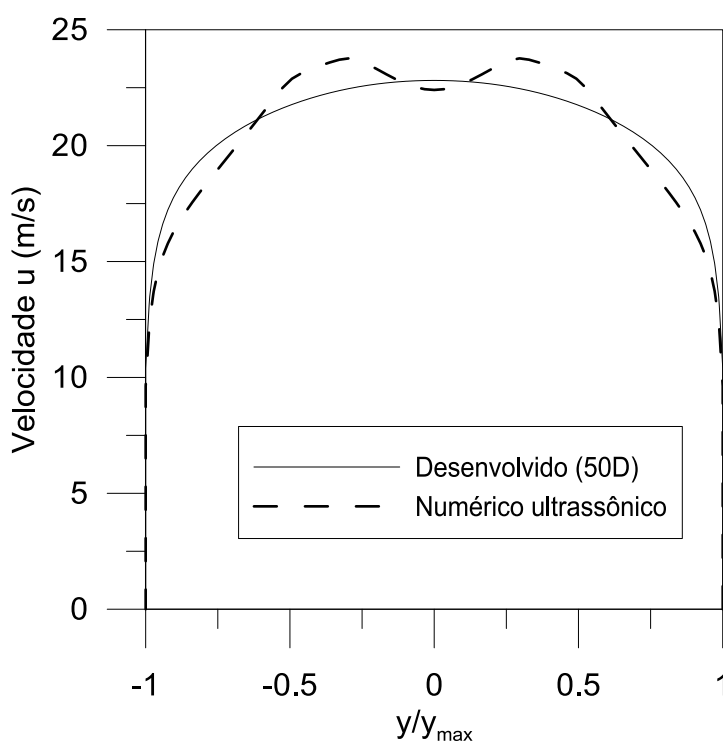


Figura 6.12 – Comparação entre o perfil desenvolvido e o perfil na seção de medição de vazão por ultrassom.

O perfil de velocidades na posição do medidor ultrassônico se revela muito diferente de um perfil de velocidades de um escoamento turbulento completamente desenvolvido. Esse perfil ainda apresenta efeitos visíveis da

interferência no medidor Photon no escoamento. A Tabela 6.8 apresenta as diferenças percentuais entre o perfil desenvolvido e o perfil de velocidades no medidor ultrassônico em sete pontos equidistantes ao longo do eixo y .

Tabela 6.8 – Desvio relativo entre os perfis de velocidade u numérico na posição do medidor ultrassônico e desenvolvido numérico.

y/y_{\max}	u (m/s)		Desvio relativo Numérico Ultrassônico/ Desenvolvido (50D)
	Numérico Ultrassônico	Desenvolvido (50D)	
0,75	18,977	20,052	-5.36%
0,5	22,802	21,741	4.88%
0,25	23,614	22,564	4.65%
0	22,403	22,814	-1.80%
-0,25	23,614	22,564	4.65%
-0,5	22,802	21,741	4.88%
-0,75	18,977	20,052	-5.36%

Os desvios percentuais mostrados pela Tabela 6.8 se mostram ainda bastante significativos, com desvio mínimo e máximo de -1,80% e -5,36%, respectivamente.

Na Figura 6.13, é comparado o perfil desenvolvido numérico e os perfis na posição do tubo de Pitot, tanto o numérico quanto o experimental. A Tabela 6.9 mostra a análise de desvios entre os perfis.

Quando comparados os desvios relativos entre o perfil numérico na posição do Pitot e o desenvolvido em 50D, nota-se um desvio máximo de 3,07% e mínimo de 0,93%. O perfil numérico nesta posição é o mais próximo do desenvolvido em relação aos perfis obtidos nas posições dos outros medidores. Ao comparar os desvios relativos entre o perfil numérico e o experimental na posição do Pitot, tem-se um desvio máximo -3,14% e mínimo de 0,52%.

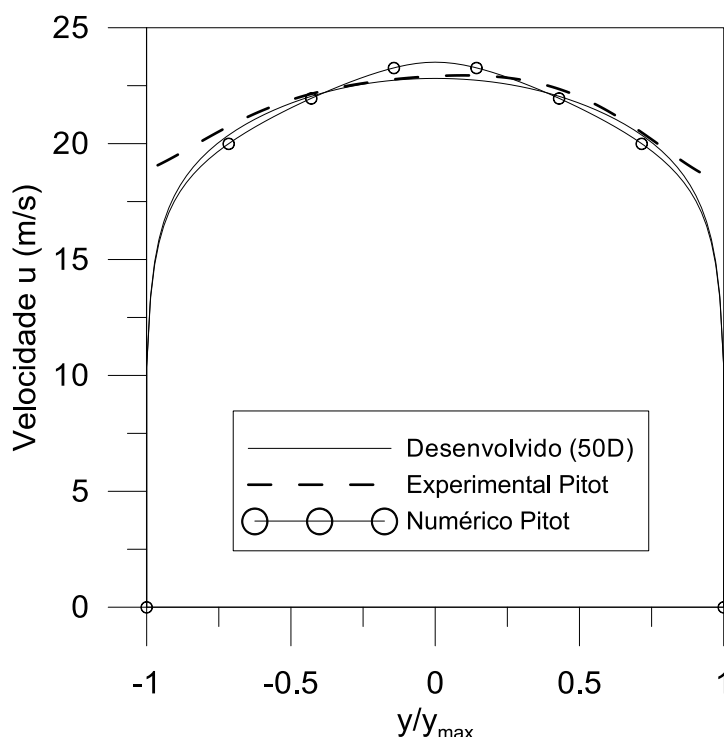


Figura 6.13 – Comparação entre os perfis da velocidade u numérico e experimental na posição do Pitot e o desenvolvido (50D).

Tabela 6.9 – Desvio relativo entre os perfis da velocidade u numérico e experimental na posição do Pitot e o desenvolvido (50D).

y/y_{\max}	u (m/s)			Desvio relativo Numérico Pitot/ Experimental Pitot	Desvio relativo Numérico Pitot / Desenvolvido (50D)
	Numérico Pitot	Experimental Pitot	Desenvolvido (50D)		
0,75	19,685	20,115	20,052	-2.14%	-1.83%
0,5	21,539	21,797	21,741	-1.18%	-0.93%
0,25	22,861	22,743	22,564	0.52%	1.32%
0	23,514	23,014	22,814	2.17%	3.07%
-0,25	22,861	22,662	22,564	0.88%	1.32%
-0,5	21,539	21,747	21,741	-0.96%	-0.93%
-0,75	19,685	20,323	20,052	-3.14%	-1.83%

A Figura 6.14 mostra o comportamento da componente u da velocidade na direção do eixo x . De acordo com o gráfico, percebe-se que a componente u da velocidade tem seu valor absoluto reduzido repentinamente, alcançando um valor negativo de aproximadamente -2 m/s. Esse comportamento se deve à presença de um obstáculo sólido na região central (medidor Photon). O obstáculo reduz a velocidade axial na região central e acelera o escoamento

nas regiões periféricas. Além disso, a interferência do medidor provoca fenômenos turbulentos, mostrados posteriormente, na região próxima a ele. Após a posição de instalação do Photon, a componente u da velocidade volta a aumentar e depois de aproximadamente $20D$ apresenta uma leve redução até se estabilizar.

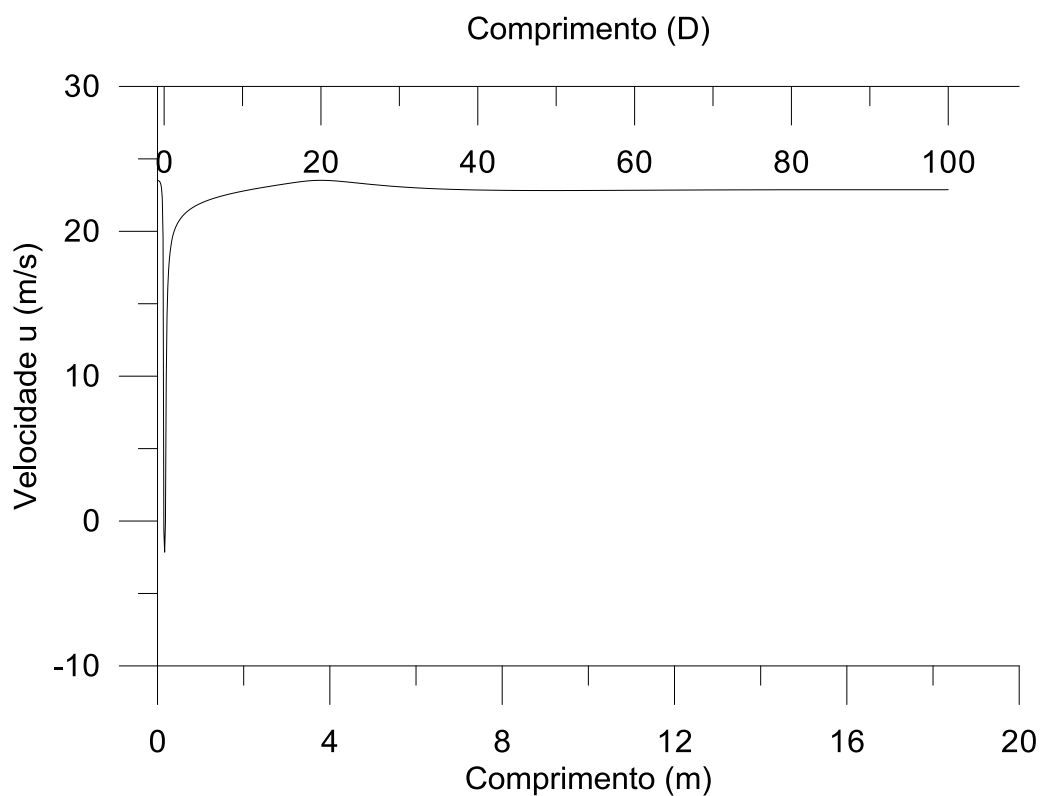


Figura 6.14 – Comportamento da componente u da velocidade na linha axial para o caso do medidor Photon.

A Figura 6.15 mostra o comportamento da componente v da velocidade na direção do eixo x . Na região após o Photon percebe-se uma mudança repentina da componente passando de 0 m/s para aproximadamente 0,5 m/s.

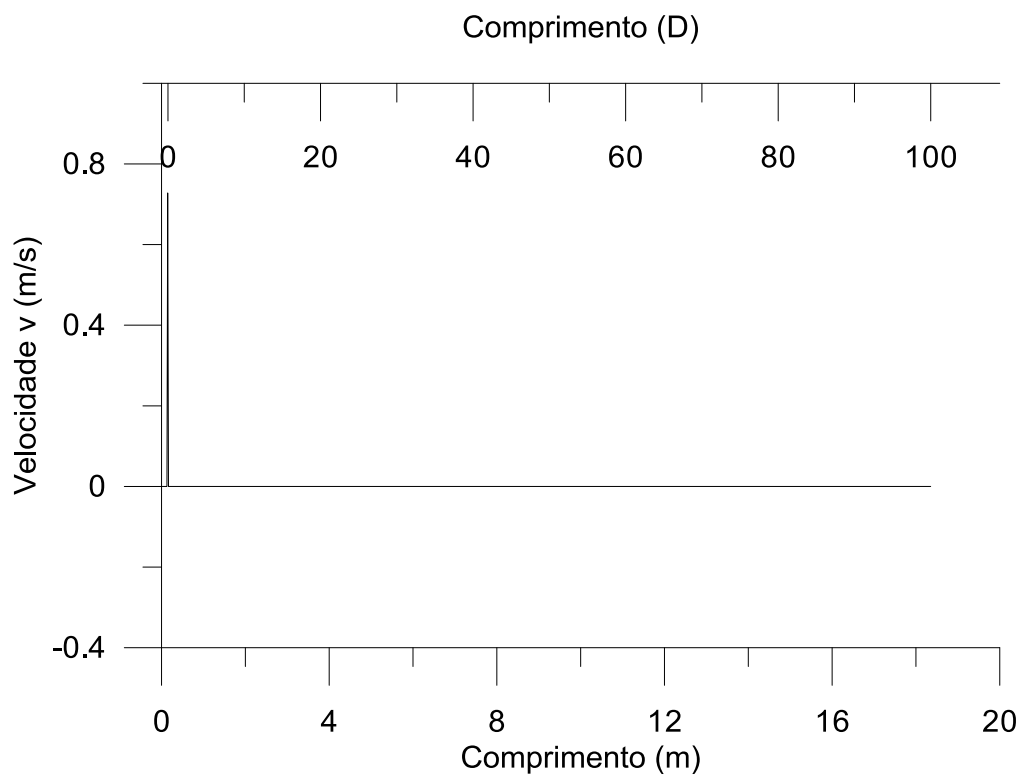


Figura 6.15 – Comportamento da componente v da velocidade na linha axial para o caso do medidor Photon.

Os resultados acima nos levaram a visualizar os fenômenos turbulentos que ocorrem após o escoamento do fluido pelo Photon. Para isso foram obtidas linhas de correntes na região logo após a posição de instalação do medidor. Essas linhas de correntes são mostradas pela Figura 6.16.

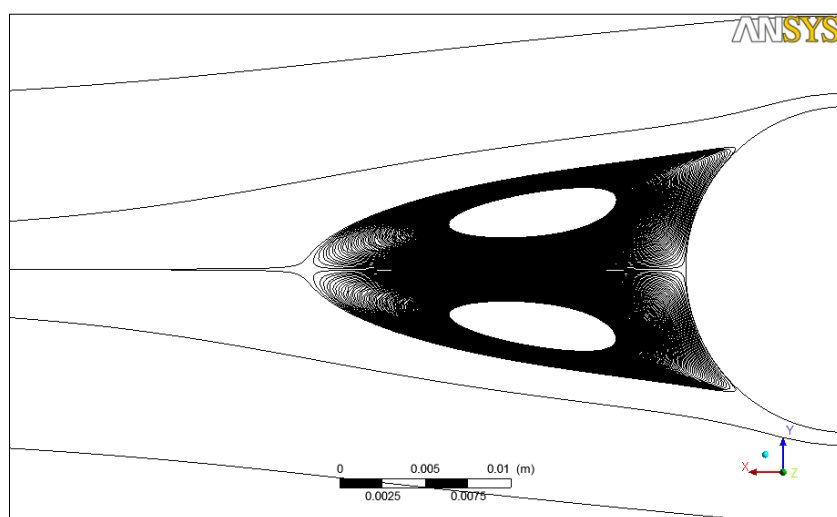


Figura 6.16 - Linhas de correntes na região logo após a posição de instalação do medidor.

7 LEVANTAMENTO EXPERIMENTAL DO CAMPO DE VELOCIDADES NA ENTRADA DO TÚNEL DE VENTO

7.1 Objetivo

O túnel de vento, objeto de estudo deste trabalho, tem um bocal de entrada instalado a montante de sua configuração. Porém a influência desse bocal de entrada no escoamento nunca havia sido estudada anteriormente. Para iniciar esse estudo decidiu-se mapear o campo de velocidades na região externa ao bocal. Essa ideia foi inspirada por um estudo mostrado em [35], ilustrado na Figura 7.1.

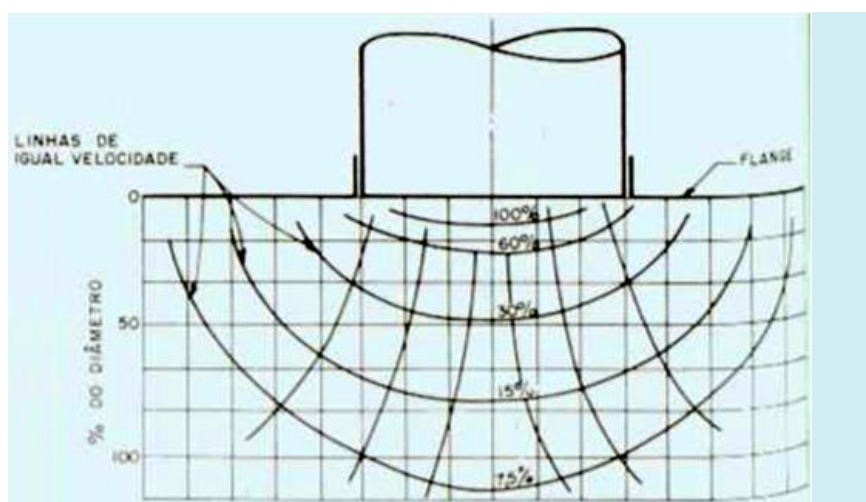


Figura 7.1 – Mapeamento da velocidade na entrada de uma tubulação com flange [35].

O mapa é formado por isolinhas de velocidade em função da distância em relação ao bocal com flange plano, em unidades de diâmetro, D . Para o caso específico do túnel de vento, serão mapeados os campos de velocidades para as três rotações de trabalho do túnel: 700, 950 e 1200 rpm.

Além deste experimento gerar dados que mapearão o campo de velocidades da região de entrada do túnel, ele nos permitirá gerar a condição de entrada para a simulação descrita no capítulo 8.

7.2 Aparato Experimental

O aparato experimental utilizado foi o seguinte:

- Anemômetro Digital;
- Suporte (pedestal tripé);
- Prumo;
- Marcação de ângulos e distâncias;
- Computador com o software *LabVIEW* instalado.

A Figura 7.2 mostra este aparato experimental utilizado, com exceção do computador mostrado na Figura 3.2-b.

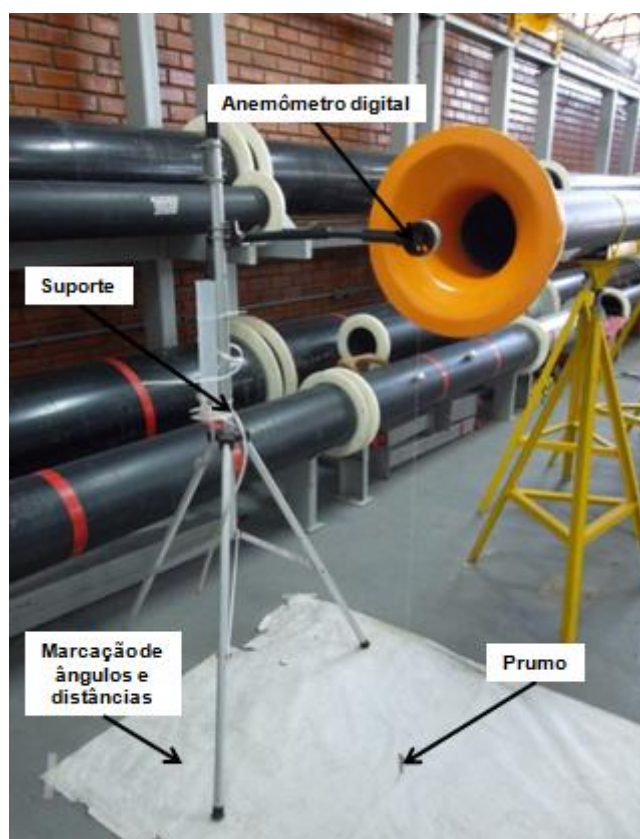


Figura 7.2 – Aparato experimental utilizado.

7.3 Procedimento Experimental

Um suporte foi adaptado para alocar o anemômetro de forma que a altura do seu centro estivesse na mesma altura do eixo axial do túnel de vento. Fixou-se o prumo, no anemômetro, de forma que a linha ficasse tensionada na vertical na direção do centro do anemômetro (ponto de medição). Fixou-se no chão um mapa com os pontos de medição conforme Figura 7.3. Durante o experimento, o prumo foi posicionado acima do ponto a ser medido garantindo uma maior

precisão nas posições de medição. Além disso, o anemômetro era posicionado de forma que seu sentido de medição fosse perpendicular a um sentido mais favorável de escoamento, garantindo a correta utilização do instrumento.

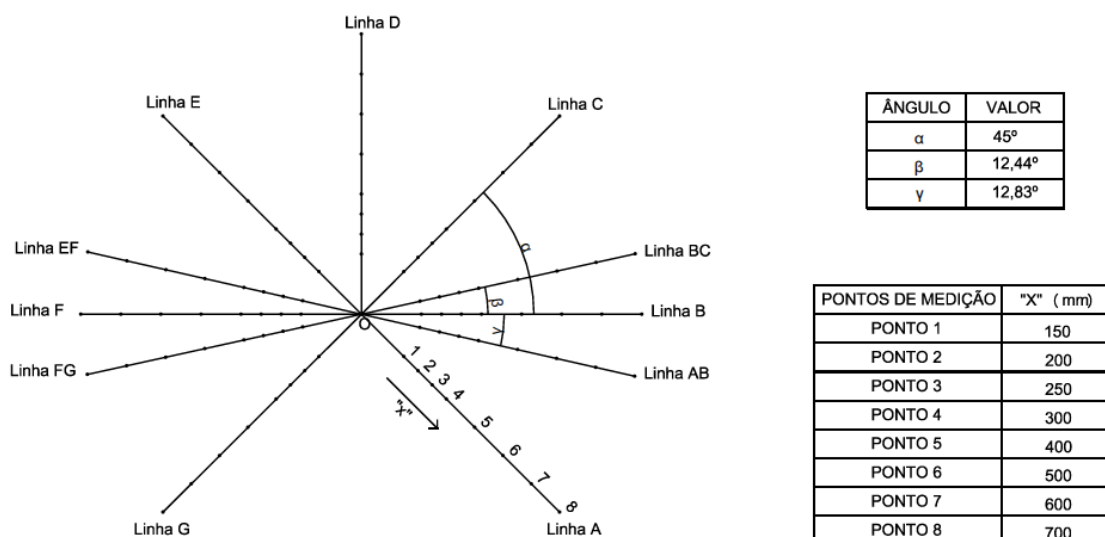


Figura 7.3 – Posições de medição do anemômetro.

Foram adquiridos os dez valores subsequentes indicados pelo anemômetro para um certo ponto a uma certa rotação, totalizando 880 valores, e depois calculadas as médias. Posteriormente, alterava-se a rotação através do computador mantendo o anemômetro na mesma posição evitando assim possíveis erros devido a um diferente posicionamento manual do instrumento para aquele mesmo ponto. Esperava-se o escoamento estabilizar, checando a variação da rotação do rotor do túnel de vento e da velocidade medida pelo anemômetro. Deve-se ressaltar que não foram adquiridos dados em alguns pontos próximos ao bocal devido a restrições operacionais. Por esse motivo, as linhas "AB", "BC", "EF" e "FG" foram adicionadas a fim de adquirir mais dados. Dessa forma, foram realizadas as medições nos pontos indicados na figura acima para as três rotações.

7.4 Resultados e Discussões

A Tabela 7.1 mostra os valores médios da velocidade para as três rotações. Os valores de todas as medições realizadas encontram-se no Anexo B. A partir

dos valores mostrados, pode-se ter uma estimativa da distância do bocal em que a velocidade é nula.

Tabela 7.1 – Valores médios da velocidade para as três rotações.

Linha A																								
Ponto	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4			Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
Rotação	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Vmed (m/s)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	0	0	-	-	0	-	-	-	-	-	-
Linha AB																								
Ponto	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4			Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
Rotação	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Vmed (m/s)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0,72	1,01	1,13	0	0,64	0,79	-	0	0	-	-	-	-	-	-
Linha B																								
Ponto	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4			Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
Rotação	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Vmed (m/s)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1,21	1,54	2,20	0,69	0,84	1,04	0	0	0,41	-	-	0	-	-	-
Linha BC																								
Ponto	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4			Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
Rotação	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Vmed (m/s)	5,06	6,88	8,41	4,44	6,06	7,75	3,18	4,44	5,53	1,90	2,59	3,28	0,97	1,22	1,59	-	0,31	0,58	0	0	0	-	-	-
Linha C																								
Ponto	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4			Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
Rotação	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Vmed (m/s)	4,22	3,92	6,89	2,86	3,91	4,80	1,91	2,62	3,26	1,17	1,74	1,95	1,03	1,16	1,31	0	0,46	0,63	-	0	0	-	-	-
Linha D																								
Ponto	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4			Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
Rotação	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Vmed (m/s)	3,70	4,97	6,25	2,30	2,99	3,83	1,45	2,02	2,50	1,08	1,30	1,73	0,63	0,98	1,19	0	0,46	0,67	-	0	0	-	-	-
Linha E																								
Ponto	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4			Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
Rotação	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Vmed (m/s)	3,94	5,29	6,76	2,73	3,74	4,64	2	2,51	3,18	1,23	1,69	2,18	0,88	1,16	1,43	0	0,63	0,71	-	0	0	-	-	-
Linha EF																								
Ponto	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4			Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
Rotação	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Vmed (m/s)	4,98	6,79	8,08	4,35	5,91	7,07	3,21	4,34	5,73	2,04	2,83	3,12	0,99	1,47	1,62	0,47	0,68	0,74	0	0,36	0,53	-	0	0
Linha F																								
Ponto	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4			Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
Rotação	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Vmed (m/s)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1,11	1,52	1,89	1,06	1,08	1,39	0	0	0,45	-	-	0	-	-	-

Linha FG																								
Ponto	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4			Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
Rotação	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Vmed (m/s)	x	x	x	x	x	x	0	0	0,51	0,49	0,86	1,12	0,33	0,43	0,57	0	0	0	-	-	-	-	-	-

Linha G																								
Ponto	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4			Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
Rotação	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Vmed (m/s)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	0	0,01	-	-	0	-	-	-	-	-	-

Legenda	
N1	700 rpm
N2	950 rpm
N3	1200 rpm
x	não foi possível medir
-	não foi medido, igual a zero

A estratégia utilizada em [35] para levantar o campo de velocidades na entrada de uma tubulação com um bocal qualquer instalado consiste em traçar isolinhas de velocidade em função do diâmetro da tubulação, D . Cada isolinha corresponde a um percentual da velocidade máxima (100%, 60%, 30%, 15% e 7,5%) medida. Partindo desta referência e de posse dos valores medidos, para cada linha em cada rotação, criaram-se polinômios com os valores de velocidade e a partir deste polinômio, conseguiu-se determinar, com auxílio da ferramenta “Atingir Meta” do *Microsoft Excel*, a distância “x”, que correspondia aos valores percentuais de velocidade. O valor máximo da velocidade foi medido no ponto O conforme Figura 7.3 e constam na Tabela 7.2. A Figura 7.4 mostra como exemplo o polinômio criado para a linha E para rotação de 1200 rpm e a Tabela 7.3 mostra os valores de “x” encontrados. O mesmo procedimento foi realizado para todas as linhas em todas as rotações.

Tabela 7.2 – Velocidades máximas medidas no ponto O para cada rotação.

Rotação (rpm)	700	950	1200
Velocidade máxima (m/s)	8.083	11.114	14.039

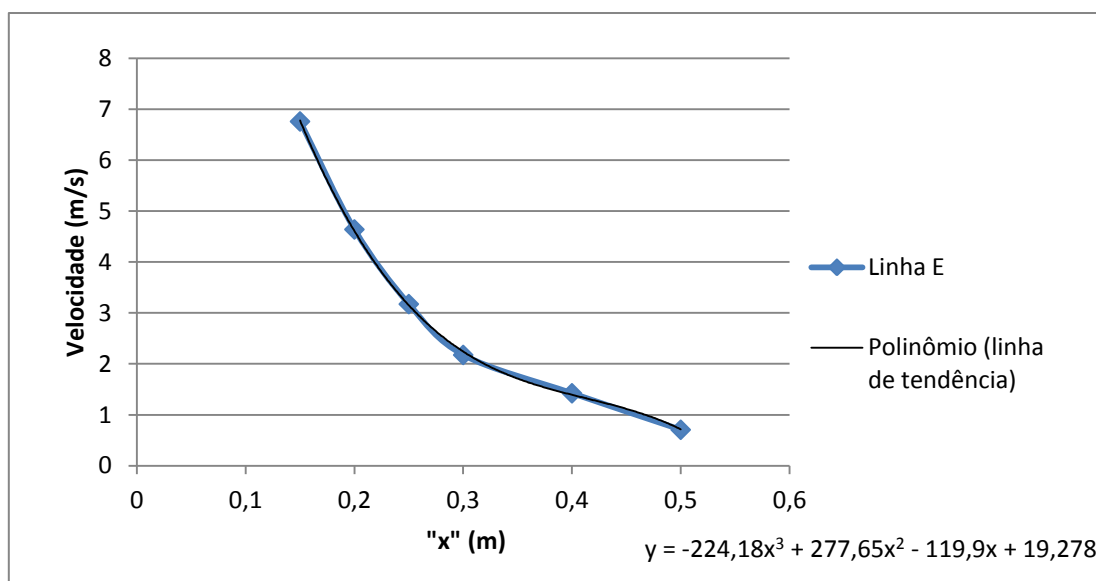


Figura 7.4 – Curva de variação da velocidade na Linha E e polinômio correspondente à linha de tendência para a rotação de 1200 rpm.

Tabela 7.3 – Valores de “x” encontrados para a Linha E de acordo com os percentuais da velocidade máxima.

% Velocidade máxima	60%	30%	15%	7,5%
Posição "x" (mm)	121,59	212,06	311,02	460,56

Com esses valores de “x”, criaram-se os gráficos para as três rotações com as isolinhas de velocidade em função de y/D . Os gráficos são mostrados pelas Figuras 7.5, 7.6 e 7.7.

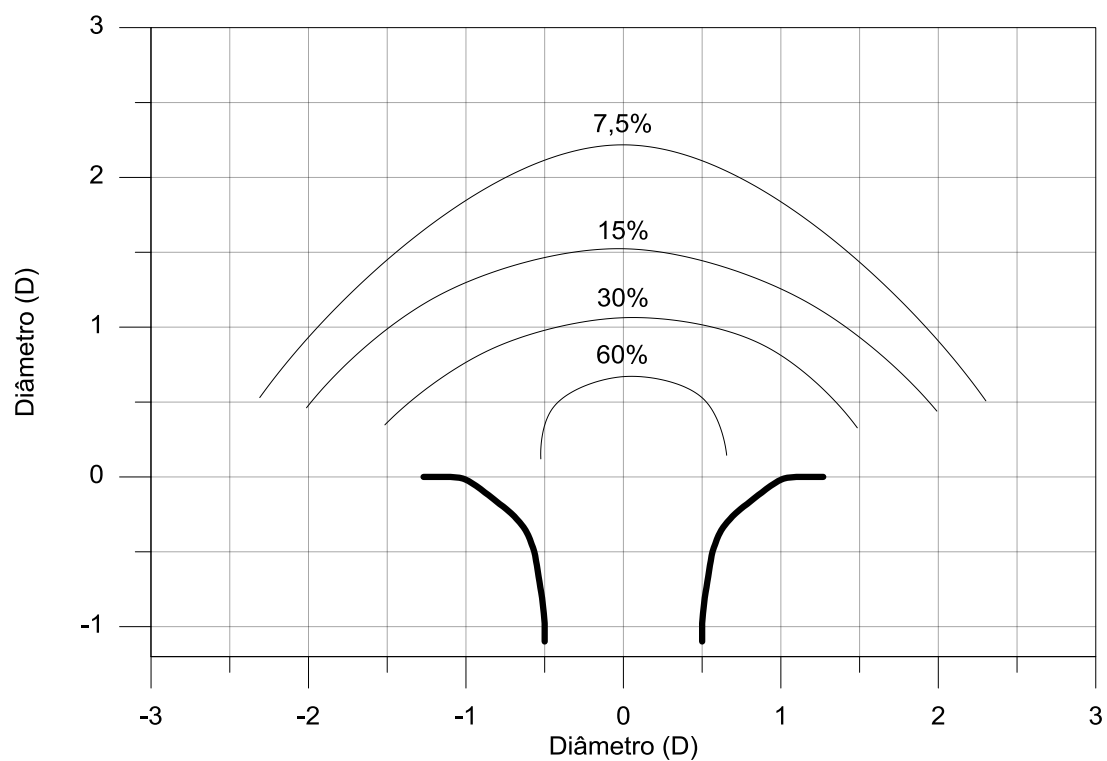


Figura 7.5 – Mapeamento do campo de velocidade na região de entrada do túnel de vento para a rotação de 700 rpm.

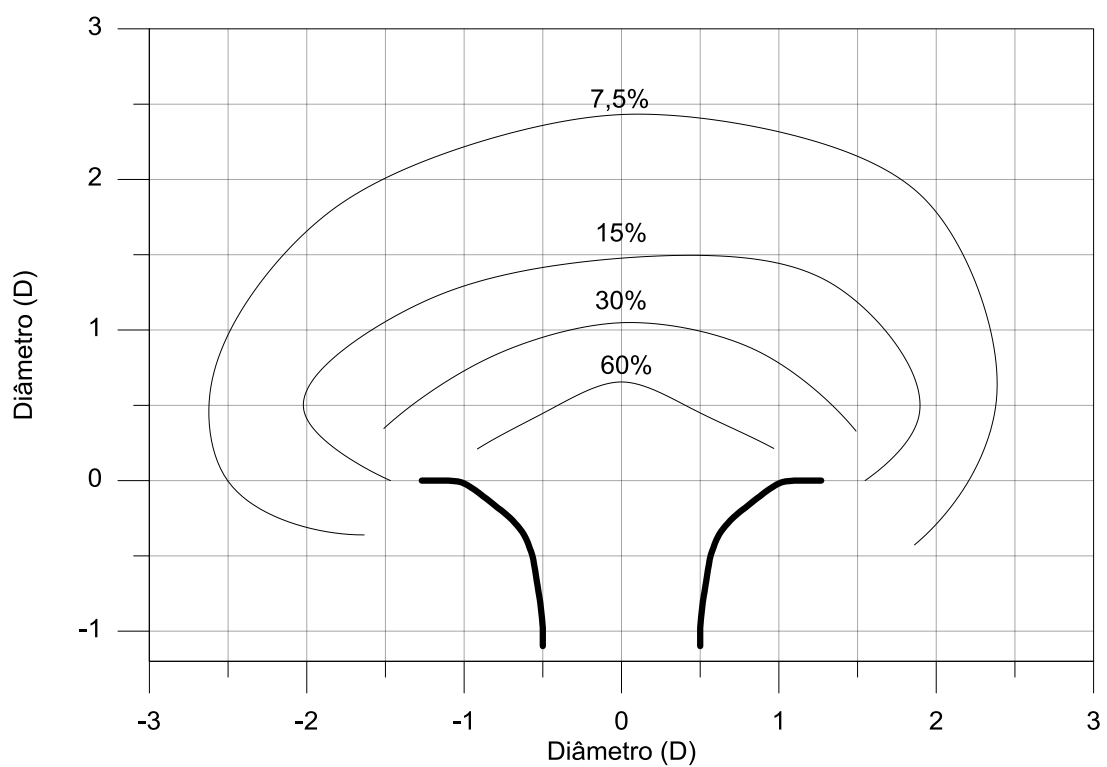


Figura 7.6 – Mapeamento do campo de velocidade na região de entrada do túnel de vento para a rotação de 950 rpm.

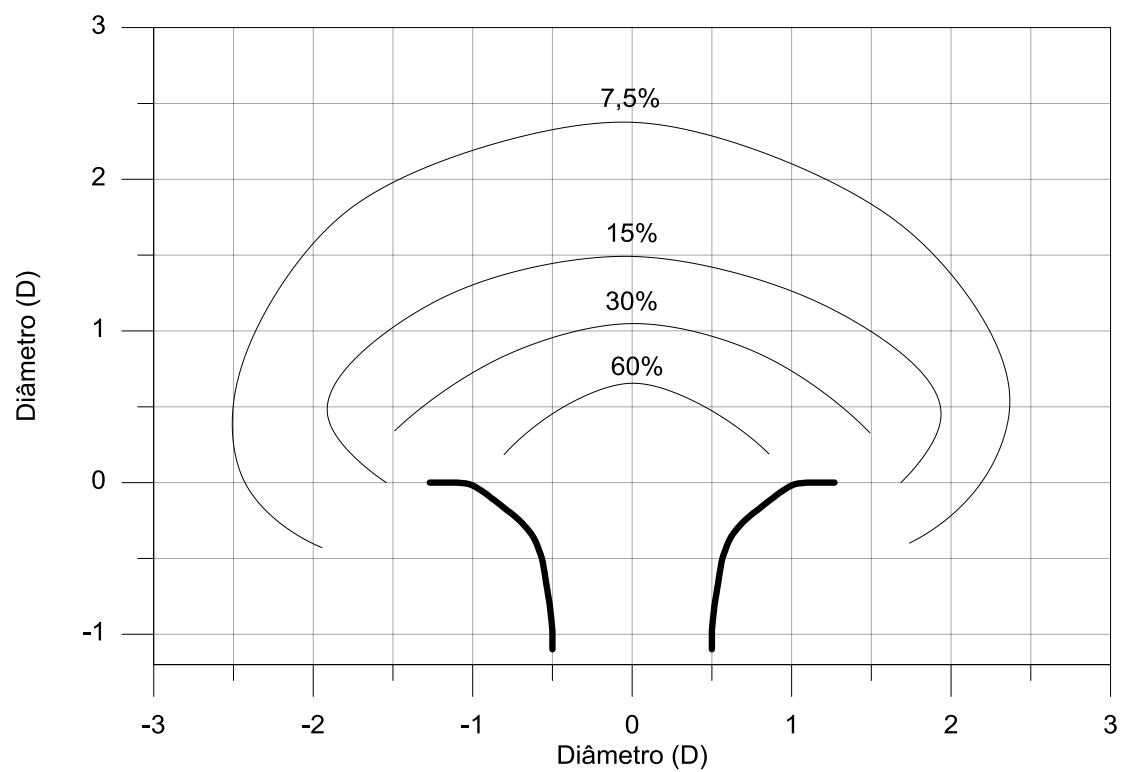


Figura 7.7 – Mapeamento do campo de velocidade na região de entrada do túnel de vento para a rotação de 1200 rpm.

8 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO TÚNEL DE VENTO COM BOCAL

8.1 Apresentação do caso

O objetivo deste último caso é estudar o escoamento do túnel de vento de uma forma mais próxima da realidade. O que torna essa simulação mais real do que os outros casos são a geometria e a condição de contorno de entrada que serão utilizadas. Esta última proverá de dados experimentais obtidos através do experimento descrito no capítulo 7.

A geometria desenhada para a simulação consiste em uma região externa ao bocal (o método para determinação da dimensão dessa região será descrito em 7.2), o bocal de entrada do túnel de vento e um trecho reto de 100D. A partir dos resultados gerados, pode-se analisar a influência do bocal no escoamento e verificar se ele realmente contribui para o desenvolvimento do escoamento.

Visto que os dados experimentais foram obtidos em 2D, decidiu-se por simular o túnel de vento também em 2D (“falso 2D”). Para iniciar o desenho da geometria era necessário levantar o perfil exato do bocal de entrada mostrado pela Figura 8.1. Foi utilizada, para isso, uma massa de modelar e moldamo-la na parede interior do bocal. Posteriormente, com a massa mais rígida, sobreponho-la em papel milimetrado, e traçou-se uma curva no mesmo seguindo a forma da massa modelada. Assim, foram obtidos vários pontos com suas respectivas coordenadas.

A partir disso, foi criado um arquivo com extensão *.txt* contendo as coordenadas desses pontos. Importou-se este arquivo para o programa *DesignModeler* gerando pontos isolados. Finalmente, os pontos gerados foram ligados através da ferramenta *Spline* formando a geometria do bocal. As coordenadas dos pontos que definem a geometria do bocal encontram-se no Anexo C. Posteriormente, uma curva que representa uma isolinha de velocidade foi adicionada à geometria para impor uma condição de entrada coerente futuramente (vide seção 8.3).

As Figuras 8.2-a e 8.2-b mostram o domínio em todo seu comprimento e a região de entrada, respectivamente.

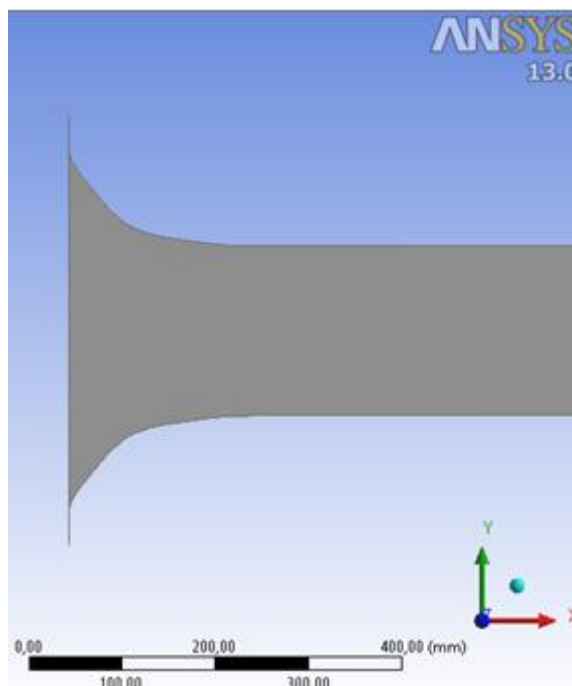
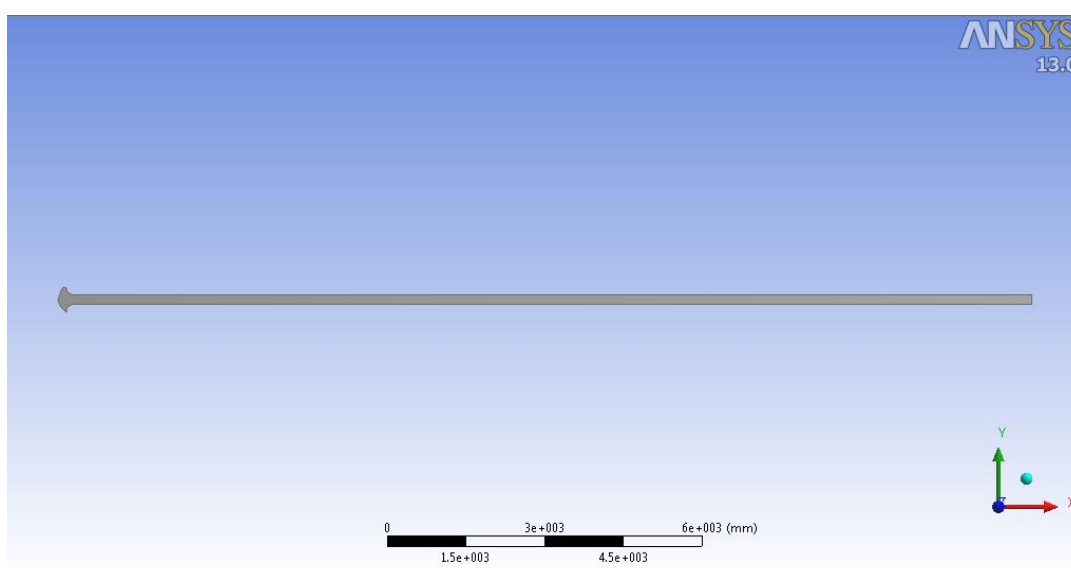


Figura 8.1 – Perfil do bocal desenhado.



(a)

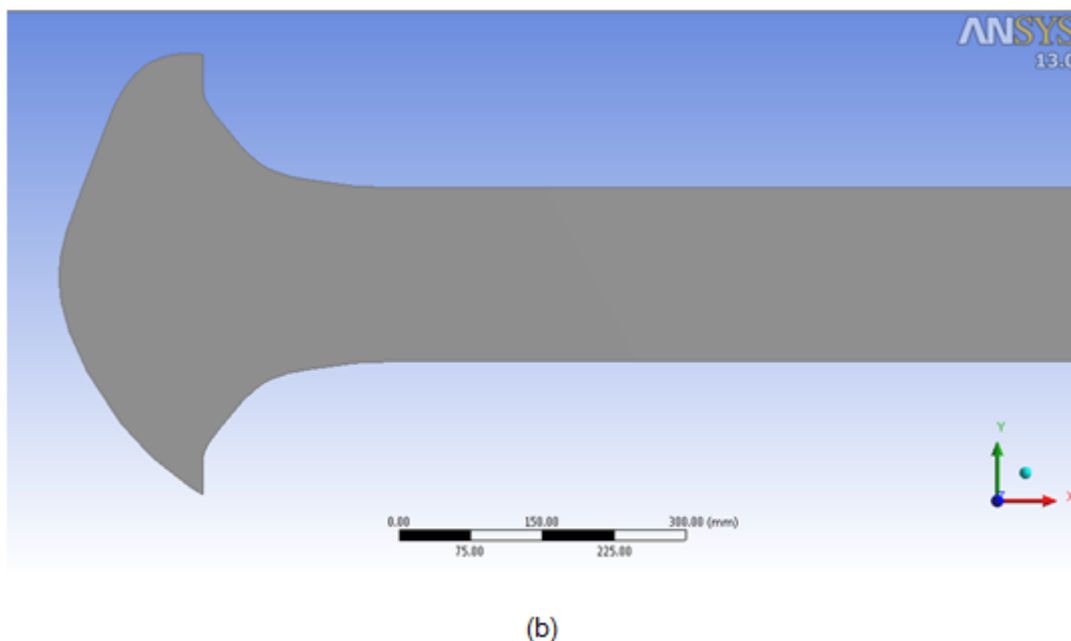


Figura 8.2 – (a) Domínio em todo o seu comprimento e (b) região de entrada.

8.2 Geração da malha

Desenhada a geometria no *software DesignModeler* seguiu-se para a etapa de geração de malha. Foi utilizado, também neste caso, o *software ICEM CFD*. Iniciou-se com a técnica de divisão da geometria em blocos, como mostra a Figura 8.3.

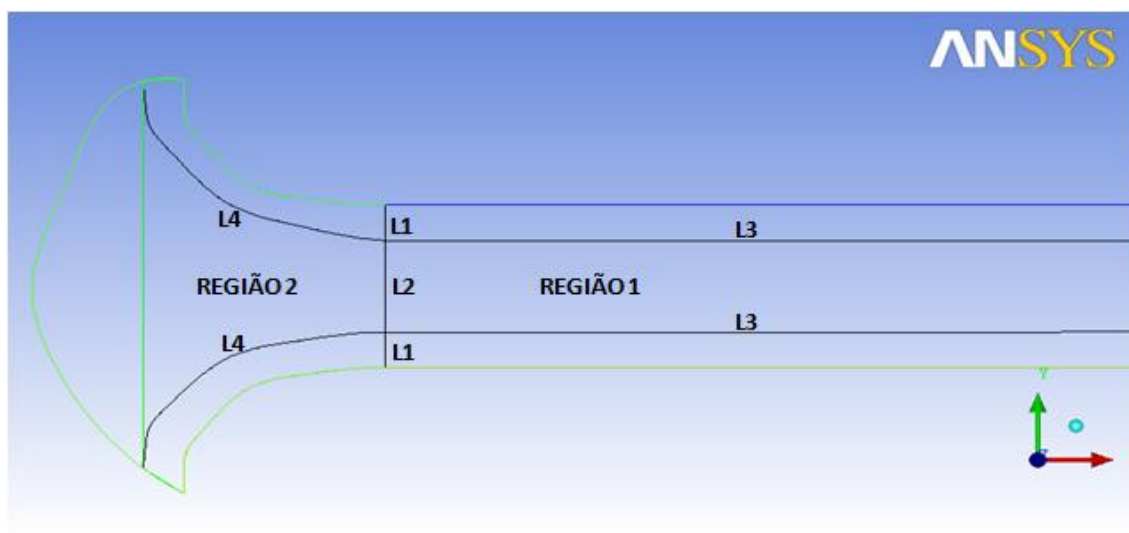


Figura 8.3 – Divisão da geometria em blocos e indicação de arestas.

A geometria foi dividida em seis blocos: três blocos no trecho reto (Região 1) e três na geometria que representa o fluido interior ao bocal e o localizado na região externa ao bocal (Região 2). Essa técnica de divisão em blocos foi utilizada para obter um controle mais independente das duas regiões, já que o comportamento do escoamento na região de entrada do túnel era completamente desconhecido e os fenômenos que acontecem próximos ao bocal, incertos. Esses fatores geram a necessidade de um refinamento maior da malha na região de entrada do que na região do trecho reto.

Nota-se na Figura 8.3, dois blocos centrais e quatro blocos mais próximos à parede. Esses blocos próximos à parede foram criados, assim como nas outras simulações realizadas neste trabalho, para que se pudesse estabelecer um maior refinamento nessas regiões, visto que nelas, as velocidades do fluido variam mais rapidamente.

As malhas geradas podem ser visualizadas na Figura 8.4. A Figura 8.4-f mostra, para melhor visualização do efeito da ferramenta *Refinement*, o zoom da região de transição entre o bocal e o tubo para a Malha 5.

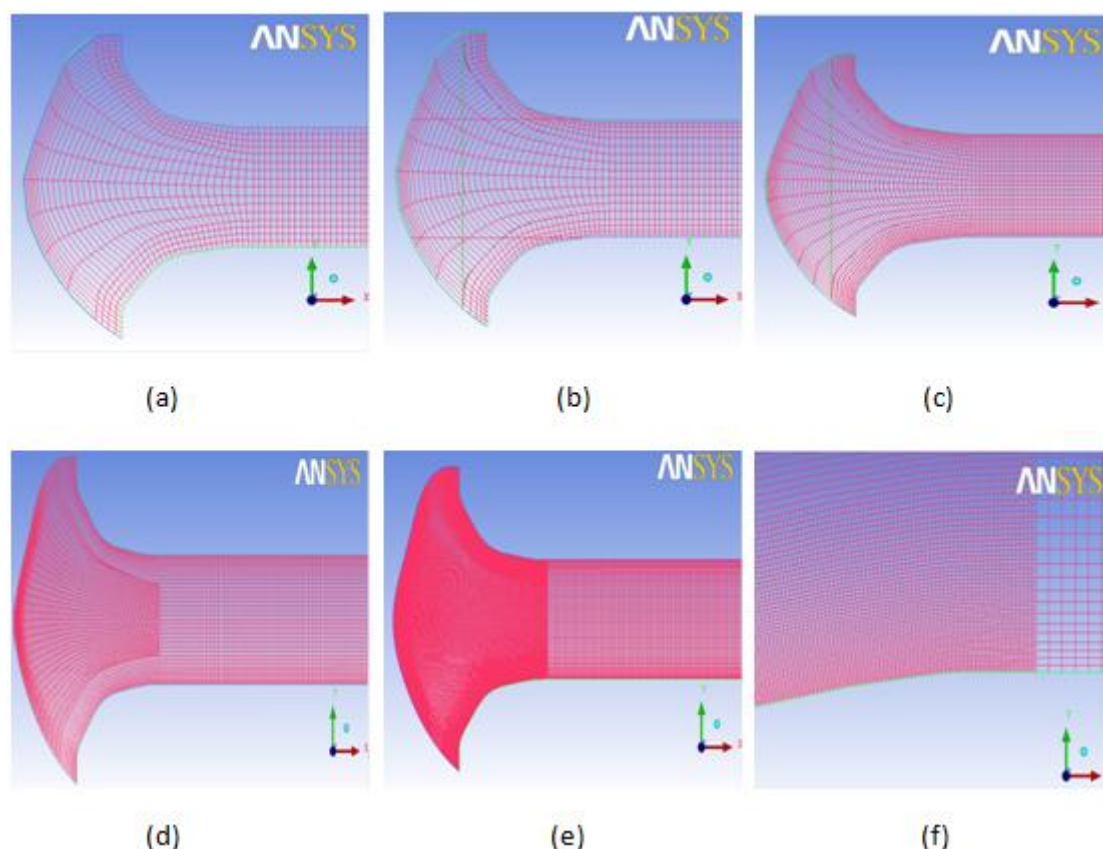


Figura 8.4 – Malhas na região do bocal de entrada do túnel de vento: (a) Malha 1, (b) Malha 2; (c) Malha 3; (d) Malha 4; (e) Malha 5 e (f) o zoom da região de transição entre o bocal e o tubo para a Malha 5.

Como nos outros dois casos simulados, aplicou-se a ferramenta *Geometric* para distribuir os nós nos quatro blocos periféricos de forma que os elementos fossem menores na região mais próxima da parede e maiores à medida que se aproximassem dos blocos centrais.

A partir da Malha 4 decidiu-se aplicar a ferramenta *Refinement* na Região 2. Essa ferramenta foi aplicada, pois os elementos gerados nessa região eram visivelmente grosseiros. Elementos maiores naquela região não eram interessantes por ser uma região com um tipo de escoamento desconhecido, sujeito a efeitos que necessitem de malhas mais refinadas para serem previstos por simulação. As malhas que tiveram essa técnica aplicada são as Malhas 4 e 5, mostradas na Figura 8.4. A Tabela 8.1 mostra as especificações de cada malha segundo a Figura 8.3.

Tabela 8.1 - Especificações de cada malha segundo a Figura 8.3.

L1	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5
Comprimento (mm)	40	40	40	40	40
Número de nós	5	6	9	12	17
<i>Mesh Law</i>	Uniform	Geometric1	Geometric1	Geometric1	Geometric1
<i>Spacing 1</i>	10	4.5	2.80	2	1.4
<i>Ratio 1</i>	1	1.29	1.16	1.11	1.07
L2	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5
Comprimento (mm)	102	102	102	101.999	101.999
Número de nós	9	9	11	17	24
<i>Mesh Law</i>	Uniform	Uniform	Uniform	Uniform	Uniform
<i>Spacing 1</i>	12.75	12.75	8.5	6.37	4.43
<i>Ratio 1</i>	1	1	1	1	1
L3	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5
Comprimento (mm)	18200	18200	18200	18200	18200
Número de nós	2000	2000	2900	3700	4900
<i>Mesh Law</i>	Uniform	Uniform	Uniform	Uniform	Uniform
<i>Spacing 1</i>	9.1	9.1	6.27	4.92	3.71
<i>Ratio 1</i>	1	1	1	1	1
L4	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5
Comprimento (mm)	329.415	329.415	329.415	329.415	329.415
Número de nós	37	37	54	68	88
<i>Mesh Law</i>	Uniform	Uniform	Uniform	Uniform	Uniform
<i>Spacing 1</i>	9.15	9.15	6.21	4.91	3.78
<i>Ratio 1</i>	1	1		1	1
Refinement Centro	-	-	-	2	3
Refinement Bordas	-	-	-	-	3
Número Total de Nós	69224	69224	171274	304879	722656

Na Tabela 8.2, além de informações gerais, é possível observar que o grau da técnica *Refinement* utilizado aumentava à medida que o objetivo era gerar malhas mais refinadas.

8.3 Condições de Contorno

As condições de contorno estão descritas na Tabela 8.2. A Figura 8.5 mostra o domínio no plano *xy* e as indicações de superfícies. Um corte foi feito na

geometria para uma melhor visualização das superfícies. Vale lembrar que existe um plano oposto ao mostrado na figura visto que a geometria é em 3D (“falso” 2D), e, portanto, uma outra superfície com condição de simetria, S6.

Tabela 8.2 - Condições de contorno para o caso do túnel de vento com bocal.

Condição de contorno	Superfície(s)	Parâmetro	Valor
Entrada	S1	Velocidade uniforme	6,22 m/s
Parede	S2, S3	-	-
Simetria	S4, S6	-	-
Saída	S5	Pressão estática média	1 atm

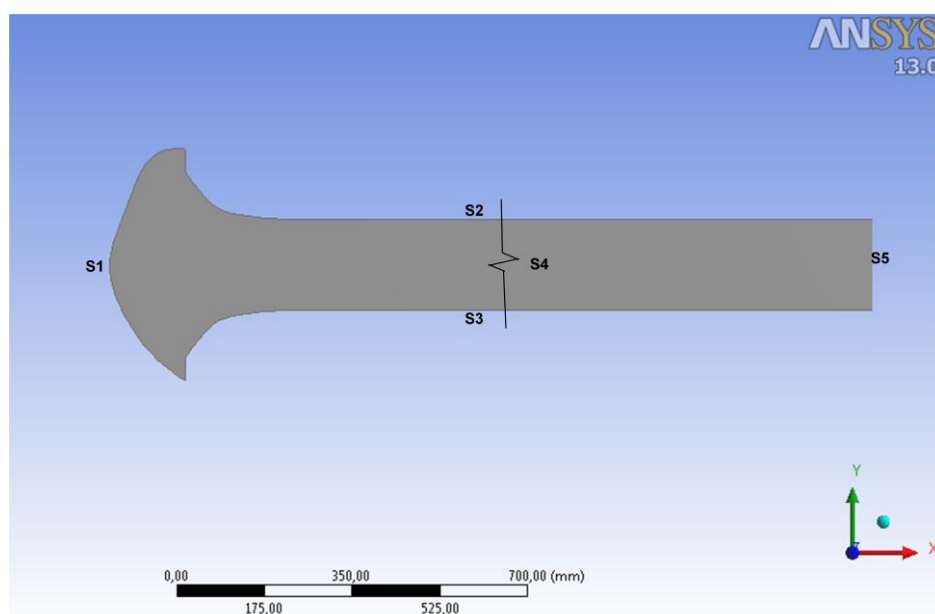


Figura 8.5 - Indicação das superfícies especificadas como condição de contorno para o caso do túnel de vento com bocal.

A simulação que vêm sendo descrita se refere apenas ao caso de rotação de 1200 rpm do rotor, por ser a que gera uma condição de escoamento mais próxima dos gases de *queima*.

O valor especificado da velocidade como condição de entrada tem fundamento experimental. Um dos objetivos do experimento descrito no capítulo 7 era conhecer o campo de velocidade para que se pudesse impor uma condição de entrada mais real possível e saber a influência do bocal no escoamento.

Através dos dados experimentais, obteve-se polinômios que descrevem o comportamento da velocidade em função da distância do ponto de medição em relação ao ponto “O”, mostrado na Figura 7.4. A partir disso, decidiu-se obter os valores absolutos da velocidade nos pontos próximos à extremidade do bocal nas Linhas BC e EF (linhas mais próximas do bocal), substituindo as variáveis x dos polinômios pelo valor do raio externo do bocal, que é de 231 mm. Esses valores foram de 6,33 m/s e 6,10 m/s, respectivamente. A partir desses valores, foi calculada a média aritmética (6,22 m/s) e em qual distância essa velocidade ocorria para os polinômios das outras linhas: C, D e E. As Linhas B e F não foram utilizadas por possuírem pontos de medição mais distantes (“x”) do que o raio externo do bocal, condição essa que ia contra a estratégia adotada para imposição da condição de contorno de entrada. As demais linhas não foram utilizadas por possuírem poucos pontos de medição em função de restrições operacionais.

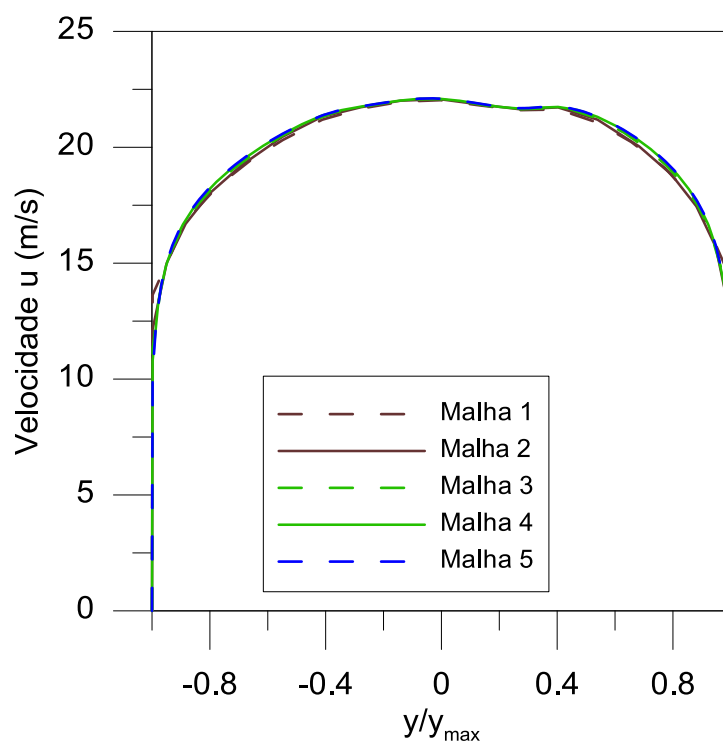
Calculadas essas outras distâncias, pode-se gerar um arquivo no formato *.txt* com as coordenadas desses pontos no plano cartesiano e carregar esse arquivo no *DesignModeler*. A partir daí, esses pontos foram interligados gerando uma curva *Spline* definindo-se o domínio da região da entrada externa ao túnel de vento. Esse domínio, junto com o bocal e o trecho reto, pode ser visto na Figura 8.2.

A condição de saída imposta foi a de pressão estática média de 1 atm. Condições de parede foram impostas às superfícies S2 e S3 e a condição de simetria à superfície S4.

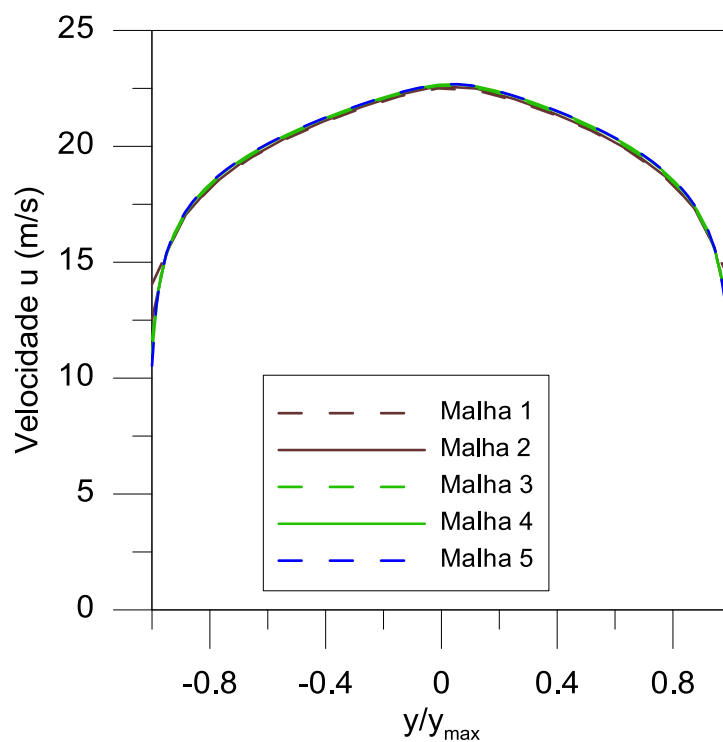
8.4 Teste de sensibilidade de malhas

Para determinar a malha convergida, novamente, comparou-se o perfil de velocidades nas três seções onde existem instalados os medidores de vazão, conforme metodologia descrita na seção 5.4. As Figuras 8.6 mostra os perfis de velocidades nas seções dos medidores Photon, ultrassônico e tubo de Pitot, respectivamente, para as cinco malhas. A Tabela 8.3 contempla a síntese do

teste de malha. O critério de convergência foi novamente erro médio de 0,3%. O teste na íntegra encontra-se no Anexo A.



(a)



(b)

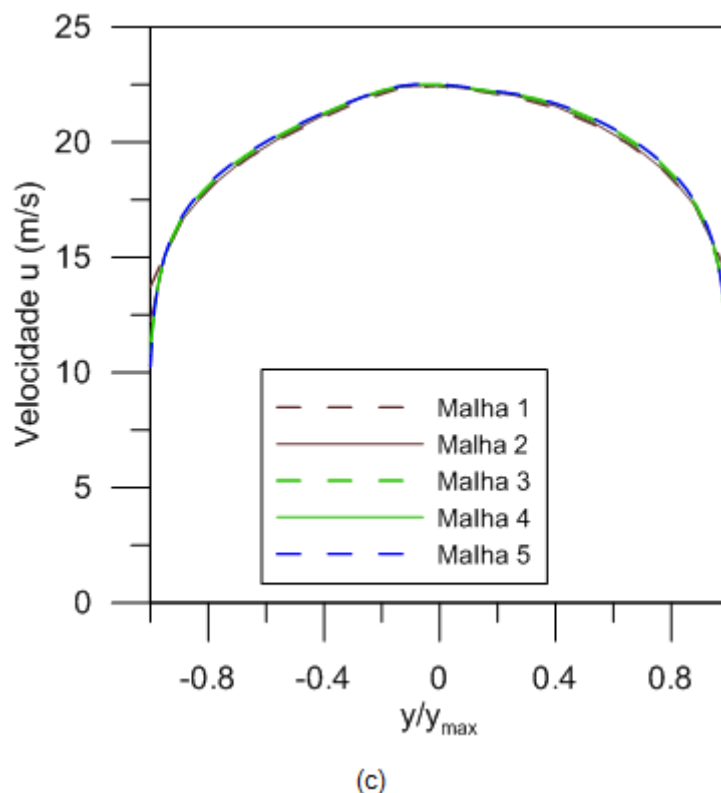


Figura 8.6 – Teste de malha para o caso do túnel de vento com bocal: (a) perfis da velocidade u na posição do medidor Photon; (b) perfis da velocidade u na posição do medidor ultrassônico; e (c) perfis da velocidade u na posição do tubo de Pitot.

Tabela 8.3 - Síntese do teste de malha para o túnel de vento com bocal na posição do medidor Photon.

Teste de Malha na posição do medidor Photon para o caso do trecho reto									
Pontos	u (m/s)					Desvio (%)			
	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5	Malhas 2 - 1	Malhas 3 - 2	Malhas 4 - 3	Malhas 4 - 3
1	13,631	12,033	11,133	10,520	9,879	-11,72%	-7,48%	-5,50%	-6,09%
2	14,198	13,219	13,003	13,110	13,078	-6,89%	-1,63%	0,82%	-0,25%
3	14,764	14,405	14,420	14,443	14,506	-2,43%	0,11%	0,16%	0,44%
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	22,021	22,063	22,075	22,093	22,110	0,19%	0,06%	0,08%	0,08%
50	22,030	22,073	22,078	22,092	22,097	0,19%	0,03%	0,06%	0,02%
51	22,007	22,050	22,057	22,072	22,083	0,19%	0,03%	0,07%	0,05%
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
98	15,408	15,012	15,084	15,099	15,155	-2,57%	0,48%	0,10%	0,37%
99	14,832	13,806	13,601	13,700	13,673	-6,92%	-1,48%	0,73%	-0,20%
100	14,257	12,600	11,694	11,058	10,372	-11,62%	-7,19%	-5,44%	-6,21%
Média						0,75%	0,53%	0,42%	0,25%

Conforme Tabela 8.3 e Anexo A, a Malha 4 possui erro médio menor do que o critério, sendo assim, a malha convergida. Portanto, os resultados relatados na próxima seção foram extraídos da solução do programa para essa malha.

8.5 Resultados e discussões

Nesta seção serão feitas comparações com perfis teóricos e experimentais. A primeira etapa antes de iniciar essas comparações é determinar em que posição o perfil de velocidade é considerado desenvolvido.

Para isso, foram comparados os perfis nas posições 20D, 40D, 60D, 80D e 100D, conforme Figura 8.7, para realizar a análise de desvios relativos. A Tabela 8.4 mostra a comparação desses desvios e a Figura 8.8 mostra a análise gráfica dos mesmos.

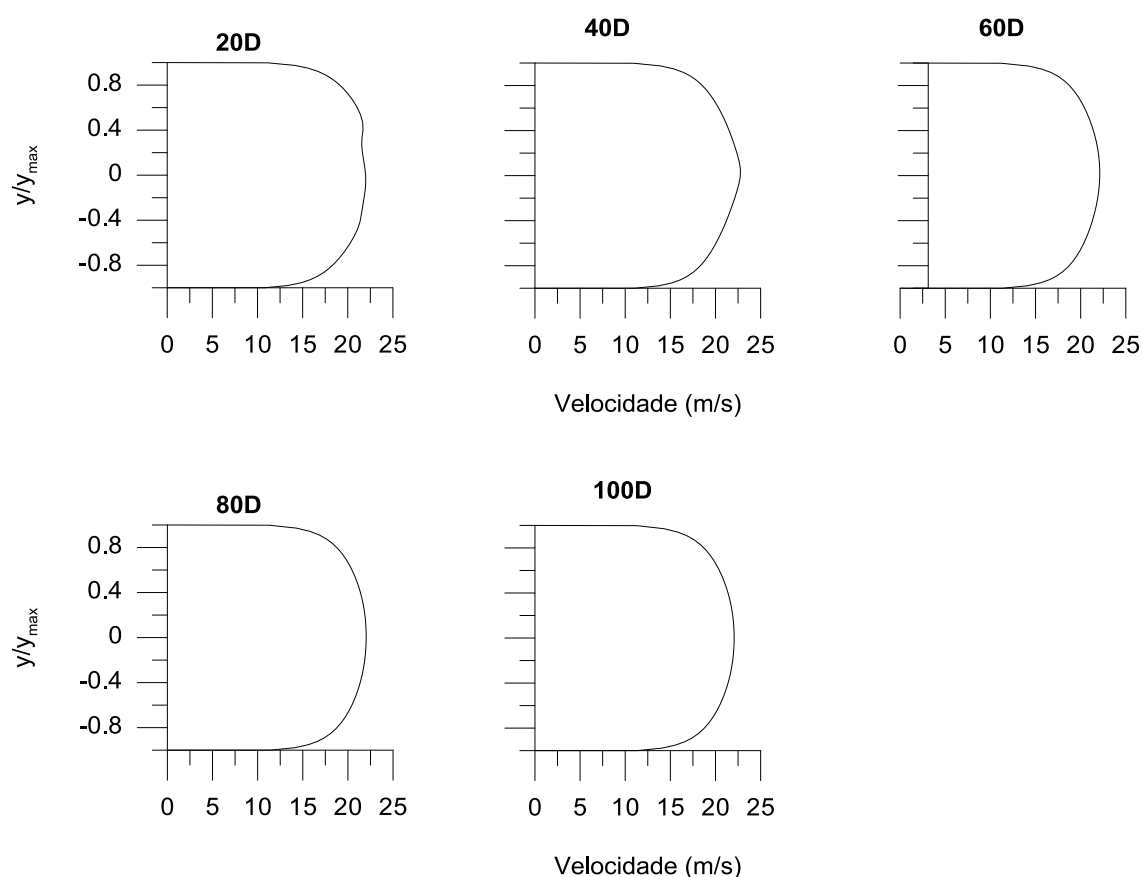


Figura 8.7 – Perfis da velocidade u ao longo do tubo.

Tabela 8.4 - Desvios relativos entre os comprimentos analisados para o caso do túnel de vento com bocal.

y/y_{\max}	u (m/s)		Desvio relativo	u (m/s)		Desvio relativo	u (m/s)		Desvio relativo	u (m/s)		Desvio relativo
	20D	40D		40D	60D		60D	80D		80D	100D	
0,75	18,884	18,828	0,30%	18,828	19,218	2,03%	19,218	19,321	0,54%	19,321	19,279	0,22%
0,5	20,954	20,659	1,43%	20,659	20,868	1,00%	20,868	20,967	0,47%	20,967	20,969	0,01%
0,25	21,701	21,907	0,94%	21,907	21,764	0,66%	21,764	21,777	0,06%	21,777	21,806	0,13%
0	21,979	22,744	3,36%	22,744	22,11	2,86%	22,11	22,035	0,34%	22,035	22,066	0,14%
-0,25	21,565	22,187	2,81%	22,187	21,867	1,46%	21,867	21,807	0,28%	21,807	21,815	0,04%
-0,5	21,551	20,99	2,67%	20,99	20,991	0,01%	20,991	21,006	0,07%	21,006	20,974	0,15%
-0,75	19,741	19,119	3,25%	19,119	19,308	0,98%	19,308	19,354	0,24%	19,354	19,278	0,39%

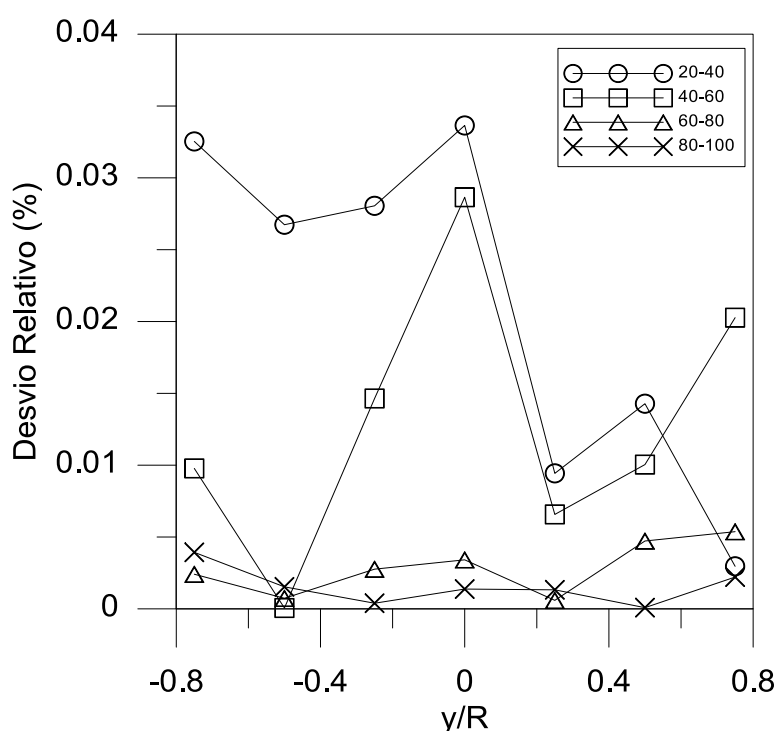


Figura 8.8 – Análise dos desvios relativos para o caso do túnel de vento com bocal.

Ao comparar os valores da Tabela 8.4 com as Tabelas 5.6 e 6.6, nota-se que os desvios para o comprimento de 80D são maiores do que para os casos anteriores, 80D e 50D, respectivamente. Porém, analisando o valor máximo (0,39%) e mínimo (0,01%) e calculando a média desses desvios (0,16%), pode-se considerar o perfil bem próximo do desenvolvido e, então, será usado para comparação.

A comparação do perfil neste comprimento com o de De Chant é apresentado na Figura 8.9 e a Tabela 8.5 indica os desvios relativos. Nota-se, portanto, uma grande semelhança entre os perfis de velocidade, fato esse que valida adotar o perfil no comprimento de 80D como desenvolvido para futuras comparações.

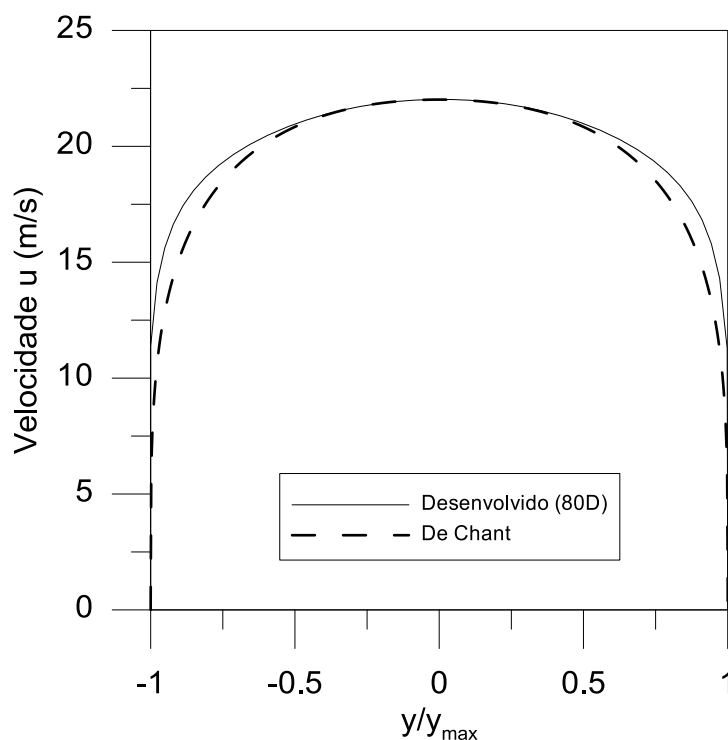


Figura 8.9 – Comparação entre perfil de velocidade u desenvolvido a 80D e o perfil proposto por De Chant.

Tabela 8.5 – Desvios relativos entre pontos do perfil desenvolvido de De Chant e desenvolvido numérico em 80D.

y/y_{\max}	u (m/s)		Desvio Relativo
	80D	De Chant	
0,75	19,291	18,513	4,03%
0,5	20,949	20,84	0,52%
0,25	21,763	21,772	0,04%
0	22,022	22,016	0,03%
-0,25	21,793	21,772	0,10%
-0,5	20,987	20,84	0,70%
-0,75	19,322	18,513	4,19%

Conforme Figura 8.9 e Tabela 8.5, nota-se um maior desvio relativo novamente na região próxima à parede. Esse mesmo resultado foi relatado por Martins e

Ramos [30], fato esse que ratifica a adoção do perfil desenvolvido em 80D como o perfil desenvolvido de referência para comparações.

A Figura 8.10 compara os perfis de velocidade u , tanto experimental quanto numérico, na seção do medidor Photon além do perfil numérico considerado desenvolvido. A Tabela 8.6 mostra os desvios relativos entre esses perfis de velocidade.

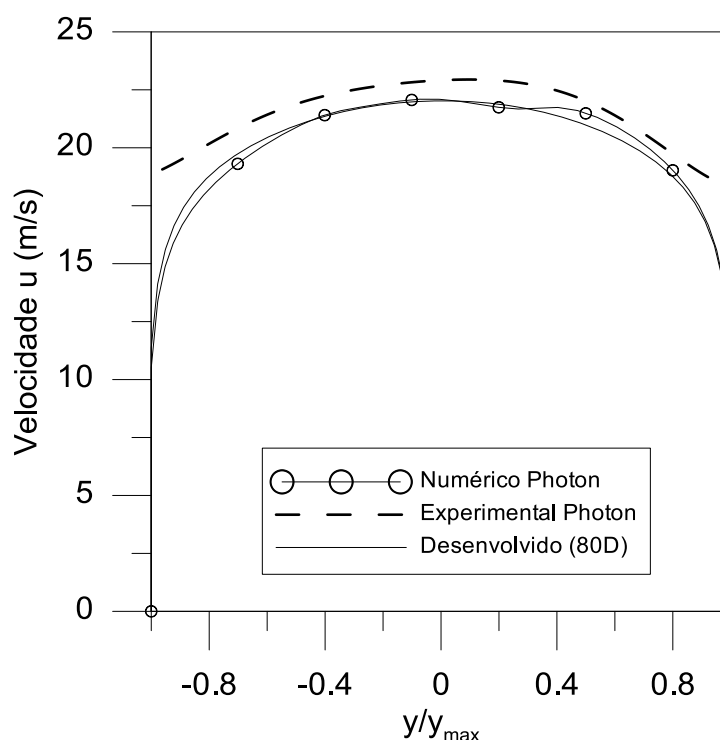


Figura 8.10 – Comparação entre os perfis da velocidade u numérico e experimental na posição do Photon e o desenvolvido (80D) para o caso do túnel de vento com bocal.

Tabela 8.6 – Desvio relativo entre os perfis da velocidade u numérico e experimental na posição do Photon e o desenvolvido (80D) para o caso do túnel de vento com bocal.

y/y_{\max}	u (m/s)			Desvio Relativo Numérico Photon/ Desenvolvido (80D)	Desvio Relativo Numérico Photon/ Experimental Photon
	Numérico Photon	Desenvolvido (80D)	Experimental Photon		
0,75	18,811	19,304	19,75	2,56%	4,76%
0,5	20,877	20,969	21,866	0,44%	4,53%
0,25	21,812	21,79	23,02	0,10%	5,25%
0	22,085	22,021	23,292	0,29%	5,18%
-0,25	21,69	21,767	22,853	0,35%	5,09%
-0,5	21,482	20,959	21,835	2,49%	1,62%
-0,75	19,628	19,311	20,345	1,64%	3,53%

Analisando os desvios entre o perfil da velocidade u numérico na posição do Photon e o perfil desenvolvido numérico (80D), calculou-se um desvio máximo de 2,56% e um mínimo de 0,1%. Apesar dos desvios serem pequenos nota-se, através da Figura 8.10, uma assimetria do perfil numérico na posição do Photon, que se deve à condição de contorno de entrada imposta que também é assimétrica. Nota-se uma maior proximidade da forma da curva do perfil experimental com o desenvolvido numérico, também devido ao fato anteriormente citado.

A Figura 8.11 compara o perfil de velocidade obtido numericamente na seção do medidor ultrassônico com o perfil numérico desenvolvido. A Tabela 8.7 mostra os desvios relativos entre esses perfis de velocidade.

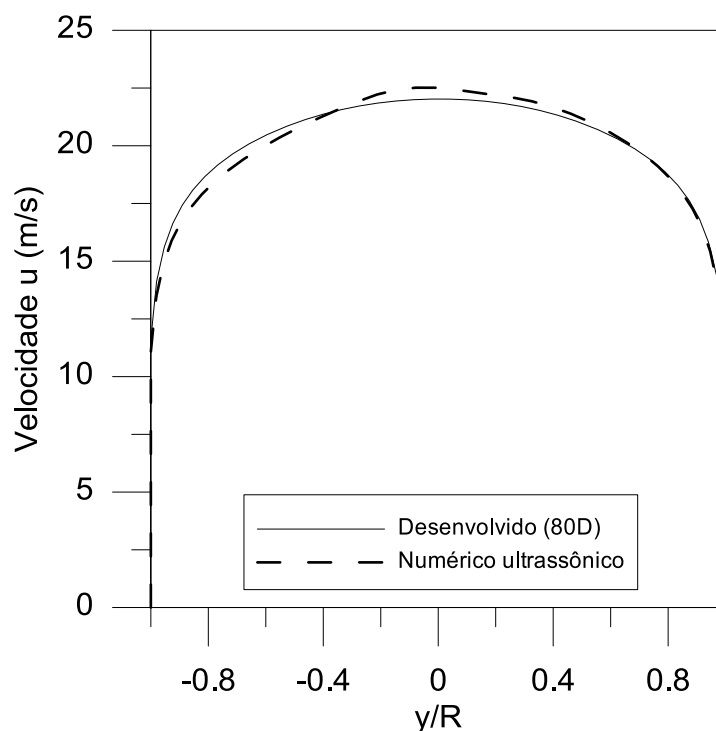


Figura 8.11 – Comparação entre os perfis da velocidade u numérico na posição do medidor ultrassônico e o desenvolvido (80D) para o caso do túnel de vento com bocal.

Tabela 8.7 - Desvio relativo entre os perfis da velocidade u numérico na posição do medidor ultrassônico e o desenvolvido (80D) para o caso do túnel de vento com bocal.

y/y_{\max}	u (m/s)		Desvio Relativo Numérico ultrassônico / Desenvolvido (80D)
	Numérico ultrassônico	Desenvolvido (80D)	
0.75	18.691	19.304	-3.18%
0.50	20.665	20.969	-1.45%
0.25	22.032	21.790	1.11%
0.00	22.505	22.021	2.20%
-0.25	22.111	21.767	1.58%
-0.5	21.200	20.959	1.15%
-0.75	19.301	19.311	-0.05%

Percebe-se claramente uma assimetria no perfil numérico para essa posição, fato que comprova a manutenção dos efeitos da assimetria da condição de contorno de entrada. Constatou-se um desvio máximo de -3,18% e mínimo de -0,05%.

A Figura 8.12 compara, novamente, o perfil de velocidade, tanto experimental quanto numérico, na seção do Tubo de Pitot além do perfil numérico considerado desenvolvido. A Tabela 8.8 mostra os desvios relativos entre esses perfis de velocidade.

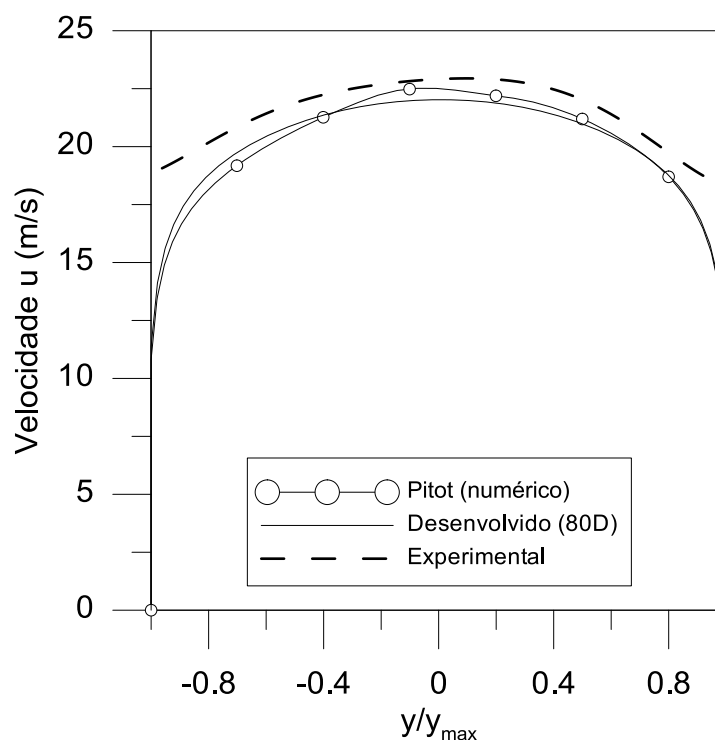


Figura 8.12 – Comparação entre os perfis da velocidade u numérico e experimental na posição do Pitot e o desenvolvido (80D).

Tabela 8.8 – Desvio relativo entre os perfis da velocidade u numérico e experimental na posição do Pitot e o desenvolvido (80D).

y/y_{\max}	u (m/s)			Desvio Relativo Numérico Pitot / Desenvolvido (80D)	Desvio Relativo Numérico Pitot / Experimental Pitot
	Numérico Pitot	Desenvolvido (80D)	Experimental Pitot		
0.75	18.878	19.304	20.115	-2.20%	-6.15%
0.50	20.683	20.969	21.797	-1.37%	-5.11%
0.25	21.894	21.790	22.743	0.48%	-3.73%
0.00	22.656	22.021	23.014	2.89%	-1.55%
-0.25	22.176	21.767	22.662	1.88%	-2.15%
-0.5	20.981	20.959	21.747	0.10%	-3.52%
-0.75	19.121	19.311	20.323	-0.99%	-5.92%

Ainda é evidente a assimetria no perfil numérico para esta posição. O desvio máximo é de 2,89% e mínimo de 0,1% quando comparado com o perfil desenvolvido. Ao comparar com os dados experimentais, tem-se erro máximo de 6,15% e mínimo de 1,55%.

As Figuras 8.13 e 8.14 mostram o desenvolvimento das componentes da velocidade ao longo do domínio.

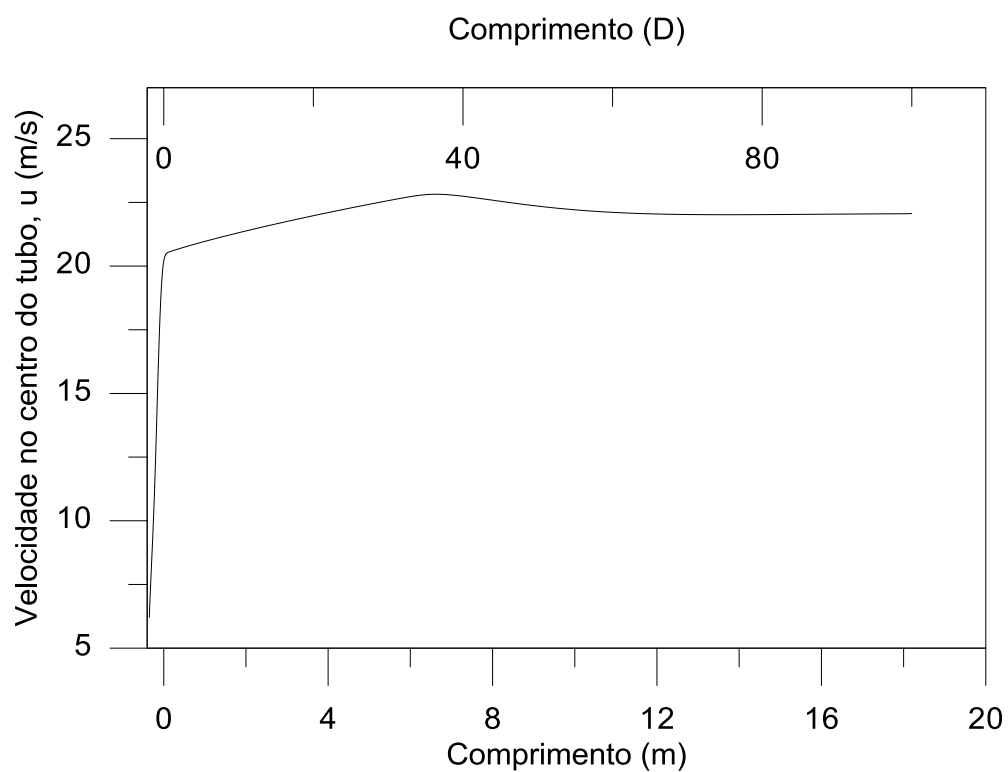


Figura 8.13 – Desenvolvimento da componente u da velocidade ao longo do centro do tubo para o caso do túnel de vento com bocal.

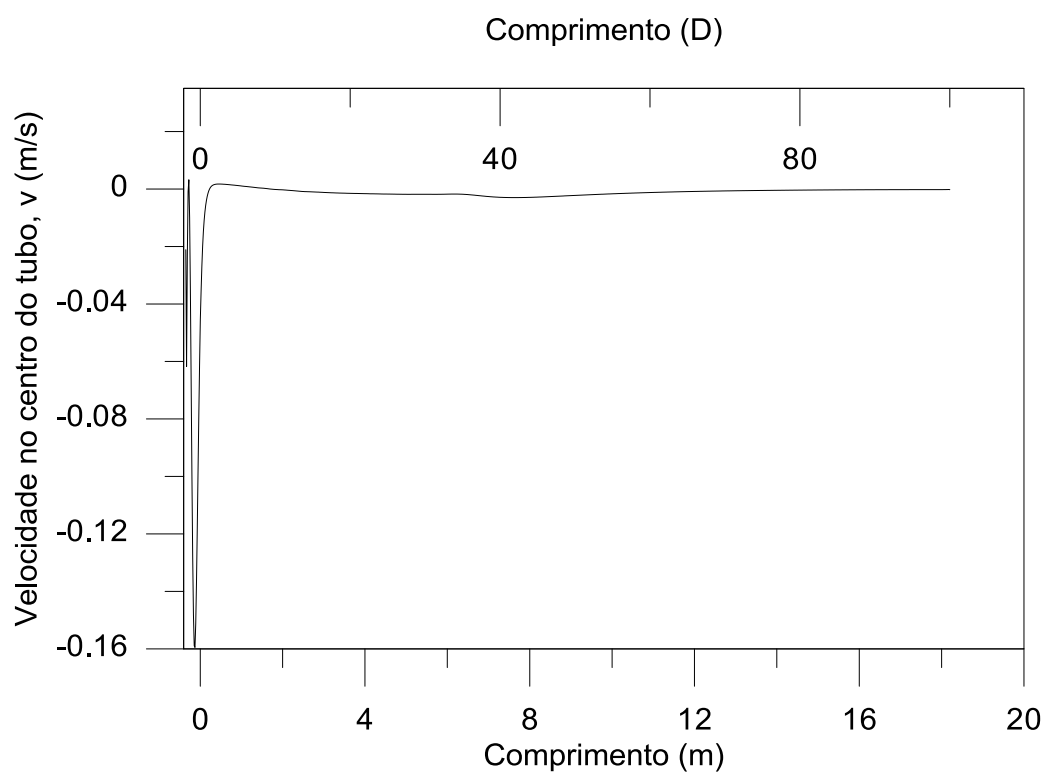


Figura 8.14 – Desenvolvimento da componente v da velocidade ao longo do centro do tubo para o caso do túnel de vento com bocal.

O bocal de entrada do túnel de vento é caracterizado por uma contração do diâmetro, de 462 mm para 182 mm. A redução de área provoca a aceleração abrupta do fluido até o final do bocal (em 0D), como mostra a Figura 8.13. A partir da entrada da tubulação de 182 mm ocorre o aumento gradativo da velocidade até aproximadamente 40D. A partir deste comprimento tem-se uma pequena redução da velocidade seguida de uma estabilização em aproximadamente 80D. Esse aumento e redução da velocidade antes da estabilização em um escoamento turbulento são comprovados experimentalmente por J. Doherty, et al [33].

Outro fato que comprova a estabilização e, por conseguinte a tendência de desenvolvimento do escoamento é o comportamento da velocidade v mostrado pela Figura 8.14 em que esta componente se mantém constante a partir de aproximadamente 80D. Nota-se também uma variação abrupta, porém em menor ordem de grandeza, na região do bocal.

As principais funções do bocal instalado é condicionar o escoamento para obtenção de um perfil de velocidade de entrada desejável e reduzir os fenômenos turbulentos diminuindo, assim, o comprimento de desenvolvimento. Uma forma de avaliar a eficácia do bocal é analisar o perfil de velocidade na sua saída. A comparação entre o perfil obtido numericamente na entrada da tubulação, logo após o bocal, e o perfil uniforme é mostrada na Figura 8.15. O perfil uniforme foi obtido aplicando a equação da continuidade. Sabe-se a área ($589,75 \text{ mm}^2$) da superfície S1 (Figura 8.5) e a velocidade de entrada ($6,22 \text{ m/s}$). Conhece-se também a área da seção referente ao tubo (182 mm^2). Igualando as vazões nessas seções, obtêm-se a velocidade média ($20,155 \text{ m/s}$) correspondente ao perfil uniforme ilustrado na Figura 8.15. A Tabela 8.8 mostra os desvios relativos entre eles. Através do perfil numérico obtido e da média dos desvios ($2,36\%$), pode-se concluir que o bocal contribui diretamente para a uniformização do perfil de velocidades na entrada da tubulação e, por conseguinte, para o desenvolvimento do escoamento.

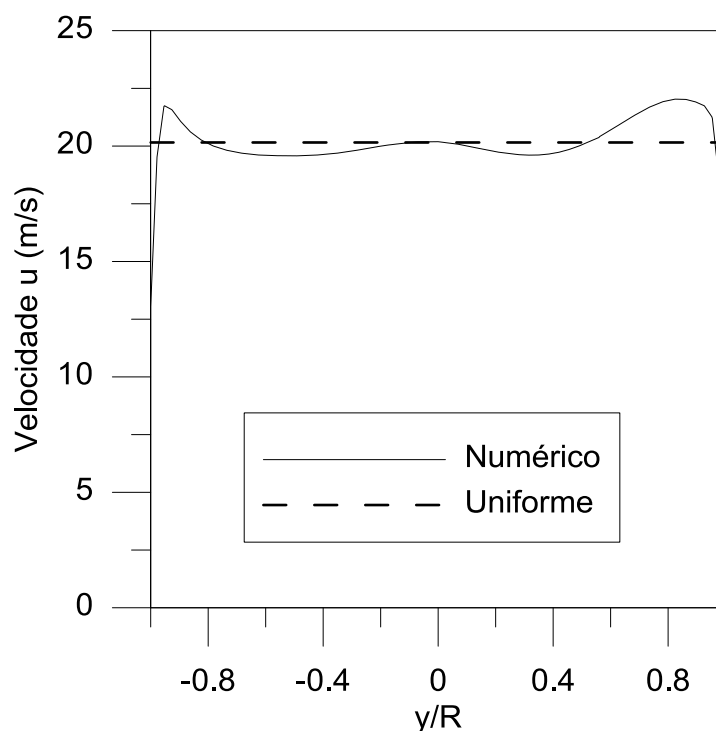


Figura 8.15 – Comparação entre o perfil numérico na entrada da tubulação e o perfil uniforme.

Tabela 8.9 – Desvio relativo entre o perfil numérico na entrada da tubulação e o perfil uniforme.

y/ymax	u (m/s)		Desvio Relativo Numérico entrada / Uniforme
	Numérico entrada	Uniforme	
0,75	21,76	20,155	7,96%
0,5	20,064	20,155	-0,45%
0,25	19,675	20,155	-2,38%
0	20,188	20,155	0,16%
-0,25	19,886	20,155	-1,33%
-0,5	19,578	20,155	-2,86%
-0,75	19,875	20,155	-1,39%

A Figura 8.16 ilustra um plano indicando a velocidade do escoamento ao longo do bocal e na entrada da tubulação. Nota-se a aceleração do escoamento provocada pela contração imposta pelo bocal além de uma assimetria provocada pela condição de entrada.

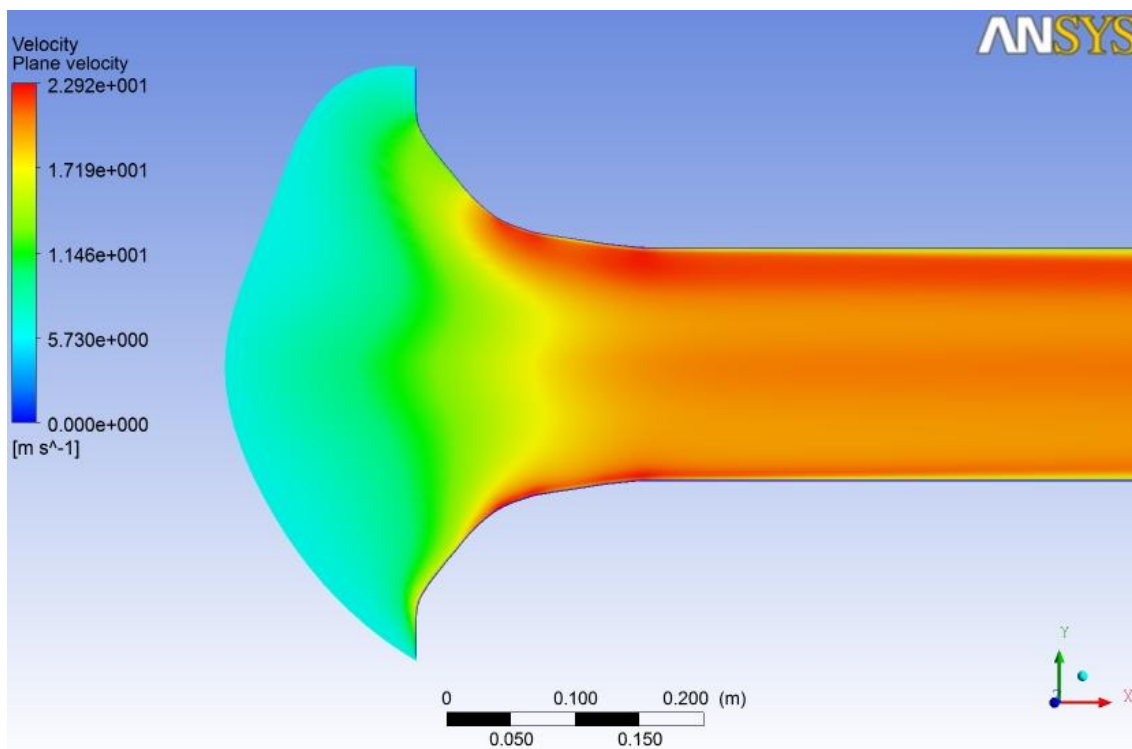


Figura 8.16 - Velocidade do escoamento ao longo do bocal e na entrada da tubulação.

9 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de desenvolver os estudos sobre o túnel de vento do Laboratório de Máquinas de Fluxo da UFES e com o objetivo final de aprimorar a aplicação de técnicas de medição de vazão, alguns trabalhos futuros são sugeridos.

A começar pela adição do medidor intrusivo Photon no último caso estudado neste trabalho. Dessa forma têm-se informações fundamentais do escoamento quando esse medidor está instalado no túnel de vento.

Outra proposta é a simulação em três dimensões da influência do medidor Photon no escoamento. A simulação em 3D, como fora abordada, requer um maior domínio dos programas de simulação, principalmente na etapa de geração de malha, e permitirá uma melhor análise dos efeitos da intrusão do medidor no escoamento do túnel de vento, como a ocorrência de vórtices.

Um experimento relevante e possivelmente bastante conclusivo é a construção de uma máquina de fumaça para visualização do escoamento na região de entrada do túnel de vento. Para isso, tornam-se necessárias a utilização de uma câmara escura e de uma câmera filmadora de alta velocidade para registro do escoamento da fumaça e análise dos fenômenos turbulentos.

Outro estudo pertinente é a otimização do bocal de entrada do túnel de vento. Blair e Cahoon [36] estudaram a influência de diferentes configurações de bocais do tipo *Bellmouth* na entrada de tubulações. Propõe-se então simular os bocais propostos pelos autores e comparar os resultados com uma nova simulação do túnel de vento com o bocal existente. Para isso, as condições de contorno devem ser as mesmas. Na entrada, sugere-se impor uma condição de pressão atmosférica em uma região externa, na forma de esfera ou retângulo, já que se tem comprovada experimentalmente tal hipótese (Capítulo 7). Na saída, sugere-se impor uma condição de perfil desenvolvido na saída, pelo manual do *CFX* julgar a condição de pressão-velocidade a mais robusta e por serem condições reais. Por fim poder-se-ia comparar os resultados obtidos e concluir sobre a viabilidade de construção e instalação de um novo bocal. Sugere-se este estudo em 2D, em função da menor complexidade de geração

de malha e menor esforço computacional requerido em relação à simulação em 3D.

Aumentando o nível de complexidade das simulações, porém reproduzindo mais fielmente o túnel de vento, recomenda-se simular uma geometria contendo a inserção do medidor ultrassônico, além do bocal e medidor Photon, no túnel de vento. Aconselha-se a utilização das mesmas condições de contorno do último caso sugerido, porém simulando em 3D em função da posição que o medidor ultrassônico é instalado e da forma de instalação do medidor Photon. A simulação deste caso, porém sem a inserção do medidor Photon também é recomendada, já que as instalações de queima de gás (flare) operam sem o medidor. Este estudo retrata mais fielmente as condições reais de operação do túnel de vento e das instalações petrolíferas.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LEI N 2.004, de 3 de outubro de 1953. [Acessado em: 11 de dezembro de 2012.] www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L2004.htm.
- [2] Lei nº 9.478 de 1997. [Acessado em: 12 de dezembro de 2012.] www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9478.htm.
- [3] ANP/INMETRO. Portaria Conjunta Nº 1, de 19.06.2000 – DOU 20.6.2000. [Acessado em: 13 de dez. de 2012.] <http://www.anp.gov.br/>; 122r. 1, 11-12.
- [4] *Wikipedia*. [Acessado em: 8 de dez. de 2012.] <http://pt.wikipedia.org/>
- [5] *Portal TPG*. [Acessado em: 10 de dez. de 2012.] <http://portaltpg.blogspot.com.br/>.
- [6] F. C. Silva, Análise comparativa de medidor de vazão em flare por tecnologia ótica e pitometria utilizando túnel de vento, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – 2012.
- [7] RAMON SILVA MARTINS, Installation Effects Of Upstream Elbows On The Correction Factor Of Single-Path Transit-Time Ultrasonic Flow Meters, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – 2012.
- [8] MEHTA, R.D., The Aerodynamic Design of Blower Tunnels with Wide-Angle Diffusers, Progress in Aerospace Sciences, Vol. 18, No. 1, p.59-120, 1977.
- [9] Mehta R. D., “Turbulent Boundary Layer Perturbed by a Screen”, AIAA Journal, Vol. 23, No.9, 1985.
- [10] Mehta, R. D. & Hoffmann, P. H. 1987 Boundary layer two-dimensionality in wind tunnels.
- [11] FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T. *Introdução à mecânica dos fluidos*. 5. 122r. – Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, c2001. Xii, 504 p. ISBN 8521612613 (broch.).

- [12] SALGADO, A.; RAMOS, R. COB09 – 1510 – *Perfect gas approach validation aiming estimation of thermophysical properties in flare flows considering operational data*. Proceedings of the 20th International Congress of Mechanical Engineering. Gramado, RS : s.n., 2009.
- [13] REPORT AGA N° 10, 2003, “*Speed of Sound in Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases*”, Ed. American Gas Association, Washington, DC.
- [14] RAMON SILVA MARTINS – Simulações Numéricas em seções de medição de vazão de escoamentos a baixa pressão, 2009.
- [15] H. Versteeg and W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method. Essex, England: Pearson Education Limited, 2nd ed., 2007.
- [16] B. J. Geurts, Elements of direct and large-eddy simulation. Edwards, 2004.
- [17] O. Reynolds, “ON THE DYNAMICAL THEORY OF INCOMPRESSIBLE VISCOUS FLUIDS AND THE DETERMINATION OF THE CRITERION – [From the “Philosophical Transactions of the Royal Society”, 1895],” in PAPERS ON MECHANICAL AND PHYSICAL SUBJECTS – VOLUME II: 1881 – 1900, ch. 62, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1901.
- [18] H. Tennekes and J. L. Lumley, A First Course in Turbulence. Cambridge Massachusetts, USA: The MIT Press, 1972.
- [19] J. Boussinesq. “Essai sur la théorie des eaux courantes,” Mémoires redits par divers savants à l’Académie des Sciences de l’Institut de France XXIII, vol. 1, PP. 1 – 680, 1877.
- [20] H. Schlichting, Boundary-Layer Theory. McGraw-Hill series in Mechanical Engineering, New York, USA: McGraw-Hill, 6th ed., 1968.
- [21] B. Launder and D. Spalding, “The numerical computation of turbulent flows,” Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 3, no. 2, pp. 269 – 289, 1974.
- [22] W. Jones and B. Launder, “The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence,” Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 15, pp. 301 – 314, 1972.

- [23] W. Jones and B. Launder, "The calculation of low-Reynolds-number phenomena with a two-equation model of turbulence," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 16, pp. 1119 – 1130, 1973.
- [24] E. W. Swokowski, *Cálculo com Geometria Analítica*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1983.
- [25] Ansys, Inc., "ANSYS CFX-Solver Theory Guide," Canonsburg, PA, USA, 2010.
- [26] S. Patankar and D. Spalding, "A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 15, no. 10, pp. 1787 – 1806, 1972.
- [27] L. J. De Chant, "The venerable $1/7^{\text{th}}$ power law turbulent velocity profile: classical nonlinear boundary value problem solution and its stochastic processes," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 161, no. 2, pp. 463 – 474, 2005.
- [28] Ansys, Inc., "ANSYS CFX™ Version 13.0," 2010.
- [29] *Mathematical Models for CFX*, Chapter 4.
- [30] R. S. Martins e R. Ramos, "Numerical evaluation of upstream bend installation effects on fully developed flow profiles aiming ultrasonic flow metering", 21st International Congress of Mechanical Engineering Outubro 24-28, 2011, Natal, RN, Brazil.
- [31] Ansys, Inc., "ANSYS ICEM CFD Version 13.0," 2010.
- [32] CFD-Online [Acessado em: 08/06/2012] <http://www.cfd-online.com.br/>.
- [33] J. Doherty et al, "The development of turbulent pipe flow", 16th Australasian Fluid Mechanics Conference, December 2-7, 2007, Gold Coast, Australia.
- [34] T. Omori et al, "Shearless and sheared flow past a circular cylinder: Comparative analysis by means of LES", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, March, 2008.
- [35] A. J. Macintyre, "Ventilação Industrial: Controle da Poluição", RJ, Ed. Guanabara, S. A, 1990.

[36] Blair G. P. e Cahoon W. M., "Special Investigation: Design of an Intake Bellmouth".

ANEXO A

Testes de malha para o caso do trecho reto.

Teste de Malha na posição do medidor Photon para o caso do trecho reto									
Pontos	u (m/s)					Desvio (%)			
	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5	Malhas 2 - 1	Malhas 3 - 2	Malhas 4 - 3	Malhas 5 - 4
1	16,299	13,749	13,007	11,949	11,198	15,64%	5,40%	8,13%	6,29%
2	16,544	14,428	14,096	13,429	13,276	12,79%	2,30%	4,73%	1,14%
3	16,788	15,106	15,184	14,908	14,816	10,02%	0,52%	1,82%	0,62%
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	23,380	23,550	23,197	23,520	23,511	0,73%	1,50%	1,39%	0,04%
50	23,464	23,633	23,252	23,601	23,589	0,72%	1,61%	1,50%	0,05%
51	23,549	23,715	23,306	23,682	23,665	0,71%	1,73%	1,61%	0,07%
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
98	24,794	24,776	24,603	24,728	24,714	0,07%	0,70%	0,51%	0,06%
99	24,794	24,776	24,607	24,728	24,714	0,07%	0,68%	0,49%	0,06%
100	24,794	24,777	24,607	24,728	24,715	0,07%	0,69%	0,49%	0,06%
Média						0,91%	1,58%	1,46%	0,16%

Teste de Malha na posição do medidor ultrassônico para o caso do trecho reto									
Pontos	u (m/s)					Desvio (%)			
	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5	Malhas 2 - 1	Malhas 3 - 2	Malhas 4 - 3	Malhas 5 - 4
1	16,736	14,104	13,007	12,251	11,480	15,73%	7,78%	5,82%	6,29%
2	16,976	14,793	14,096	13,758	13,602	12,86%	4,72%	2,40%	1,14%
3	17,216	15,482	15,184	15,265	15,171	10,07%	1,93%	0,53%	0,62%
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	23,013	23,182	23,197	23,198	23,193	0,74%	0,07%	0,01%	0,02%
50	23,063	23,233	23,252	23,254	23,247	0,74%	0,08%	0,01%	0,03%
51	23,114	23,284	23,306	23,310	23,299	0,74%	0,09%	0,02%	0,05%
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
98	24,337	24,588	24,603	24,597	24,582	1,03%	0,06%	0,02%	0,06%
99	24,345	24,595	24,607	24,601	24,585	1,03%	0,05%	0,03%	0,07%
100	24,338	24,596	24,607	24,604	24,587	1,06%	0,04%	0,01%	0,07%
Média						1,24%	0,29%	0,15%	0,15%

Teste de Malha na posição do medidor tubo de Pitot para o caso do trecho reto									
Pontos	u (m/s)					Desvio (%)			
	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5	Malhas 2 - 1	Malhas 3 - 2	Malhas 4 - 3	Malhas 5 - 4
1	16,459	13,873	12,797	12,052	11,295	15,71%	7,76%	5,82%	6,28%
2	16,699	14,553	13,870	13,538	13,385	12,85%	4,69%	2,40%	1,13%
3	16,939	15,233	14,944	15,024	14,932	10,08%	1,89%	0,54%	0,61%
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	23,130	23,290	23,301	23,302	23,297	0,69%	0,05%	0,01%	0,02%
50	23,200	23,360	23,372	23,374	23,367	0,69%	0,05%	0,01%	0,03%
51	23,269	23,429	23,442	23,445	23,435	0,69%	0,05%	0,01%	0,04%
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
98	25,581	25,648	25,637	25,628	25,616	0,26%	0,04%	0,03%	0,05%
99	25,602	25,659	25,641	25,629	25,616	0,22%	0,07%	0,05%	0,05%
100	25,575	25,670	25,638	25,631	25,617	0,37%	0,12%	0,03%	0,06%
Média						1,11%	0,30%	0,17%	0,16%

Testes de malha para o caso da interferência do medidor Photon no escoamento turbulento desenvolvido.

Teste de malha na posição do medidor Photon para o caso da interferência do medidor Photon							
Pontos	u(m/s)				Desvio (%)		
	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malhas 2-1	Malhas 3-2	Malhas 4-3
1	9,372	9,046	8,749	8,555	3,60%	3,40%	2,27%
2	12,465	12,537	12,501	12,479	0,58%	0,29%	0,18%
3	14,112	14,203	14,107	14,077	0,64%	0,68%	0,21%
-	-	-	-	-	-	-	-
30	24,892	24,910	24,878	24,865	0,07%	0,13%	0,05%
31	25,119	25,133	25,106	25,095	0,05%	0,11%	0,05%
32	25,362	25,371	25,350	25,341	0,04%	0,08%	0,04%
-	-	-	-	-	-	-	-
88	14,112	14,203	14,107	14,077	0,64%	0,68%	0,21%
89	12,465	12,537	12,501	12,479	0,58%	0,29%	0,18%
90	9,372	9,046	8,749	8,555	3,60%	3,40%	2,27%
Média					0,37%	0,41%	0,17%

Teste de malha na posição do tubo de Pitot para o caso da interferência do medidor Photon

Pontos	$u(\text{m/s})$				Desvio (%)		
	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malhas 2-1	Malhas 3-2	Malhas 4-3
1	11,213	10,684	10,332	9,974	4,95%	3,41%	3,60%
2	14,211	14,055	14,024	14,118	1,11%	0,22%	0,67%
3	15,524	15,536	15,580	15,614	0,08%	0,28%	0,22%
-	-	-	-	-	-	-	-
49	23,424	23,472	23,501	23,504	0,20%	0,12%	0,01%
50	23,437	23,481	23,510	23,514	0,19%	0,12%	0,02%
51	23,437	23,481	23,510	23,514	0,19%	0,12%	0,02%
-	-	-	-	-	-	-	-
98	15,524	15,536	15,580	15,614	0,08%	0,28%	0,22%
99	14,211	14,055	14,024	14,118	1,11%	0,22%	0,67%
100	11,213	10,684	10,332	9,974	4,95%	3,41%	3,60%
Média					0,20%	0,13%	0,12%

Teste de malha na posição do medidor ultrassônico para o caso da interferência do medidor Photon

Pontos	$u(\text{m/s})$				Desvio (%)		
	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malhas 2-1	Malhas 3-2	Malhas 4-3
1	10,431	9,951	9,624	9,310	4,82%	3,41%	3,37%
2	13,181	13,054	13,015	13,104	0,97%	0,30%	0,67%
3	14,380	14,410	14,435	14,462	0,21%	0,18%	0,19%
-	-	-	-	-	-	-	-
49	22,199	22,365	22,432	22,461	0,74%	0,30%	0,13%
50	22,151	22,343	22,413	22,441	0,86%	0,31%	0,12%
51	22,151	22,343	22,413	22,441	0,86%	0,31%	0,12%
-	-	-	-	-	-	-	-
98	14,380	14,410	14,435	14,462	0,21%	0,18%	0,19%
99	13,181	13,054	13,015	13,104	0,97%	0,30%	0,67%
100	10,431	9,951	9,624	9,310	4,82%	3,40%	3,37%
Média					0,38%	0,24%	0,15%

Testes de Malha para o caso do túnel de vento com bocal

Teste de Malha na posição do medidor Photon para o caso do trecho reto									
Pontos	u (m/s)					Desvio (%)			
	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5	Malhas 2 - 1	Malhas 3 - 2	Malhas 4 - 3	Malhas 5 - 4
1	13,631	12,033	11,133	10,520	9,879	11,72%	7,48%	5,50%	6,09%
2	14,198	13,219	13,003	13,110	13,078	6,89%	1,63%	0,82%	0,25%
3	14,764	14,405	14,420	14,443	14,506	2,43%	0,11%	0,16%	0,44%
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	22,021	22,063	22,075	22,093	22,110	0,19%	0,06%	0,08%	0,08%
50	22,030	22,073	22,078	22,092	22,097	0,19%	0,03%	0,06%	0,02%
51	22,007	22,050	22,057	22,072	22,083	0,19%	0,03%	0,07%	0,05%
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
98	15,408	15,012	15,084	15,099	15,155	2,57%	0,48%	0,10%	0,37%
99	14,832	13,806	13,601	13,700	13,673	6,92%	1,48%	0,73%	0,20%
100	14,257	12,600	11,694	11,058	10,372	11,62%	7,19%	5,44%	6,21%
					Média	0,75%	0,53%	0,42%	0,25%

Teste de Malha na posição do medidor ultrassônico para o caso do trecho reto									
Pontos	u (m/s)					Desvio (%)			
	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5	Malhas 2 - 1	Malhas 3 - 2	Malhas 4 - 3	Malhas 5 - 4
1	13,681	12,107	11,191	10,569	9,922	11,51%	7,56%	5,56%	6,12%
2	14,231	13,275	13,039	13,133	13,104	6,72%	1,77%	0,72%	0,22%
3	14,781	14,442	14,449	14,459	14,519	2,29%	0,05%	0,07%	0,42%
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	22,428	22,473	22,491	22,514	22,529	0,20%	0,08%	0,10%	0,07%
50	22,447	22,487	22,496	22,513	22,517	0,18%	0,04%	0,08%	0,02%
51	22,423	22,464	22,474	22,494	22,504	0,18%	0,05%	0,09%	0,05%
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
98	15,260	14,883	14,914	14,906	14,966	2,47%	0,21%	0,05%	0,40%
99	14,705	13,710	13,449	13,526	13,514	6,77%	1,90%	0,57%	0,08%
100	14,151	12,538	11,597	10,958	10,279	11,40%	7,51%	5,51%	6,19%
					Média	0,69%	0,52%	0,42%	0,25%

Teste de Malha na posição do medidor tubo de Pitot para o caso do trecho reto									
Pontos	u (m/s)					Desvio (%)			
	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5	Malhas 2 - 1	Malhas 3 - 2	Malhas 4 - 3	Malhas 5 - 4
1	13,999	12,426	11,478	10,833	10,169	11,24%	7,63%	5,62%	6,13%
2	14,539	13,590	13,323	13,397	13,380	6,53%	1,96%	0,55%	0,12%
3	15,078	14,753	14,751	14,739	14,803	2,15%	0,01%	0,09%	0,43%
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	22,449	22,538	22,569	22,610	22,620	0,40%	0,13%	0,18%	0,04%
50	22,501	22,593	22,615	22,652	22,646	0,41%	0,09%	0,17%	0,03%
51	22,489	22,578	22,616	22,661	22,672	0,40%	0,17%	0,20%	0,05%
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
98	15,257	14,868	14,890	14,857	14,928	2,55%	0,15%	0,22%	0,48%
99	14,727	13,736	13,433	13,484	13,502	6,73%	2,20%	0,38%	0,13%
100	14,198	12,605	11,645	11,001	10,324	11,22%	7,62%	5,53%	6,15%
				Média		0,65%	0,53%	0,42%	0,25%

ANEXO B

Valores medidos da velocidade (mm/s) nos pontos pré-determinados (Figura 7.4) para o mapeamento da velocidade na região de entrada do bocal.

Linha A											
Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Linha A											
Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
0	0	29	-	-	0	-	-	-	-	-	-
0	0	38	-	-	0	-	-	-	-	-	-
0	0	38	-	-	0	-	-	-	-	-	-
0	0	40	-	-	0	-	-	-	-	-	-
0	0	54	-	-	0	-	-	-	-	-	-
0	0	67	-	-	0	-	-	-	-	-	-
0	0	46	-	-	0	-	-	-	-	-	-
0	0	48	-	-	0	-	-	-	-	-	-
0	0	41	-	-	0	-	-	-	-	-	-
0	0	39	-	-	0	-	-	-	-	-	-
0	0	44	-	-	0	-	-	-	-	-	-

Linha B											
Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
x	x	x	x	x	x	x	x	x	128	142	219
x	x	x	x	x	x	x	x	x	117	144	218
x	x	x	x	x	x	x	x	x	115	142	229
x	x	x	x	x	x	x	x	x	111	144	233
x	x	x	x	x	x	x	x	x	111	142	224
x	x	x	x	x	x	x	x	x	114	144	221
x	x	x	x	x	x	x	x	x	121	152	219

x	x	x	x	x	x	x	x	x	134	165	208
x	x	x	x	x	x	x	x	x	132	173	207
x	x	x	x	x	x	x	x	x	125	190	217
x	x	x	x	x	x	x	x	x	120,8	153,8	219,5

Linha B											
Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
58	90	101	0	0	57	-	-	0	-	-	-
63	86	98	0	0	66	-	-	0	-	-	-
76	82	100	0	0	68	-	-	0	-	-	-
81	73	103	0	0	58	-	-	0	-	-	-
72	81	92	0	0	44	-	-	0	-	-	-
57	88	92	0	0	32	-	-	0	-	-	-
59	86	110	0	0	24	-	-	0	-	-	-
70	82	117	0	0	0	-	-	0	-	-	-
75	83	111	0	0	28	-	-	0	-	-	-
75	93	113	0	0	31	-	-	0	-	-	-
68,6	84,4	103,7	0	0	40,8	-	-	0	-	-	-

Linha C											
Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
417	430	687	287	387	461	190	257	315	111	180	198
391	402	703	297	362	470	194	263	316	109	177	180
432	402	673	287	381	447	183	259	325	113	176	192
424	393	674	296	377	479	186	255	318	112	174	199
420	362	696	294	387	513	177	264	331	117	175	203
409	386	696	201	403	510	180	271	326	117	173	177
449	398	691	285	397	513	192	276	325	116	172	187
428	371	669	250	397	480	194	269	337	121	165	186
429	391	686	264	395	473	194	260	340	128	166	199
416	384	690	246	400	500	195	252	336	131	165	215
422,0	392,0	688,5	286,0	391,0	479,5	191,0	261,5	325,5	116,5	173,5	195,0

Linha C											
Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
94	138	130	0	51	61	-	0	0	0	0	0
101	134	108	0	43	58	-	0	0	0	0	0
98	114	116	0	45	65	-	0	0	0	0	0
104	141	132	0	41	64	-	0	0	0	0	0
107	108	138	0	48	62	-	0	0	0	0	0
102	108	134	0	59	61	-	0	0	0	0	0
97	119	135	0	65	61	-	0	0	0	0	0

114	106	124	0	42	64	-	0	0	0	0	0
113	117	130	0	45	67	-	0	0	0	0	0
108	115	136	0	47	69	-	0	0	0	0	0
103,0	116,0	131,0	0,0	46,0	63,0	-	0	0	0	0	0

Linha D

Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
358	495	646	230	293	390	148	197	252	99	132	179
353	475	628	231	300	381	152	204	240	98	133	174
368	478	610	227	306	363	153	205	242	100	129	167
368	488	611	230	299	358	154	201	252	101	130	165
379	513	647	231	295	371	153	196	252	104	131	175
386	498	625	231	291	381	144	192	240	115	129	180
385	511	620	227	300	401	134	206	252	119	129	178
367	512	623	230	299	399	131	200	247	119	129	175
364	501	620	229	304	394	134	208	250	108	130	171
368	501	615	232	304	393	142	210	274	116	131	169
369,6	497,2	624,5	229,8	299,1	383,1	144,5	201,9	250,1	107,9	130,3	173,3

Linha D

Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
64	100	130	0	48	64	0	0	0	0	0	0
65	96	131	0	45	67	0	0	0	0	0	0
65	95	128	0	45	68	0	0	0	0	0	0
63	96	123	0	43	62	0	0	0	0	0	0
61	96	116	0	44	66	0	0	0	0	0	0
59	95	115	0	45	72	0	0	0	0	0	0
59	99	103	0	46	70	0	0	0	0	0	0
63	102	116	0	46	67	0	0	0	0	0	0
63	102	117	0	48	69	0	0	0	0	0	0
65	98	109	0	50	62	0	0	0	0	0	0
62,7	97,9	118,8	0,0	46,0	66,7	0	0	0	0	0	0

Linha E

Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
395	532	681	275	360	467	195	248	311	128	171	213
385	538	659	269	366	435	181	247	336	128	168	215
376	546	664	279	367	449	183	252	329	125	157	215
399	545	679	277	368	463	190	245	314	120	156	217
401	540	659	271	367	470	196	252	321	115	163	219
405	520	657	277	370	473	230	254	310	116	171	219
407	529	710	277	383	488	227	253	294	126	176	221
397	508	692	273	387	466	204	254	321	128	177	222
391	528	699	271	391	467	191	256	325	116	177	220
387	505	664	256	385	465	200	248	316	128	176	217

394,3 529,1 676,4 272,5 374,4 464,3 199,7 250,9 317,7 123,0 169,2 217,8

Linha E											
Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
85	124	153	0	43	72	-	0	0	-	-	-
84	119	148	0	57	71	-	0	0	-	-	-
83	109	142	0	67	71	-	0	0	-	-	-
80	115	135	0	68	71	-	0	0	-	-	-
88	108	131	0	63	71	-	0	0	-	-	-
90	107	134	0	58	67	-	0	0	-	-	-
93	113	141	0	55	65	-	0	0	-	-	-
93	128	144	0	61	67	-	0	0	-	-	-
92	121	146	0	76	73	-	0	0	-	-	-
92	119	151	0	83	80	-	0	0	-	-	-
88,0	116,3	142,5	0,0	63,1	70,8	-	0	0	-	-	-

Linha F											
Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
x	x	x	x	x	x	x	x	x	108	145	211
x	x	x	x	x	x	x	x	x	114	154	206
x	x	x	x	x	x	x	x	x	114	152	203
x	x	x	x	x	x	x	x	x	107	160	199
x	x	x	x	x	x	x	x	x	111	165	181
x	x	x	x	x	x	x	x	x	115	159	168
x	x	x	x	x	x	x	x	x	109	161	173
x	x	x	x	x	x	x	x	x	115	152	175
x	x	x	x	x	x	x	x	x	111	138	184
x	x	x	x	x	x	x	x	x	108	134	186
x	x	x	x	x	x	x	x	x	111,2	152	188,6

Linha F											
Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
104	115	109	0	0	46	-	-	0	-	-	-
107	111	113	0	0	46	-	-	0	-	-	-
106	117	119	0	0	44	-	-	0	-	-	-
92	113	142	0	0	44	-	-	0	-	-	-
104	96	142	0	0	41	-	-	0	-	-	-
110	119	184	0	0	40	-	-	0	-	-	-
100	111	165	0	0	44	-	-	0	-	-	-
109	94	140	0	0	48	-	-	0	-	-	-
119	106	125	0	0	49	-	-	0	-	-	-

113	96	152	0	0	48	-	-	0	-	-	-
106,4	107,8	139,1	0	0	45	-	-	0	-	-	-

Linha G											
Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Linha G											
Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
0	0	30	-	-	0	-	-	-	-	-	-
0	0	45	-	-	0	-	-	-	-	-	-
0	0	36	-	-	0	-	-	-	-	-	-
0	0	25	-	-	0	-	-	-	-	-	-
0	0	24	-	-	0	-	-	-	-	-	-
0	0	21	-	-	0	-	-	-	-	-	-
0	0	34	-	-	0	-	-	-	-	-	-
0	0	35	-	-	0	-	-	-	-	-	-
0	0	36	-	-	0	-	-	-	-	-	-
0	0	35	-	-	0	-	-	-	-	-	-
0	0	32,1	-	-	0	-	-	-	-	-	-

Linha BC											
Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
518	683	833	456	623	817	342	472	566	190	258	331
551	703	825	453	606	802	336	451	566	191	258	331
514	679	837	476	606	776	340	453	572	210	257	333
489	676	843	488	601	825	333	453	573	202	263	339
472	678	834	469	600	783	348	462	563	197	265	335
491	695	804	464	622	786	332	473	572	204	269	336
505	680	853	428	659	802	350	478	593	182	262	333
514	688	852	441	626	796	324	463	592	175	254	311

497	697	879	449	621	790	304	460	586	173	256	311
507	704	852	445	624	776	312	475	576	175	245	323
505,8	688,3	841,2	456,9	618,8	795,3	332,1	464	575,9	189,9	258,7	328,3

Linha BC											
Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
89	124	151	0	35	52	0	0	0	-	-	-
97	121	150	0	33	55	0	0	0	-	-	-
96	119	150	0	33	59	0	0	0	-	-	-
94	119	155	0	32	62	0	0	0	-	-	-
91	122	164	0	32	65	0	0	0	-	-	-
98	121	160	0	30	65	0	0	0	-	-	-
98	120	157	0	28	59	0	0	0	-	-	-
101	121	163	0	25	53	0	0	0	-	-	-
101	124	168	0	29	53	0	0	0	-	-	-
107	128	169	0	32	56	0	0	0	-	-	-
97,2	121,9	158,7	0	30,9	57,9	0	0	0	-	-	-

Linha AB											
Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
x	x	x	x	x	x	x	x	x	60	109	119
x	x	x	x	x	x	x	x	x	57	107	117
x	x	x	x	x	x	x	x	x	61	101	111
x	x	x	x	x	x	x	x	x	61	113	121
x	x	x	x	x	x	x	x	x	62	107	115
x	x	x	x	x	x	x	x	x	75	92	103
x	x	x	x	x	x	x	x	x	92	93	109
x	x	x	x	x	x	x	x	x	82	100	120
x	x	x	x	x	x	x	x	x	84	98	118
x	x	x	x	x	x	x	x	x	84	91	101
x	x	x	x	x	x	x	x	x	71,8	101,1	113,4

Linha AB											
Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
0	65	80	-	0	0	-	-	-	-	-	-
0	69	73	-	0	0	-	-	-	-	-	-
0	69	63	-	0	0	-	-	-	-	-	-
0	67	76	-	0	0	-	-	-	-	-	-
0	65	81	-	0	0	-	-	-	-	-	-
0	65	86	-	0	0	-	-	-	-	-	-
0	66	88	-	0	0	-	-	-	-	-	-
0	65	86	-	0	0	-	-	-	-	-	-

0	59	82	-	0	0	-	-	-	-	-	-
0	54	79	-	0	0	-	-	-	-	-	-
0	64,4	79,4	-	0	0	-	-	-	-	-	-

Linha GF

Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
x	x	x	x	x	x	0	0	48	36	85	109
x	x	x	x	x	x	0	0	44	41	80	109
x	x	x	x	x	x	0	0	41	48	80	100
x	x	x	x	x	x	0	0	40	57	80	109
x	x	x	x	x	x	0	0	40	57	84	118
x	x	x	x	x	x	0	0	45	57	86	121
x	x	x	x	x	x	0	0	63	53	86	114
x	x	x	x	x	x	0	0	57	49	92	117
x	x	x	x	x	x	0	0	67	47	98	111
x	x	x	x	x	x	0	0	68			
x	x	x	x	x	x	0	0	51,3	49,4	85,7	112,0

Linha GF

Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
32	53	80	0	0	0	-	-	-	-	-	-
32	51	66	0	0	0	-	-	-	-	-	-
33	48	57	0	0	0	-	-	-	-	-	-
34	45	58	0	0	0	-	-	-	-	-	-
34	42	45	0	0	0	-	-	-	-	-	-
35	42	48	0	0	0	-	-	-	-	-	-
34	40	35	0	0	0	-	-	-	-	-	-
32	35	46	0	0	0	-	-	-	-	-	-
33	34	63	0	0	0	-	-	-	-	-	-
33	43	67	0	0	0	-	-	-	-	-	-
33,2	43,3	56,5	0	0	0	-	-	-	-	-	-

Linha FE

Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
518	683	833	441	601	731	324	434	547	190	282	317
551	703	825	464	584	676	327	441	571	197	285	295
514	679	837	439	576	693	323	420	568	196	289	320
489	676	843	428	578	690	324	429	543	195	267	305
472	678	834	426	634	706	315	437	532	196	278	315
491	695	804	436	601	711	315	426	555	199	294	325
505	680	853	433	591	699	314	445	632	207	284	330
514	688	852	439	586	720	316	446	637	218	282	312

497	697	879	424	583	733	324	434	558	221	291	306
507	704	852	422	572	706	329	426	584	219	273	297
498,3	678,7	808,1	435,2	590,6	706,6	321,1	433,8	572,7	203,8	282,5	312,2

Linha FE											
Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
95	136	171	53	72	93	0	34	48	-	0	0
98	139	164	50	68	86	0	33	48	-	0	0
100	143	138	48	57	75	0	36	46	-	0	0
103	149	144	47	65	67	0	39	44	-	0	0
102	151	151	46	68	63	0	40	46	-	0	0
100	152	159	46	67	57	0	39	48	-	0	0
99	151	167	45	69	62	0	38	49	-	0	0
98	149	175	43	71	70	0	36	59	-	0	0
98	148	175	45	73	80	0	34	70	-	0	0
100	150	175	48	73	89	0	32	69	-	0	0
99,3	146,8	161,9	47,1	68,3	74,2	0	36,1	52,7	-	0	0

Legenda	
N1	700 rpm
N2	950 rpm
N3	1200 rpm
x	não foi possível medir
-	não foi medido, igual a zero

ANEXO C

Coordenadas utilizadas para geração de pontos e desenho da geometria do bocal de entrada do túnel de vento.

Ponto	x (mm)	y (mm)
1	-200	231
2	-200	215
3	-200	200
4	-199	189.5
5	-198	185.5
6	-197	183
7	-196	181
8	-195	179
9	-194	177.5
10	-193	176
11	-192	174.5
12	-191	173
13	-190	171.5
14	-189	170
15	-185.2	165
16	-181	160
17	-178	156
18	-173	150
19	-167	143
20	-164	139
21	-161	135.5
22	-156	130
23	-154	128
24	-152	126
25	-149	123.5
26	-145	120
27	-143	118.5

Ponto	x (mm)	y (mm)
28	-141	117
29	-139	115.5
30	-135	113
31	-131	111
32	-129	110
33	-124	108
34	-121	107
35	-118	106
36	-114	104.5
37	-109	103
38	-104.5	102
39	-98	101
40	-92.5	100
41	-85.5	99
42	-78.5	98
43	-72.5	97
44	-69	96.5
45	-65.5	96
46	-59.5	95
47	-53	94
48	-43.5	93
49	-34	92
50	-22	91
51	-14	91
52	-10	91
53	-5	91
54	0	91