

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

RODRIGO AUGUSTO BASSAN

**VISUALIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTOS NO INTERIOR DE
CANAIS MUNIDOS DE PROTUBERÂNCIAS PARIETAIS**

Ilha Solteira
2011

RODRIGO AUGUSTO BASSAN

**VISUALIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTOS NO INTERIOR DE
CANAIS MUNIDOS DE PROTUBERÂNCIAS PARIETAIS**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia - UNESP – Campus de Ilha
Solteira, para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica.

Área de Conhecimento: Ciências Térmicas

Prof. Dr. Sérgio Said Mansur

Orientador

Prof. Dr. Edson Del Rio Vieira

Co-orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B317v Bassan, Rodrigo Augusto.
Visualização experimental de escoamentos no interior de canais munidos de protuberâncias parietais / Rodrigo Augusto Bassan. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2011
125 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica Dos Fluidos, 2011

Orientador: Sergio Said Mansur
Co-orientador: Edson Del Rio Vieira
Inclui bibliografia

1. Visualização de escoamento no interior de canais com protuberâncias parietais. 2. Túnel hidrodinâmico vertical. 3. Anemometria de filme quente. 4. Injeção de corantes líquidos.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: VISUALIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTOS NO INTERIOR DE CANAIS
MUNIDOS DE PROTUBERÂNCIAS PARIETAIS

AUTOR: RODRIGO AUGUSTO BASSAN

ORIENTADOR: Prof. Dr. SERGIO SAID MANSUR

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. EDSON DEL RIO VIEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica ,
Área: CIÊNCIAS TÉRMICAS, pela Comissão Examinadora:



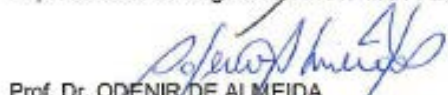
Prof. Dr. EDSON DEL RIO VIEIRA

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. ANDRE LUIZ SEIXLACK

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. ODENIR DE ALMEIDA

Centro de Ciências Exatas e Tecnologia / Universidade Federal de Uberlândia

Data da realização: 26 de agosto de 2011.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pelo dom da vida e oportunidades que ELE concede a mim todos os dias.
Aos Profs. Sérgio Mansur e Edson Del Rio, pela orientação e amizade, das quais desfrutei ao longo dos últimos anos;
Ao corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica, que me proporcionou auxílios e confiança para que este projeto se tornasse realidade.
Aos técnicos Reginaldo, Fernando, Ronaldo, Marino, Edivaldo, Carlos e Darci, do Departamento de Engenharia Mecânica, pelo auxílio na confecção de peças e na montagem da instalação experimental.
A CAPES, pelo suporte financeiro que viabilizou a realização deste trabalho, concedido na forma de uma bolsa de mestrado.
A meus pais, Jesus e Ivanir, meus irmãos, Luiz e Patrícia a minha cunhada Thaisa in memoriam e a minha avó Palmira

RESUMO

Neste trabalho realiza-se um estudo do escoamento no interior de um canal com protuberâncias parietais para números de Reynolds menores que 10^3 . Os ensaios foram conduzidos em um túnel hidrodinâmico vertical. Perfis de velocidade na seção de testes, assim como a intensidade turbulenta do túnel e emissões de vórtices, foram adquiridos por meio da anemometria de fio/filme quente. Técnicas de visualização de escoamentos, também, foram empregadas em diferentes circunstâncias, com três objetivos fundamentais: como ferramenta de análise qualitativa, na identificação de padrões de escoamento; como mecanismo de apoio à realização de medidas experimentais, para auxiliar no correto posicionamento de sondas anemométricas; e, finalmente, como instrumento complementar de análise, para facilitar a interpretação de resultados. Em todos os casos o escoamento foi tratado estritamente bidimensional.

Outro fator importante deste trabalho refere-se a reconstrução do túnel hidrodinâmico vertical, o qual situa-se no Laboratório de Visualização de Escoamentos do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP - campus de Ilha Solteira; que com grande empenho dos Professores Edson Del Rio Vieira, Sergio Said Mansur, Técnicos do laboratório e com uma pequena contribuição de minha parte pode-se finalizar esse projeto.

Palavras-chave: Visualização de escoamento no interior de canais com protuberâncias parietais. Túnel hidrodinâmico vertical. Anemometria de filme quente. Injeção de corantes líquidos.

ABSTRACT

In the present work is accomplished a study of the flow within a channel with parietal protuberances for Reynolds numbers less than 10^3 . The tests were conducted in a hydrodynamic tunnel vertical. Velocity profiles in the test section, as well as the turbulent intensity of the tunnel, vortex emissions were acquired through anemometry wire / hot film. Flow visualization techniques were employed as a tool for qualitative analysis, in the identification of flow patterns, as qualitative analytical tool to identify flow patterns; as a mechanism to support the implementation of experimental measurements, to assist in the correct positioning of airspeed probes; and finally as an additional tool of analysis, to facilitate interpretation of results. In every case the disposal was treated dimensional strictly. Another important factor of this work refers to the reconstruction of vertical hydrodynamic tunnel, which is located in the Flow View Laboratory, Department of Mechanical Engineering of UNESP - campus of Single Island; that with great commitment of Teachers Edson Vieira Del Rio, Sergio Said Mansur, lab technicians and a small contribution from me you can finish this project.

Keywords: Flow visualization inside channels with parietal protuberances. Hydrodynamic vertical tunnel. Hot film anemometry. Injection liquids dyes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1-	Imagem de uma pintura de Da Vinci.	15
Figura 1.2-	Mapa elaborado em 1539, por Olaus Magnus (1490-1557).	16
Figura 1.3-	Comportamento do número de Strouhal (St) em função do ângulo de ataque (α) para número de Reynolds 500 e 800 – LINDQUIST et al. (2010).	17
Figura 1.4-	Imagens do escoamento visualizado ao redor de um cilindro quadrado em vários ângulos de ataque para Reynolds igual a 500.	18
Figura 1.5-	Escoamento visualizado na folga existente entre o corpo emissor de vórtices e as paredes da tubulação em um medidor de vazão a efeito vórtice.	19
Figura 1.6-	Túnel hidrodinâmico piloto de superfície livre e imagens visualizadas do escoamento no interior de uma cavidade aberta.	21
Figura 1.7-	Esquema de um túnel hidrodinâmico vertical típico.	22
Figura 1.8-	Sequência de imagens de um choque laminar frontal ($Re = 520$) de dois anéis de vórtices visualizados utilizando corante PVA.	24
Figura 1.9-	Jato livre axissimétrico em meio quiescente, visualizado com o auxílio de duas técnicas de injeção de corante e iluminação em contraluz.	25
Figura 2.1-	Visualização do escoamento de um corpo unido a parede.	29
Figura 2.2-	Esboço da geometria do obstáculo em um canal de escoamento.	30
Figura 2.3-	Vórtices gerados a montante do corpo.	31
Figura 2.4-	Esquema da configuração do corpo de prova.	31
Figura 2.5-	Diagrama esquemático do escoamento sobre um obstáculo no interior de um canal entre duas placas planas paralelas verticais.	32
Figura 2.6-	Protuberâncias não simétricas confinadas em um canal.	33
Figura 3.1-	Ilustração esquemática do túnel hidrodinâmico vertical.	36
Figura 3.2-	Seção de testes.	38
Figura 3.3-	Configuração das janelas utilizadas na seção de testes do túnel.	39
Figura 3.4-	Detalhe da seção de testes do túnel em operação.	40
Figura 3.5-	Corpo de prova inserido na seção de teste.	42
Figura 3.6-	Vista do túnel hidrodinâmico mostrando a seção de testes e parte da estrutura de sustentação.	44
Figura 3.7-	Vista do Laboratório de Visualização mostrando o túnel em primeiro plano.	45
Figura 4.1-	Diferentes tipos de sondas anemométricas de fio quente: (a) sonda comercial Dantec; (b) sonda sendo calibrada com auxílio de um micro tubo de Pitot em um túnel aerodinâmico; (c) sonda de fabricação própria.	48
Figura 4.2-	Elementos básicos da cadeia de medição do anemômetro CTA.	48
Figura 4.3-	Curva de calibração da sonda.	49
Figura 4.4-	Anemômetro de temperatura constante Dantec Stream Line.	50

Figura 4.5-	Dados da operação intermitente de longa duração do túnel hidrodinâmico.....	51
Figura 4.6-	Determinação da turbulência no túnel hidrodinâmico.	52
Figura 4.7-	Aceleração do escoamento na seção de testes.....	53
Figura 4.8-	Perfil de velocidades na seção de testes.	54
Figura 5.1-	Dispositivo típico de injeção de corantes líquidos.....	57
Figura 5.2-	Arranjo experimental para a determinação da influência da agulha de injeção de corantes sobre a corrente livre no interior da seção de testes.	57
Figura 5.3-	Perfis experimentais de velocidade a jusante de uma agulha de injeção.....	58
Figura 5.4-	Seção de testes do túnel com os injetores de corantes.....	60
Figura 5.5-	Escoamento ao redor de um cilindro quadrado $Re = 153$	62
Figura 5.6-	Esquema do canal com uma única protuberância na parede.	63
Figura 5.7-	Visualização do escoamento em um canal com uma única protuberância na parede para diferentes regimes de escoamento.....	64
Figura 5.8-	Visualização do escoamento ao redor de um cilindro quadrado relativamente longe dos efeitos da parede, teste realizado no novo túnel hidrodinâmico.	65
Figura 5.9-	Rolos de vórtices observados na face frontal da protuberância.....	66
Figura 5.10-	Descolamento da camada limite na face sem protuberância do canal.	67
Figura 5.11-	Esquema do canal com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $1L$	68
Figura 5.12-	Imagens do escoamento visualizado em uma cavidade com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $1L$	70
Figura 5.13-	Detalhe do escoamento visualizado entre as duas protuberâncias para $Re \cong 405$	71
Figura 5.14-	Esquema do canal com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $2L$	71
Figura 5.15-	Imagens do escoamento visualizado em um canal com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $2L$	73
Figura 5.16-	Esquema do canal com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $3L$	74
Figura 5.17-	Imagens do escoamento visualizado em uma cavidade com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $3L$	75
Figura 5.18-	Esquema do canal com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $4L$	76
Figura 5.19-	Imagens do escoamento visualizado em uma cavidade com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $4L$	78
Figura 5.20-	Esquema do canal com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $5L$	79
Figura 5.21-	Imagens do escoamento visualizado em uma cavidade com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $5L$	81

Figura 5.22-	Esquema do canal com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $6L$	82
Figura 5.23-	Imagens do escoamento visualizado em uma cavidade com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $6L$	83
Figura 5.24-	Esquema do canal com três protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $1L$	84
Figura 5.25-	Imagens do escoamento visualizado em uma cavidade com três protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $1L$	85
Figura 5.26-	Esquema do canal com três protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $2L$	86
Figura 5.27-	Imagens do escoamento visualizado em uma cavidade com três protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $2L$	88
Figura 5.28-	Esquema do canal com três protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $3L$	90
Figura 5.29-	Imagens do escoamento visualizado em uma cavidade com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $3L$	91
Figura 5.30-	Esquema do canal com três protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $4L$	92
Figura 5.31-	Detalhe próximo a aresta anterior da segunda protuberância, ($Re \cong 357$).	93
Figura 5.32-	Imagens do escoamento visualizado em uma cavidade com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $4L$	94
Figura 5.33-	Esquema do canal com três protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $5L$	95
Figura 5.34-	Imagens do escoamento visualizado em um canal com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $5L$	96
Figura 5.35-	Distância relativa de descolamento (D_{rel}) em função do Reynolds	97
Figura 6.1-	Sequência temporal de imagens visualizadas do escoamento transiente acelerado em um canal com duas protuberâncias espaçadas de 30 mm, de $Re = 26$ em $t = 0$ s a $Re = 136$ em $t = 33$ s.	101
Figura 6.2-	Sequência temporal de imagens visualizadas do escoamento transiente acelerado em um canal com três protuberâncias espaçadas de 20 mm, de $Re = 90$ em $t = 0$ s a $Re = 250$ em $t = 9,6$ s.	102
Figura 6.3-	Sequência temporal de imagens visualizadas do escoamento transiente acelerado em um canal com duas protuberâncias espaçadas de 40 mm, de $Re = 6,4$ em $t = 0$ s a $Re = 52$ em $t = 45$ s.	103
Figura 6.4-	Sequência temporal de imagens visualizadas do escoamento transiente acelerado em um canal uma protuberância, de $Re = 134$ em $t = 0$ s a $Re = 243$ em $t = 25,0$ s.	104

Figura 6.5-	Sequência temporal de imagens visualizadas do escoamento transiente acelerado em um canal com duas protuberâncias espaçadas de 60 mm, de $Re = 6,4$ em $t = 0$ s a $Re = 38$ em $t = 27$ s.	105
Figura 6.6-	Sequência temporal de imagens visualizadas do escoamento transiente acelerado em um canal com três protuberâncias espaçadas de 10 mm, de $Re = 66$ em $t = 0$ s a $Re = 71$ em $t = 9$ s.	106
Figura 6.7-	Sequência temporal de imagens visualizadas do escoamento transiente acelerado em um canal com três protuberâncias espaçadas de 10 mm, de $Re = 498$ em $t = 0$ s a $Re = 631$ em $t = 4,0$ s.	107
Figura A1-	Aparato experimental de Reynolds.	117
Figura B.1-	Kelvin-Helmholtz visualizado através das nuvens.	118
Figura B.2-	Inflexão do perfil de velocidade.	119
Figura C.1-	Linhas de corrente do projeto da contração.	121
Figura C.2-	Difusor de descarga.	124

LISTA DE SÍMBOLOS

d	dimensão característica do cilindro [m]
f	frequência de emissão dos vórtices de um lado do cilindro [s ⁻¹]
It	intensidade turbulenta
N	número de pontos experimentais adquiridos
Q	vazão volumétrica do escoamento [m ³ .s ⁻¹]
t	tempo de coleta de dados [s]
T	temperatura do fluido [°C]
V_{∞}	velocidade da corrente livre [m.s ⁻¹]
μ	viscosidade dinâmica ou absoluta do fluido [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]
ρ	densidade ou massa específica do fluido [kg.m ⁻³]
A	área da seção de teste [m ²]
E	tensão [volts]

NÚMEROS ADIMENSIONAIS

Re número de Reynolds
St número de Strouhal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO A VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS	15
1.1	MOTIVAÇÃO	16
1.2	OBJETIVOS	20
1.3	TÚNEIS HIDRODINÂMICOS VERTICAIS E A VISUALIZAÇÃO.....	20
1.4	VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS EM MEIO LÍQUIDO	23
1.5	ANEMOMETRIA DE FILME QUENTE	27
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	29
2.1	ESCOAMENTO AO REDOR DE CILINDROS RETANGULARES DISPOSTOS NA PAREDE DO CANAL.	29
2.2	CONCLUSÃO.....	33
3	TUNEL HIDRODINAMICO VERTICAL	35
3.1	INTRODUÇÃO	35
3.2	DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL.....	36
3.2.1	Seção de testes	37
3.2.2	Canal com protuberâncias parietais	41
3.3	OPERAÇÃO DO TÚNEL	42
3.4	CONCLUSÃO.....	45
4	ANEMOMETRIA DE FIO QUENTE	47
4.1	INTRODUÇÃO	47
4.2	PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO	47
4.3	DADOS COLETADOS DO NOVO TÚNEL HIDRODINÂMICO COM ANEMOMETRIA DE FIO QUENTE	50
4.4	CONCLUSÃO.....	54
5	VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO NO INTERIOR DE CAVIDADES COM PROTUBERÂNCIAS PARIETAIS	56
5.1	VISUALIZAÇÃO POR INJEÇÃO DE CORANTES LÍQUIDOS	56
5.2	VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM UMA PROTUBERÂNCIA NA PAREDE.....	63
5.3	VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM DUAS PROTUBERÂNCIAS NA PAREDE, ESPAÇADAS POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE UMA PROTUBERÂNCIA	68
5.4	VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM DUAS PROTUBERÂNCIAS EM UMA DAS PAREDES, ESPAÇADAS POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE DUAS PROTUBERÂNCIAS.....	71
5.5	VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO EM UM CANAL COM DUAS PROTUBERÂNCIAS EM UMA DAS PAREDES, ESPAÇADAS POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE TRÊS PROTUBERÂNCIAS.....	74
5.6	VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM DUAS PROTUBERÂNCIAS EM UMA DAS PAREDES, ESPAÇADAS	

	POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE QUATRO PROTUBERÂNCIAS.....	76
5.7	VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM DUAS PROTUBERÂNCIAS EM UMA DAS PAREDES, ESPAÇADAS POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE CINCO PROTUBERÂNCIAS.....	79
5.8	VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM DUAS PROTUBERÂNCIAS EM UMA DAS PAREDES, ESPAÇADAS POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE SEIS PROTUBERÂNCIAS.....	82
5.9	VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM TRÊS PROTUBERÂNCIAS EM UMA DAS PAREDES, ESPAÇADAS POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE UMA PROTUBERÂNCIAS.....	84
5.10	VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM TRÊS PROTUBERÂNCIAS EM UMA DAS PAREDES, ESPAÇADAS POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE DUAS PROTUBERÂNCIAS.....	86
5.11	VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM TRÊS PROTUBERÂNCIAS EM UMA DAS PAREDES, ESPAÇADAS POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE TRÊS PROTUBERÂNCIAS.....	89
5.12	VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM TRÊS PROTUBERÂNCIAS EM UMA DAS PAREDES, ESPAÇADAS POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE QUATRO PROTUBERÂNCIAS.....	92
5.13	VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM TRÊS PROTUBERÂNCIAS EM UMA DAS PAREDES, ESPAÇADAS POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE CINCO PROTUBERÂNCIAS.....	95
5.14	CONCLUSÃO.....	98
6	VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS ACELERADOS	100
6.1	CONCLUSÃO.....	107
7	CONCLUSÕES	109
7.1	RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	109
	REFERÊNCIAS.....	112
	APÊNDICE A – NUMERO DE REYNOLDS (RE)	116
	APÊNDICE B – INSTABILIDADE DE KELVIN HELMOLTZ	118
	APÊNDICE C – DETALHAMENTO DO TÚNEL HIDRODINAMICO VERTICAL.....	120
	C.1 Reservatório Superior.....	120
	C.2 Contração Inferior	120
	C.3 Contração superior	121
	C.4 Medidor de Vazão Magnético	121
	C.5 Reservatório Inferior	122
	C.6 Válvulas Controladoras de Vazão.....	122

C.7 Válvula de Escape	123
C.8 Tubulação de Descarga	123
C.9 Controlador do Nível do Fluido no Reservatório Superior	123
C.10 Sistema de Abastecimento	124
C.11 Sistema de Alimentação pela Parte Inferior do Túnel	125
C.12 Marcador do Nível do Fluido no Reservatório Superior	125

1 INTRODUÇÃO A VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS

O movimento de um fluido pode ser observado por meio de várias técnicas, como, por exemplo, a adição de um traçador na forma de corantes ou partículas sólidas, dependente das propriedades do fluido ou do fenômeno visualizado, tal como vórtices, descolamentos, entre outros. A visualização de escoamentos consiste de uma forma rápida e de custos relativamente baixos de obtenção de propriedades qualitativas do campo do escoamento. Entretanto, atualmente, a visualização de escoamentos também é empregada para obtenção de propriedades quantitativas.

Leonardo Da Vinci é considerado por muitos como sendo o “pai da visualização de escoamentos” uma vez que seus esboços retratavam com muito realismo as imagens de diferentes escoamentos. Desde então, as mais variadas técnicas de visualização de escoamentos são empregadas e a cada dia novas técnicas são desenvolvidas, representando uma importante ferramenta para análise e compreensão dos diferentes fenômenos associados ao movimento dos fluidos. A Figura 1.1 retrata um dos trabalhos de Leonardo Da Vinci, no qual observam-se o fluxo e os vórtices.

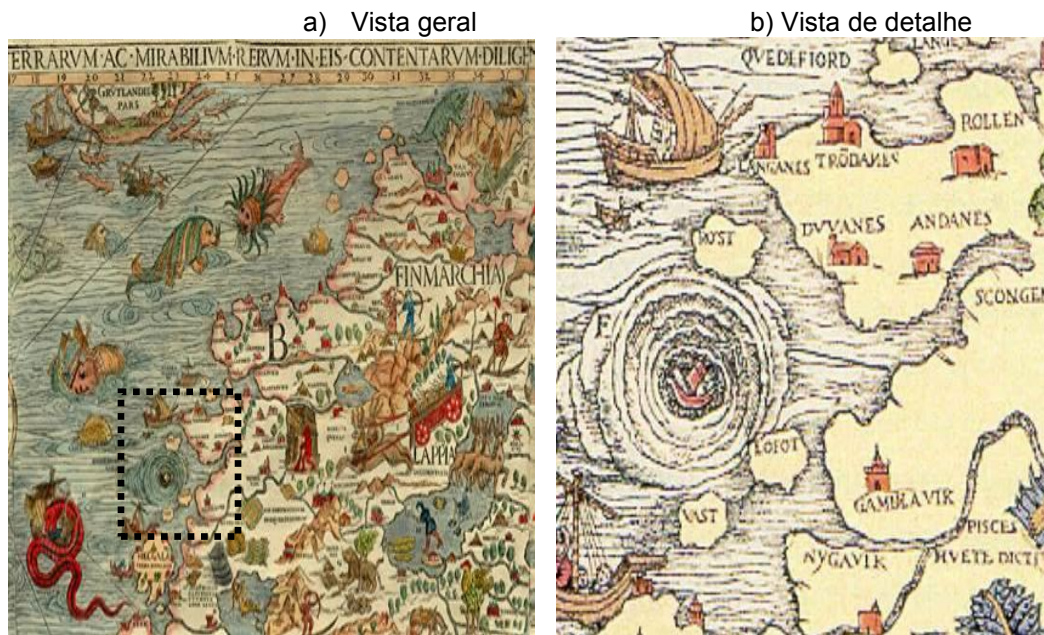
Figura 1.1 - Imagem de uma pintura de Da Vinci.



Fonte: Bartoli et al. (2009).

Antigamente, mais precisamente na época das Grandes Navegações, marinheiros temiam o encontro com grandes monstros marinhos que, segundo as crenças da época, afundavam navios e devoravam seus tripulantes. Além disso, os navegadores contavam histórias sobre redemoinhos que surgiam inesperadamente à frente das embarcações, sugando-as para o fundo do oceano. Todos esses temores foram representados com detalhes na carta náutica de Olaus Magnus, elaborada em 1539, mostrada na Figura 1.2 a e b.

Figura 1.2 - Mapa elaborado em 1539, por Olaus Magnus (1490-1557).



Fonte: Mega (2009).

No presente trabalho, ferramentas de visualização de escoamentos de líquidos são empregadas para obtenção de imagens do escoamento em um canal com protuberâncias nas paredes. Tais imagens permitem a obtenção e informações qualitativas do escoamento e dados quantitativos são obtidos por meio da anemometria de filme quente. Os ensaios foram realizados utilizando o túnel hidrodinâmico de baixa turbulência do Laboratório de Visualização de Escoamentos do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP/ Campus de Ilha Solteira.

1.1 MOTIVAÇÃO

Tradicionalmente utilizadas como fonte de informações qualitativas sobre o escoamento, o emprego de técnicas de visualização sempre se fez acompanhar de extensivas medidas experimentais, para o fornecimento de dados quantitativos sobre o fenômeno estudado. Como exemplo bem sucedido dessa combinação, cita-se o famoso trabalho de Brown e Roshko (1974), que revelou a presença, num escoamento turbulento e, portanto, aparentemente caótico, das chamadas estruturas coerentes de vorticidade.

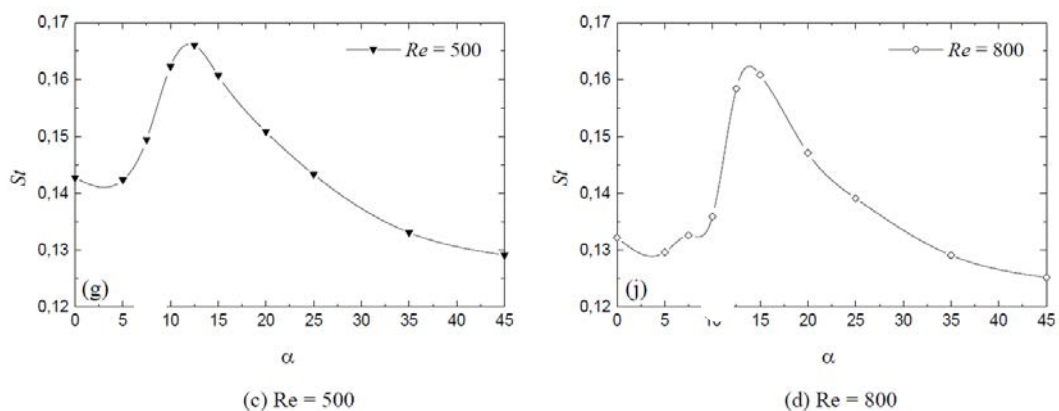
A descoberta das estruturas coerentes, além de abrir novas fronteiras ao estudo fenomenológico da turbulência, incentivou o desenvolvimento de *softwares* e

hardwares voltados para a quantificação direta de campos de escoamentos, a partir da utilização de técnicas de visualização experimental, Hesselink (1988). Atualmente, o processamento digital de imagens constitui parte integrante da visualização experimental de escoamentos, (HESSELINK et al., 1992).

Por outro lado, muitos pesquisadores empregam com vantagens a associação de uma técnica de visualização de escoamentos, obtendo dados qualitativos, com uma técnica de medidas para obtenção de dados quantitativos, como extensamente expandido por (FREYMUTH, 1993).

O trabalho Lindquist et al. (2010) é um bom exemplo de associação de uma técnica de visualização com medidas quantitativas. Nesse trabalho, foram realizadas as medidas do número de Strouhal do escoamento na esteira de um cilindro quadrado (corpo prismático de seção transversal quadrada) em vários ângulos de ataque, para número de Reynolds menores que 1 000. As Figuras 1.3a e 1.3b apresentam o comportamento do número de Strouhal em função do ângulo de ataque (α), respectivamente, para número de Reynolds 500 e 800. De forma geral, o número de Strouhal de corpos rombudos tende a diminuir com o aumento da largura da esteira de vórtices, como explicado por (OLSEN; RAJAGOPALAN, 2000). Com o aumento do ângulo de ataque do cilindro quadrado torna-se evidente o aumento da largura da esteira. Dessa forma, o comportamento esperado seria de um número de Strouhal sempre decrescente com o aumento do α .

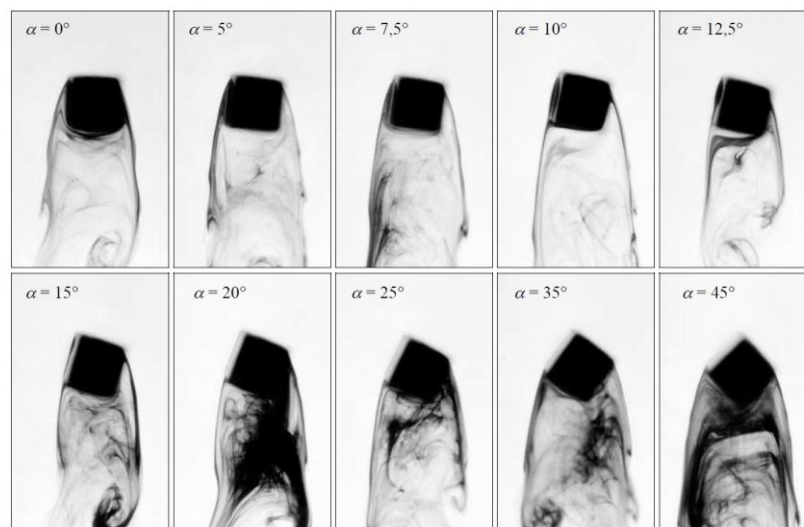
Figura 1.3 - Comportamento do número de Strouhal (St) em função do ângulo de ataque (α) para número de Reynolds 500 e 800 – LINDQUIST et al. (2010).



Fonte: Lindquist et al. (2010).

Como o comportamento do Strouhal, observado na Figura 1.3, apresenta uma inflexão, com a diminuição do valor do St somente ocorrendo para ângulos de ataque maiores do que aproximadamente 12, torna-se evidente a ocorrência de outro fenômeno influenciando o valor da frequência de emissão dos vórtices além da largura da esteira de Von Kármán. A Figura 1.4 apresenta imagens do escoamento ao redor do cilindro quadrado que auxiliam na interpretação dos resultados obtidos.

Figura 1.4 - Imagens do escoamento visualizado ao redor de um cilindro quadrado em vários ângulos de ataque para Reynolds igual a 500.



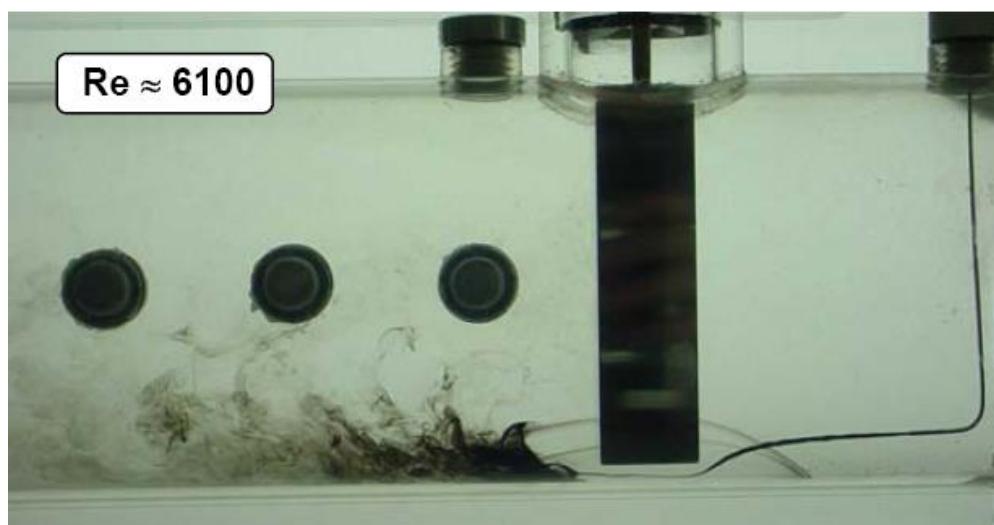
Fonte: Lindquist et al. (2010).

O comportamento da curva do número de Strouhal *versus* ângulo de ataque pode ser explicado com base no padrão de descolamento e recolamento da camada cisalhante sobre as superfícies laterais do cilindro quadrado. A Figura 1.4 mostra que, para um ângulo de incidência nulo, as camadas cisalhantes se descolam nas arestas de ataque do cilindro e interagem entre si a jusante do corpo, formando a esteira de von Kármán. À medida que o ângulo de ataque (α) aumenta, observa-se que a camada cisalhante se descola, diminui em espessura e se aproxima da superfície lateral esquerda do cilindro, enquanto que a camada cisalhante da face oposta, aumenta em espessura e se afasta da superfície lateral direita do cilindro. Aumentando progressivamente o ângulo de incidência, esse processo continua até que se atinja um ângulo de incidência crítico, quando a camada cisalhante esquerda se recol sobre a superfície lateral do cilindro, formando uma bolha de recirculação. Então, os pontos de separação do escoamento permanecem fixos na aresta

posterior esquerda e na anterior direita. Com base nas imagens da Figura 1.4, pode-se constatar-se que este ângulo crítico está situado aproximadamente entre 10° e $12,5^\circ$, que corresponde exatamente ao ângulo em que o número de Strouhal atinge seu valor máximo. Com base nas imagens obtidas por meio da visualização, observa-se que o fenômeno de emissão de vórtices está intimamente relacionado com o recolamento de uma das camadas cisalhantes sobre a superfície lateral do cilindro.

Dessa forma, a visualização de escoamentos representa um importante papel na interpretação de resultados quantitativos. Outro exemplo da utilização da visualização para interpretação dos resultados obtidos é o trabalho de Hirai et al. (2010), no qual a visualização de escoamentos em meio líquido auxilia no projeto da forma geométrica de corpos emissores de vórtices (shedder) para medidores de vazão a efeito vórtice (vortexflowmeter). Como exemplo, na Figura 1.5 é apresentado uma imagem do escoamento que ocorre entre a extremidade inferior do shedder de um medidor de vazão a efeito vórtice e as paredes da tubulação. Nesse caso, o escoamento pelo estreito espaço existente entre a extremidade inferior do corpo emissor de vórtices e as paredes da tubulação implica em uma forte influência na relação sinal ruído observada pelo sensor posicionado na esteira de vórtices, principalmente para número de Reynolds moderados.

Figura 1.5 - Escoamento visualizado na folga existente entre o corpo emissor de vórtices e as paredes da tubulação em um medidor de vazão a efeito vórtice.



Fonte: Hirai et al. (2010).

Dessa forma, a visualização de escoamentos pode ser associada com medidas diretas permitindo a compreensão de complexos fenômenos associados ao movimento dos fluidos.

A possibilidade de utilização de técnicas de visualização em meio líquido com obtenção de dados qualitativos permitindo a investigação dos complexos fenômenos associados ao movimento dos fluidos é a principal motivação do presente trabalho.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

- 1) Analisar o escoamento no interior de canais com protuberâncias parietais para número de Reynolds menores que 10^3 .
- 2) Recuperar a capacidade de trabalho no Laboratório de Visualização de Escoamentos, do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP – campus de Ilha Solteira, com a reconstrução do túnel hidrodinâmico.

Quanto ao primeiro, são apresentadas as imagens de escoamentos no interior de canais com protuberâncias parietais

Com relação ao segundo é destinado ao término da reconstrução do túnel hidrodinâmico vertical e da recuperação das instrumentações envolvidas em sua operação e na qualificação do escoamento da nova instalação, são os principais tópicos descritos no presente trabalho

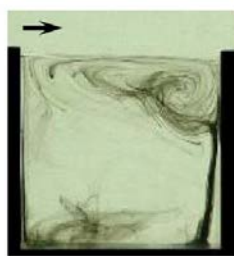
1.3 TÚNEIS HIDRODINÂMICOS VERTICAIS E A VISUALIZAÇÃO

Em inúmeras situações, os fenômenos associados ao movimento dos fluidos podem ser mais adequadamente observados na água do que no ar (Clayton E Massey, 1967; Mordoff, 1986; Werlé, 1973). Existe uma grande variedade de dispositivos experimentais concebidos para a geração de escoamentos em meio líquido, dentre os quais se inserem os chamados túneis hidrodinâmicos. Segundo Erickson (1981), tais dispositivos substituem com vantagens os túneis aerodinâmicos, particularmente no que concerne à visualização de escoamentos incompressíveis de baixa velocidade.

Também observa-se uma grande diversidade de tamanhos dos túneis hidrodinâmicos. De fato, pequenas instalações para aplicações notadamente didáticas, como o túnel hidrodinâmico de seção de testes horizontal de superfície livre de Mega et al. (2007) - mostrado na Figura 1.6, podem ser utilizadas na visualização de escoamentos em meio aquoso. O trabalho de Erickson (1981) apresenta mais de 200 túneis hidrodinâmicos de diferentes instalações ao redor do mundo. Segundo Merzkirch (1974), dentre os diferentes túneis hidrodinâmicos, os que operam pela ação da gravidade e possuem seção de testes vertical, via de regra, são utilizados sistematicamente para a visualização de escoamentos.

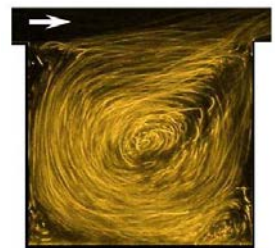
A Figura 1.7 mostra um esquema de um túnel hidrodinâmico vertical típico apresentando suas partes principais. Esse dispositivo de ensaio compõe-se, fundamentalmente, de um reservatório superior (RS), munido de telas e colméias (TC), seguido de uma contração (CT) e de uma seção de testes (ST), dotada de janelas de observação, e opera em modo contínuo ou intermitente (*blow-down*), sempre pela ação da gravidade.

Figura 1.6 – Túnel Hidrodinâmico piloto de superfície livre e imagens visualizadas do interior de uma cavidade.



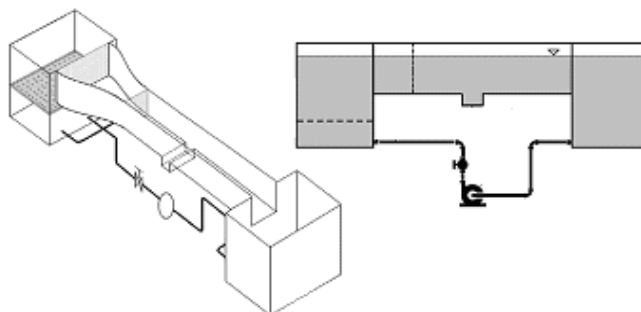
(a) $Re = 500$

Escoamentos visualizados no interior de uma cavidade quadrada – com a técnica de injeção de corantes líquidos (esquerda) e com particulados sólidos e folha de luz (direita)



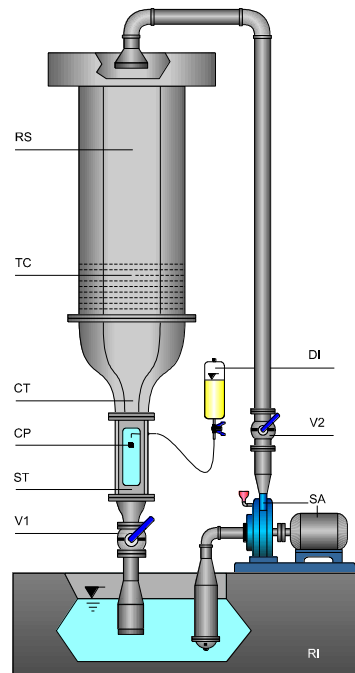
(d) $Re = 1300$

a) Túnel hidrodinâmico piloto de superfície livre.



Fonte: Mega et al. (2007).

Figura 1.6 - Esquema de um túnel hidrodinâmico vertical típico.



Fonte: Mega et al. (2007).

No modo contínuo de funcionamento, as válvulas (V1) e (V2) são reguladas simultaneamente, de maneira que o nível de água do reservatório superior (RS) mantenha-se constante. Nessa condição, a velocidade média na seção de testes (ST) permanece inalterada durante todo o tempo de realização dos ensaios.

Em modo de operação *blow-down*, o reservatório superior é abastecido com água da rede urbana por intermédio de um conjunto moto-bomba (SA), até atingir o seu nível máximo. Em seguida a bomba é desligada, aguardando-se o tempo necessário para que a água no interior do túnel se tranquilize. A válvula de controle de vazão (V1) é, então, ajustada para uma abertura previamente estabelecida, iniciando-se o ensaio. Evidentemente, devido à diminuição do nível da água do reservatório superior, a velocidade média do escoamento na seção de testes decresce continuamente durante a operação do túnel em modo *blow-down*. Em vista disso, durante a realização do ensaio, a abertura da válvula V1 deve ser ajustada com critério, a fim de produzir uma queda suficientemente lenta na velocidade média, capaz de ser encoberta pela magnitude das próprias flutuações turbulentas.

O sistema de injeção de corantes líquidos (DI) é composto de um reservatório pressurizado, ligado a uma longa agulha hipodérmica. A injeção é efetuada,

geralmente, à montante do modelo (CP), com velocidade e pressão controladas, a fim de se introduzir a mínima perturbação possível sobre o escoamento principal.

1.4 VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS EM MEIO LÍQUIDO

A visualização de escoamentos sempre constituiu uma importante ferramenta para o estudo do movimento dos fluidos. Os métodos de visualização descritos na literatura são numerosos e englobam diferentes níveis de sofisticação. As publicações de (Clayton e Massey, 1967; Merzkirch, 1974; Goldstein, 1983; Vieira e Mansur, 2004 e Freymuth, 1993), constituem excelentes revisões do assunto, apresentando diversas técnicas experimentais utilizáveis em meio hidrodinâmico. Dentre elas, a injeção de traçadores líquidos destaca-se como a mais intensamente empregada, em razão de sua simplicidade e reconhecida eficácia. Apesar dessas qualidades, sua implementação requer uma série de precauções e, sobretudo, uma boa dose de paciência.

A escolha do traçador líquido adequado a um determinado tipo de ensaio constitui uma tarefa eminentemente empírica. Os corantes alimentícios, os produtos fluorescentes, os pigmentos de tintas e o leite in natura, incluem-se entre os principais fluidos utilizados para essa finalidade.

Substâncias gordurosas, como o leite, via de regra, apresentam um filete opaco e muito estável, provavelmente devido à gordura, mas apresentam o inconveniente da fermentação e da deposição contínua de camadas de gordura e sujeiras nas paredes do experimento. A utilização de leite condensado dissolvido em água diminui sensivelmente o problema da fermentação.

Corantes alimentícios podem ser facilmente obtidos em uma extensa gama de cores e podem ser eliminados da água de trabalho com o auxílio de alvejantes ou produtos de limpeza a base de hipoclorito de sódio. Em outras palavras, a água turva pela adição constante de corantes ao longo de muitos ensaios é facilmente limpa com adição de uma pequena quantidade de produto de limpeza do tipo água sanitária ou de uma solução de baixa concentração de hipoclorito de sódio. Entretanto, os corantes alimentícios nem sempre conseguem produzir um filete opaco e contrastante.

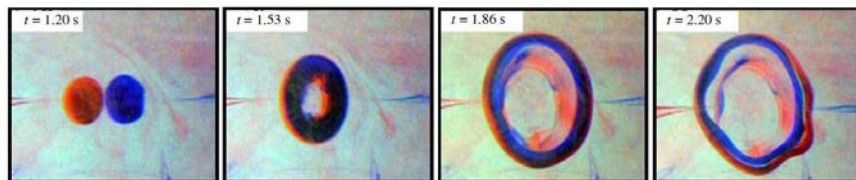
Soluções de azul de metileno, preferivelmente de baixa concentração, podem ser também utilizadas produzindo um filete opaco e nítido, mas esse tipo de

substância química, assim como outros corantes químicos, apresenta a tendência de aderir nas paredes do experimento e no modelo de testes e, geralmente, a operação de limpeza mostra-se um trabalho lento e difícil de ser realizado.

O dispositivo de injeção deve ser constituído de um reservatório pressurizado, ligado a uma longa agulha hipodérmica de menor diâmetro externo possível e instalada no interior da seção de ensaios. A velocidade e a pressão de injeção são controladas por intermédio de uma válvula de agulha, para produzir um filete de corante nítido e estável, introduzindo o mínimo de perturbação possível no escoamento.

Ao longo dos anos, dezenas de substâncias foram sistematicamente testadas como corantes líquidos para a visualização em meio aquoso no Laboratório de Visualização do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP – Campus de Ilha Solteira. Os melhores resultados foram obtidos com uma solução aquosa de pigmentos de tinta PVA (disponível comercialmente nas lojas de materiais de construção) com grande poder de tingimento e de baixo custo de aquisição, à qual foi adicionada uma pequena quantidade de álcool etílico, para tornar a densidade da mistura mais próxima à da água e evitar convecção em ensaios a velocidades muito baixas, como explanado no trabalho de (RIBEIRO et al., 2009). Nesse trabalho, Ribeiro et al. (2009) estudaram qualitativamente o choque de dois vórtices em anel, mostrado na Figura 1.8. Observa-se pela imagem da Figura 1.8, que o corante de PVA mostra-se estável não se dissolvendo facilmente na água de trabalho e é significativamente opaco e contrastante.

Figura 1.7 - Sequência de imagens de um choque laminar frontal ($Re = 520$) de dois anéis de vórtices visualizados utilizando corante PVA.



Fonte: Ribeiro et al. (2009).

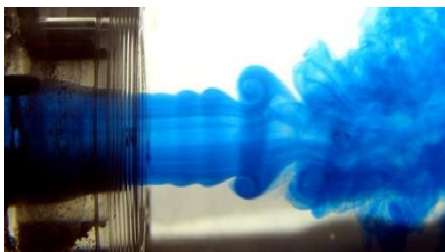
A correta iluminação do objeto constitui o primeiro passo para a obtenção de uma imagem de boa qualidade. Além disso, deve existir perfeita sintonia entre os sistemas de iluminação e de captura utilizados, o que nem sempre pode ser

conseguido facilmente. Os foto-sensores eletrônicos são incapazes de registrar com fidelidade absoluta aquilo que é observado pela visão humana. Em vista disso, na maioria dos trabalhos experimentais envolvendo a visualização de fenômenos físicos, uma série de testes preliminares devem ser realizados, até que se obtenham imagens exploráveis cientificamente.

Em geral, uma iluminação branca, difusa e em contraluz, proveniente de holofotes dispostos a uma distância conveniente da seção de testes, mostra-se absolutamente adequado para o tipo de trabalho realizado, produzindo uma iluminação com alta temperatura de cor, a um custo moderado.

No caso específico da captura de imagens para visualização de escoamentos o trabalho de Vieira e Mansur (2010) apresenta uma série de recomendações. A iluminação em contraluz na qual as fontes de luz encontram-se apontadas diretamente para a câmera) pode produzir excelentes resultados para a técnica de injeção de corantes líquidos, como apresentado na Figura 1.9, na qual um jato livre axissimétrico descarregando em meio quiescente é visualizado por duas diferentes técnicas de injeção de corante. Na Figura 1.9(a), o corante é misturado ao fluido a montante do bocal de descarga, ao passo que na Figura 1.9(b) a injeção é feita com o auxílio de uma fina agulha hipodérmica (de 0,7 mm de diâmetro externo), posicionada próximo à parede interna do bocal. Em todos os casos, as imagens fornecem uma série de informações sobre a topologia do escoamento, permitindo o reconhecimento de estruturas turbilhonares típicas e regiões de intensa atividade turbulenta.

Figura 1.8 - Jato livre axissimétrico em meio quiescente, visualizado com o auxílio de duas técnicas de injeção de corante e iluminação em contraluz.



(a) Injeção global.



(b) Injeção parietal.

Fonte: Vieira e Mansur (2010).

Os melhores resultados, foram obtidos com a injeção de corantes líquidos com iluminação em contraluz.

As novas iluminações frias por meio de lâmpadas do tipo fluorescente e LED geralmente apresentam uma boa temperatura de cor aliado a uma baixa emissão de calor. Os filmes fotográficos químicos podem exigir altas intensidades luminosas para sensibilização da imagem. Por exemplo, no trabalho de Mansur et al. (1996) utilizou-se 6 kW de intensidade luminosa em lâmpadas incandescentes, gerando uma alta emissão de calor que necessitava ser dissipada por interferir no experimento causando convecção na seção de testes, principalmente para os ensaios em velocidade reduzida. Felizmente, as câmeras digitais modernas, de nível profissional e semi-profissional, podem operar com uma relativa baixa intensidade luminosa e com baixo nível de ruídos (grão fino).

O uso de filtros de iluminação como o Rosco Cinegel#3308 converte a luz fluorescente do tipo luz do dia para 5 500 K. Por sua vez, o Rosco Cinegel#3007 produz uma luz difusa, reduzindo substancialmente as sombras da imagem e gerando imagens.

As imagens estáticas, do presente trabalho, foram capturadas com uma câmera Nikon D90 DSLR de 12,3 Mpixel equipada com uma objetiva Nikkor Medical macro de 120 mm de distância focal. As fotografias foram capturadas com $f/1:11$ e $1/250$ s para ISO 100. O emprego de obturadores fechados ($f/1:11$ ou ainda maiores) garante uma boa profundidade de campo facilitando o ajuste de foco e as relativamente altas velocidades de obturação são necessárias para obtenção de imagens nítidas. Uma objetiva do tipo Macro Medical é projetada para aplicação em câmeras fotográficas que utilizavam filmes químicos de 35 mm do tipo *full frame* (24×36 mm) em fotografia macro de cirurgia médica. Esse tipo de objetiva pode ser adaptada para ser utilizada em uma moderna câmera digital DSLR permitindo a obtenção de boas fotografias macro com uma mínima distorção. Vale a pena ressaltar que, em todas as operações de captura de imagens realizadas no laboratório, as câmeras fotográficas operam necessariamente em modo manual e as funções de foco automático e de controle automático de obturador e diafragma são desligadas. Dessa forma, antes do início dos ensaios, realiza-se o ajuste de foco por diferentes técnicas de focagem manual, descritas nos manuais de fotografia, e a fotometria da cena é realizada utilizando-se o próprio fotômetro da câmera para ajuste preciso do obturador e diafragma.

A câmera Nikon D90 opera com um sensor do tipo CMOS de 23,6×15,8 mm de tamanho. A objetiva Nikkor Medical opera em *full frame* (24×36 mm) o que gera

um fator de escala de aproximadamente 1,5, aumentando a distância focal da objetiva de 120 para 180 mm.

Câmeras DSLR com obturadores de cortina são uma boa opção de captura de imagens em visualização de escoamentos. Infelizmente, a maioria das câmeras digitais até então fabricadas tinham uma estimativa de vida útil do obturador de apenas aproximadamente 30 000 disparos obrigando os profissionais de fotografia a trocas frequentes de equipamento. Tal fato deve-se a política de obsolescência programada aplicada pela indústria do setor. A opção pela aquisição da câmera Nikon D90 é que esse tipo de câmera apresenta um obturador de alta precisão e com uma vida útil acima de 100 000 disparos, o que implica em uma alta vida útil do equipamento.

1.5 ANEMOMETRIA DE FILME QUENTE

O primeiro sistema de anemometria de fio quente disponível no Laboratório de Visualização de Escoamentos, do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP – Campus de Ilha Solteira, foi um anemômetro Dantec tipo CTA, modelo 55M01 fabricado em 1974, equipado com uma sonda 55R11 de filme quente. Salienta-se que tal sistema ainda hoje encontra-se operacional. Posteriormente, o Laboratório pode contar com um novo sistema *Dantec Stream Line* 90C10 equipado com 3 módulos CTA 90C10, permitindo a medida simultânea de 3 canais com uma placa de aquisição A/D AT MIO 16E (16 bits), da *National Instrument*. A aferição das sondas utilizadas nesse dispositivo de medição foi realizada por meio de um jato livre gerado por um pequeno túnel hidrodinâmico horizontal de seção aberta, semelhante ao descrito por Pluister (1975), especialmente construído para essa finalidade. Detalhes do equipamento de calibração de sondas encontram-se no trabalho de (EGUTI et al., 2002). Todos esses equipamentos sofreram pesados danos causados pelo incêndio ocorrido em 2003 no antigo Laboratório de Visualização de Escoamentos, do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP – Campus de Ilha Solteira, quer pela ação direta do fogo como pela ação de combate ao fogo, Os equipamentos eletrônicos não atingidos pelo fogo sofreram danos com exposição direta aos agentes extintores, sobretudo à água. Em particular, o sistema de calibração de sondas de filme quente foi restaurado parcialmente neste trabalho, o que permitiu a calibração das sondas utilizadas. Um

novo sistema calibrador de sondas de filme quente encontra-se, no presente momento, em construção nesse laboratório de visualização, do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP – Campus de Ilha Solteira, com recursos da FAPESP. Quanto ao sistema de anemometria houve perda total do equipamento.

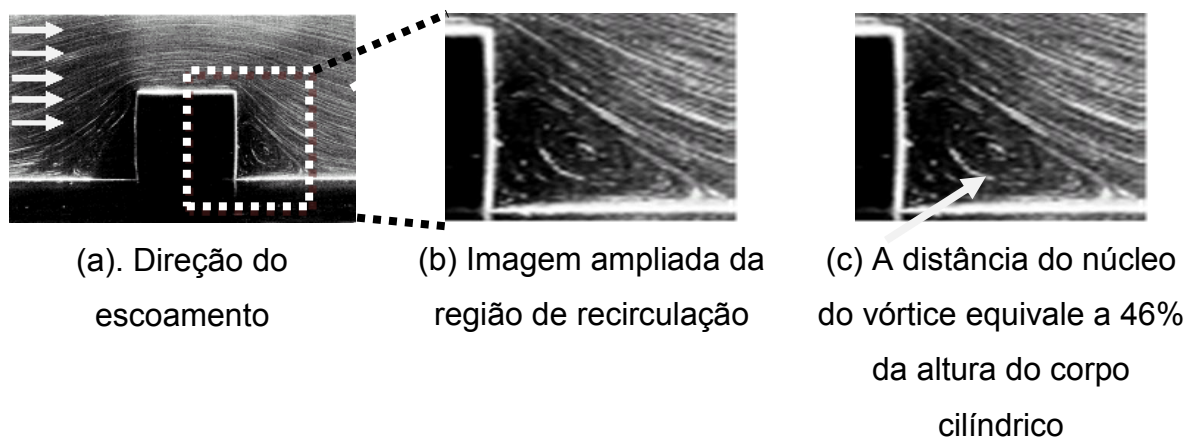
Recentemente um novo sistema de anemometria de fio/filme quente foi adquirido pelo laboratório (*Dantec 90C10*). Tal sistema foi colocado em operação neste trabalho e utilizado para a qualificação do túnel hidrodinâmico. O trabalho de Bassan et al. (2011) apresenta os primeiros resultados de qualificação do novo túnel hidrodinâmico utilizando-se o novo sistema de anemometria.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 ESCOAMENTO AO REDOR DE CILINDROS RETANGULARES DISPOSTOS NA PAREDE DO CANAL.

Taneda (1979) mostra alguns experimentos do escoamento ao redor de um corpo prismático de seção transversal quadrada junto a uma parede plana e lisa. O obstáculo apresenta uma largura de 10 mm e a velocidade da corrente não perturbada é de apenas 0,20 cm/s, resultando em um número de Reynolds, baseado na altura do cilindro quadrado, utilizando glicerina como fluido de trabalho. A técnica de visualização empregada foi a iluminação intensa de minúsculas contas de vidro em suspensão na glicerina e o resultado é mostrado na Figura 2.1. Taneda (1979) observou um escoamento com simetria a montante e a jusante do cilindro quadrado com um acentuado descolamento na parede posterior e a formação de um vórtice na parede anterior, situações que não são observadas para um regime de escoamento a um número de Reynolds efetivamente baixo, ou seja, $Re \leq 1$. Ao que tudo indica, o cálculo do número de Reynolds de tais experimentos encontra-se subestimado para justificar o pronunciado descolamento. Outra estrutura observada por Taneda (1979), foi a formação de vórtice entre a placa e a face do corpo quadrado. A distância entre o centro desse vórtice e a junção entre a placa e o corpo é de 0,46 vezes a altura do ressalto. O escoamento se dá da esquerda para direita como indicado na figura. (Vide Figura 2.1).

Figura 2.1 - Visualização do escoamento de um corpo unido a parede.



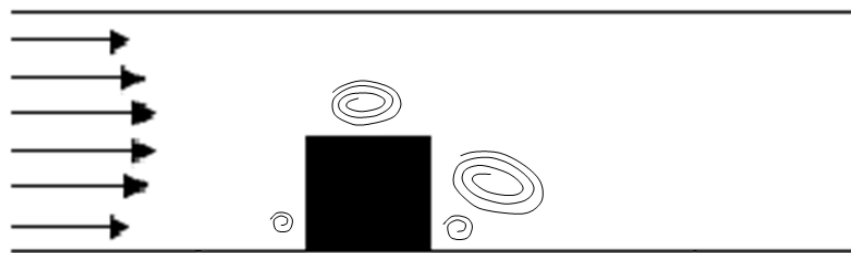
Fonte: Taneda (1979).

Tovbich (1992) desenvolveu experimentos contendo um modelo de parede com um obstáculo retangular. As trajetórias de linhas de correntes foram visualizadas por meio de corantes, pó de alumínio e fotografia. Os ressaltos possuíam uma altura constante c , mas a distância entre elas poderia ser variada. O escoamento nas cavidades entre os ressaltos foram em todos os casos vorticais segundo (TOVBICH, 1992).

A velocidade média no experimento foi adquirida por um sistema automatizado, consistindo de uma velocidade discreta, um amplificador e um medidor de frequência, no qual a velocidade variou entre 0.035 e 3 m/s.

Martinuzzi e Tropea (1993) fizeram testes com obstáculos prismáticos de seção transversal retangular, variando a largura do corpo prismático, unidos a uma das paredes do canal entre duas placas planas. As técnicas empregadas nesse caso foram: lâmina de luz a laser e filme de óleo cristal violeta. A visualização desses experimentos foi obtida por meio de fumaça e uma vídeo câmera. A dimensão do canal utilizado no experimento foi de 3,9m por 0.6m por 0,05m. O número de Reynolds baseou-se na altura do canal e sua faixa foi de 80.000 a 115.000. O esboço do canal é mostrado na Figura 2.2.

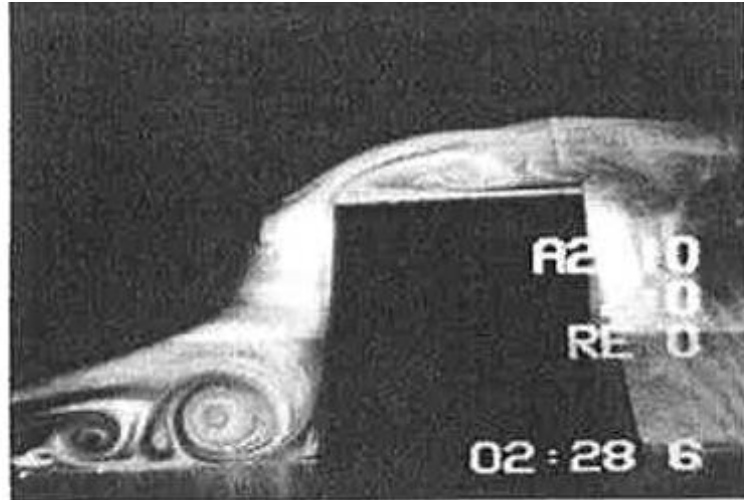
Figura 2.2 - Esboço da geometria do obstáculo em um canal de escoamento.



Fonte: Martinuzzi e Tropea (1993).

Foram investigados escoamentos em torno de obstáculos de diferentes razões de aspectos (W/H) e mostrou-se que uma região bidimensional nominalmente ocorreu atrás do obstáculo para $W/H > 6$ e a montante da região de recirculação, na frente do obstáculo, para $W/H > 10$. A Figura 2.3 mostra a imagem capturada de um ensaio.

Figura 2.3 - Vórtices gerados a montante do corpo.

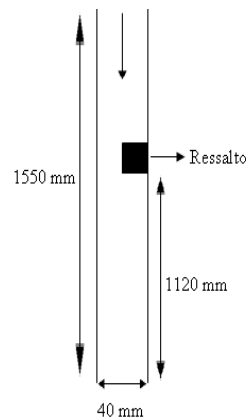


Fonte: Martinuzzi e Tropea (1993).

Na Figura 2.3 o escoamento se dá da esquerda para direita. Imagens do padrão de escoamento nessa região obtidas por meio da técnica de lâmina de luz a laser mostraram que, um jato adjacente à parede pode ser observado como que rolos a formar uma série de vórtices.

Onur e Baydar (1992) investigaram um escoamento no interior de um canal, no qual um ressalto cilíndrico de base quadrada, encontra-se em uma das paredes do canal. Para esse estudo o aparato experimental utilizado foi um túnel de vento com 1550 mm de comprimento e uma seção transversal de 700 x 40 mm, fornecendo assim uma razão de aspecto de 17.5:1. O ressalto, de seção transversal quadrada de dimensão 20 por 20, foi instalado a 1120 mm da entrada do canal como segue a Figura 2.4.

Figura 2.4 - Esquema da configuração do corpo de prova.



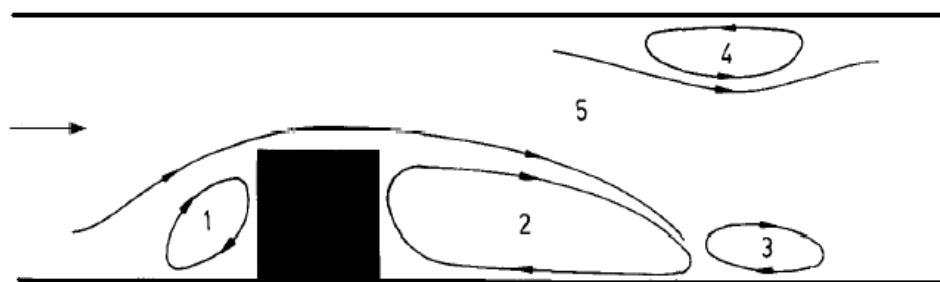
Fonte: Onur e Baydar (1992).

A seção de teste foi instalada na posição vertical com o objetivo de minimizar o erro de convecção livre nas medições com filme quente. Para visualização de escoamento utilizou-se o método de geração de fumaça.

As medições da velocidade através da utilização de filme quente, foram obtidas para $Re=200$, 400 e 800. Um perfil de velocidade parabólico plenamente desenvolvido, o qual foi referido como “perfil de referência”, foi obtido a uma distância de 1000 mm do canal de entrada para todos números de Reynolds estudados.

Um diagrama esquemático foi montado na Figura 2.5 para demonstrar as cinco regiões de circulação identificadas em meio a esse canal. Na borda de ataque apresenta-se a região 1, no qual aparece em recirculação estável. A região de recirculação primária é a região 2, sendo que essa estrutura sempre existiu, porém mudando de forma e de comprimento. As regiões 3 e 4, entretanto, foram instáveis e periodicamente varridas pelo movimento do jato principal. O jato principal foi identificado como região 5.

Figura 2.5 - Diagrama esquemático do escoamento sobre um obstáculo no interior de um canal entre duas placas planas paralelas verticais.



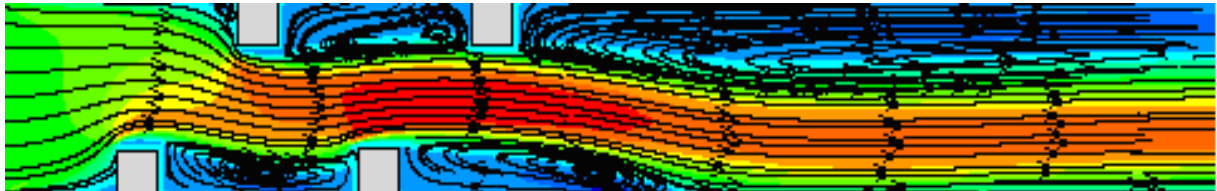
Fonte: Onur e Baydar (1992).

Vieira (2007), investigou numericamente o escoamento em um canal bidimensional munido de protuberâncias dispostas junto às paredes, efetuando simulações para vários tamanhos, formas e disposições geométricas das protuberâncias ao longo do canal. As simulações foram feitas para números de Reynolds moderados, em uma faixa de 15 a 750, utilizando-se como ferramenta o código *Fluids_1.0*, desenvolvido no Laboratório de Simulação Computacional em Ciências Térmicas (LSCCT) da UNESP/Ilha Solteira. Esse programa resolve as

equações de Navier-Stokes 2-D em coordenadas cartesianas, utilizando o método dos volumes finitos.

A Figura 2.6 é mostra as linhas de corrente obtidas de um dos casos analisados: protuberâncias deslocada, não simétrica com $Re \cong 90$.

Figura 2.6 - Protuberâncias não simétricas confinadas em um canal.



Fonte: Vieira (2007).

As cores mostradas na Figura 2.6 representam o gradiente de velocidade no canal. Percebe-se que as linhas de corrente no centro tendem a acelerar, em razão do estrangulamento causado pelos corpos.

As protuberâncias dispostas de maneira alternadas fazem com que se tenha uma análise diferenciada, quando se trata entre a parte superior e a parte inferior do canal. Estruturas geradas nessa configuração são totalmente diferentes. Comparando-se as cavidades, nota-se que a bolha de recirculação na cavidade inferior sofre um achatamento próximo ao segundo corpo, enquanto que na cavidade superior a bolha recirculante não sofre um achatamento tão abrupto. Segundo Vieira (2007) outra característica interessante é a estrutura formada após o segundo corpo. A emissão de vórtices após os obstáculos também é bastante diferenciada, sendo mais intensa na metade superior do canal, onde a frequência de emissão é maior e o diâmetro das recirculações também.

2.2 CONCLUSÃO

Nos dias atuais, o desenvolvimento dos equipamentos de medição permite a obtenção de dados quantitativos com alta resolução temporal e espacial. Adicionalmente, os resultados numéricos atualmente obtidos são notáveis mostrando uma grande evolução das técnicas computacionais de análise de escoamentos. Mesmo assim, a visualização experimental de escoamentos permanece com uma ferramenta útil de trabalho, principalmente para análise

qualitativa. Várias técnicas experimentais de visualização de escoamentos podem ser aplicadas para a obtenção de imagens, mesmo para escoamentos complexos.

O estudo do escoamento no interior de canais com protuberâncias é de fundamental importância para a compreensão dos fenômenos complexos associados ao descolamento da camada limite. Dessa forma, diferentes geometrias de protuberâncias devem ser analisadas, como proposto por (BASSAN et al., 2011).

Nos trabalhos analisados algumas estruturas turbulentas foram observadas, tais como recirculações, estagnações, vórtices e descolamentos. Ressalta-se que existe uma grande proximidade entre os resultados numéricos com os resultados experimentais nos trabalhos avaliados. Entretanto, os ensaios numéricos e os experimentais em canais com protuberâncias quadradas nas paredes são relativamente escassos na literatura técnica consultada, tornando esse tipo de análise de importância fundamental.

3 TUNEL HIDRODINAMICO VERTICAL

3.1 INTRODUÇÃO

Os túneis hidrodinâmicos, contam com as vantagens de poder utilizar líquidos como fluido de trabalho. Vórtices, recirculações, jatos, esteiras e descolamentos podem se tornar visíveis, com grande nitidez e clareza, utilizando-se partículas sólidas dispersas, filetes de tinta injetados no escoamento ou pequenas bolhas gasosas em suspensão na corrente livre.

A utilização de túneis hidrodinâmicos deve-se, também, à sua facilidade de trabalho e seu baixo custo de operação e manutenção. A possibilidade da aquisição de imagens de escoamentos com elevada definição torna esse tipo de instalação uma excelente ferramenta de trabalho para o desenvolvimento de pesquisas e para aplicações didáticas (LINDQUIST et al., 1999).

Esse tipo de aparato experimental é frequentemente empregado para a realização de ensaios de visualização, conduzidos exclusivamente para tornar evidentes aspectos específicos de escoamentos estudados quantitativamente em túneis aerodinâmicos ou simulados numericamente.

Escoamentos uniformes com baixa intensidade turbulenta e pequenos números de Reynolds não podem ser facilmente obtidos na maioria dos túneis aerodinâmicos. Nesses casos, o emprego de um túnel hidrodinâmico, também pode ser determinante, permitindo a obtenção de imagens de excelente qualidade dos escoamentos observados. Ensaios dessa natureza foram conduzidos por (HAN; PATEL, 1979).

A velocidade máxima do escoamento produzido por um túnel hidrodinâmico é menor do que a alcançada em túneis aerodinâmicos típicos, o mesmo valendo para as dimensões da seção de testes. Esse fato contribui para a limitação dos números de Reynolds dos escoamentos tipicamente obtidos em túneis hidrodinâmicos. Em contrapartida, a viscosidade cinemática da água é aproximadamente 15 vezes menor do que a do ar, compensando parcialmente essa limitação, em termos dos números de Reynolds possíveis de serem obtidos.

Os túneis hidrodinâmicos são uma ferramenta de fundamental importância para um laboratório de pesquisa experimental em mecânica dos fluidos, ao lado de

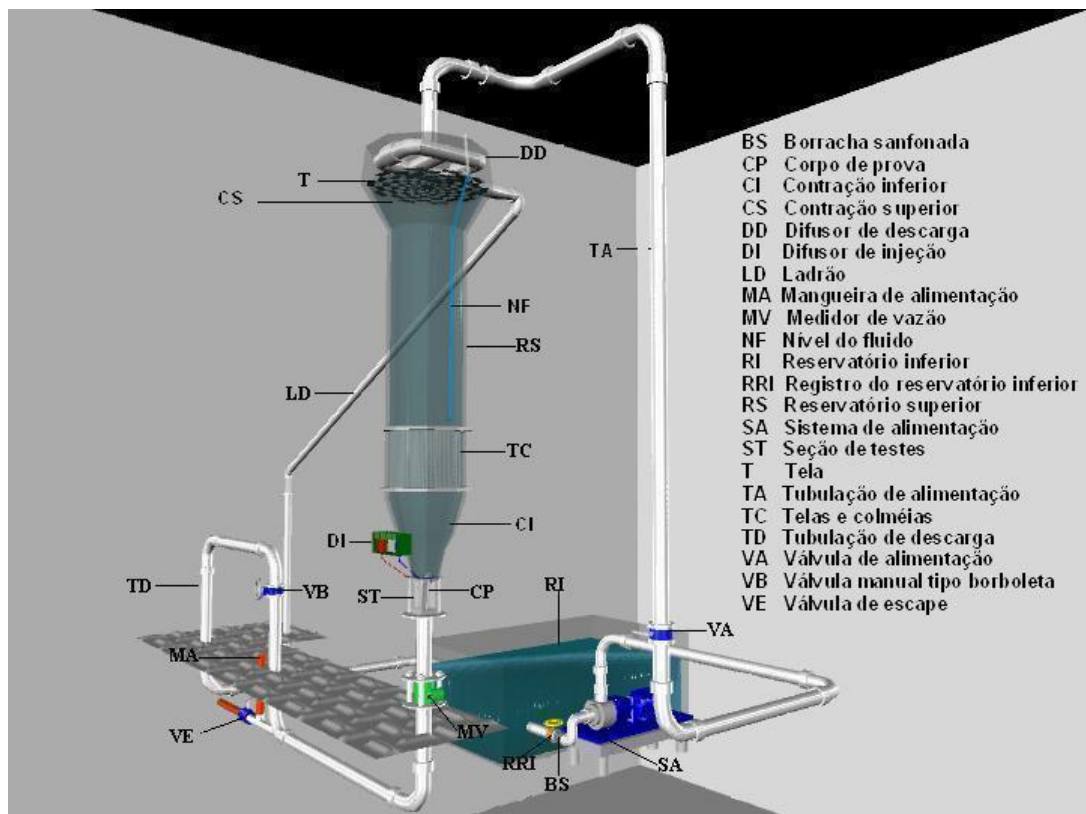
outras instalações experimentais complementares, tais como os canais e os túneis aerodinâmicos.

No presente trabalho, um túnel hidrodinâmico vertical foi utilizado para investigar experimentalmente o escoamento ao redor de uma determinada geometria em um canal dispoendo de protuberâncias parietais, tal configuração pode ser observada em placas de circuitos eletrônicos.

3.2 DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

O túnel hidrodinâmico do Laboratório de Visualização de Escoamentos do Departamento de Engenharia Mecânica, UNESP/ Ilha Solteira foi construído de acordo com as instalações do TH1 existente no *Laboratoire de Visualisation Hydrodynamique* do *ONERA* (*Office National d'Etudes et Recherches Aérospatiales*), localizado em Chantillon, França. O esquema da instalação pode ser visto na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Ilustração esquemática do túnel hidrodinâmico vertical.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Esse equipamento é composto de um reservatório superior (RS) munido de tela (T), telas e colméias (TC), uma contração inferior (CI), uma contração superior (CS), em sua parte externa encontra-se um nível do fluido (NF), uma seção de testes (ST), corpo de prova (CP), um medidor de vazão (MV), uma válvula do tipo borboleta (VB) que permite o controle da vazão do escoamento no interior da seção de testes, seguindo para a tubulação de descarga (TD).

Logo abaixo da (VB) na tubulação do subsolo encontram-se uma mangueira de alimentação (MA) e uma válvula de escape (VE). O ladrão (LD) situado no topo do túnel, limita o nível no reservatório superior evitando assim o transbordamento.

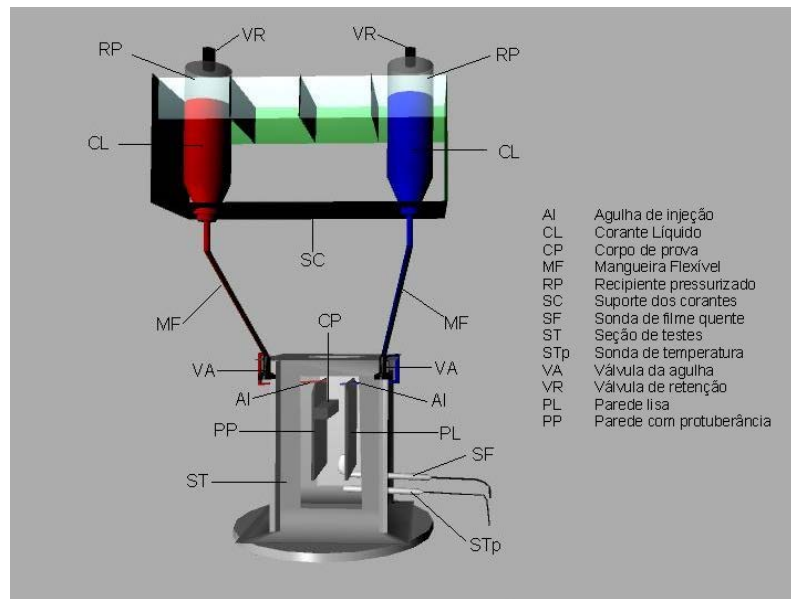
Completando a instalação, o sistema de abastecimento (SA) é composto por um registro do reservatório inferior (RRI) de 3 polegadas, seguido de um borracha sanfonada (BS). Essa borracha é usada para atenuar vibrações na parede do reservatório inferior, na qual está inserida uma bomba centrífuga que é instalada na sala de máquinas, no subsolo ao lado do laboratório. Na (TA) é inserida uma válvula do tipo borboleta (VB), instalada no interior do laboratório. Seguindo a (TA) em sua parte superior, há um difusor de descarga (DD), que semelhante a um chuveiro em forma de um H fechado.

Os principais componentes do túnel hidrodinâmico vertical serão apresentados detalhadamente a seguir.

3.2.1 Seção de testes

A seção de testes do túnel possui seção transversal quadrada de 146 á 146 mm, com cantos cortados e 500 mm de comprimento. Construída integralmente em alumínio aeronáutico 4050, essa seção possui quatro amplas janelas de observação, que a tornam particularmente adequada para a realização de ensaios de visualização de escoamentos. Detalhes da seção teste são apresentados na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Seção de testes.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

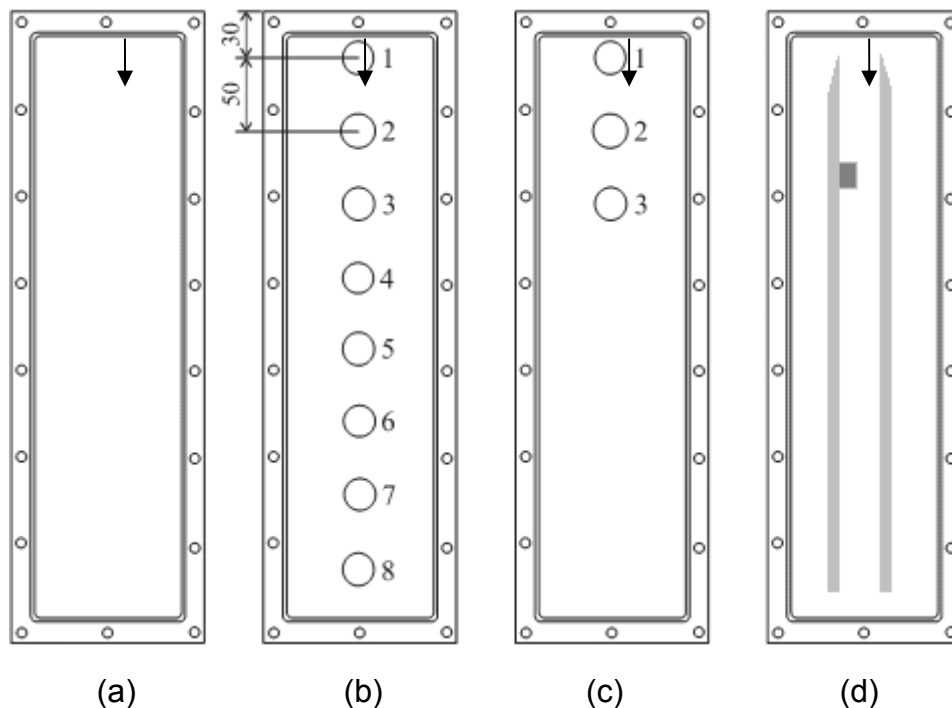
Cada canto interno da seção de testes é ocupado por um prisma de seção transversal triangular, que se estende ao longo de todo o seu comprimento, conferindo-lhe o formato quadrado de cantos cortados. Esses prismas afunilam-se em direção à jusante, de tal forma que o volume útil da seção de testes seja ligeiramente divergente, com o objetivo de atenuar o efeito do crescimento da camada limite sobre o perfil de velocidades. Tal prática de ajustar a área da seção de testes por meio de prismas instalados nas arestas da seção é aplicada convencionalmente em túneis aerodinâmicos de baixa velocidade. Assim, a área da seção transversal da seção de testes varia entre $177,2 \text{ cm}^2$, na entrada, e $192,5 \text{ cm}^2$, na saída. Os modelos de ensaio são fixados na seção de testes em uma área equivalente a cerca de 184 cm^2 .

As quatro janelas da seção de testes são fixadas, por parafusos de aço inoxidável, à estrutura metálica da seção, com vedação feita por meio de anel de borracha do tipo *o-ring* de 4 mm de diâmetro. Essa configuração permite a fácil e rápida substituição das janelas por outras com características mais adequadas à realização de um determinado ensaio e garantem uma boa vedação, mesmo após repetidas operações de retirada e colocação das janelas. Em geral, as janelas são confeccionadas em chapas de acrílico transparente com 12 mm de espessura e boa qualidade óptica, de forma a permitir a visualização do escoamento no interior da seção de testes. Através de orifícios existentes em algumas janelas, pode-se

introduzir agulhas para a injeção de corantes no escoamento, assim como fios metálicos para a geração de bolhas de hidrogênio, sondas de filme quente e outros dispositivos de medição.

No atual trabalho, quatro diferentes tipos de janelas foram especialmente confeccionadas para a realização dos ensaios propostos. Todas as janelas foram fabricadas em chapa de acrílico transparente com 12 mm de espessura. A janela traseira possui a configuração mais simples e consiste de uma janela lisa, como ilustrado na Figura 3.3(a).

Figura 3.3 - Configuração das janelas utilizadas na seção de testes do túnel.



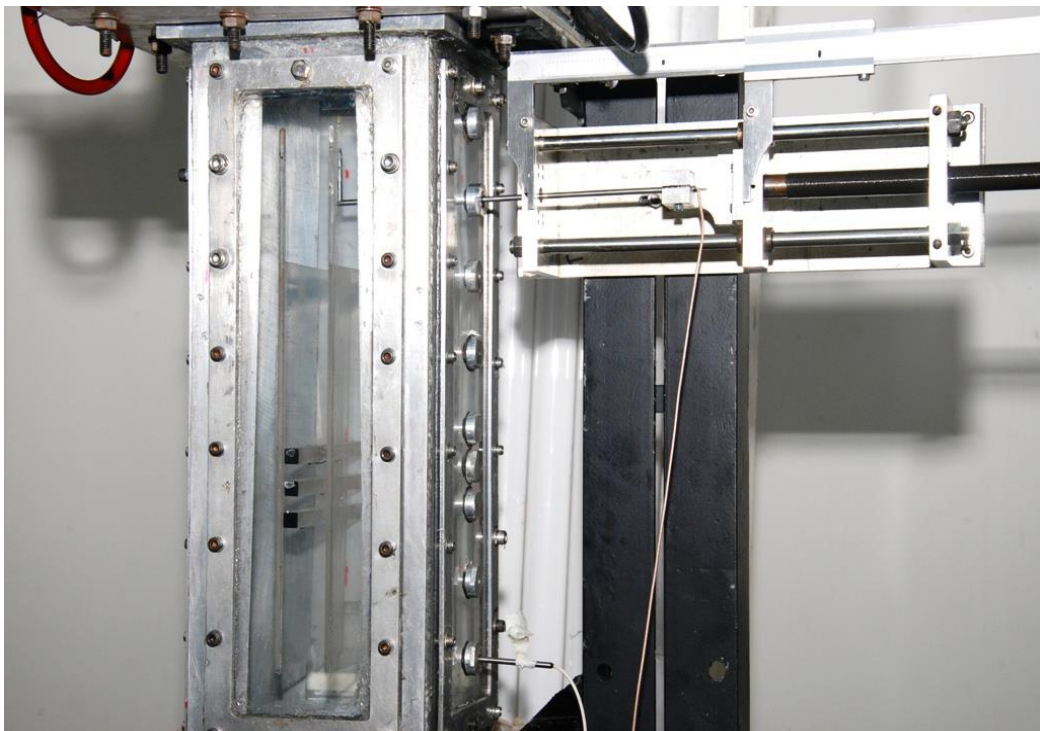
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

As janelas laterais podem apresentar duas diferentes configuração. Para os ensaios de anemometria de filme quente e injeção de corante líquido, foi utilizada uma janela lateral com 8 orifícios, cada qual situado numa estação identificada por números de 1 a 8, conforme ilustrado na Figura 3.3(b).

A outra janela lateral possui três orifícios, localizados nas estações identificadas por números de 1 a 3, que podem ser utilizados para injeção de corantes líquidos conforme ilustra a Figura 3.3(c). Esses orifícios são vedados por bujões metálicos, apenas para garantir a vedação, ou por retentores de borracha, para a introdução de fios ou sondas no interior da seção de testes.

Finalmente, a janela posterior, ou seja, a janela frontal abriga o canal com as protuberâncias nas paredes, conforme ilustrado na Figura 3.3(d). Na imagem da Figura 3.4 é possível observar a seção de testes com o canal inserido em seu interior. Na parte superior direita observa-se o posicionador de sondas de operação manual, construído no próprio laboratório, utilizando-se um paquímetro de 250 mm para efetuar a medição da posição da sonda de filme quente no interior da seção de testes. Nessa foto, a sonda encontra-se instalada em um suporte de sonda do tipo “L”. Na parte inferior direita, observa-se a presença de uma sonda de temperatura que realiza o monitoramento constante da temperatura do fluido de ensaio. A decisão de construção de um reservatório subterrâneo de grandes dimensões produz mínimas alterações de temperatura durante os ensaios. Observa-se que a janela lateral, onde se instalou a sonda, apresenta uma nova configuração de furos para melhor posicionamento da sonda. Finalmente, na fotografia observa-se o canal com três protuberâncias alojado no interior da seção de testes.

Figura 3.4 - Detalhe da seção de testes do túnel em operação.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

3.2.2 Canal com protuberâncias parietais

O canal é composto de duas placas de laminado de policarbonato de 3 mm de espessura, soldadas na janela do túnel com metacrilato de metila, com uma distância fixa entre elas de 30 mm, conforme apresentado na Figura 3.3(d). Em uma das placas são afixadas as protuberâncias de seção transversal quadrada com 10 mm de lado. O número de protuberâncias e a distância entre elas variam de acordo com o ensaio realizado. Essa é uma configuração de trabalho em que pode-se facilmente alterar a distância entre as placas (largura do canal), simplesmente pela substituição da janela frontal.

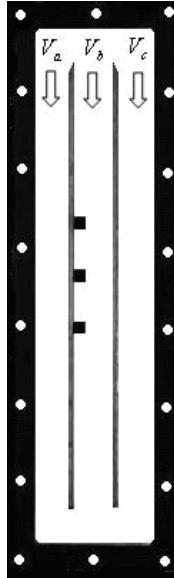
Outro ponto que merece destaque para a configuração do canal montado no interior da seção de testes do túnel hidrodinâmico é o controle da camada limite. Em outras palavras, na extremidade superior do canal as chapas de policarbonato são cortadas em bisel e a camada limite tem sua origem na entrada do canal. Dessa forma, as protuberâncias podem ser afastadas ou aproximadas da entrada do canal para observação do efeito da camada limite sobre as protuberâncias.

Na Figura 3.5 observa-se que a seção de testes encontra-se dividida em três canais distintos, ou seja, os dois canais laterais e o canal central com as protuberâncias em suas paredes internas. Em cada um dos três canais, a queda de pressão individual apresenta valores diferenciados e, conseqüentemente, valores de vazões diferenciados. Em outras palavras, a velocidade média do escoamento em cada um dos três canais apresenta valores diferentes. As medidas do perfil de velocidade no interior dos canais permitiram relacionar a velocidade média no interior do canal com as protuberâncias parietais, com a velocidade média na seção de testes. Com os ensaios realizados com anemometria de filme quente observa-se uma diferença de velocidade média entre os canais, sendo que no canal central, que possui as protuberâncias parietais, a velocidade média é aproximadamente 15% inferior em relação aos canais laterais. Como demonstrado na Figura 3.5, observa-se três canais, o canal de interesse é o canal central representado por V_b e os canais laterais representados por V_a e V_c .

É bem provável que a velocidade média no canal central (V_b) apresentou diferença comparando com os canais laterais, devido as protuberâncias obstruindo

em parte o canal central. Enquanto que as velocidades médias nos canais laterais apresentaram semelhança.

Figura 3.5 - Corpo de prova inserido na seção de teste.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

3.3 OPERAÇÃO DO TÚNEL

Antes do início dos ensaios torna-se necessário o abastecimento da instalação através da alimentação (MA) e deve-se utilizar uma vazão de aproximadamente 50 l/h apenas, principalmente na seção de teste. Após o enchimento da seção de testes pode-se prosseguir com a operação de abastecimento a uma vazão de 1 000 l/h, até o fluido ultrapassar as colméias. Em seguida, o abastecimento do reservatório superior pode ser completado com auxílio do sistema de abastecimento a uma vazão mais elevada. Dessa forma, evita-se a formação de bolhas na seção de testes e nas telas e colméias.

O túnel pode funcionar segundo dois modos de operação: o modo contínuo e o modo intermitente ou *blow-down*. No modo contínuo, o reservatório superior do túnel é continuamente abastecido durante os ensaios, com as válvulas VA e VB (ou VE) ajustadas de forma a manter o nível de água constante. Pode-se manter o nível constante com ajuda do ladrão existente na extremidade do reservatório superior ou então manter o nível constante a qualquer cota do reservatório superior para obter melhores valores do nível de turbulência

No modo *blow-down*, por sua vez, após o abastecimento do reservatório superior, o sistema de abastecimento é desligado e aguarda-se até que o fluido armazenado se estagne completamente. Após esse período de repouso, inicia-se o ensaio, que transcorre na medida em que o reservatório superior é esvaziado.

O modo de operação contínuo é mais indicado para a realização de ensaios em que se deseja que as condições de ensaio permaneçam constantes ao longo do tempo. Nesse modo de operação, podem ser realizados ensaios com duração virtualmente ilimitada, mantendo-se a velocidade média do escoamento no interior da seção de testes praticamente constante no decorrer do ensaio. Já no modo de operação *blow-down*, a duração dos ensaios é limitada pela capacidade de armazenamento do reservatório superior e a velocidade média do escoamento decresce continuamente com o passar do tempo, à medida que o nível do fluido diminui.

Para o modo de operação intermitente, o tempo de espera pode variar atingindo até 12 horas, para ensaios a baixos números de Reynolds, e para velocidade maiores, cerca de 2 horas de espera garantem um nível de turbulência bastante reduzido nos ensaios.

O piso do laboratório foi construído com um recobrimento de resina epóxi que tem se mostrado plenamente adequado, pois, nesse tipo de instalação, os vazamentos são frequentes e a drenagem da água derramada torna-se absolutamente necessária.

A operação do túnel exige um ambiente isento de exposição à radiação direta ou indireta. Observou-se que os raios solares entrando pelas janelas, mesmo recobertas por *isofilme*, e refletidos pelo piso provocavam forte convecção na seção de testes durante o período de espera para a partida ou mesmo durante os ensaios de baixa velocidade. Por esse motivo, as vidraças do laboratório foram cobertas por uma película de alumínio comercial denominada de *isofoil* para reflexão da energia radiante impedindo sua entrada no Laboratório. Adicionalmente, encontra-se instalado no laboratório, o sistema de ar condicionado que deve garantir uma melhor condição de operação do aparato experimental, mantendo a temperatura ambiente constante.

Na Figura 3.6 observa-se uma vista da instalação. No primeiro plano, à esquerda, visualiza-se a válvula de controle de vazão manual, (VB), e no centro da imagem o túnel. Logo abaixo da seção de testes, observa-se a transição da seção

quadrada de cantos cortados para uma seção circular de 100 mm de diâmetro para abrigar a tubulação de descarga (TD). Todos os flanges utilizados na tubulação de descarga são de material termoplástico PVC.

Na Figura 3.7 é mostrada uma vista do Laboratório Visualização com o túnel hidrodinâmico em primeiro plano. Detalhes dos acessórios do túnel são apresentados no Apêndice C.

Figura 3.6 - Vista do túnel hidrodinâmico mostrando a seção de testes e parte da estrutura de sustentação.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 3.7 - Vista do Laboratório de Visualização mostrando o túnel em primeiro plano.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

3.4 CONCLUSÃO

Os túneis hidrodinâmicos verticais de ação pela gravidade permitem a obtenção de escoamentos com baixa intensidade turbulenta relativa, mesmo para pequenas velocidades, permitindo a obtenção de ensaios em velocidades relativamente pequenas. Adicionalmente, a visualização em meio líquido é mais facilmente realizável do que em meio gasoso, tornando esse tipo de equipamento adequado para ensaios de número de Reynolds moderados.

Comparado aos túneis aerodinâmicos, os números de Reynolds obtidos em um túnel hidrodinâmico são significativamente inferiores, embora a viscosidade cinemática da água alcance valores, aproximadamente, 15 vezes menores do que a do ar.

Para o presente estudo foi realizado a reconstrução do túnel hidrodinâmico que encontrava-se desativado desde 2003 em razão de um acidente ocorrido no antigo Laboratório de Visualização. O túnel reconstruído sofreu alterações significativas, em relação à instalação antiga, permitindo um aumento sensível em sua capacidade operacional.

Na maioria das vezes, os estudos experimentais necessitam de uma boa dose de paciência e perseverança para a obtenção de um resultado cientificamente explorável. Dessa forma, a operação do túnel é repleta de pequenos detalhes envolvendo muitas das possíveis interferências no experimento. Assim, o cuidado do experimentalista deve ser para isolar tais influências para obtenção de um experimento com o mínimo possível de interferências. Infelizmente, tais procedimentos não são publicáveis e formam aquilo que chamamos de “cultura de túnel” uma série de recomendações aos operadores do túnel que são repassadas de geração em geração de experimentalistas. Com o recomeço das atividades do túnel, muitos desses procedimentos verbais haviam se perdido e tiveram que ser recuperados para os futuros operadores da nova instalação.

4 ANEMOMETRIA DE FIO QUENTE

4.1 INTRODUÇÃO

Dentre os principais instrumentos utilizados na medição de velocidade em fluidos destacam-se os anemômetros de fio e filme quente. Particularmente adequados para aplicação em laboratório, esse tipo de equipamento realiza medidas com alta resolução espacial e temporal, podendo ser utilizado no escoamento de líquidos e gases com níveis de turbulência baixo e moderado – geralmente inferior a 25%.

Seu princípio de funcionamento é razoavelmente simples e baseia-se na transferência de calor por convecção entre um pequeno elemento metálico aquecido eletricamente e o fluido circundante. Assim, não apenas a velocidade local instantânea do escoamento pode ser medida com o auxílio de um anemômetro de fio quente, mas qualquer propriedade capaz de alterar as condições de transferência de calor entre o elemento sensor e o fluido pode ser potencialmente quantificada. Em vista disso, a anemometria de fio quente tem sido empregada, também, para detectar mudanças na temperatura do fluido ou na concentração de misturas de gases, bem como na determinação da fração de vazio em escoamentos bifásicos, segundo (BRUUN, 1995).

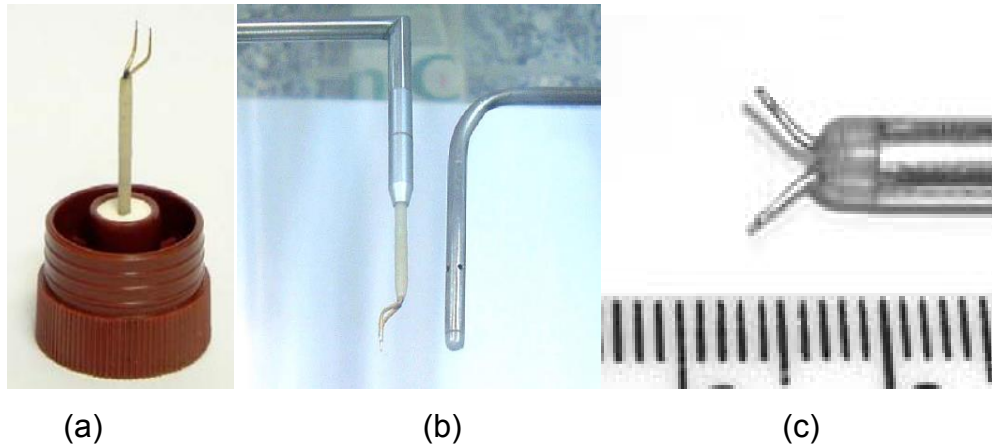
No presente trabalho, a anemometria de fio/filme quente é utilizada como principal ferramenta de análise quantitativa de propriedades do escoamento. Na qualificação do túnel hidrodinâmico, essa técnica é empregada na determinação dos perfis de velocidade e níveis de turbulência no interior da seção de testes.

4.2 PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO

De maneira geral, todos os anemômetros de fio quente são compostos por duas partes fundamentais: uma sonda, com seu respectivo suporte e cabo de ligação, e um circuito eletrônico, que incorpora uma ponte de resistores. A sonda é constituída por um elemento sensor – em geral um fio ou filme de tungstênio, níquel ou platina, com cerca de 1 mm de comprimento e alguns poucos microns de diâmetro ou espessura, montado sobre uma haste de dimensões reduzidas, confeccionada em resina epóxi ou material cerâmico, como mostrado na Figura 4.1.

A escolha entre os vários tipos de sonda existentes depende fortemente da aplicação à que se destinam.

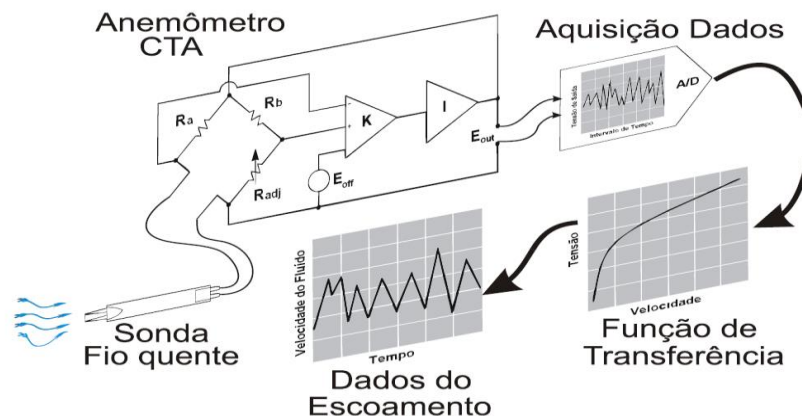
Figura 4.1 - Diferentes tipos de sondas anemométricas de fio quente: (a) sonda comercial Dantec; (b) sonda sendo calibrada com auxílio de um micro tubo de Pitot em um túnel aerodinâmico; (c) sonda de fabricação própria.



Fonte: Eguti e Vieira (2005).

Em sua versão mais usual, conhecida como anemômetro de temperatura constante (CTA), o elemento sensor representa um dos resistores da ponte, tal como ilustra a Figura 4.2. Quando exposto ao movimento do fluido, esse elemento tende a se resfriar, provocando alterações em sua resistência elétrica. Nessas condições, o controlador do circuito é imediatamente acionado, ajustando automaticamente o valor da corrente elétrica para restabelecer a temperatura do sensor e, conseqüentemente, o equilíbrio da ponte.

Figura 4.2 - Elementos básicos da cadeia de medição do anemômetro CTA.



Fonte: Eguti e Vieira (2005).

Assim, a velocidade local instantânea do escoamento pode ser determinada, medindo-se a diferença de tensão na saída do circuito que alimenta a sonda e realizando-se, em seguida, a conversão desse sinal elétrico em velocidade, com o auxílio de uma correlação.

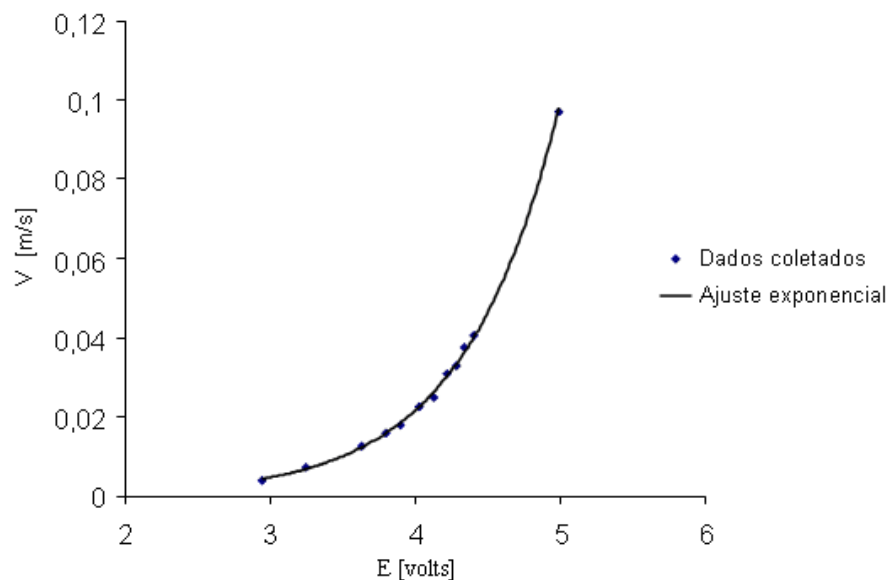
No trabalho de Lindquist (2000) foi utilizado a Lei de King para a calibração, sendo que no presente trabalho essa curva não apresentou ajustes satisfatórios. Dessa forma, a curva de calibração a ser usada neste trabalho foi gerada por meio da função exponencial dada por,

$$U = A \times e^{BE} \quad (4.1)$$

na qual U é a velocidade relativa entre a sonda e o fluido [m/s], E é a tensão (V), a constante de Euler ($e = 2,7182$), A e B são as constantes de ajuste da curva.

Na Figura 4.3 apresenta-se a curva de calibração tensão/velocidade, para a qual o erro do ajuste foi inferior a 1%

Figura 4.3 - Curva de calibração da sonda.

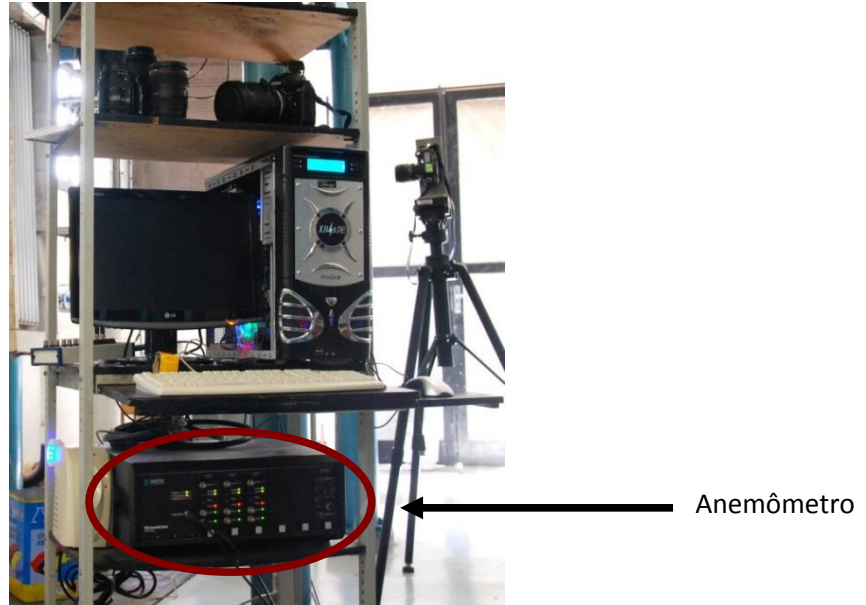


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A Figura 4.4 mostra o anemômetro utilizado no presente trabalho, que se baseia na plataforma Stream Line 90N10, produzida pela Dantec Measurement Technology. Esse anemômetro possui três módulos CTA 90C10, que permitem a

medição simultânea de até três componentes da velocidade local e instantânea. Os dados são coletados em uma placa A/D NI-DAQmx 8.7.1 (16 bits), da National Instrument.

Figura 4.4 - Anemômetro de temperatura constante Dantec Stream Line.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

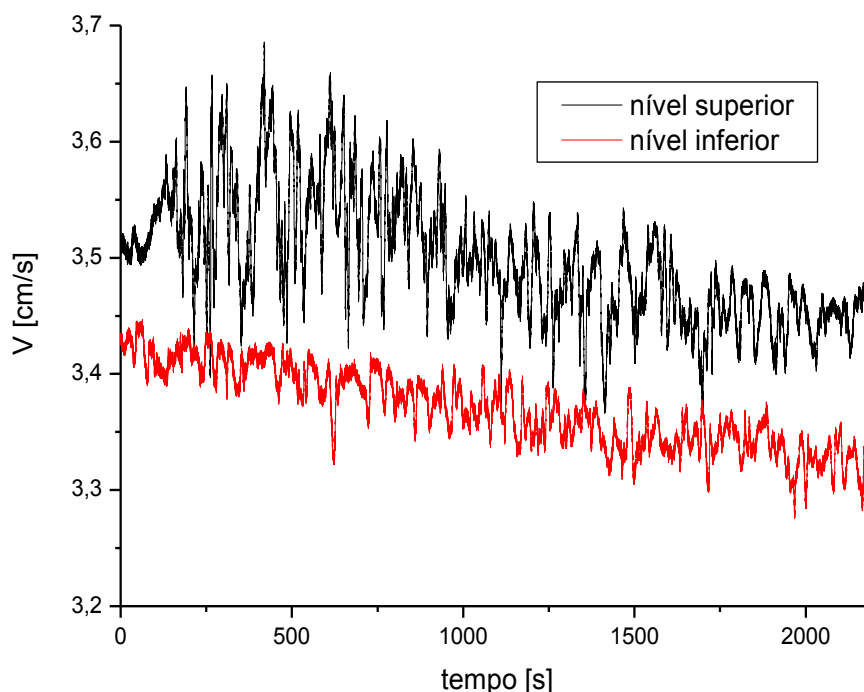
4.3 DADOS COLETADOS DO NOVO TÚNEL HIDRODINÂMICO COM ANEMOMETRIA DE FIO QUENTE

A Figura 4.5 mostra as distribuições de velocidade obtidas a partir dos dados coletados pela sonda de filme quente *Dantec 55R11* conectada ao anemômetro de temperatura constante. Nessa medição nenhum corpo de testes é posicionado na seção de ensaios e a sonda anemométrica é posicionada exatamente no local do corpo de ensaios. Os dados referem-se ao túnel completamente cheio até a altura máxima do ladrão e depois de 12 horas de descanso a válvula de controle (VB) é aberta permitindo uma vazão inicial de 2 000 litros por hora de um ensaio em *blow-down*. Após 1 minuto da abertura da válvula do túnel inicia-se a aquisição do sinal de velocidade na frequência de aquisição de 15 pontos por segundo, que se estende por 36,4 minutos, totalizando 32 768 pontos de medição, representados na cor vermelha do gráfico da Figura 3.4. Nessa fase da aquisição o nível do túnel permanece sempre acima da contração superior. Concluída a primeira fase, inicia-se a segunda fase de aquisição de sinais quando o nível do reservatório desce

imediatamente logo abaixo da contração. O sinal obtido no anemômetro quando o nível de água encontra-se abaixo da contração inferior, também obtido com uma frequência de aquisição de 15 pontos por segundo e 32 768 pontos de medição, encontra-se representado na cor preta no gráfico da Figura 4.5, sobreposto ao primeiro resultado. Apesar do ensaio ser realizado em tempos distintos, apenas para efeito comparativo o tempo dos dois ensaios encontram-se sobrepostos.

Para o túnel antigo havia uma mudança brusca de seção transversal no reservatório superior, como mostrado esquematicamente na Figura 1.7. Tal mudança brusca de seção transversal provocava um elevadíssimo nível de turbulência quando o túnel era operado com o nível acima dessa mudança de seção. Para minimizar esse tipo de problema causado pelo aumento abrupto da seção transversal do reservatório superior, optou-se, para o projeto do novo túnel, por uma transição de seção ocorrendo de forma suave por meio de uma contração aerodinâmica, como mostrado na Figura 3.1. Dessa forma, o novo túnel hidrodinâmico permite a realização de ensaios em modo intermitente com o nível acima da contração superior e imediatamente abaixo da contração aumentando, em muito, o tempo de duração dos ensaios em regime permanente.

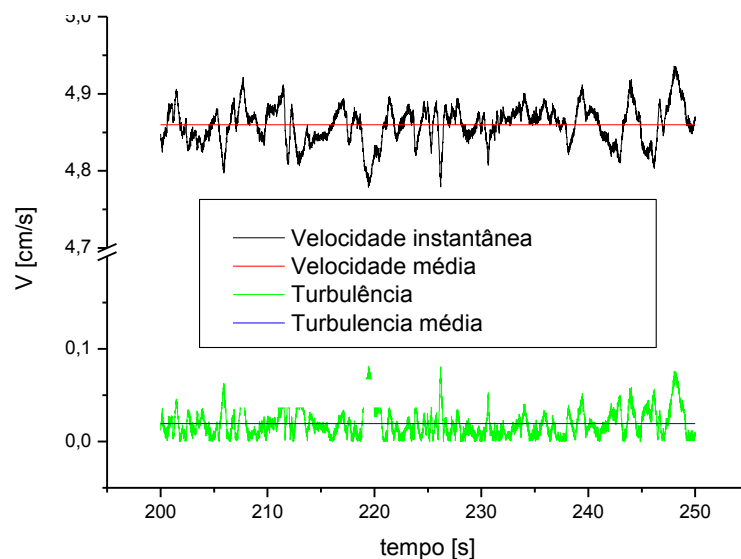
Figura 4.5 - Dados da operação intermitente de longa duração do túnel hidrodinâmico.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A medida da turbulência do túnel foi realizada utilizando-se uma frequência de amostragem de 100 pontos por segundo e um tempo de amostragem de 50 segundos, totalizando 5 000 pontos de medição. A Figura 4.6 mostra, na parte superior, a velocidade instantânea (em preto) e a velocidade média (em vermelho) no período de aquisição de 200 a 250 segundos em vermelho. Por sua vez, na parte inferior da Figura 4.6, a flutuação instantânea encontra-se representada em verde e a flutuação média em azul. O valor numérico da velocidade média é de 4,86 cm/s e a turbulência média é de 0,02 cm/s, produzindo uma turbulência relativa de apenas 0,4%. Comparativamente a outras instalações de mesmas características pode-se afirmar que se trata de um túnel de baixa intensidade turbulenta.

Figura 4.6 - Determinação da turbulência no túnel hidrodinâmico.

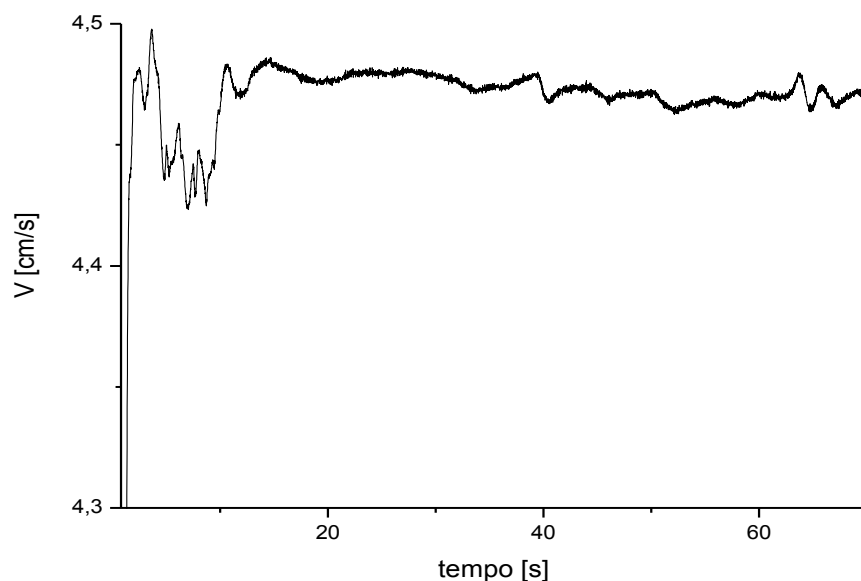


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Outro teste que foi realizado é o de abertura súbita da válvula de controle de vazão (VB), mostrado na Figura 4.7. Nesse teste, também sem um corpo de provas na seção de testes e a sonda posicionada exatamente no local do corpo de testes, o túnel é, de modo semelhante ao ensaio anterior, cheio até o nível desejado, que pode ser acima da contração superior ou abaixo da contração inferior, e aguarda-se o tempo necessário para que a água no interior do reservatório superior atinja o repouso. Então, a válvula de controle de vazão é aberta subitamente, provocando uma série de instabilidades do fluxo devido à aceleração brusca do escoamento.

Torna-se importante ressaltar que uma parte da amplitude das instabilidades provocada pelo rápido aumento de velocidade do escoamento deve-se também às vibrações induzidas pela haste na ponta de prova. Ou seja, o escoamento ao se acelerar provoca um aumento significativo do arrasto hidrodinâmico sobre a haste, que por sua vez sofre uma pequena deflexão. Apesar da deflexão da haste ser muito pequena, a sonda acusa tal deflexão e confunde o sinal de vibração com o sinal de turbulência. Testes realizados com o comprimento da haste diminuído mostraram uma pequena diminuição na amplitude das oscilações nos primeiros segundos após a abertura da válvula, mostrando que ocorre uma vibração da haste devido à rápida aceleração do fluxo. Entretanto, o importante a ser observado na Figura 4.7 diz respeito ao que ocorre após 12 segundos, aproximadamente, após a abertura da válvula, quando o escoamento torna-se bastante estável, observando-se uma turbulência relativa muito pequena. Esse tipo de teste mostra a estabilidade da instalação e foi repetido diferentes vezes, sempre com o mesmo resultado, mostrando que as instabilidades iniciais tendem a se amortecerem e o escoamento atinge um valor estável antes do início dos testes. Salienta-se que, no início de um ensaio, a abertura da válvula controladora de vazão – que pode ser a válvula (VB) ou, dependendo do ensaio, a válvula (VE) – deve ser realizada o mais suavemente possível até atingir o valor de velocidade desejado, para introduzir as menores perturbações possíveis no escoamento.

Figura 4.7 - Aceleração do escoamento na seção de testes.

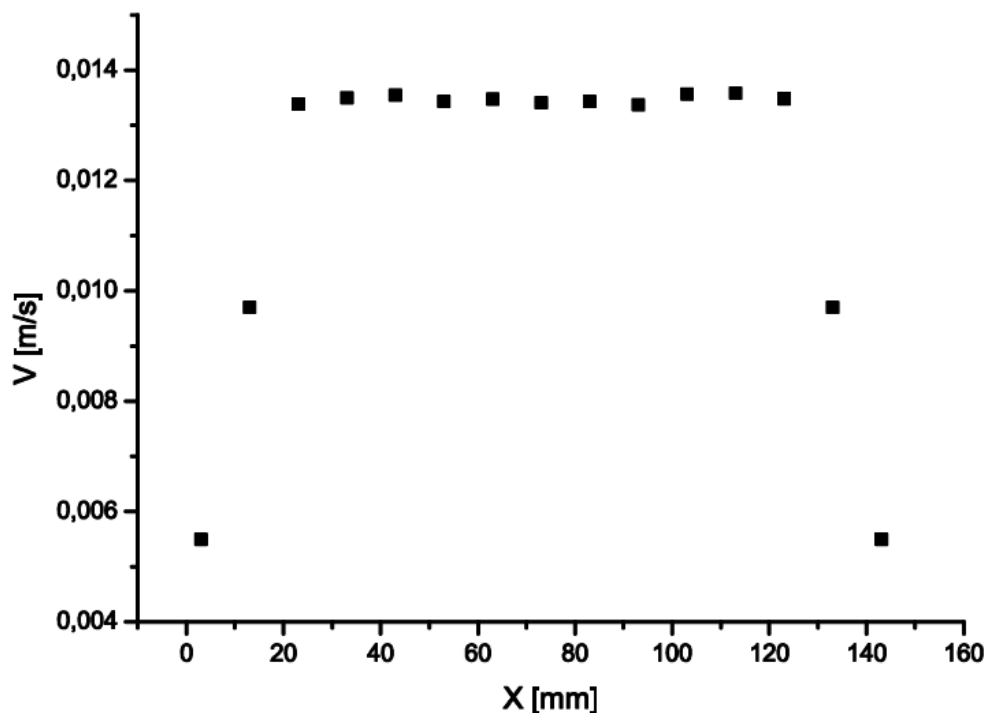


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Para o caso inverso, em que o túnel é desacelerado em regime intermitente, as perturbações amplificam-se significativamente provocando um escoamento altamente perturbado no interior da seção de testes, até mesmo com a ocorrência de recirculações dissipando-se muito lentamente ao longo do tempo. Nesses casos, o ensaio é suspenso, as válvulas de controle fechadas, o tanque é novamente abastecido e, após o tempo necessário para que o fluido entre em repouso, o ensaio é recommçado.

A Figura 4.8 mostra o perfil de velocidade obtido na seção de testes com a sonda posicionada na altura de instalação do corpo de provas mostrando uma boa homogeneidade, mesmo para baixas velocidades de ensaios.

Figura 4.8 - Perfil de velocidades na seção de testes.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

4.4 CONCLUSÃO

Anemometria de fio/filme quente é uma importante ferramenta de análise experimental dos escoamentos, com uma alta resolução temporal extensamente utilizada no estudo de escoamentos turbulentos.

No presente trabalho, os dados adquiridos por meio da anemometria de filme foram utilizados para a qualificação do escoamento no interior da seção de testes do aparato experimental. De fato, o objetivo de um túnel hidrodinâmico é a geração de um escoamento no interior da seção de testes com um perfil de velocidades homogêneo e estável.

Adicionalmente, a calibração das sondas de filme quente foram realizadas utilizando-se o próprio túnel hidrodinâmico, da mesma forma que se utiliza um túnel aerodinâmico para calibração das sondas de Pitot.

5 VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO NO INTERIOR DE CAVIDADES COM PROTUBERÂNCIAS PARIETAIS

A visualização de escoamentos explora globalmente os campos físicos do escoamento, em contraste com as sondas locais, tais como: tubo de Pitot, anemômetro de fio quente, anemômetro laser e outras que, embora sejam mais precisas, trazem informações pontuais. A visualização experimental de escoamentos e as medições pontuais contribuem de maneira sinérgica para o desenvolvimento da ciência da mecânica dos fluidos. Um campo complexo do escoamento é mais bem entendido quando a sua visualização e as medições locais atuam em conjunto para alcançar um objetivo comum.

A visualização de escoamentos permite ainda, uma melhor interpretação dos fenômenos observados pela medição global (força, momento) ou ainda, por medições locais (pressão, velocidade), fornecendo quase sempre importantes informações complementares para essas medidas.

Desde os primeiros experimentos de Osborne Reynolds em 1883, os avanços na mecânica dos fluidos envolveram o contínuo desenvolvimento de novas técnicas para a visualização de escoamentos. Atualmente, os experimentalistas em mecânica dos fluidos sabem que se um fenômeno é visualizado, um grande passo foi tomado na direção de seu entendimento e na direção da solução dos problemas teóricos e experimentais envolvidos.

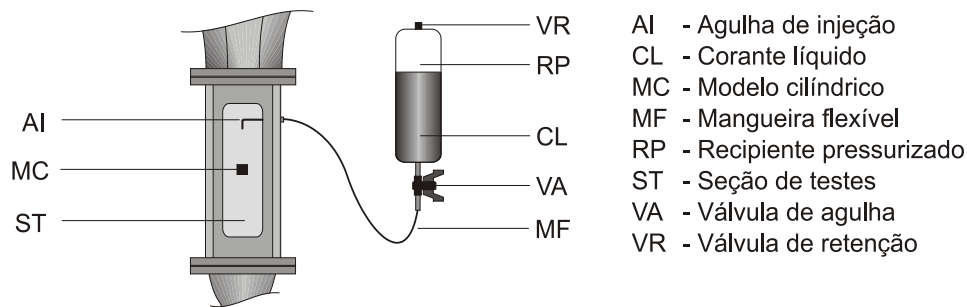
No presente trabalho, o escoamento foi visualizado usando corante líquido como agente visualizador e, em todas as visualizações, o escoamento ocorre no sentido descendente.

5.1 VISUALIZAÇÃO POR INJEÇÃO DE CORANTES LÍQUIDOS

A técnica de injeção de corantes líquidos é amplamente empregada em visualização, principalmente para números de Reynolds moderados ou baixos. Essa técnica baseia-se na injeção de um filete de corante líquido, conforme mostra a Figura 5.1. O dispositivo de injeção constituído de um reservatório pressurizado e conectado, por intermédio de uma mangueira flexível, a uma agulha dobrada em forma de cotovelo. Uma válvula do tipo agulha, preferivelmente de ajuste fino e operada manualmente, faz o controle da vazão de corante para o interior do

escoamento principal. A agulha de injeção é introduzida no interior da seção de testes através de uma de suas janelas, com sua extremidade posicionada à montante do modelo ensaiado.

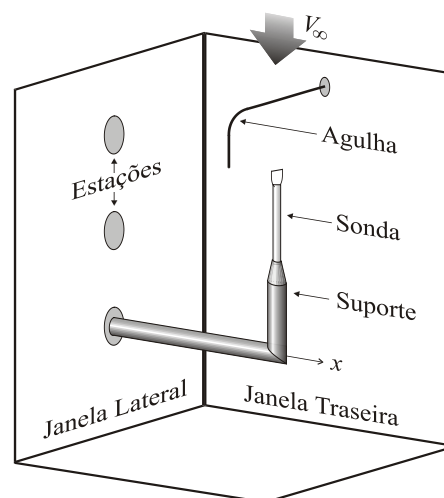
Figura 5.1 - Dispositivo típico de injeção de corantes líquidos.



Fonte: Lindquist et al. (2010).

O diâmetro da agulha de injeção é um fator importante a ser considerado, pois a esteira turbulenta que se forma à jusante da própria agulha pode introduzir sensíveis perturbações indesejáveis sobre o escoamento investigado. A fim de quantificar tal perturbação, Lindquist et al. (2010) realizou medidas anemométricas no túnel antigo, para determinar o perfil de velocidade à jusante de uma agulha com 0,7 mm de diâmetro externo, conforme ilustra a Figura 5.2.

Figura 5.2 - Arranjo experimental para a determinação da influência da agulha de injeção de corantes sobre a corrente livre no interior da seção de testes.

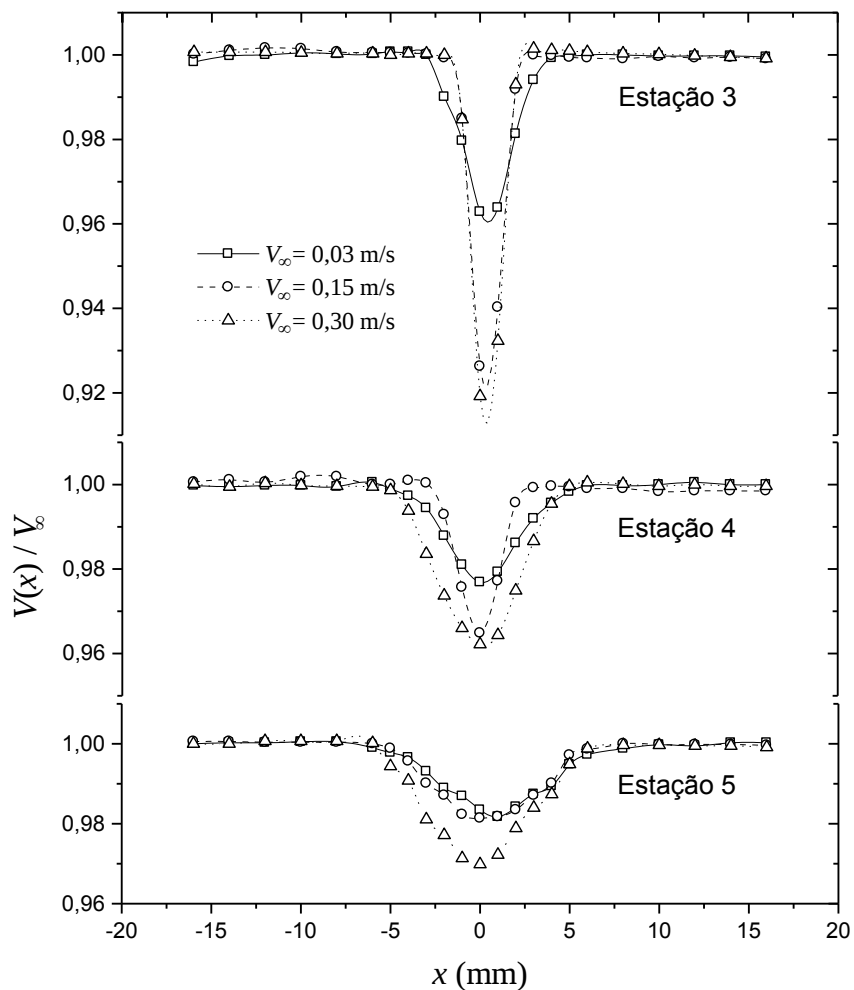


Fonte: Lindquist et al. (2010).

A agulha foi introduzida no interior da seção de testes através de um orifício localizado na janela lateral. Durante a realização dos ensaios, a válvula de controle de vazão de corante foi mantida fechada, ou seja, os testes foram conduzidos sem a injeção de corantes.

O suporte da sonda de filme quente, por sua vez, foi introduzido em três diferentes estações a jusante da agulha: estações 3, 4 e 5 da Figura 5.3, de forma a avaliar a extensão de sua influência sobre o perfil de velocidade da corrente livre. Em cada uma das estações, foram realizados ensaios com o túnel operando em regime contínuo, para três diferentes valores da velocidade da corrente livre. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.3.

Figura 5.3 - Perfis experimentais de velocidade a jusante de uma agulha de injeção.



Fonte: Lindquist et al. (2010).

Estes resultados mostram que existe uma forte influência da esteira produzida pela agulha sobre o escoamento, capaz de provocar uma deformação significativa no perfil de velocidade da corrente livre, que vai incidir sobre o modelo de testes. Nota-se, também, que o déficit de velocidade causado pelo arrasto da agulha é mais pronunciado na estação 3, localizada próximo à agulha. Mais a jusante, estações 4 e 5, observa-se que este déficit se atenua, sendo distribuído por uma região maior ao longo da direção perpendicular ao escoamento. Todavia, mesmo na estação 5, a velocidade na linha de centro ainda é 3% menor do que a velocidade da corrente livre não afetada pela agulha.

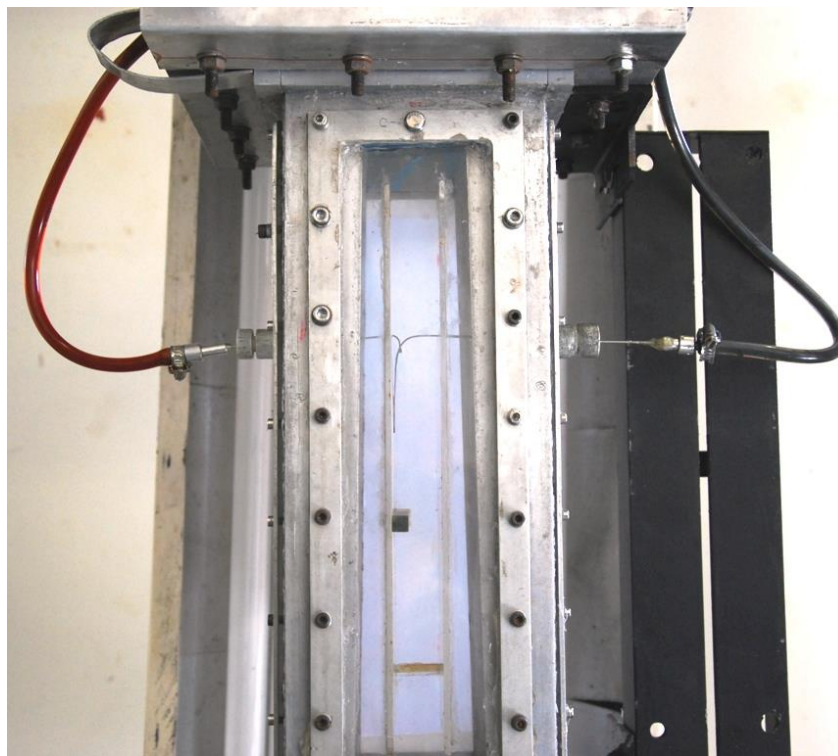
Como forma de eliminar este problema, nas visualizações efetuadas ao longo deste trabalho, utilizou-se uma agulha retrátil, que permitisse injetar corante sobre o modelo de testes e, logo em seguida, pudesse ser recolhida para junto da parede da seção de testes. Nessas condições, o corante, injetado em abundância sobre a superfície do corpo sólido, permanece retido apenas na camada limite do modelo, nas regiões de descolamento e recirculação, e na sua esteira, sendo lavado rapidamente nas demais regiões do escoamento, onde a velocidade mostra-se mais elevada. Decorridos alguns instantes da injeção, a perturbação causada pela presença da agulha à montante do corpo, assim como pela injeção do corante, é convectada pelo escoamento, possibilitando observar, com nitidez, alguns fenômenos que ocorrem no modelo e em sua esteira. Essa técnica é indicada para escoamentos com moderados números de Reynolds.

Embora existam tintas fabricadas especialmente para a visualização de escoamentos, os traçadores líquidos mais frequentemente utilizados são os corantes alimentícios e os corantes para pintura, solúveis em água. Dentre os primeiros, destacam-se as tintas fluorescentes, que podem ser excitadas pela luz ou pela ação de componentes químicos ou por meio de campos elétricos. Existem, ainda, as chamadas soluções fotocromáticas, que alteram sua coloração na presença de radiações eletromagnéticas. No presente trabalho utilizaram-se somente as soluções aquosas de corante de PVA e álcool.

A Figura 5.4 mostra a seção do túnel hidrodinâmico com o canal com uma única protuberância quadrada alojada na parede esquerda. Observam-se duas agulhas de injeção de corantes líquidos no interior do canal, sendo uma delas à esquerda, de cor avermelhada, a outra à direita, de cor preta. As agulhas movimentam-se horizontalmente e dessa forma, são posicionadas adequadamente

para permitir a visualização do escoamento. Uma vez a agulha devidamente posicionada, a injeção do corante é aberta. Então, a válvula de agulha é rapidamente fechada e a agulha é retirada de sua posição de injeção, sendo retraída até a parede do túnel, longe da entrada do canal. Dessa forma, não mais oferecendo interferência direta no experimento. Por alguns segundos, o corante permite visualizar o fenômeno desejado e as imagens são capturadas. A técnica é simples, mas exige um operador no manuseio das agulhas e outro para operação da câmera digital ou filmadora. Por alguns segundos é possível observar o escoamento no interior do canal, entre as cavidades e na esteira turbulenta produzida pelas cavidades. Durante esse curto período de tempo, deve-se checar o foco da câmera e a fotometria da imagem e tentar capturar o máximo possível de imagens para posterior escolha das melhores ou mais representativas. Ao final de um dia de trabalho são colhidas centenas de imagens fotográficas que deverão ser adequadamente catalogadas e devidamente armazenadas com as informações pertinentes do tipo de ensaio e o regime de escoamento.

Figura 5.4 - Seção de testes do túnel com os injetores de corantes.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

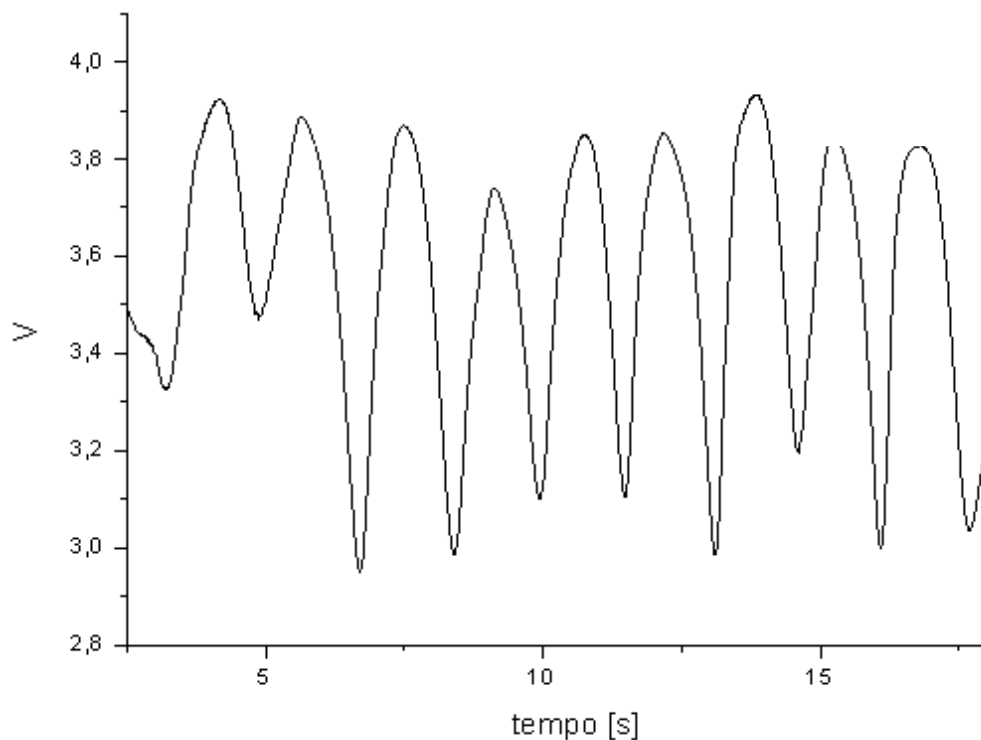
Os primeiros testes de visualização, que são realizados logo após o túnel entrar em operação, são simples verificações visuais em que a seção de testes encontra-se totalmente vazia, sem a presença do corpo de prova, e a injeção do corante ocorre apenas para certificação visual das características do escoamento. Ou seja, injeta-se corante nas paredes do túnel e observa-se se as linhas de corrente visualizadas próximo às paredes encontram-se paralelas. Produz-se um filete de corante e observa-se se o mesmo mantém-se estável em diferentes pontos da seção. Injetam-se corantes de diferentes cores em vários pontos da seção e observa-se se o escoamento apresenta a mesma velocidade e outros tipos de testes qualitativos que corroboram na certificação da qualidade do escoamento na seção de testes. São unicamente informações qualitativas e, via de regra, não são adequadamente documentadas, ou seja, nem sempre se realiza a captura da imagem ou então seu correto armazenamento com arquivamento do regime de trabalho. De maneira geral, tais ensaios são difíceis de serem registrados e, da mesma forma, a captura da imagem nem sempre produz imagens de qualidade aceitável cientificamente explorável. Por exemplo, no teste utilizando-se particulados sólidos intensamente iluminados para geração do fenômeno de scattering, observou-se a formação de uma pequena bolha de recirculação na entrada da seção de testes, imediatamente após a junção da contração inferior. A bolha de recirculação encontrava-se alojada em um dos cantos da seção de difícil acesso óptico. Para sua visualização, um pequeno espelho foi posicionado na seção de testes. Constatou-se posteriormente que o problema em questão era causado simplesmente por uma montagem equivocada de um dos prismas laterais da seção de testes.

Uma vez certificada a operação do túnel de forma visual e corrigidos os primeiros vazamentos, iniciam-se os primeiros ensaios que, no presente caso envolveram o estudo do escoamento ao redor de um cilindro quadrado. No túnel antigo, esses testes foram realizados com um cilindro circular dada a quantidade de informações experimentais e numéricas que o escoamento ao redor de um cilindro circular apresenta na literatura científica. No novo túnel, a opção por um cilindro quadrado deve-se unicamente à quantidade de informações coletadas ainda no túnel antigo. Os testes mostraram regimes de escoamentos muito próximos aos obtidos no antigo Laboratório de Visualização – (LINDQUIST et al., 2010). Dessa forma, na Figura 5.5(a) apresenta-se um resultado típico do sinal da sonda anemométrica mostrando as flutuações de sinal em decorrência da existência dos

vórtices na esteira de um cilindro quadrado para número de Reynolds igual a 153. A frequência dos vórtices pode ser obtida simplesmente pela aplicação de uma Transformada Rápida de Fourier (FFT). Para esse tipo de análise, determinação do número de Strouhal, não existe a necessidade de que a sonda seja calibrada, pois a sonda irá coletar apenas as flutuações. Por sua vez, na Figura 5.5(b) é mostrada a imagem visualizada da esteira de vórtices. Observa-se a esteira de vórtices e ao lado a sonda anemométrica em seu suporte.

Figura 5.5 - Escoamento ao redor de um cilindro quadrado $Re = 153$.

a) Registro das flutuações de velocidade na esteira do cilindro quadrado.



b) Visualização da esteira de vórtices de um cilindro quadrado.



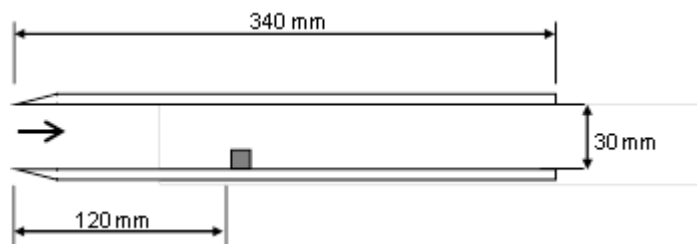
Fonte: Dados da pesquisa do autor.



5.2 VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM UMA PROTUBERÂNCIA NA PAREDE

Para o caso de um canal com uma única protuberância na parede, mostrado na Figura 5.6, a altura do canal é de 30 mm e a protuberância encontra-se a uma distância de 120 mm da entrada do canal. O número de Reynolds é baseado no comprimento da face do cilindro quadrado ($L=10$ mm). O comprimento total do canal é de 340 mm e a sua largura de 146 mm.

Figura 5.6 - Esquema do canal com uma única protuberância na parede.



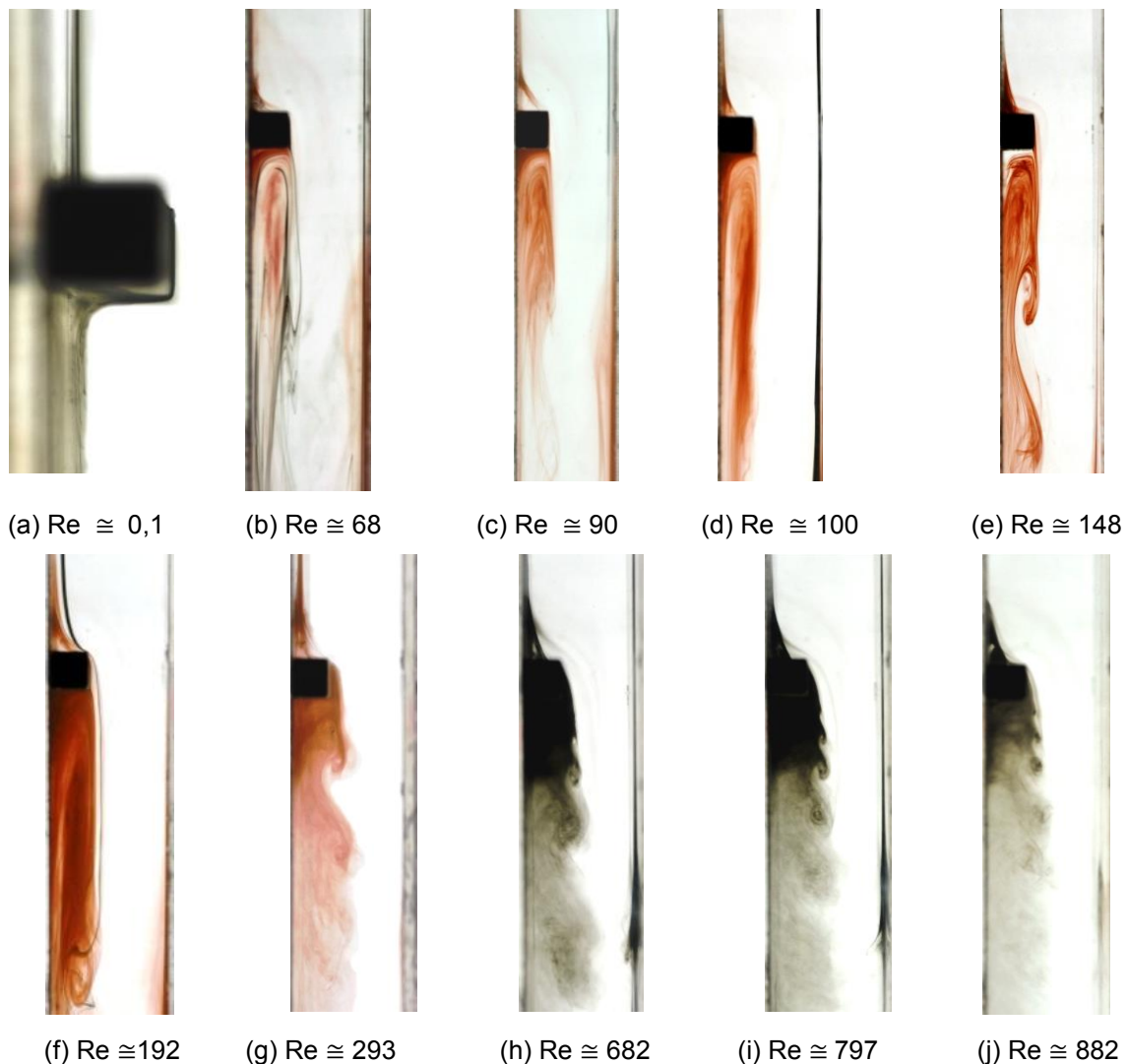
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Na Figura 5.7(a) a imagem é bem aproximada e observa-se o escoamento com número de Reynolds extremamente reduzido, ($Re \cong 0,1$), no qual os efeitos viscosos do escoamento são nitidamente dominantes. O filete de corante líquido utilizado como traçador, ao incidir contra a superfície frontal do modelo, contorna-o sem descolamento expressivo. Nesse caso, verifica-se um feixe de emissão independente do tempo, caracterizando um regime de escoamento no qual os efeitos viscosos assumem substancial importância. Para o caso de um cilindro quadrado longe do efeito das paredes e em regime de escoamento semelhante, o traçador, ao incidir contra a superfície frontal do modelo, divide-se em dois, contornando o corpo sólido sem descolamento significativo, como mostra a Figura 5.8(a), ($Re \cong 3,0$).

A Figura 5.7(b), ($Re \cong 68$), mostra que, ao contrário do verificado no regime anterior, os efeitos de inércia se fazem presentes de maneira mais significativa. Como resultado, o feixe de corante torna-se incapaz de acompanhar os contornos do obstáculo, notadamente em sua face posterior. Observa-se que o descolamento ocorre na aresta posterior, aresta de fuga, da protuberância. O recolamento da camada limite ocorre quase no final do canal, formando uma extensa região de recirculação na parte traseira do cilindro quadrado. Observa-se também, a formação

de perturbações que se propagam a jusante deformando a bolha de recirculação com uma certa periodicidade. Essas perturbações tendem a se amplificar e aumentar sua frequência com o aumento do número de Reynolds, como observado nas Figuras 5.7(c), ($Re \cong 90$) e 5.7 (d), ($Re \cong 100$), aumentando o tamanho da bolha de recirculação. Observa-se entretanto, que mesmo para esses números de Reynolds o descolamento permanece na aresta posterior da protuberância. Na Figura 5.7(e), ($Re \cong 148$) e (f), ($Re \cong 192$), observa-se o contínuo aumento das perturbações intensificando-se progressivamente, mas ainda o descolamento ocorrendo na aresta de escape.

Figura 5.7 - Visualização do escoamento em um canal com uma única protuberância na parede para diferentes regimes de escoamento.

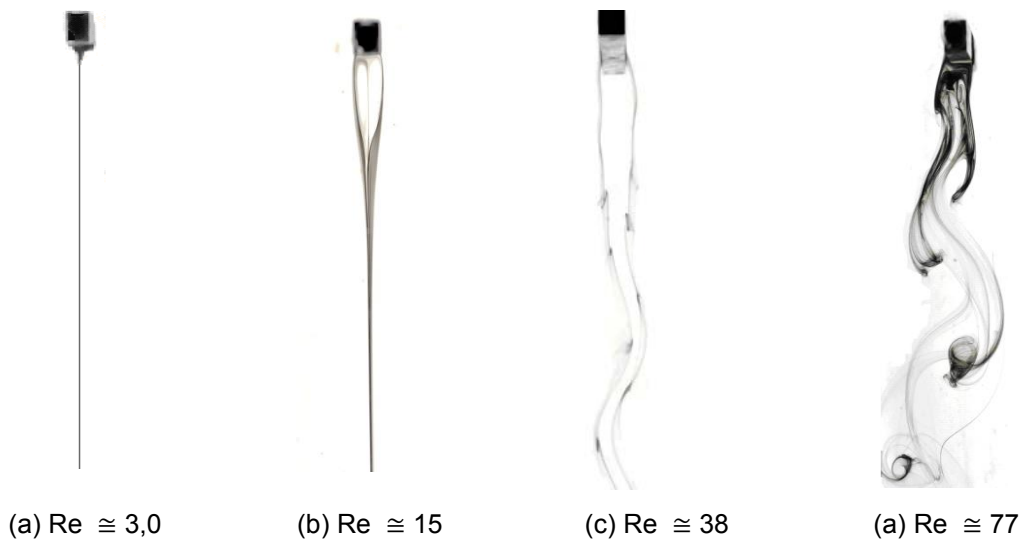


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Na Figura 5.7(g), ($Re \cong 293$), observa-se que o descolamento passa a ocorrer na aresta anterior, ocorrendo uma sensível diminuição na esteira de recirculação e a formação de vórtices com uma frequência mais pronunciada, comportamento que pode ser também observado nas Figuras 5.7(h), ($Re \cong 682$), 5.7(i), ($Re \cong 797$) e 5.7(j), ($Re \cong 882$). Nessa condição de escoamento, os vórtices são emitidos, mas a estrutura advectada dissipa-se rapidamente, diferentemente do que ocorre em um cilindro quadrado longe do efeitos das paredes.

A presença da parede causará certamente, em significativas alterações na estrutura do escoamento. A Figura 5.8 mostra algumas imagens, obtidas no novo túnel hidrodinâmico, de alguns dos regimes de escoamentos de um corpo cilíndrico com seção transversal quadrada ($L = 8 \text{ mm}$) posicionado relativamente longe dos efeitos das paredes. Outras imagens comentadas desse tipo de escoamento encontram-se disponíveis no trabalho de (MANSUR et al., 1996).

Figura 5.8 - Visualização do escoamento ao redor de um cilindro quadrado relativamente longe dos efeitos da parede, teste realizado no novo túnel hidrodinâmico.



Fonte: Mansur et al. (1996)

Neste trabalho também foram observados a existência de um rolo de vórtices estável na face frontal do cilindro quadrado, próximo ao ponto de estagnação, como identificado nas Figuras 5.9(a), ($Re \cong 530$) e 5.9(b), ($Re \cong 721$). O vórtice é formado em razão da presença da camada limite próximo ao corpo. Nos ensaios do cilindro quadrado longe da interferência da camada limite das paredes tal vórtice não é formado.

Figura 5.9 - Rolos de vórtices observados na face frontal da protuberância.



(a) $Re \cong 530$

(b) $Re \cong 721$

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Nas imagens da Figura 5.7 também visualiza-se a ocorrência de um descolamento na camada limite na parede oposta à parede com a protuberância. De fato, uma parcela do corante é propositalmente injetado na parede sem protuberância e com o início dos ensaios é possível visualizar as diferentes posições onde ocorrem o descolamento da camada limite na parede sem protuberância. A Figura 5.10 mostra diferentes regimes de escoamento e a ocorrência do descolamento na parede sem protuberância. O bloqueio de área do canal provoca uma aceleração do fluxo na região próxima à protuberância. Entretanto, logo após a protuberância ocorre uma queda do valor médio da velocidade em razão do aumento da área do fluxo. Tal fato provoca uma diminuição do gradiente de pressão na direção longitudinal do canal favorecendo o descolamento da camada limite. A análise das imagens, por meio de processamento digital de baixo nível, permite estimar a posição do descolamento na parede sem protuberância.

Figura 5.10 - Descolamento da camada limite na face sem protuberância do canal.



(a) $Re \cong 190$



(b) $Re \cong 466$



(c) $Re \cong 496$



(d) $Re \cong 513$



(e) $Re \cong 540$



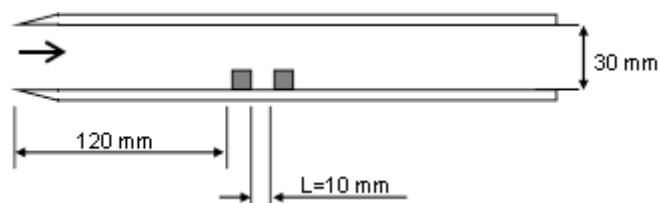
(f) $Re \cong 635$

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

5.3 VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM DUAS PROTUBERÂNCIAS NA PAREDE, ESPAÇADAS POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE UMA PROTUBERÂNCIA

O canal com duas protuberâncias idênticas (de lado $L = 10 \text{ mm}$) em uma das paredes, com espaçamento $1L$ entre elas, é esquematizado na Figura 5.11.

Figura 5.11 - Esquema do canal com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $1L$.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

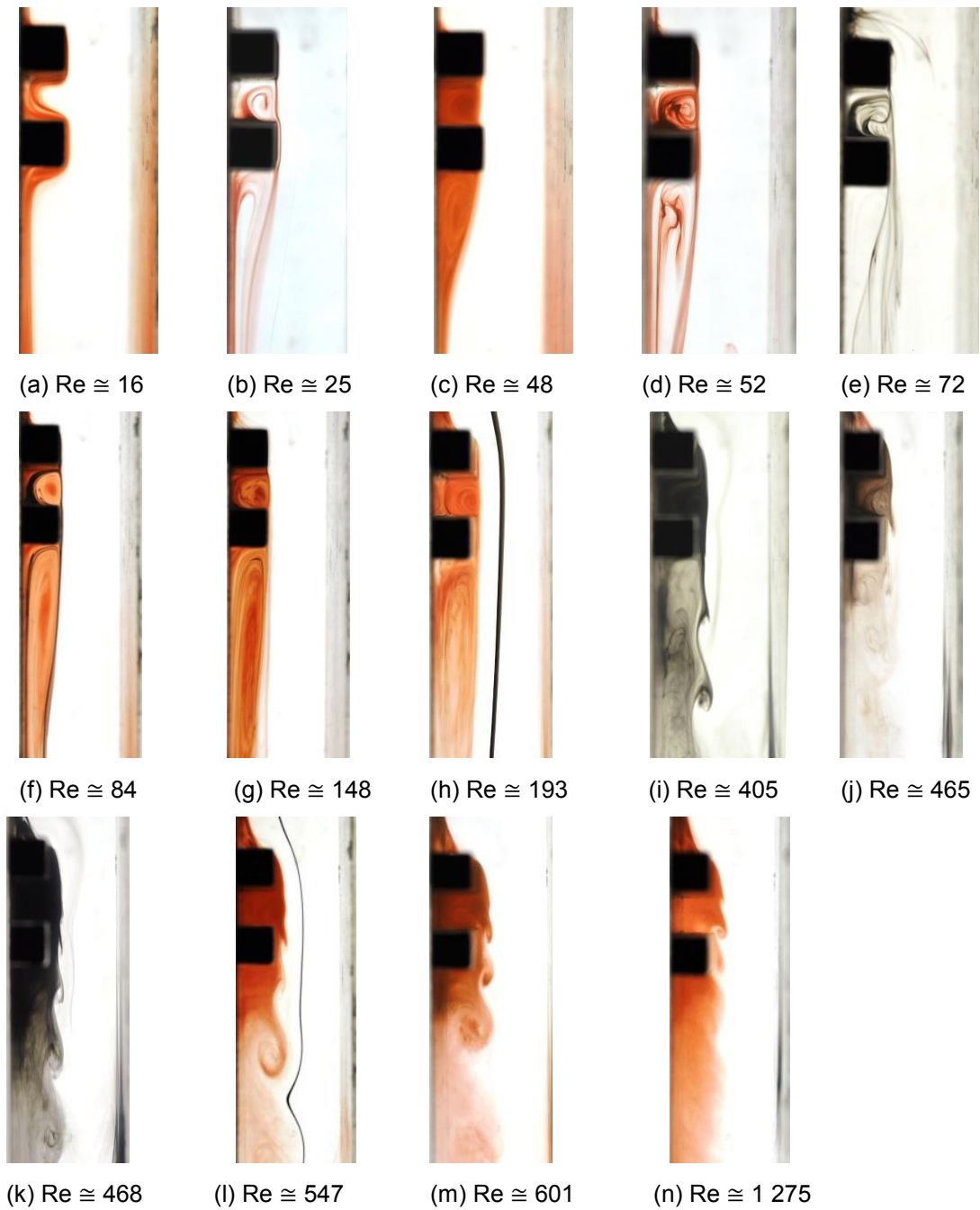
A Figura 5.12(a) mostra o escoamento com número de Reynolds relativamente baixo, ($Re \cong 16$), no qual os efeitos viscosos são preponderantes. Observa-se, para esse valor de Reynolds que o corante contorna ambas as protuberâncias praticamente sem descolamento. Na Figura 5.12(b), para Reynolds igual a 25, os efeitos de inércia provocam o descolamento da camada limite exatamente na aresta posterior do primeiro cilindro, formando uma bolha recirculante no espaço entre os cilindros,. O descolamento na aresta posterior do primeiro cilindro ocorre até Reynolds da ordem de 193 – Figura 5.12(h). Com o descolamento ocorrendo na aresta posterior do primeiro cilindro, ocorre a formação de uma bolha recirculante estável no espaço delimitado entre os dois cilindros. Para Reynolds menores que 193, Figura 5.12(h), e maiores que 25 – Figura 5.12(b), o escoamento descola na aresta posterior da primeira protuberância e recolhe na aresta superior da segunda protuberância, para descolar novamente na aresta posterior do segundo cilindro, formando uma bolha de recirculação relativamente estável na esteira da segunda protuberância. Para Reynolds maiores ou iguais a 405 – Figura 5.12(i) o descolamento é antecipado para a primeira aresta da primeira protuberância. Na Figura 5.13 observa-se uma imagem ampliada, com detalhes, o descolamento que ocorre na primeira aresta da primeira protuberância para $Re \cong 405$. Nessa situação, observa-se ainda a bolha de recirculação no espaço entre as protuberâncias, mas o

descolamento da primeira aresta provoca perturbações periódicas que podem ser visualizadas na forma de estruturas cisalhantes interagindo sobre a aresta superior da segunda protuberância. Essas estruturas se intensificam e na proporção que o número de Reynolds aumenta, interagem de forma relativamente fraca com a bolha recirculante existente no espaço entre os cilindros e de forma relativamente forte com a bolha recirculante existente após o segundo cilindro, inclusive deformando-a significativamente, como observado, por exemplo, para $Re \cong 601$, Figura 5.12(m). Para Reynolds ainda maiores, as dificuldades de visualização, utilizando-se a injeção de corantes líquidos, aumentam significativamente e observa-se uma esteira turbulenta bastante difusa.

Na Figura 5.13, ($Re \cong 405$), por sua vez, é mostrado uma imagem em alta resolução do interior da bolha de recirculação existente entre as duas protuberâncias. Observa-se que a estrutura dessa bolha de recirculação é bastante complexa, inclusive com a existência de pequenas bolhas nas arestas em fluxo contra rotativos. Entretanto, dada às pequenas dimensões do experimento (a aresta da protuberância é de apenas 10 mm), tais detalhes não são facilmente revelados. A tentativa de aplicação da técnica de visualização de particulados sólidos também não obteve maiores sucessos na busca de revelar imagens com detalhes finos e precisos de tais estruturas da bolha recirculante. Certamente, a utilização de instalações significativamente maiores, permitindo a utilização de modelos de testes de grandes dimensões poderá permitir a obtenção de detalhes deste tipo de escoamento.

Também na Figura 5.13 observa-se uma perturbação de pequenas dimensões que se desloca na face superior da segunda protuberância. Essa perturbação, à medida que o número de Reynolds aumenta, tende também a crescer. Para Reynolds da ordem de 405, a perturbação nitidamente salta acima da aresta superior da segunda protuberância sem tocar na aresta. Com o aumento do número de Reynolds e consequente aumento da amplitude das perturbações, observa-se que ocorre um choque das perturbações com a aresta anterior da segunda protuberância, como é visualizado na imagem da Figura 5.13. Com o a instabilidade causada pelo choque com a aresta uma quantidade significativa de massa passa a ser injetada no interior do espaço entre as protuberâncias interferindo na dinâmica da bolha de recirculação. Em razão a entrada de massa para o interior da zona de recirculação, uma certa quantidade de massa passa a ser ejetada para o exterior da região entre as duas protuberâncias.

Figura 5.12 - Imagens do escoamento visualizado em uma cavidade com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $1L$.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 5.13 - Detalhe do escoamento visualizado entre as duas protuberâncias para $Re \cong 405$.

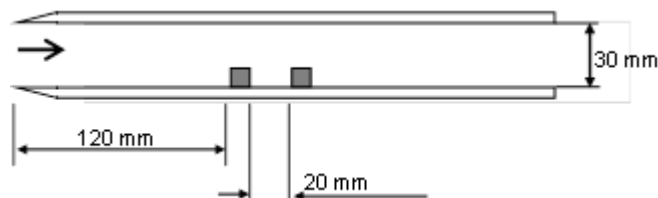


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

5.4 VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM DUAS PROTUBERÂNCIAS EM UMA DAS PAREDES, ESPAÇADAS POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE DUAS PROTUBERÂNCIAS

O canal com duas protuberâncias idênticas, de lado $L = 10$ mm, em uma das paredes com espaçamento entre elas de $2L$, é esquematizado na Figura 5.14.

Figura 5.14 - Esquema do canal com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $2L$.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A Figura 5.15(a), ($Re \cong 8$), mostra o escoamento com número de Reynolds relativamente baixo, no qual os efeitos de inércia são pouco perceptíveis. Devido às

forças viscosas, o filete de corante quase que acompanha o contorno das protuberâncias, descolando suavemente somente nas regiões muito próximas às arestas fixadas na parede. Para Reynolds mais elevados, como na Figura 5.15(b), ($Re \cong 50$), o escoamento sofre evidente descolamento na aresta posterior da primeira protuberância, recolando-se na face superior da segunda protuberância, para descolar novamente na aresta posterior da segunda protuberância. Entre as duas protuberâncias observa-se a formação de uma bolha de recirculação relativamente estável. Outra região de recirculação ocorre atrás da segunda protuberância e o escoamento somente poderá se recolocar em um ponto distante do canal fora da região com registro fotográfico. No espaço entre as duas protuberâncias, provavelmente duas regiões recirculantes contra rotativas devem ocorrer próximas das paredes. Entretanto o registro fotográfico dessas pequenas bolhas de recirculação de sentido de rotação oposto à bolha recirculante principal torna-se, evidentemente, uma operação complexa, dado às pequenas dimensões dos modelos de testes. Com o crescimento do número de Reynolds observa-se o crescimento do comprimento da bolha recirculante existente após a segunda protuberância, como registrado na Figura 5.15(c), ($Re \cong 100$), que se mantém razoavelmente estável. O descolamento sobre a primeira protuberância permanece ocorrendo na aresta posterior.

Para Reynolds igual a 268, Figura 5.15(d), o descolamento na primeira protuberância ocorre na aresta anterior e o recolamento se dá na face superior da segunda protuberância, para descolar novamente na aresta posterior da segunda protuberância, formando uma região recirculante com instabilidades bastante pronunciadas. Observa-se que na face superior da primeira protuberância ocorre nitidamente uma recirculação que se junta à recirculação existente no espaço entre as protuberâncias.

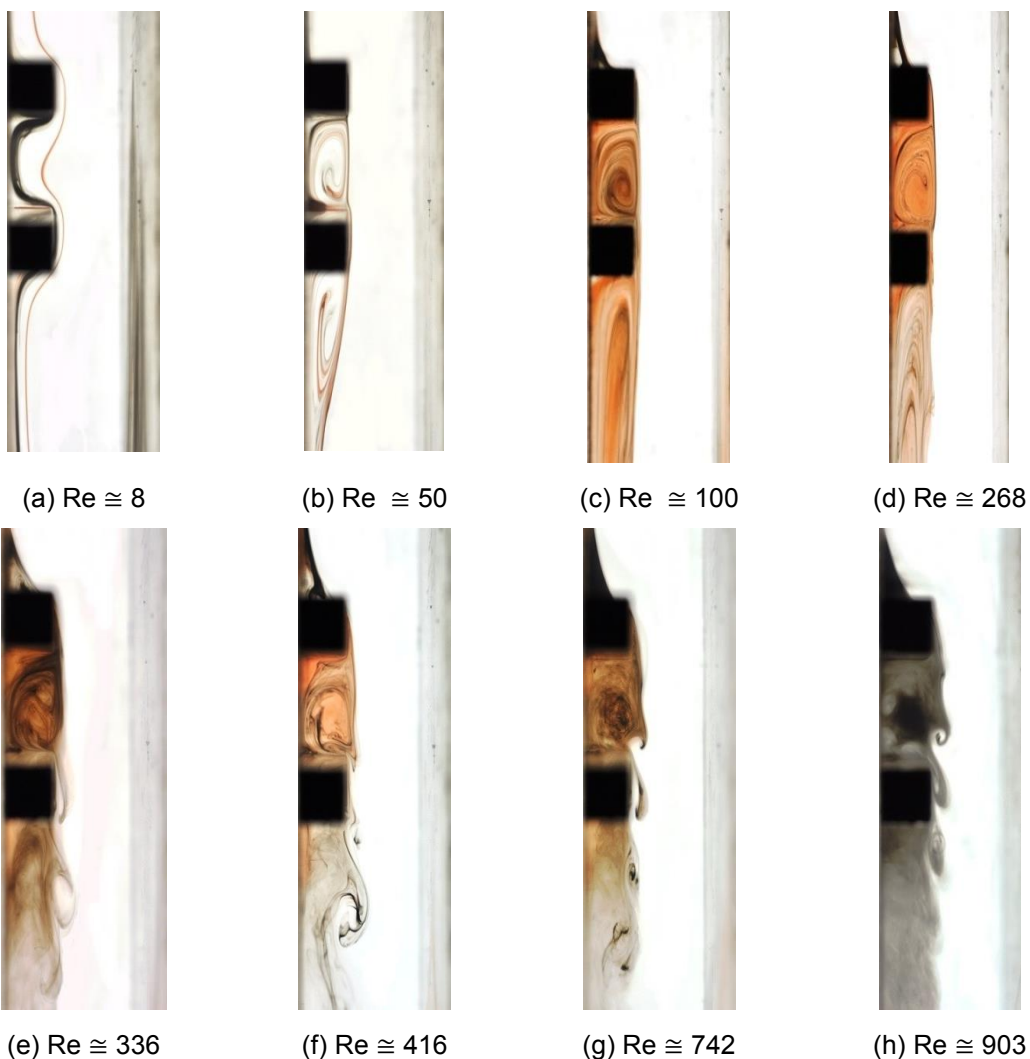
Para Reynolds igual a 336, Figura 5.15(e), as perturbações provocadas no descolamento na face anterior da primeira protuberância aumentaram a sua amplitude e agora chocam-se contra a aresta anterior da segunda protuberância, produzindo injeções de massa periódicas no interior da bolha de recirculação existente entre as duas protuberâncias e provocando sensíveis alterações na dinâmica da bolha recirculante. Em decorrência da equação da continuidade, a injeção de massa para o interior da bolha recirculante existente entre as duas protuberâncias provoca a ejeção de massa da zona de recirculação. Essa ejeção de

massa é visível na face superior da segunda protuberância e o aumento das instabilidades também é perceptível na região de recirculação atrás da segunda protuberância. As instabilidades tendem a se amplificarem como se observa na Figura 5.15(f) para Reynolds igual a 416.

Com o aumento do número de Reynolds, como na Figura 5.15(g) para Reynolds igual a 742, nota-se que a frequência das instabilidades aumenta significativamente, pois observa-se na imagem a diminuição do comprimento de onda das instabilidades.

Com Reynolds igual a 903, Figura 5.15(h), o processo de injeção de massa para a zona de recirculação, existente entre as duas protuberâncias, produz uma estrutura turbilhonar característica na forma de catraca giratória.

Figura 5.15 - Imagens do escoamento visualizado em um canal com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $2L$.

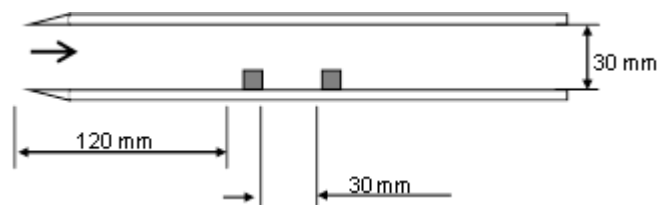


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

5.5 VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO EM UM CANAL COM DUAS PROTUBERÂNCIAS EM UMA DAS PAREDES, ESPAÇADAS POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE TRÊS PROTUBERÂNCIAS

O canal com duas protuberâncias idênticas, de lado $L = 10 \text{ mm}$, em uma das paredes com espaçamento entre elas de $3L$, é esquematizado na Figura 5.16.

Figura 5.16 - Esquema do canal com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $3L$.

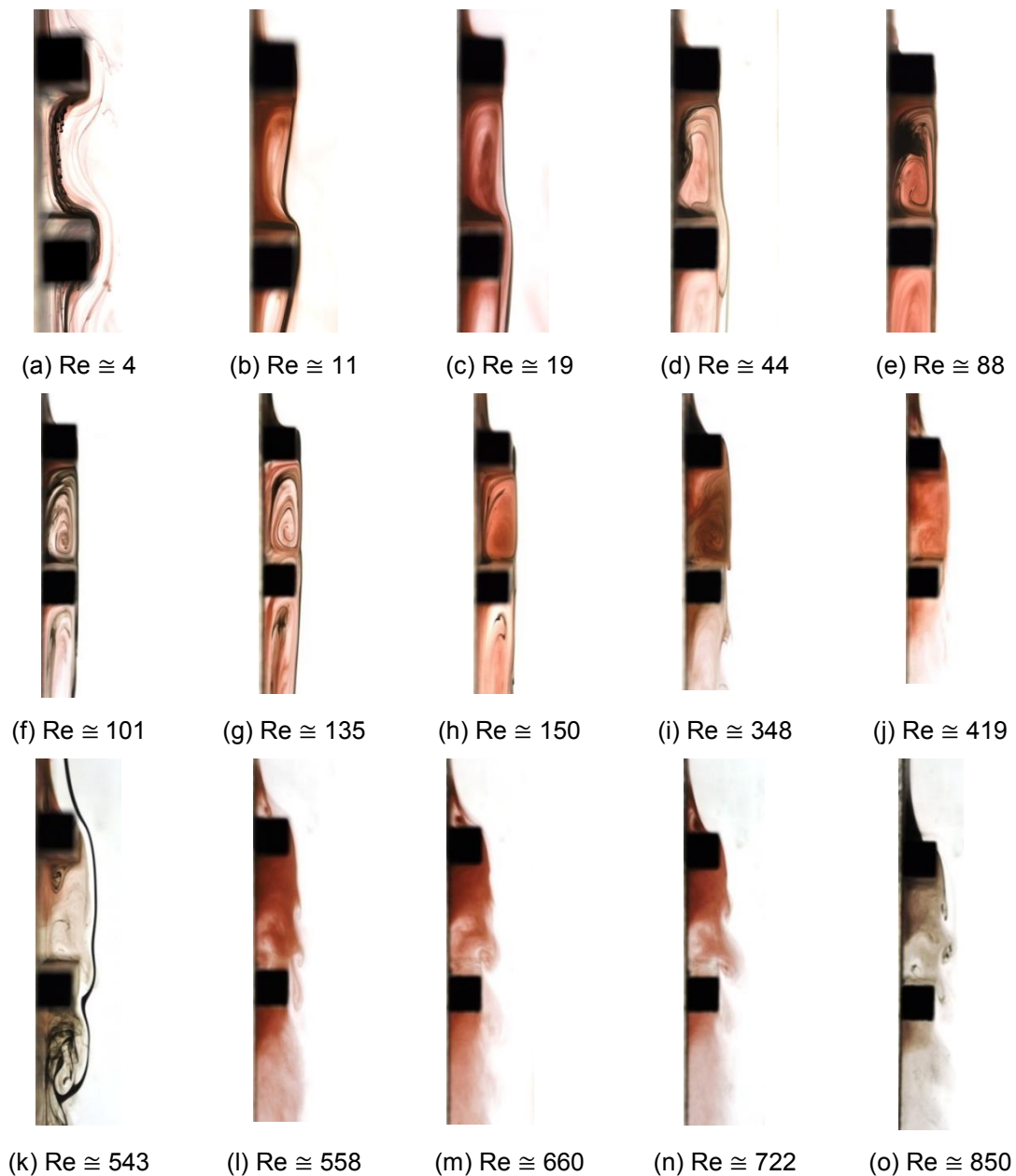


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A Figura 5.17(a), ($Re \cong 4$), mostra o escoamento com número de Reynolds relativamente baixo, no qual os efeitos viscosos são preponderantes. Observa-se um descolamento apenas moderado com o corante contornando quase que perfeitamente os obstáculos sólidos. Na Figura 5.17(b), ($Re \cong 11$), com número de Reynolds mais elevado, observa-se o descolamento na face posterior do primeiro obstáculo e a formação da região de recirculação no espaço entre as protuberâncias. Na imagem da Figura 5.17(c), para Reynolds igual a 19, uma região contrarrotativa torna-se evidente na imagem na face anterior da segunda protuberância. Com o aumento do número de Reynolds observa-se uma forte variação da estrutura recirculante existente entre as protuberâncias com a formação de regiões contrarrotativas, como visto nas imagens das Figuras 5.17(d), ($Re \cong 44$) e 5.17(e), ($Re \cong 88$). Para Reynolds igual a 101, Figura 5.17(f), a linha de corrente superior da bolha de recirculação existente no espaço entre as protuberâncias torna-se quase que perfeitamente alinhada com as faces superiores das protuberâncias, gerando uma bolha bastante estável. Com o aumento do número de Reynolds, Figuras 5.17(g), ($Re \cong 135$) e 5.17(h) ($Re \cong 150$) observa-se que a linha de corrente da parte superior da bolha de recirculação existente no espaço entre as duas protuberâncias perde seu alinhamento com as faces superiores das protuberâncias, iniciando um processo pulsátil de injeção de massa para a região recirculante. Na

Figura 5.17(i), ($Re \cong 348$), o descolamento na primeira protuberância passa a ocorrer na aresta anterior da primeira protuberância e ocorre uma mudança na estrutura da região de recirculação entre as protuberâncias e a formação de fortes instabilidades cisalhantes da região turbulenta que ocorre após a segunda protuberância.

Figura 5.17 - Imagens do escoamento visualizado em uma cavidade com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $3L$.



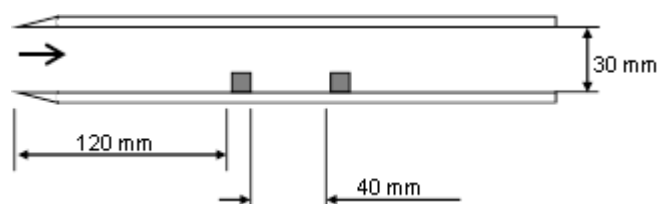
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Na imagem da Figura 5.17(j), ($Re \cong 419$), observa-se uma troca de massa ocorrendo na região recirculante que ocorre após a segunda protuberância, o que pode ser ainda melhor observado na Figura 5.17(k) com ajuda de um filete de corante adequadamente posicionado. A Figura 5.17(k), ($Re \cong 543$) também permite a visualização de uma região recirculante contrarrotativa próxima à face posterior da primeira protuberância. Nas Figuras 5.17(l), ($Re \cong 558$), 5.17(m), ($Re \cong 660$), e 5.17(n), ($Re \cong 722$), observa-se que o choque das instabilidades contra a aresta anterior da segunda protuberância produz intensa troca de massa e energia com a região recirculante existente entre as duas protuberâncias. Por fim, na Figura 5.17(o), ($Re \cong 850$), observa-se que o descolamento que ocorre na aresta anterior da primeira protuberância geram estruturas cisalhantes que se chocam contra a aresta anterior da segunda protuberância introduzindo fortes trocas de massa e energia para o interior da região recirculante existente entre as protuberâncias. No interior da região recirculante entre as protuberâncias observa-se também a existência de duas regiões distintas. A primeira, próxima da segunda protuberância onde os efeitos de troca de massa e energia são intensos, gerando velocidades relativas altas e a segunda região, próxima da primeira protuberância, onde as trocas são menores e as velocidades relativas são baixas.

5.6 VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM DUAS PROTUBERÂNCIAS EM UMA DAS PAREDES, ESPAÇADAS POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE QUATRO PROTUBERÂNCIAS

O canal com duas protuberâncias idênticas, de lado $L = 10$ mm, em uma das paredes, com espaçamento de $4L$ entre elas, é esquematizado na Figura 5.18.

Figura 5.18 - Esquema do canal com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $4L$.



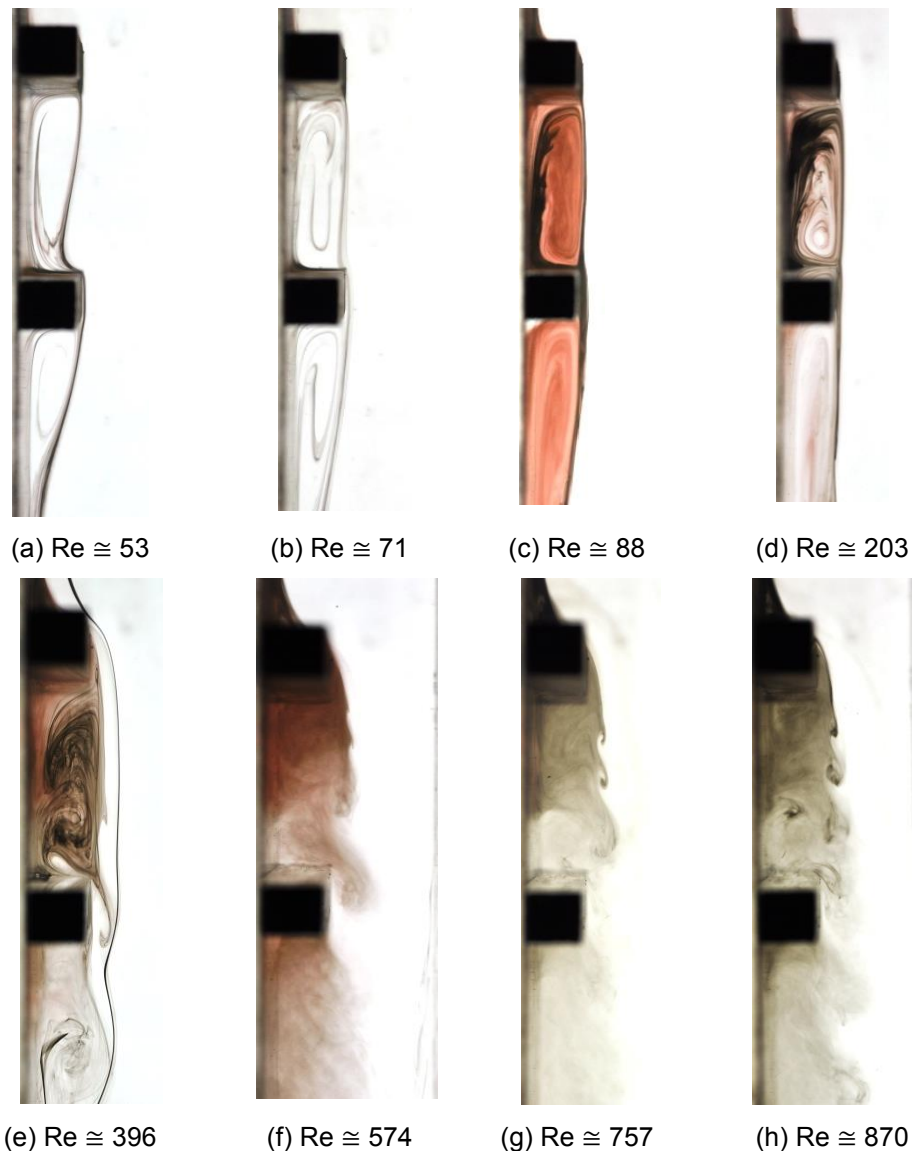
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A Figura 5.19(a) mostra o escoamento com número de Reynolds igual a 53 no qual observa-se que o descolamento ocorre na aresta posterior da primeira protuberância, formando uma região de recirculação relativamente estável entre as duas protuberâncias. Posteriormente, o escoamento volta a se recolocar na face superior da segunda protuberância e se descola novamente na aresta posterior da segunda protuberância, formando assim a segunda região de recirculação, também significativamente estável, a jusante da segunda protuberância. Por fim, o escoamento volta a se recolocar junto à parede relativamente afastado da segunda protuberância.

Para Reynolds igual a 71, Figura 5.19(b), observa-se um aumento significativo no comprimento da região de recirculação existente atrás da segunda protuberância. As inflexões da linha de emissão que separa a bolha recirculante existente no espaço entre as duas protuberâncias diminuí sensivelmente, tornando-se quase alinhada com as faces superiores das protuberâncias.

Para um número de Reynolds ligeiramente mais elevado, $Re \cong 88$, Figura 5.19(c), observa-se ainda um contínuo aumento da região recirculante existente a jusante da segunda protuberância, que, entretanto, permanece estável, sem apresentar significativas perturbações. O escoamento permanece com o descolamento na aresta posterior da primeira protuberância e a linha de emissão que limita a região de recirculação existente entre as duas protuberâncias encontra-se praticamente alinhada com as duas faces superiores das duas protuberâncias.

Figura 5.19 - Imagens do escoamento visualizado em uma cavidade com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $4L$.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Na Figura 5.19(d), ($Re \cong 203$), observa-se um moderado descolamento na face anterior da primeira protuberância e um aumento do comprimento da região recirculante a jusante da segunda protuberância. As primeiras instabilidades podem ser visíveis na região de recirculação existente a jusante da segunda protuberância. Também é possível visualizar as recirculações contrarrotativas existentes na região próxima a parede do canal entre as duas protuberâncias.

Para um número de Reynolds ainda mais elevado, ($Re \cong 396$), Figura 5.19(e), o descolamento torna-se mais acentuado na aresta anterior da primeira protuberância e a formação de instabilidades também é observável facilmente. As

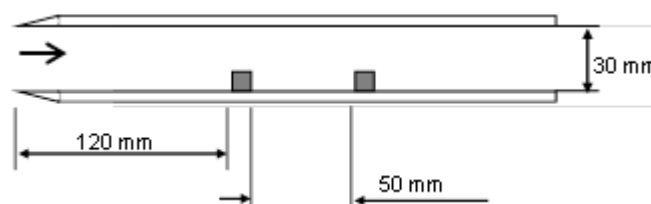
instabilidades chocam-se contra a aresta da segunda protuberância provocando intensas trocas de massa e energia com a bolha recirculante existente entre as duas protuberâncias. Observa-se que, entre as duas protuberâncias, duas regiões distintas são geradas, sendo uma de velocidade relativamente alta e outra de velocidade relativamente baixa. Visualiza-se ainda a intensa troca de massa que ocorre na região posterior a jusante da segunda protuberância. O filete de corante passa relativamente próximo da bolha de recirculação existente entre as duas protuberâncias, sem entretanto sofrer grandes perturbações em razão das instabilidades. Entretanto, após a segunda protuberância ocorre uma nítida amplificação das instabilidades e o filete então é jogado diretamente para o interior da região recirculante existente após a segunda protuberância.

Na Figura 5.19(f), ($Re \cong 574$), observa-se pequenas instabilidades sendo geradas logo após a primeira protuberância. Já com o aumento do número de Reynolds, nas Figuras 5.19(g), ($Re \cong 757$) e 5.19(h), ($Re \cong 870$), para Reynolds significativamente mais altos, os processos difusivos ganham força dificultando sobremaneira a visualização pela técnica de injeção de corantes líquidos. Também é possível visualizar o aumento da frequência de emissão das perturbações.

5.7 VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM DUAS PROTUBERÂNCIAS EM UMA DAS PAREDES, ESPAÇADAS POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE CINCO PROTUBERÂNCIAS

O canal com duas protuberâncias idênticas, de lado $L = 10$ mm, em uma das paredes, com espaçamento de $5L$ entre elas é esquematizado na Figura 5.20.

Figura 5. 20 - Esquema do canal com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $5L$.



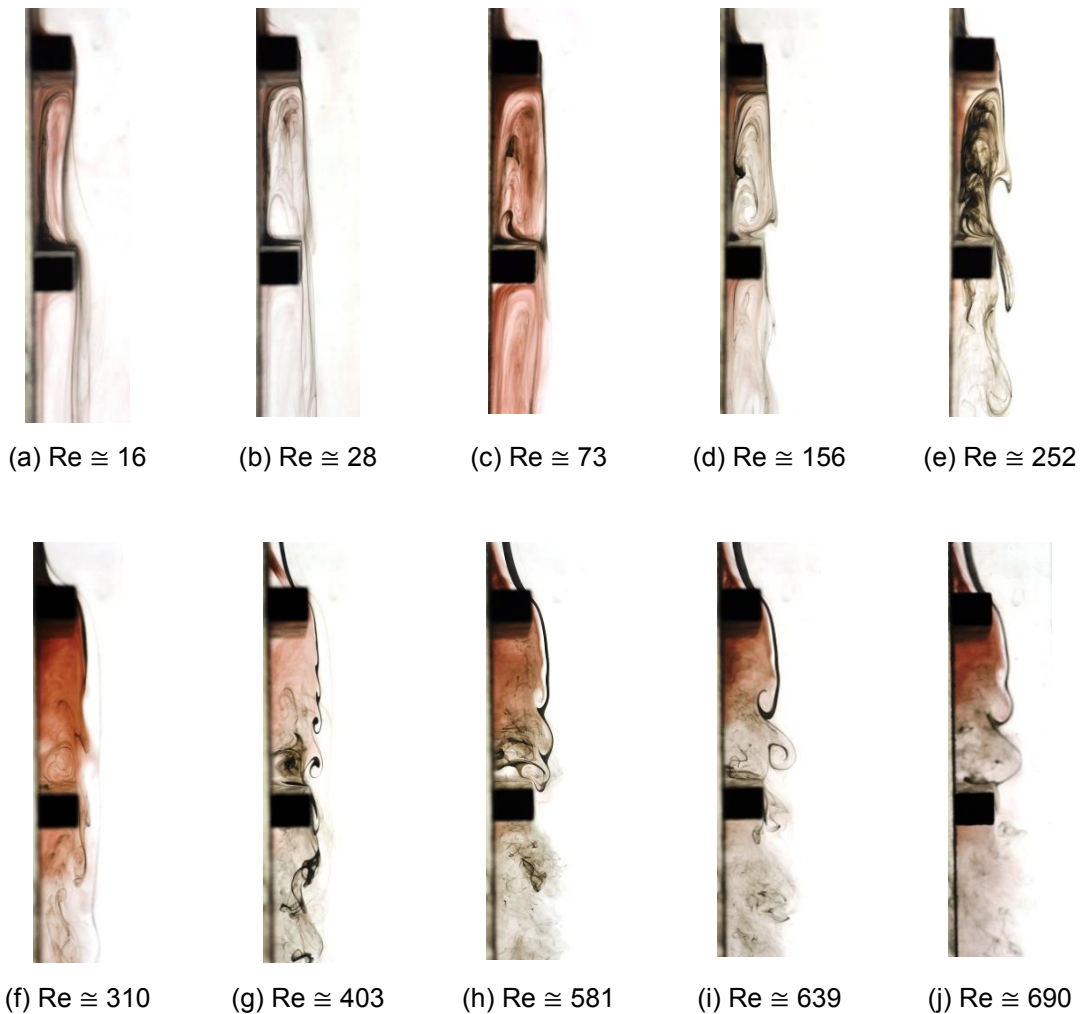
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A Figura 5.21(a), ($Re \cong 16$), mostra um descolamento na aresta posterior da primeira protuberância e um comportamento muito similar ao obtido para um espaçamento menor, inclusive permitindo observar a zona de recirculação contrarrotativa existente no espaço entre as protuberâncias. Na Figura 5.21(b), ($Re \cong 28$), observa-se o crescimento da região de recirculação na saída da segunda protuberância. Na Figura 5.21(c), para Reynolds igual a 73, o processo de injeção de massa na zona recirculante, existente entre as duas protuberâncias, torna-se bastante evidenciado e as perturbações da zona recirculante, existentes após a segunda protuberância, provocam sua deformação. Para Reynolds ainda maiores, ($Re \cong 156$), Figura 5.21(d), observa-se o processo intermitente de injeção de massa para o interior da zona recirculante localizada entre as duas protuberâncias provocando o aparecimento de duas regiões: a primeira, mais energizada, próxima à segunda protuberância e a segunda, menos energizada, próxima à primeira protuberância.

Por sua vez, a Figura 5.21(e), Reynolds igual a 252, o descolamento ocorre na face anterior da primeira protuberância e as perturbações são intensamente amplificadas provocando severas deformações nas estruturas recirculantes. Para um número de Reynolds pouco acima, ($Re \cong 310$), Figura 5.21(f), a região mais clara no espaço entre as duas protuberâncias é aquela em que as trocas de massa são mais intensas que na região mais escura, onde o corante demora um tempo significativamente maior para ser diluído pela água limpa da corrente livre.

Na Figura 5.21(g), ($Re \cong 403$), observa-se que o fenômeno de geração e desprendimento dos vórtices é plenamente visível, graças a injeção de um filete de corante na cor preta, formando uma estrada de vórtices que é advectada a jusante da primeira protuberância. Entretanto, os vórtices chocam-se com a aresta anterior da segunda protuberância e rapidamente dissipam-se.

Figura 5.21 - Imagens do escoamento visualizado em uma cavidade com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $5L$.



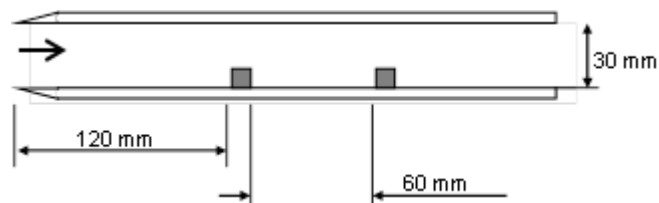
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Para um número de Reynolds ligeiramente maior, os choques dos vórtices emitidos da primeira protuberância provocam uma maior difusão de massa no interior do espaço delimitado pelas duas cavidades e pela parede, como visto na Figura 5.21(h), ($Re \cong 581$). Com o aumento do número de Reynolds o processo de choque dos vórtices contra a segunda protuberância intensificam-se, como observado nas Figuras 5.21(i), ($Re \cong 639$) e 5.21(j), ($Re \cong 690$).

5.8 VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM DUAS PROTUBERÂNCIAS EM UMA DAS PAREDES, ESPAÇADAS POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE SEIS PROTUBERÂNCIAS

O canal com duas protuberâncias idênticas, de lado $L = 10 \text{ mm}$, em uma das paredes, com espaçamento de $6L$ entre elas, como esquematizado na Figura 5.22.

Figura 5.22 - Esquema do canal com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $6L$.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

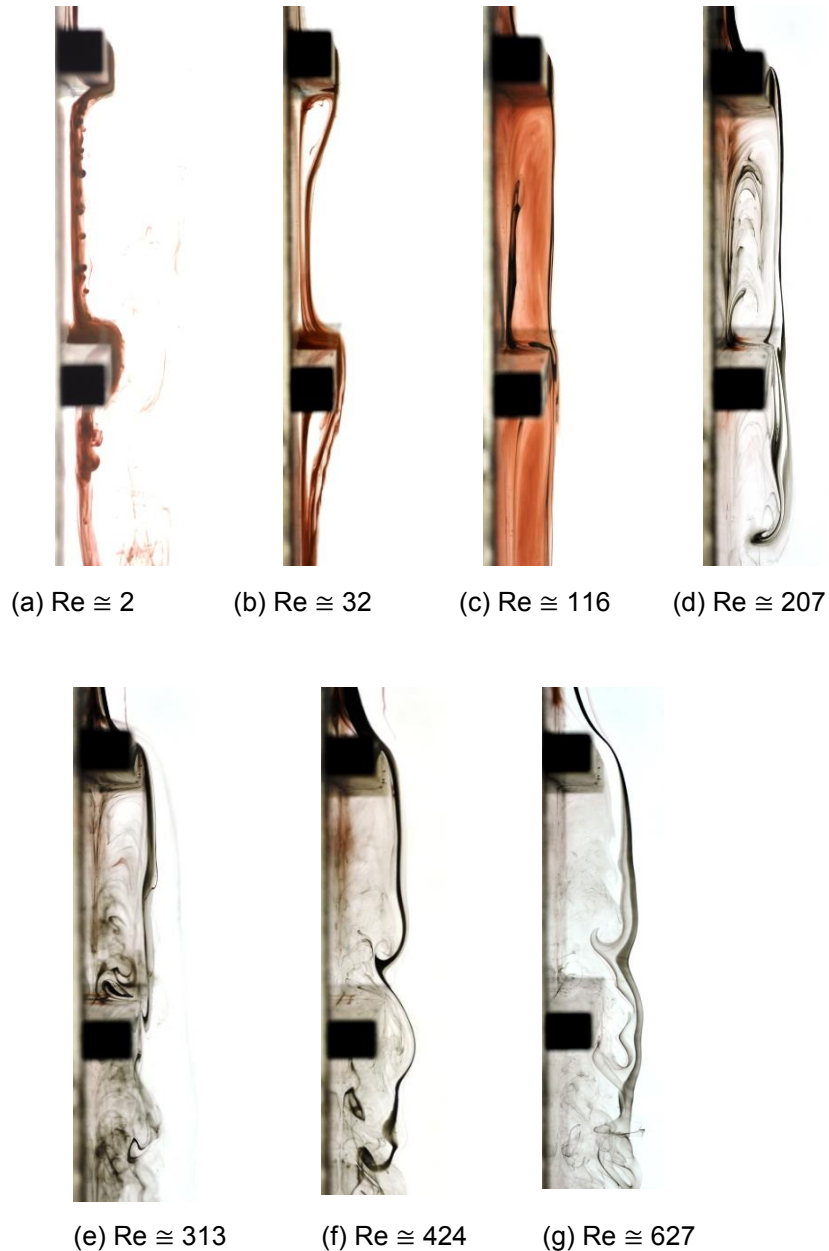
A Figura 5.23(a) mostra o escoamento com número de Reynolds relativamente baixo, ($Re \cong 2$), no qual os efeitos viscosos são preponderantes. Entretanto, o descolamento moderado observado na face posterior da primeira protuberância deve-se, muito provavelmente, ao corante que pela presença das estruturas na forma de minúsculos cogumelos invertidos, que na fotografia passam por pequenos pontos de corante, caracterizam que a densidade do corante é maior que a densidade do fluido de trabalho. Antes do início do ensaio a densidade do corante é minuciosamente acertada, mas nem sempre, satisfatoriamente ajustada e então, nos decorrer dos ensaios, principalmente em baixas velocidades torna-se perceptível a diferença de densidades que podem influenciar os resultados.

Na Figura 5.23(b) para Reynolds igual a 32, observa-se que após o descolamento que ocorre na aresta posterior da primeira protuberância, o escoamento tende, sem sucesso, a se recolocar junto à parede do canal tornando a bolha de recirculação extremamente fina. De forma surpreendente, ocorre o aparente recolamento na face anterior da segunda protuberância e a formação de pequenas instabilidades após a segunda protuberância.

Para a Figura 5.23(c), ($Re \cong 116$), observa-se, apesar do espaço relativamente grande entre as protuberâncias, a formação da bolha de recirculação. Na face superior da segunda protuberância foi capturado o exato momento que uma

parcela de massa da bolha recirculante existente entre as protuberâncias é ejetada. O processo é intermitente e alternado com a injeção de massa.

Figura 5.23 - Imagens do escoamento visualizado em uma cavidade com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $6L$.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Na Figura 5.23(d), ($Re \cong 207$), o descolamento passa a ocorrer na aresta anterior da primeira protuberância aumentando consideravelmente a quantidade de

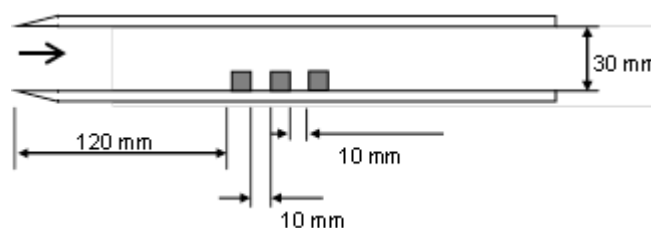
massa que passa a ser injetada na região entre as protuberâncias. Com o aumento do Reynolds as instabilidades também aumentam e a turbulência é evidente.

Por sua vez, na Figura 5.23(f), ($Re \cong 424$), o processo de início da formação do vórtice pode ser observado, entretanto, a existência da segunda protuberância provoca a destruição da estrutura. Situação equivalente pode ser observada na imagem seguinte – Figura 5.23(g), ($Re \cong 627$) - para Reynolds mais elevado.

5.9 VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM TRÊS PROTUBERÂNCIAS EM UMA DAS PAREDES, ESPAÇADAS POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE UMA PROTUBERÂNCIAS

O canal com três protuberâncias idênticas, de lado $L = 10$ mm, em uma das paredes, com espaçamento de $1L$ entre elas, é esquematizado na Figura 5.24.

Figura 5.24 - Esquema do canal com três protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $1L$.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

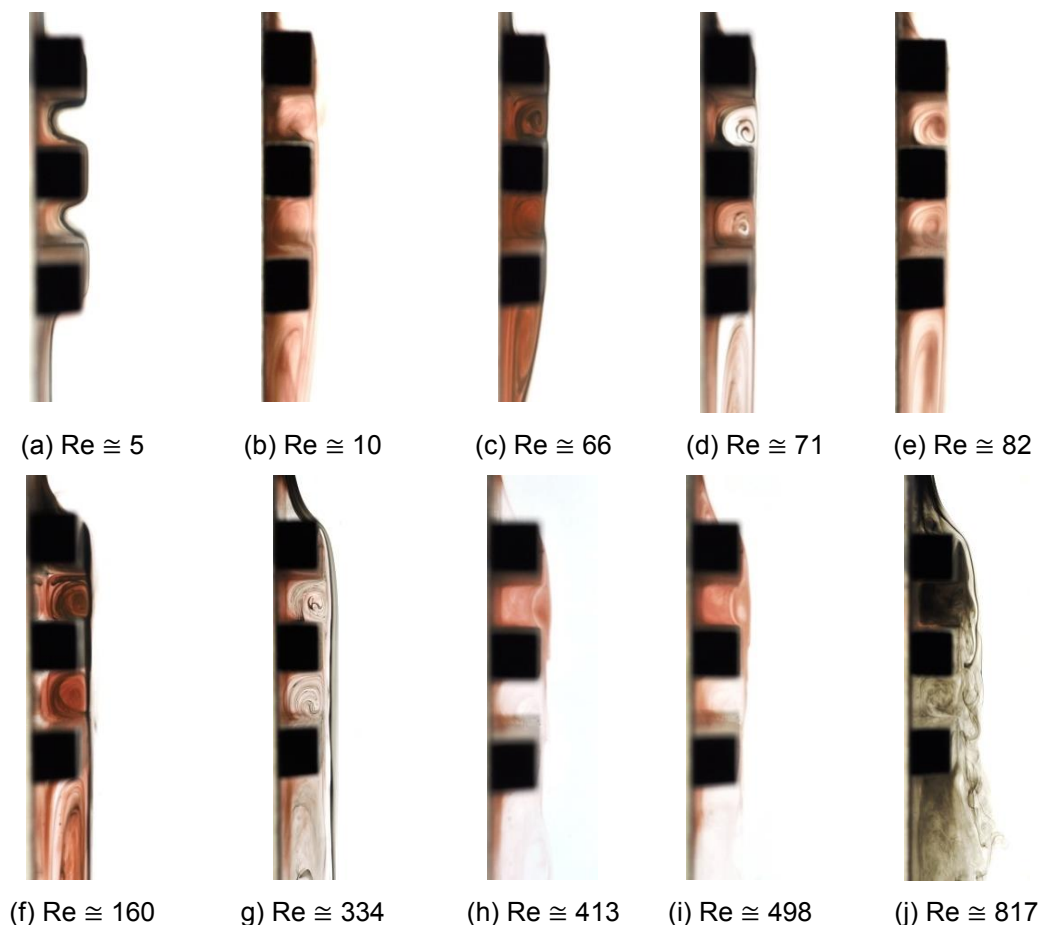
A Figura 5.25(a), ($Re \cong 5$), mostra o escoamento com número de Reynolds relativamente baixo para o qual o corante praticamente acompanha o contorno das protuberâncias. Entretanto, para um número de Reynolds, ($Re \cong 10$), Figura 5.25(b), observa-se o descolamento ocorrendo nas arestas posteriores das protuberâncias e o escoamento recolhe na face superior das protuberâncias seguintes. Aparentemente, o efeito de paralaxe da câmera pode levar a pensar que não ocorre recolamento, entretanto o esse efeito ocorre na face superior, sendo apenas observado um efeito óptico da imagem. A Figura 5.25(c), ($Re \cong 66$), mostra uma imagem detalhada da zona de recirculação entre as cavidades existentes entre as protuberâncias e, como se observa, o corante sofre descolamento na aresta posterior das protuberâncias, mas recolhe-se facilmente na face superior da aresta seguinte. Desse fato, conclui-se

que o efeito observado na imagem anterior para Reynolds igual a 10 refere-se unicamente a um efeito de paralaxe na imagem.

Na Figura 5.25(d), ($Re \cong 71$), na qual também ocorre o efeito de paralaxe da imagem, observa-se detalhes das regiões recirculantes existentes entre as protuberâncias e um aumento considerável do comprimento da região de recirculação que ocorre após a terceira protuberância. Para um Reynolds levemente aumentado, observa-se ainda detalhes da região recirculante existente entre as protuberâncias – Figura 5.25(e) ($Re \cong 82$).

Na Figura 5.25(f), ($Re \cong 160$), verifica-se como é relativamente grande a região de recirculação que ocorre a jusante da terceira protuberância que se estende, para fora do campo de visão da imagem, até os limites das paredes do canal. Também notam-se os primeiros indícios de um descolamento suave ocorrendo na aresta anterior da primeira protuberância.

Figura 5.25 - Imagens do escoamento visualizado em uma cavidade com três protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $1L$.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Entretanto, para um Reynolds significativamente mais elevado, ($Re \cong 334$) Figura 5.25(g), observa-se uma mudança drástica na região recirculante existente após a terceira protuberância com a ocorrência de um processo turbulento deformando significativamente a bolha recirculante.

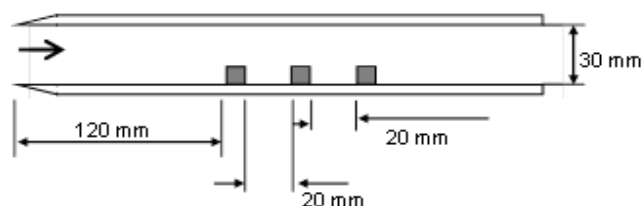
Na Figura 5.25(h), ($Re \cong 413$), observa-se uma estrutura singular na forma lenticular ocorrendo acima da região delimitada pela primeira e segunda protuberância. A estrutura pode também ser observada na Figura 5.25(i) para Reynolds igual a 498. Trata-se de uma estrutura de interesse de estudo dada a sua forma única e a sua posição. Nesse caso, a disponibilidade de instalações de grande porte que acomodem modelos de grandes dimensões facilitaria a visualização de detalhes finos do escoamento e a compreensão dessa topologia. As sucessivas observações desse fenômeno permitem relatar que a linha branca que contorna a formação lenticular em sua parte próxima das protuberâncias é formada por fluido de trabalho sem corante, portanto de água limpa, que é proveniente do espaço entre a segunda e a terceira protuberância. Portanto, a formação lenticular é causada pelo descolamento que ocorre na aresta anterior da primeira protuberância.

Na Figura 5.25(j) para Reynolds igual a 817, os fortes efeitos difusivos evidenciam-se, dificultando a captura de uma imagem nítida com a técnica de visualização empregada.

5.10 VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM TRÊS PROTUBERÂNCIAS EM UMA DAS PAREDES, ESPAÇADAS POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE DUAS PROTUBERÂNCIAS

O canal com três protuberâncias idênticas, de lado $L = 10$ mm, em uma das paredes, com espaçamento de $2L$ entre elas é esquematizado na Figura 5.26.

Figura 5.26 - Esquema do canal com três protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $2L$.

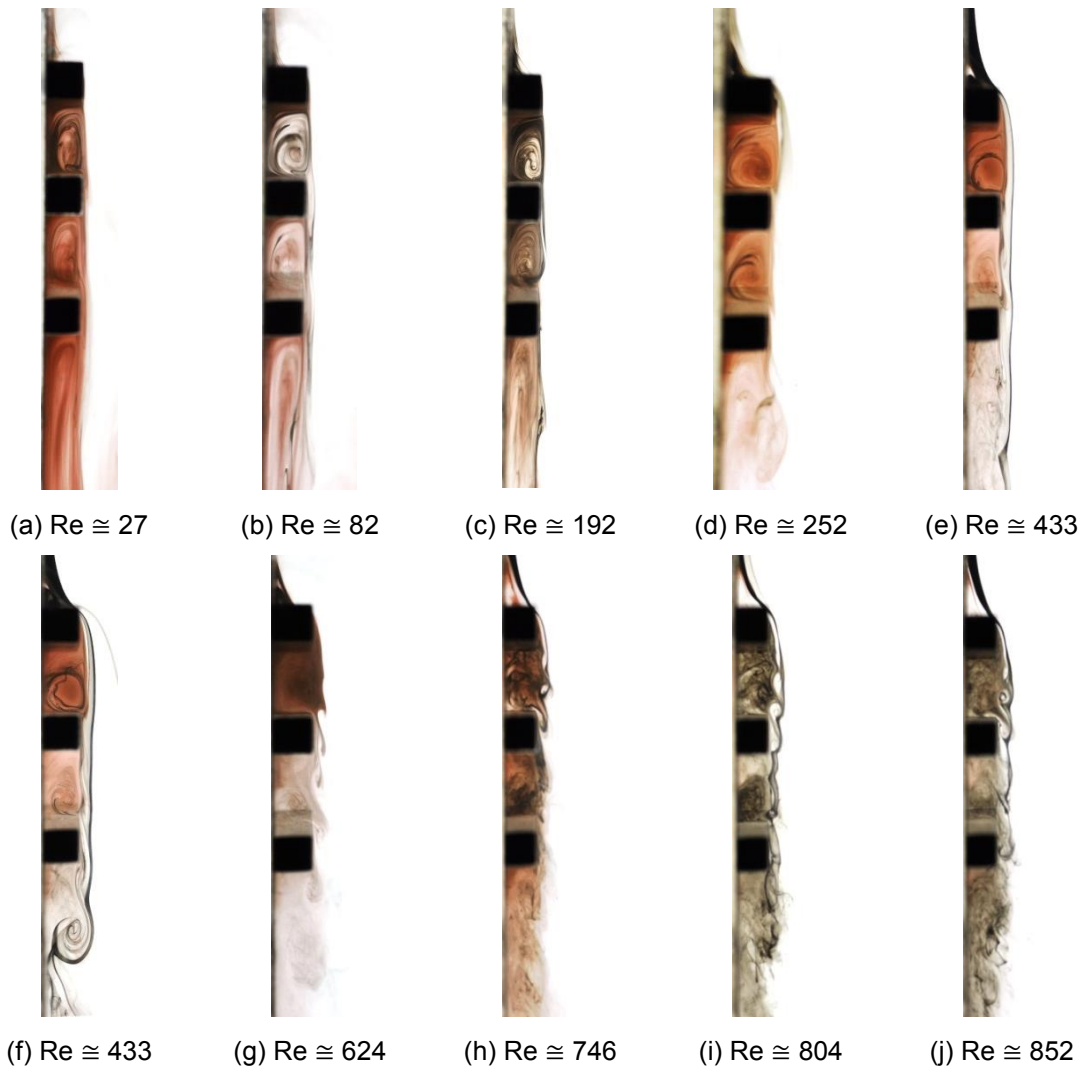


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A Figura 5.27(a) mostra o escoamento em um número de Reynolds igual a 27, uma vez que para números de Reynolds inferiores não foi observado nenhuma mudança apreciável de comportamento das estruturas do escoamento em relação à estrutura anteriormente estudada da disposição das protuberâncias. O descolamento ocorre na aresta posterior da primeira protuberância e observa-se nitidamente as bolhas recirculantes existente entre os espaços das protuberâncias. O processo de injeção periódica de massa ocorre em ambas as bolhas recirculante mas, aparentemente, é mais intenso na bolha existente entre a primeira e a segunda protuberância. Observa-se ainda a região recirculante a jusante da terceira protuberância que apresenta um comprimento que se estende além do campo de visão da câmera.

Na Figura 5.27(b), para número de Reynolds 82, observa-se que a bolha de recirculação existente entre a primeira e segunda protuberância é significativamente mais energizada que a bolha existente entre a segunda e terceira protuberância. Para obter essa imagem, primeiramente foi lançado o corante de cor avermelhada e somente depois que o corante preencheu todo o espaço entre as protuberâncias foi injetado o corante de cor preta na forma de um filete. Apesar da agulha de injeção do corante preto encontrar-se com a maior parte de seu corpo fora da entrada do canal, para obtenção da imagem, a injeção foi interrompida e a agulha foi afastada para próxima da parede do experimento. Assim, as áreas avermelhadas são as que apresentam menores taxas de troca de massa e as áreas escuras, as maiores taxas de troca de massa e, conseqüentemente, de energia. Nota-se ainda que o centro do vórtice, existente na região recirculante no espaço entre as protuberâncias, encontra-se nitidamente deslocado, aproximando-se sempre da protuberância a jusante. As partes brancas no interior da recirculação referem-se ao fluido de trabalho limpo que é injetado, após o término da injeção do filete de corante preto.

Figura 5.27 - Imagens do escoamento visualizado em uma cavidade com três protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $2L$.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Para Reynolds no valor de 192, como na Figura 5.27(c), observam-se poucas alterações na estrutura do escoamento. Para a Figura 5.27(d), com Reynolds ligeiramente maior ($Re \cong 252$), o descolamento antecipa-se para a aresta anterior da primeira protuberância e as perturbações amplificam-se significativamente distorcendo sobremaneira a região de recirculação existente a jusante da terceira protuberância.

Para Reynolds igual a 433, Figura 5.27(e), as perturbações amplificam-se significativamente, mas afetando pouco a estrutura da zona recirculante existente entre as protuberâncias. No interior de ambas as recirculações existentes entre as protuberâncias visualiza-se a formação de um vórtice quase que circular.

Para a Figura 5.27(f), o número de Reynolds permanece em 433, mesmo número de Reynolds da Figura 5.27(e) e permite visualizar o processo de formação dos vórtices à jusante da terceira protuberância.

Na imagem da Figura 5.27(g), $Re \cong 624$, observam-se estruturas galopantes na face superior da segunda protuberância. Tais perturbações chocam-se com a aresta anterior da terceira protuberância.

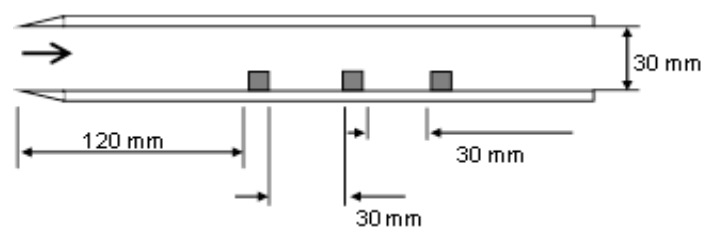
Na obtenção da imagem mostrada na Figura 5.27(h), ($Re \cong 746$), o corante de tom avermelhado foi lançado primeiro, preenchendo toda a cavidade entre as protuberâncias, e, logo a seguir, injetou-se o corante preto. Portanto, no espaço delimitado pelas protuberâncias, as áreas do escoamento marcadas com a cor vermelha são regiões de menores velocidades, com uma baixa taxa de penetração do corante preto. No interior das recirculações observam-se também regiões de cor branca, principalmente entre a primeira e a segunda cavidade, pois são porções do escoamento sem corante que foram injetadas para o interior da zona de recirculação.

Para a Figura 5.36(i), ($Re \cong 804$), um filete de corante preto é injetado poucos milímetros no interior do canal, próximo da parede com as protuberâncias. Observa-se a interação entre o escoamento no interior das recirculações com o filete de corante. O mesmo processo foi utilizado para a Figura 5.27(j), ($Re \cong 852$), para um número de Reynolds levemente mais elevado.

5.11 VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM TRÊS PROTUBERÂNCIAS EM UMA DAS PAREDES, ESPAÇADAS POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE TRÊS PROTUBERÂNCIAS

O canal com três protuberâncias idênticas (de lado $L = 10$ mm) em uma das paredes, com espaçamento de $3L$ é esquematizado na Figura 5.28.

Figura 5.28 - Esquema do canal com três protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $3L$.

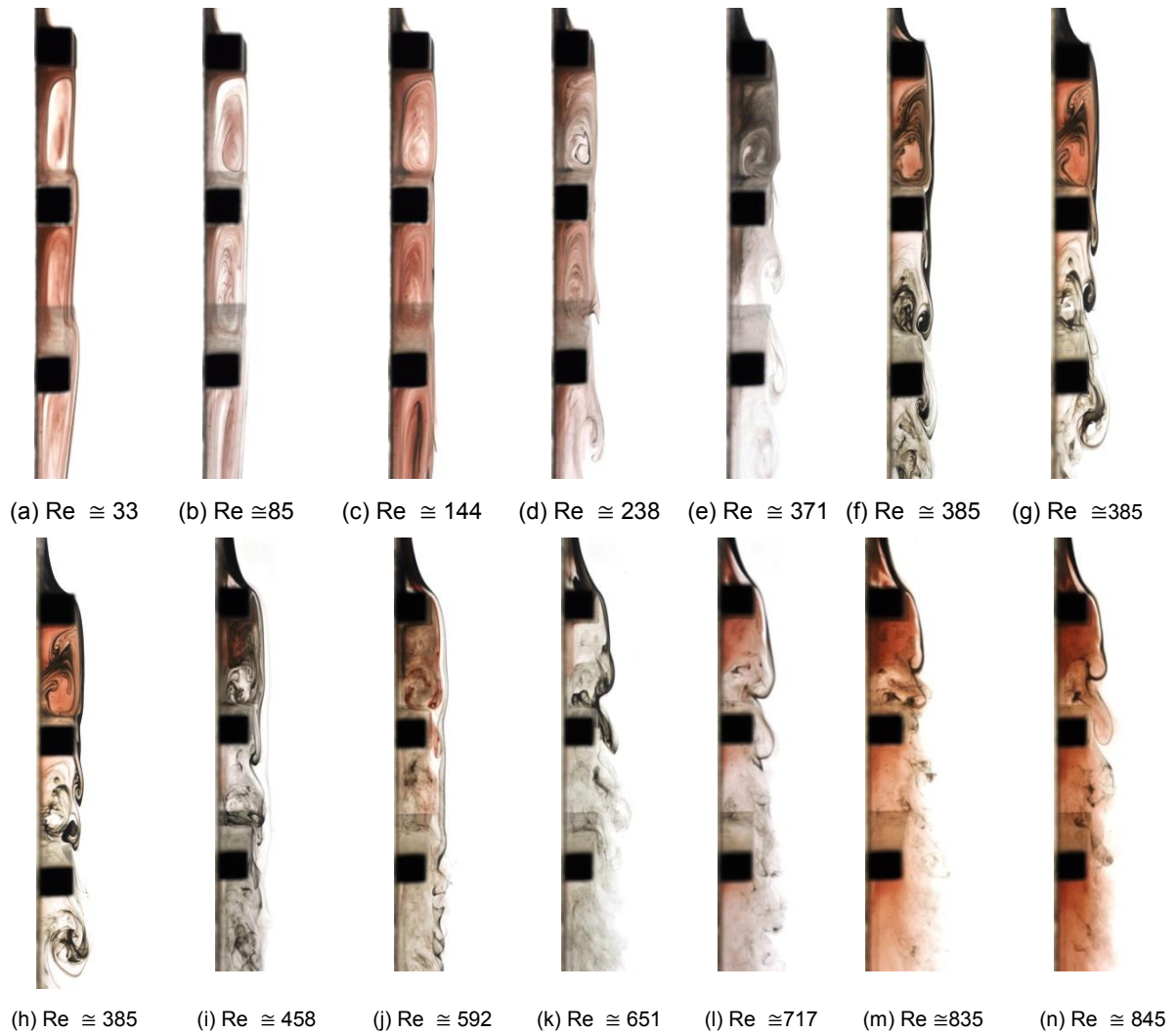


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A Figura 5.29(a) mostra o escoamento em um número de Reynolds igual a 33 apresentando as bolhas de recirculações estáveis, com o escoamento colado nas faces superiores das três protuberâncias. No interior das recirculações é possível observar partes da imagem com tom avermelhado do corante, partes discretas de corante cor preta e também partes sem coloração, mostrando a ocorrência de injeção periódica nas bolhas. A imagem da Figura 5.29(a) mostra exatamente o momento em que a massa do interior das duas recirculações existente entre as protuberâncias é ejetada. Na Figura 5.29(b), ($Re \cong 85$), as bolhas permanecem estáveis e o descolamento permanece na aresta posterior das protuberâncias. Para Reynolds igual a 144, como na Figura 5.29(c), visualiza-se que as bolhas permanecem estáveis e o descolamento ainda ocorre na face posterior das protuberâncias. Entretanto, para Reynolds igual a 238, Figura 5.29(d), observa-se que o descolamento ocorre na aresta anterior da primeira protuberância ocasionando perturbações que são convectadas a jusante provocando suaves alterações na forma da primeira recirculação localizada entre a primeira e segunda protuberância e, Em razão da amplificação das perturbações as deformações sofridas pelas recirculações posteriores são significativamente maiores.

Para Reynolds mais elevados, como na Figura 5.29(e), ($Re \cong 371$), nota-se que a camada cisalhante produzida pelo descolamento na primeira protuberância, choca-se com a segunda protuberância injetando no espaço entre a primeira e a segunda protuberância uma quantidade de movimento significativa. A recirculação existente entre a primeira e a segunda protuberância mostra que nas proximidades da segunda protuberância ocorrem as maiores velocidades. Na segunda recirculação existente entre a segunda e a terceira protuberância, também observa-se que as maiores velocidades ocorrem nas proximidades da terceira protuberância.

Figura 5.29 - Imagens do escoamento visualizado em uma cavidade com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $3L$.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Na Figura 5.29(f), ($Re \cong 385$), a estrutura da zona de recirculação existente entre a primeira e a segunda protuberância é bastante característica, com o registro de duas recirculações de sentido contrário. Também a camada cisalhante gerada na primeira protuberância inicia o processo de formação dos vórtices, entretanto os vórtices praticamente tangenciam a face superior da segunda protuberância, quase recolando, alterando apenas levemente a sua forma estrutural. Somente após o choque dos vórtices com a terceira protuberância é que verifica-se uma forte deformação dos rolos de vórtices antecipando a sua difusão. O processo é observado em diferentes instantes de tempo nas imagens das Figuras 5.29(g), ($Re \cong 385$) e 5.29(h), ($Re \cong 385$). Com o aumento do número de Reynolds o

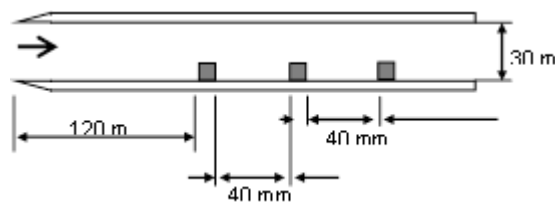
processo da geração e choque dos vórtices intensifica-se significativamente, como observado na Figura 5.29(i), ($Re \cong 458$) e 5.29(j) ($Re \cong 592$).

Entretanto, para Reynolds ainda maiores, como na Figura 5.29(k), ($Re \cong 651$), os rolos de vórtices iniciam sua formação bem próximo da primeira protuberância. Dessa forma, os vórtices atingem parte da face anterior da segunda protuberância sofrendo alteração de sua forma, gerando um processo intensamente mais difusivo. As imagens das Figuras 5.29(l), ($Re \cong 717$), 5.29(m), ($Re \cong 835$) e 5.29(n), ($Re \cong 845$), mostram o processo de formação e choque dos vórtices em diferentes números de Reynolds.

5.12 VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM TRÊS PROTUBERÂNCIAS EM UMA DAS PAREDES, ESPAÇADAS POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE QUATRO PROTUBERÂNCIAS

O canal com três protuberâncias idênticas, de lado $L = 10 \text{ mm}$, em uma das paredes, com espaçamento de $4L$ entre elas é esquematizado na Figura 5.30.

Figura 5.30 - Esquema do canal com três protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $4L$.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Observa-se na Figura 5.32(a), ($Re \cong 26$), que a configuração básica do escoamento pouco foi alterada com o aumento do espaçamento entre as protuberâncias, pelo menos para esse regime de escoamento. As recirculações mostram-se relativamente estáveis e o descolamento ocorre na face posterior da primeira protuberância. Com o aumento do número de Reynolds para 61, Figura 5.32(b), observa-se um aumento do comprimento da recirculação estacionada a jusante da terceira protuberância. Para um Reynolds de 95, Figura 5.32(c), observa-se ainda o descolamento ocorrendo na aresta posterior da primeira protuberância,

entretanto, para Reynolds igual a 278, Figura 5.32(d), o descolamento antecipa-se para a aresta anterior da primeira protuberância e o processo de formação dos vórtices implica em uma intensa troca de massa com a região compreendida entre a segunda e terceira protuberância, enquanto que a troca de massa com a região compreendida entre a primeira e a segunda protuberância é significativamente inferior. Nesse caso específico observa-se a propagação dos vórtices a jusante da terceira protuberância. Os vórtices mantêm a sua estrutura até o choque com a parede do canal, longe do campo de visão da imagem.

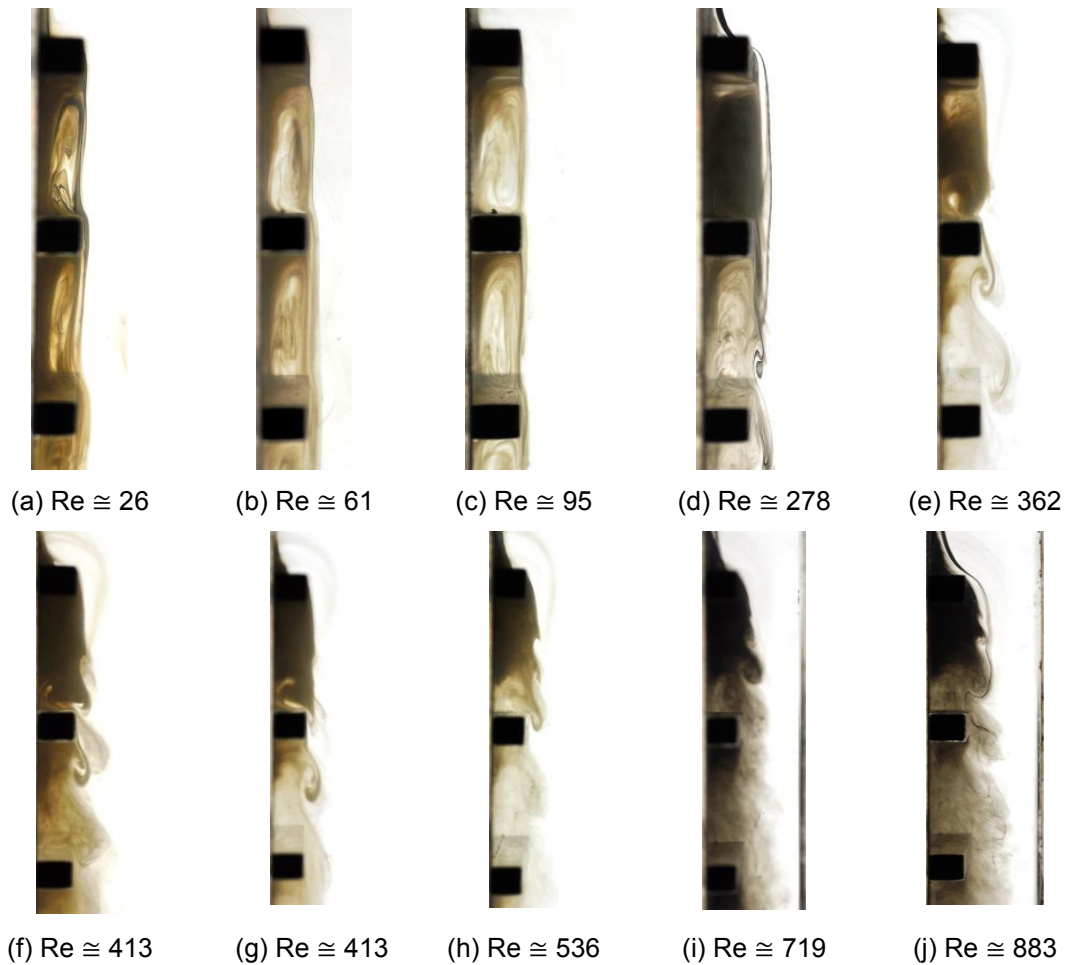
Uma imagem detalhada em “close up” da região de recirculação compreendida entre a primeira e a segunda protuberância é mostrada na Figura 5.31. Para Reynolds 357 mostrando a complexa estrutura desse escoamento. Nota-se, para esse caso específico, que o processo de entrada e saída de massa da zona recirculante ocorre próximo a aresta anterior da segunda protuberância de forma alternada. Nessa imagem maximizada é possível visualizar o instante de saída da massa do interior da zona de recirculação.

Figura 5.31 - Detalhe próximo a aresta anterior da segunda protuberância, ($Re \cong 357$).



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 5.32 - Imagens do escoamento visualizado em uma cavidade com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $4L$.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Na Figura 5.32(e), ($Re \cong 362$), observa-se a captura do exato momento da entrada da massa injetada para o interior da zona de recirculação existente entre a primeira e segunda protuberância. As imagens das Figuras 5.32(f) e 5.33(g), foram obtidas para o mesmo número de Reynolds igual a 413 mas em instantes diferentes e verifica-se a formação de uma estrutura rotacional na forma de catraca ou planetária.

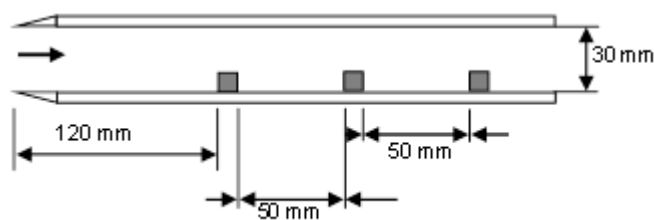
Na Figura 5.32(h), o aumento do número de Reynolds para 536 promove um aumento no número de Strouhal nas instabilidades geradas na região de cisalhamento ocorrido no descolamento da primeira protuberância que altera significativamente a geometria da estrutura rotacional planetária.

Nas Figuras 5.32(i), ($Re \cong 719$) e 5.32(j), ($Re \cong 883$), o aumento do número de Reynolds, por sua vez, provoca um escoamento muito turbulento, no qual observam-se as estruturas cisalhantes.

5.13 VISUALIZAÇÃO EM UM CANAL COM TRÊS PROTUBERÂNCIAS EM UMA DAS PAREDES, ESPAÇADAS POR UMA DISTÂNCIA RELATIVA DE CINCO PROTUBERÂNCIAS

O canal com três protuberâncias idênticas, de lado $L = 10$ mm, em uma das paredes, com espaçamento $5L$ entre elas é esquematizado na Figura 5.33.

Figura 5.33 - Esquema do canal com três protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $5L$.



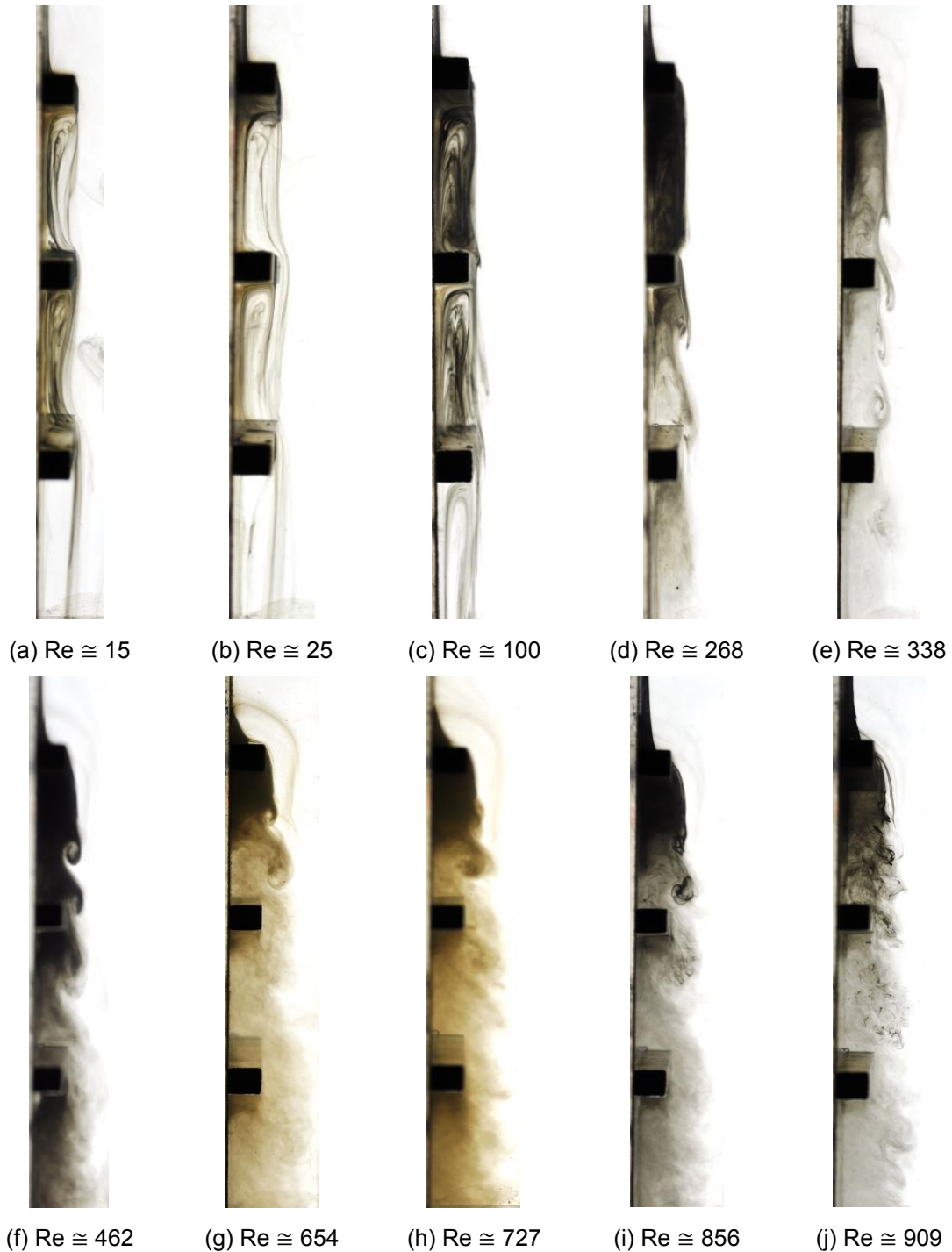
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A Figura 5.34(a) mostra o escoamento com número de Reynolds igual a 15, apresenta a formação de regiões recirculantes relativamente estáveis, com o descolamento ocorrendo na aresta posterior da primeira protuberância. Pouca alteração do escoamento ocorre para Reynolds igual a 25 da Figura 5.34(b). Entretanto, para Reynolds igual a 100, Figura 5.34(c), instabilidades consideráveis podem ser visualizadas. Para Reynolds igual a 268, Figura 5.34(d), observa-se que o descolamento ocorre na face anterior da primeira protuberância produzindo grandes perturbações no escoamento a jusante. No entanto, para Reynolds igual a 338, Figura 5.34(e), o processo de formação de vórtices gera estruturas que se propagam a jusante, mas perdendo significativamente a identidade após a terceira protuberância.

Os vórtices que se formam após a primeira protuberância dissipam-se após a terceira protuberância também na imagem da Figura 5.34(f) para Reynolds igual a 462. Na Figura 5.34(g), ($Re \cong 654$), o processo de formação e dissipação dos

vórtices permanece apesar do aumento do número de Reynolds, como também são observados nas imagens das Figura 5.34(h), (Re $\cong$ 727), 5.34(i), (Re $\cong$ 856) e 5.34(j), (Re $\cong$ 909).

Figura 5.34 - Imagens do escoamento visualizado em um canal com duas protuberâncias em uma das paredes. A distância entre as protuberâncias é de $5L$.



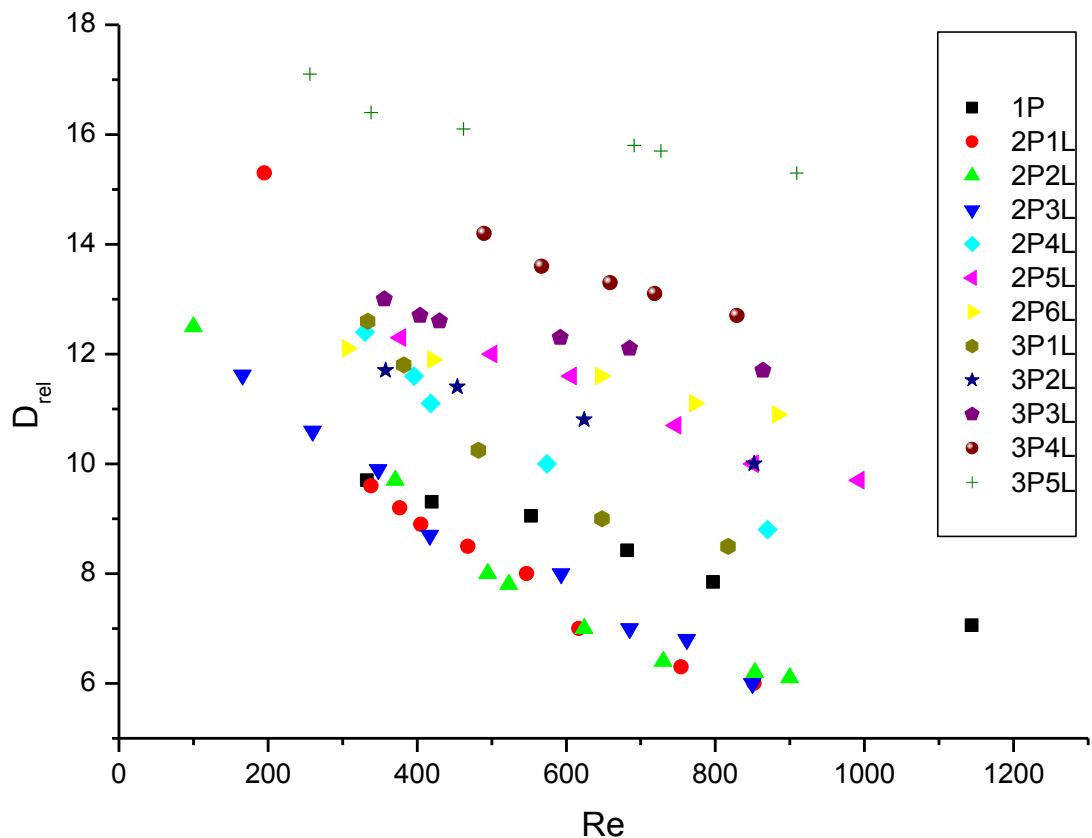
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Nos ensaios realizados em canais com protuberâncias parietais observam-se regiões de descolamentos do corante líquido na parede lisa do canal, tais desprendimentos foram identificados nas imagens da Figura 5.10 e também em todas as configurações do corpo de prova dispostos na seção de testes.

O fenômeno tende a ser antecipado com o aumento do número Reynolds. Esse descolamento provavelmente ocorre devido ao gradiente de pressão. A consequência desse efeito pode causar cavitação na parede.

Na Figura 5.35 mostra a distância relativa de descolamento, distância contada a partir da face anterior da primeira protuberância dividido pela altura (L) do corpo, em função do número de Reynolds.

Figura 5.35 - Distância relativa de descolamento (D_{rel}) em função do Reynolds



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

5.14 CONCLUSÃO

Na engenharia, mais precisamente na linha automotiva, os projetos tem sido exaustivamente estudados e melhorados tanto em ensaios experimentais quanto numéricos, assim como também em projetos aeronáuticos, nos quais a preocupação está na estabilidade das aeronaves. Pesquisas tem sido realizadas com o objetivo de analisar o coeficiente de arrasto e fenômenos tais como esteiras e vórtices formados ao longo de tais geometrias em estudo.

Na construção civil é de grande importância o estudo da região onde o projeto será construído, em razão, por exemplo, da frequência de tempestades e intensidade de correntes de ar ou de água, exemplo disso são as construções de pontes. Caso alguns fatores não forem devidamente considerados, gera-se uma catástrofe como ocorrida com a ponte de Tacoma em 7 de novembro de 1940. O mesmo pode ser dito com relação a enormes arranha céus de grandes centros, que geram grandes estruturas no escoamento do ar e modificam o comportamento do fluido para construções nas circunvizinhança. Por isso é imprescindível o estudo do comportamento do fluido nas construções próximas na redondeza de edifícios.

Com a tendência da tecnologia, equipamentos eletrônicos tem se tornado cada vez mais compactos facilitando a vida de seus usuários, porém esse procedimento deve ser rigorosamente estudado para aumentar e melhorar a vida útil dos componentes eletrônicos.

Estudos referentes a escoamento confinados em canais com protuberâncias parietais a baixo Reynolds são poucos explorados, ao contrário de pesquisas em canais, nas quais o corpo de prova encontra-se longe de efeitos de parede. As estruturas formadas em razão da presença de protuberâncias unidas às paredes diferem-se totalmente dos fenômenos causados em corpos não próximos a parede, como pode ser observado nas Figura 5.8

No estudo atual observam-se diversas estruturas geradas ao longo dos corpos fixados à parede plana. A cada bateria de ensaios os corpos eram inseridos na parede do canal e alterando-se a distância entre eles. Uma configuração típica de vórtices gerados ao longo dos corpos foi capturado sendo ela representada na Figura 5.9. Recirculação nas cavidades entre as protuberâncias foram observadas,

como mostrado na Figura 5.13. Um fenômeno interessante que merece atenção, sem registro científico, foi observado nas Figuras 5.32(h) e 5.32(i), localizado na primeira cavidade, na qual é possível notar uma recirculação acima de outra, por meio de uma linha sem corante que separa as duas. Na Figura 5.17(h) outra estrutura que merece destaque foi o aparecimento de uma 'planetária', capturada a partir de Reynolds 600. Assim como Onur e Baydar (1992), no presente trabalho observou-se uma estrutura pouco registrada no meio científico, que foi o aparecimento do descolamento da parede lisa. Os perfis do descolamento em função do número de Reynolds foram obtidos a cada disposição do corpo de prova, esse descolamento é antecipado com o aumento do número de Reynolds.

Nesse trabalho ainda há muito que explorar, em razão da grande quantidade de informações coletadas apenas para algumas configurações no corpo de prova. Em trabalhos futuros, é interessante inserir mais corpos até mesmo com dimensões distintas, mudar a distância entre as placas, inserir corpos na parede opostas, para estudar o comportamento simétrico ou alternado das protuberâncias.

6 VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS ACELERADOS

Um escoamento acelerado ao redor de um corpo não aerodinâmico gera, na maioria das vezes, um vórtice transiente. Com relativa frequência observam-se na natureza escoamentos acelerados, como por exemplo, no fluxo sanguíneo pulsátil dos animais, no qual a abertura e fechamento das válvulas cardíacas geram vórtices. Dessa forma, o estudo de escoamentos acelerados assume importância fundamental.

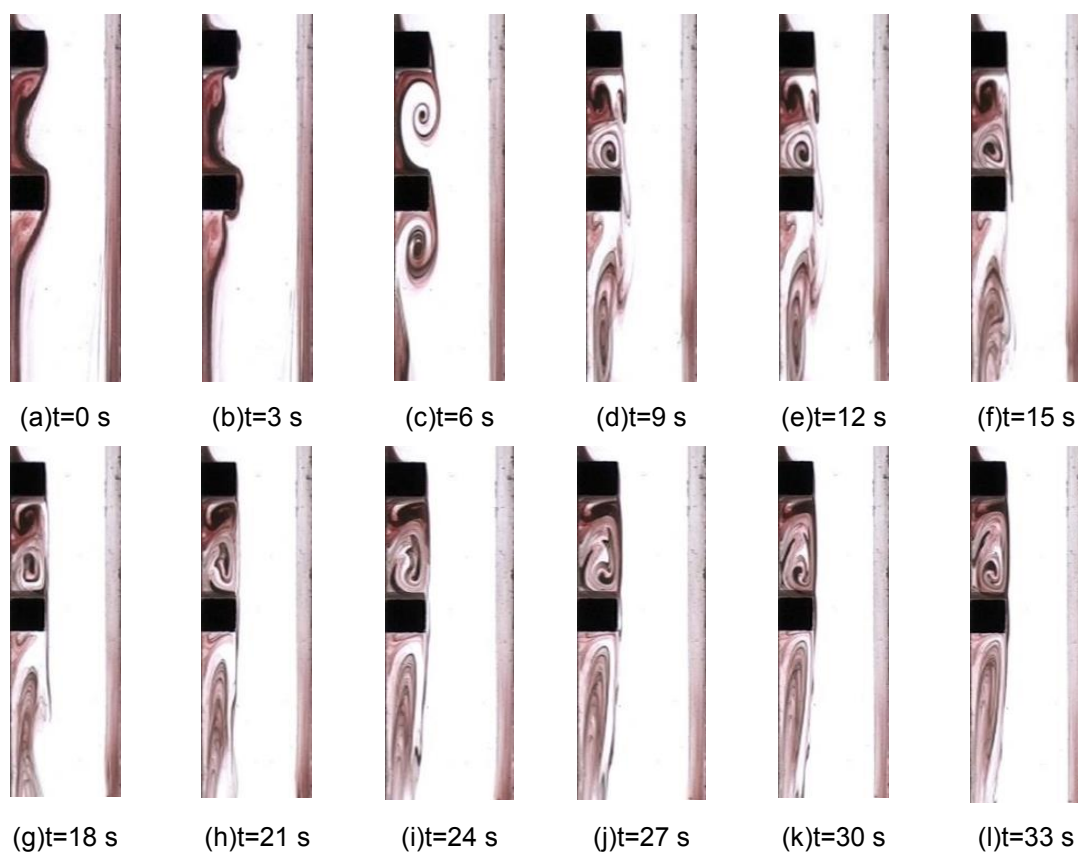
As tentativas de realizar ensaios em regime transiente acelerado no túnel hidrodinâmico antigo nem sempre geraram resultados satisfatórios. Com a construção do novo túnel hidrodinâmico houve a preocupação de capacitar a nova instalação para a realização de ensaios em regime transiente acelerado, para obtenção de resultados cientificamente exploráveis. Os resultados apresentados neste trabalho referem-se ao escoamento no interior de canais com protuberâncias nas paredes.

Para capturar as imagens dinâmicas utilizou-se uma recém adquirida câmera *Panasonic Ag-dvc20*, de 3CCD de 1/6" e 0,46 MPixels, operando em 30 fotogramas por segundo e gravando imagens em formato miniDV. A câmera é conectada a um computador por meio de uma placa IEEE 1394, permitindo uma resolução de 525 linhas. Algumas tomadas também foram realizadas com o auxílio de uma câmera *Nikon D90* com objetiva macro de 60 mm de distância focal que permite a aquisição de imagem em formato HD.

A técnica de visualização empregada foi a injeção de corantes líquidos como na captura das imagens estáticas. Para a realização dos ensaios em regime transiente o procedimento consiste inicialmente no enchimento do reservatório superior do túnel hidrodinâmico. Após a devida espera para que o fluido de trabalho atinja o repouso, abre-se lentamente a válvula de controle de vazão até a posição desejada e mantém-se um escoamento em regime permanente com um número de Reynolds previamente determinado. Nessa situação opera-se a abertura das válvulas dos injetores de corantes líquidos. Após o corante tingir o espaço entre as cavidades, a injeção é interrompida e as agulhas retiradas do escoamento para minimizar a interferência no escoamento analisado. Nesse instante, a válvula de controle de vazão é abruptamente aberta até uma posição previamente determinada, iniciando-se o experimento. Por alguns segundos o número de

Reynolds do escoamento altera-se a partir do valor inicial de partida para outro determinado valor relativo ao novo regime permanente. Esse procedimento permite a captura em vídeo do escoamento transiente acelerado no interior do canal munido de protuberâncias nas paredes. As imagens aqui apresentadas mostram alguns dos resultados preliminares obtidos. São os primeiros resultados obtidos de escoamentos transientes da equipe de trabalho e a análise qualitativa desses resultados deve ser realizada somente após a conclusão de repetidos testes para garantia de uma análise representativa correta. A observação de apenas alguns casos específicos facilmente induz ao erro em uma análise qualitativa do escoamento.

Figura 6.1 - Seqüência temporal de imagens visualizadas do escoamento transiente acelerado em um canal com duas protuberâncias espaçadas de 30 mm, de $Re = 26$ em $t = 0$ s a $Re = 136$ em $t = 33$ s.



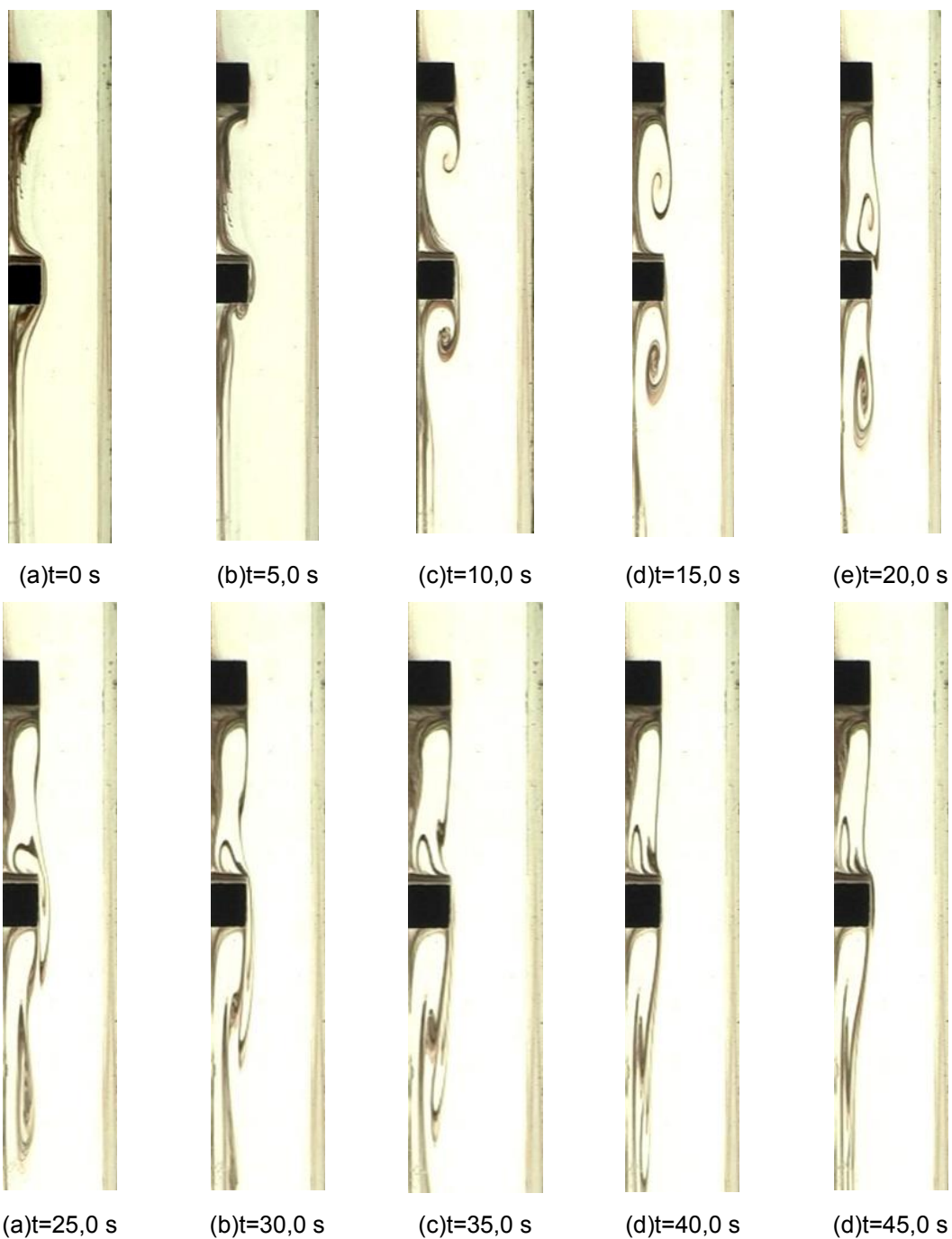
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 6.2 - Sequência temporal de imagens visualizadas do escoamento transiente acelerado em um canal com três protuberâncias espaçadas de 20 mm, de $Re = 90$ em $t = 0$ s a $Re = 250$ em $t = 9,6$ s.



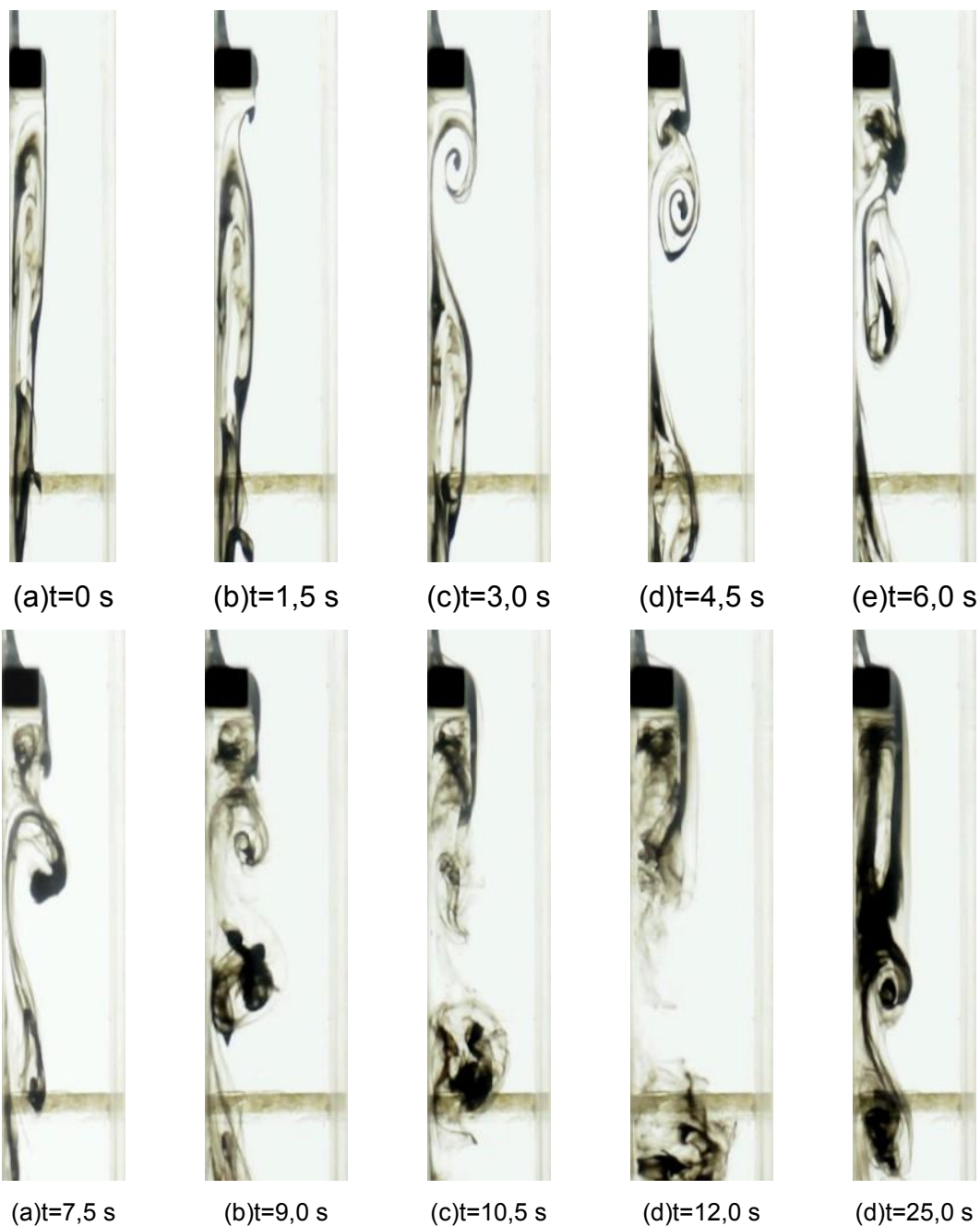
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 6.3 - Sequência temporal de imagens visualizadas do escoamento transiente acelerado em um canal com duas protuberâncias espaçadas de 40 mm, de $Re = 6,4$ em $t = 0$ s a $Re = 52$ em $t = 45$ s.



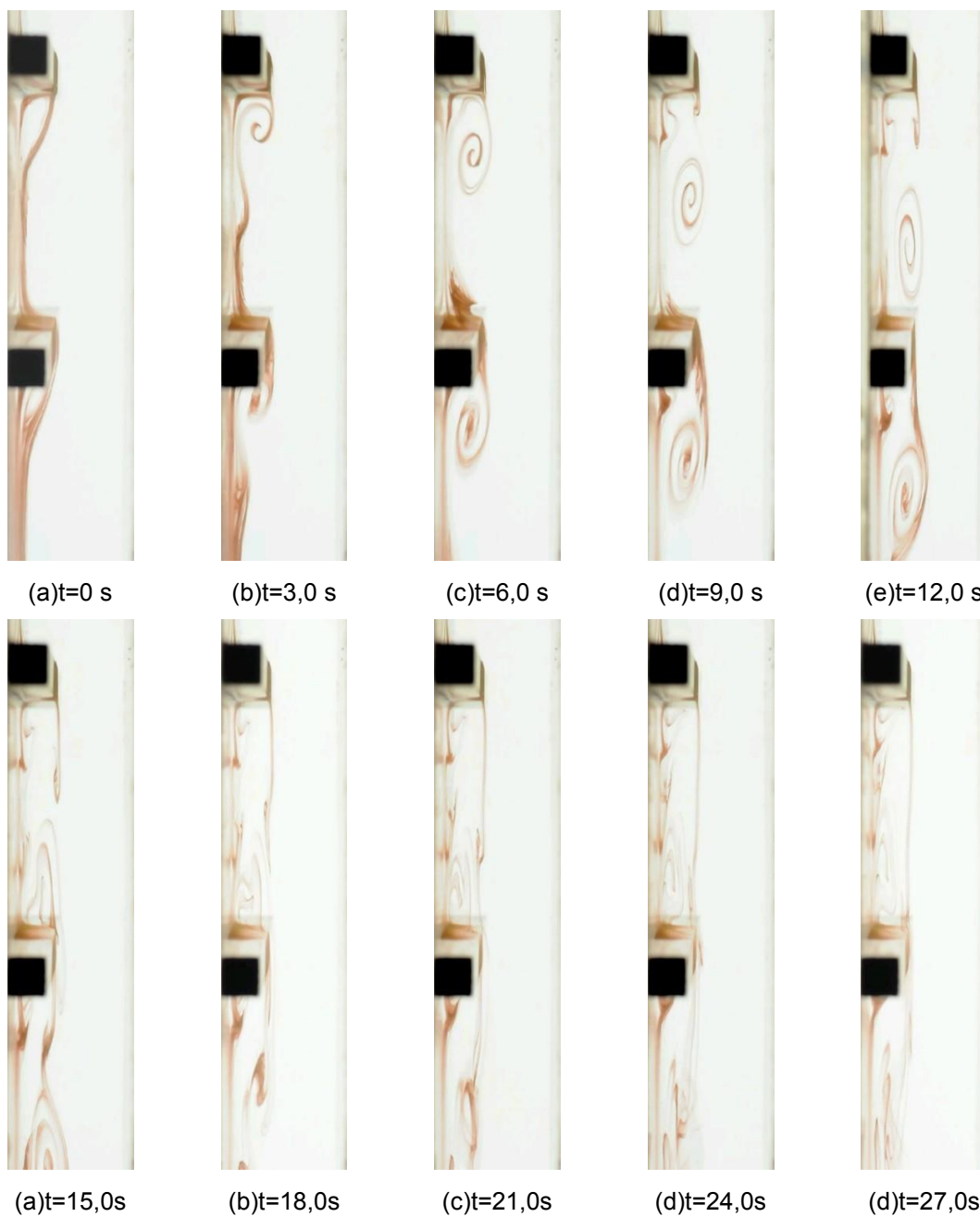
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 6.4 - Sequência temporal de imagens visualizadas do escoamento transiente acelerado em um canal uma protuberância, de $Re = 134$ em $t = 0$ s a $Re = 243$ em $t = 25,0$ s.



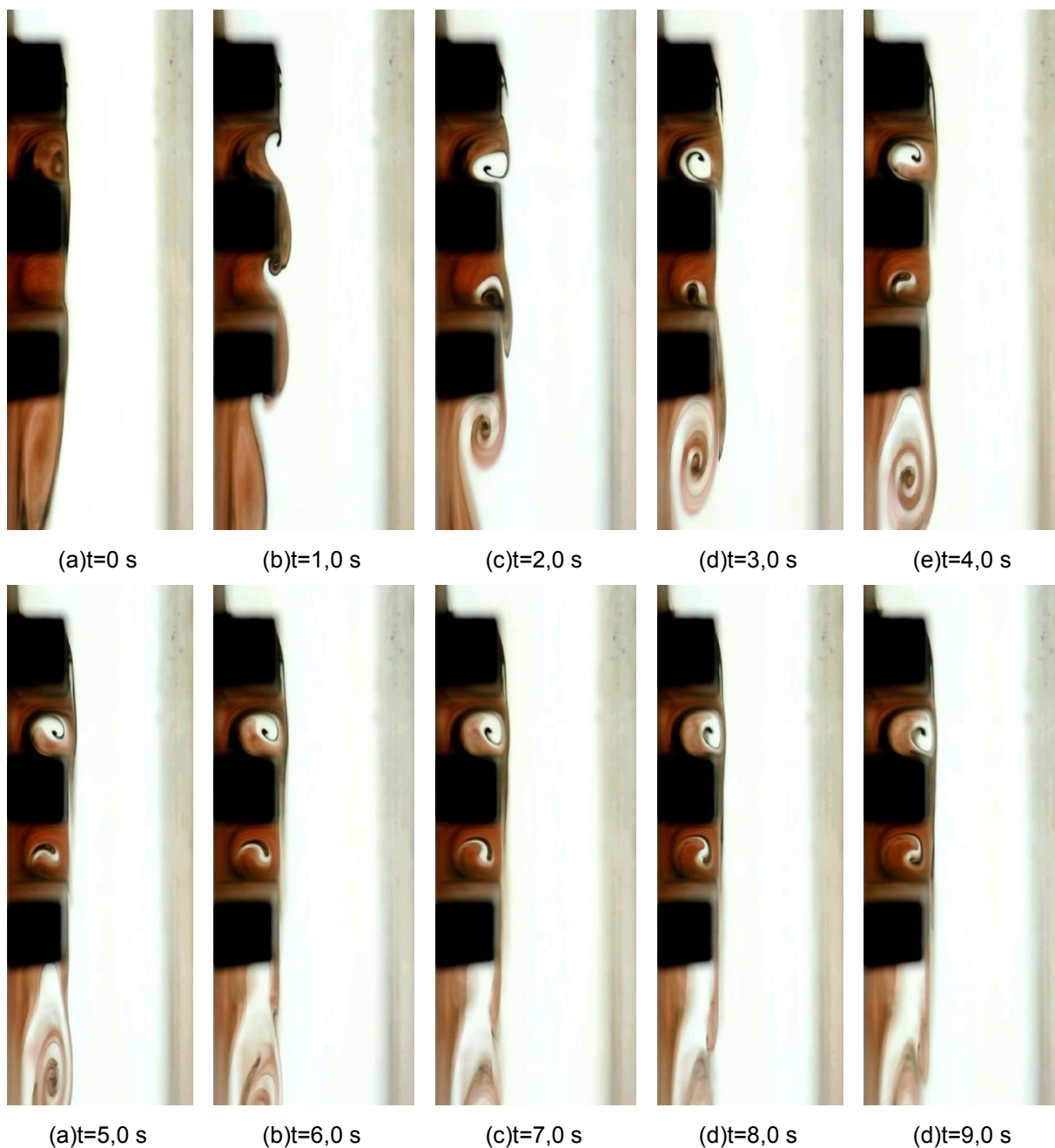
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 6.5 - Sequência temporal de imagens visualizadas do escoamento transiente acelerado em um canal com duas protuberâncias espaçadas de 60 mm, de $Re = 6,4$ em $t = 0$ s a $Re = 38$ em $t = 27$ s.



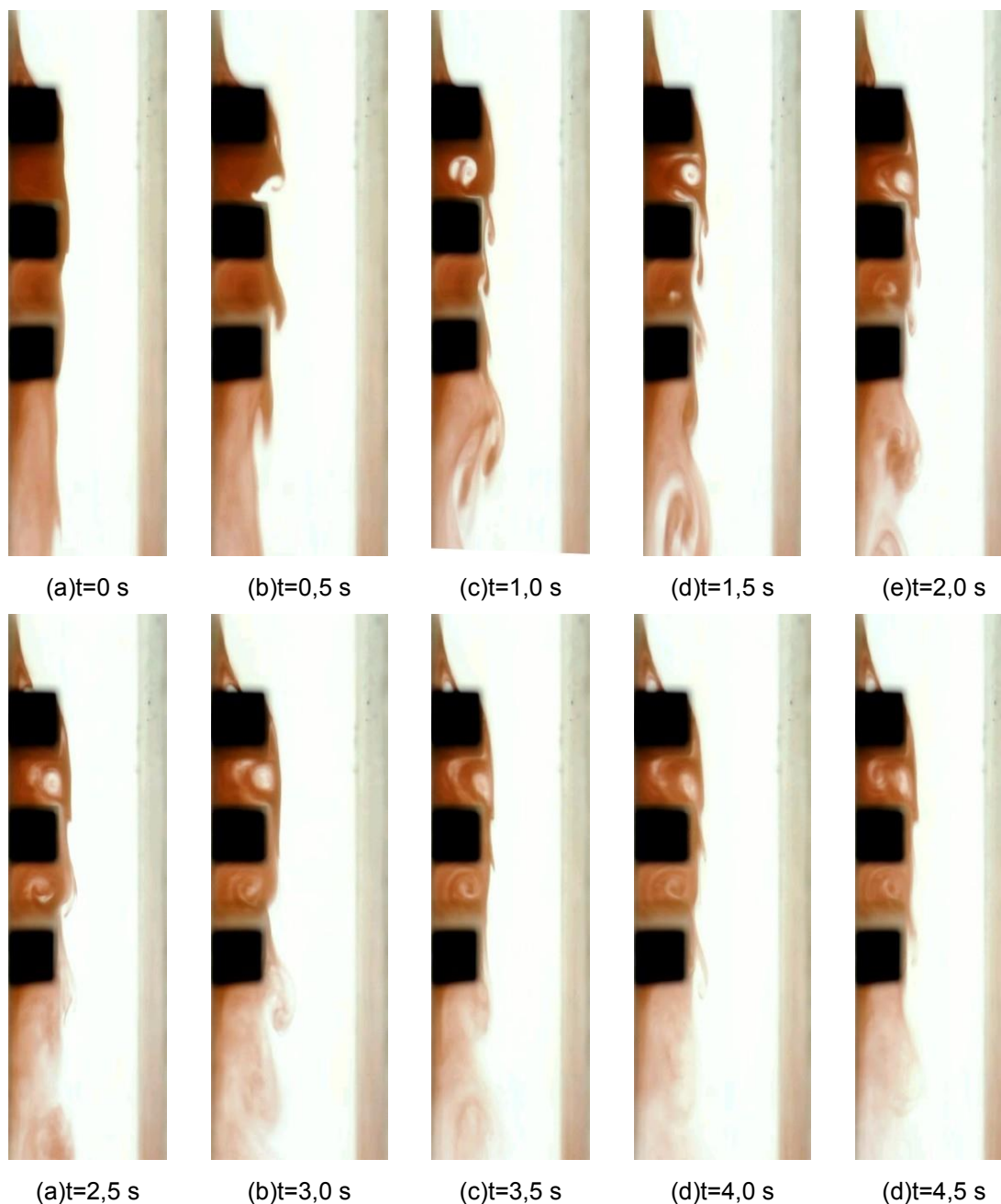
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 6.6 - Sequência temporal de imagens visualizadas do escoamento transiente acelerado em um canal com três protuberâncias espaçadas de 10 mm, de $Re = 66$ em $t = 0$ s a $Re = 71$ em $t = 9$ s.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 6.7 - Sequência temporal de imagens visualizadas do escoamento transiente acelerado em um canal com três protuberâncias espaçadas de 10 mm, de $Re = 498$ em $t = 0$ s a $Re = 631$ em $t = 4,0$ s.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

6.1 CONCLUSÃO

Escoamentos podem comportar-se de um modo contínuo ou intermitente. Em uma simples de avião, é possível estar na calmaria admirando a paisagem do alto e em um instante enfrentar uma terrível turbulência. Assim como em um

bombeamento de um fluido, há impreterivelmente um processo transiente em razão a aceleração, o qual pode resultar em cavitação no duto.

Resultados obtidos no novo túnel foram mais satisfatórios que os coletados na instalação antiga, uma vez que na reconstrução desse aparato houve intenso esforço para que o mesmo pudesse realizar ensaios em regime transiente.

Regiões de estruturas como vórtices foram capturadas por meio de vídeos, e as imagens de interesse foram editadas com o editor de vídeo, mostrando a evolução temporal dos vórtices.

Diferente de escoamentos em regime permanente, os regimes transientes apresentam estruturas bem complexas, como o aparecimento de pequenas estruturas de vórtices sobrepostas em uma grande estrutura vórtica.

Na Figura 6.1(c), na qual o valor do número Reynolds transiciona de 26 para 136, observa-se o vórtice gerado após 6 segundo da abertura da válvula, alguns instantes depois o vórtice superior choca-se com a face superior do segundo corpo, resultando no aparecimento de um vórtice contrarrotativo na face inferior do primeiro corpo, como mostrado na Figura 6.1(d). Já o vórtice inferior visto na Figura 6.1(c), começa a perder energia e passa a deformar-se, como se observa na Figura 6.1(d), provavelmente influenciado pelo efeito de parede, resultando em gradientes de velocidade, no qual o campo de velocidade na linha de corrente no lado direito ao vórtice é maior. No lado esquerdo a direção do escoamento é oposta, perceptível por meio do corante que começa a fluir na direção contrária ao escoamento. Nas Figura 6.1(d), 6.1(e) e 6.1(f), verifica-se que há um início de surgimento de um vórtice contrarrotativo. Após um determinado período o escoamento entra em regime permanente resultando em uma nova configuração do escoamento, como demonstrado na Figura 6.1(l).

7 CONCLUSÕES

No presente trabalho apresentou-se um estudo experimental do escoamento no interior de canais com protuberâncias parietais, os quais as protuberâncias são cilindros de base quadrada e retangular posicionados perpendicularmente à corrente livre. Nesses canais foram investigados várias regiões de recirculação, vórtices e instabilidades.

As técnicas experimentais empregadas ao longo de todo o trabalho foram: visualização de escoamentos e a anemometria de filme quente. A primeira delas apresentou-se como ferramenta de análise qualitativa, permitindo a identificação de padrões dos escoamentos e auxiliando na interpretação dos resultados quantitativos. A segunda, por sua vez, utilizada para a qualificação do escoamento do túnel e também na determinação da frequência de emissão dos vórtices a jusante dos cilindros.

O método usado para a visualização de escoamentos foi a utilização de uma solução aquosa de corante líquido tipo PVA, à qual foi adicionada uma pequena quantidade de álcool etílico para tornar a densidade da mistura mais próxima à da água e evitar convecção em ensaios de velocidades muito baixas. O corante líquido foi injetado no interior do canal por meio de agulhas retráteis, tais agulhas exercem forte influência no escoamento gerando uma esteira turbulenta que se forma a jusante da própria agulha. A fim de eliminar essa influência injeta-se o corante no seio do canal e em seguida retira-se a agulha deixando apenas o corante a ser lavado pelo fluido de trabalho, esse método é conhecido como *dyewash*.

De maneira geral, os parâmetros investigados mostraram forte influência sobre o escoamento relativo a cada disposição e quantidade de protuberâncias, bem como a distância entre os corpos. Os resultados obtidos foram comparados com os poucos dados encontrados na literatura, revelando, na maioria das vezes, ótima concordância. Além disso, foram identificadas estruturas não relatadas na literatura.

7.1 RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Em razão da complexidade do escoamento em canais munidos de protuberâncias parietais cilíndricos, dificilmente um estudo experimental sobre o assunto poderia abordar a totalidade de suas múltiplas facetas. Dessa forma, o

presente trabalho concentrou sua maior atenção na visualização de escoamentos, utilizando corante líquido tipo PVA como agente visualizador. Durante a realização dos ensaios experimentais e da análise e interpretação dos resultados obtidos, surgiram várias ideias para futuros trabalhos, que poderiam ser implementadas, como uma extensão do estudo aqui desenvolvido. As mais pertinentes são apresentadas a seguir:

- para todos os casos considerados, ampliar a faixa do número de Reynolds, o que implicaria na utilização de uma outra instalação experimental;
- ampliar a quantidade de corpos inseridos na parede,
- modificar o comprimento característico das protuberâncias para a identificação de novas estruturas.
- variar a largura do canal para o estudo da influência do descolamento na parede lisa;
- inserir corpos nas duas paredes, dispondo simetricamente e alternadamente;
- modificar a posição do corpo na região de entrada do canal e verificar a influência da camada limite.
- mapear os perfis de velocidade nos três canais e em diferentes posições na seção de teste

Com o objetivo de aperfeiçoar a metodologia experimental utilizada, algumas modificações podem ser realizadas, entre as quais destacam-se:

- utilizar válvulas de controle automático, para maior precisão na vazão na qual se queira chegar;
- injetar o corante através de orifícios confeccionados nos próprios modelos cilíndricos, de forma a permitir a visualização do escoamento para números de Reynolds mais elevados.

A lista de sugestões de trabalhos que poderiam ser desenvolvidos, investigando-se a influência de fatores que interferem sobre este tipo de escoamento, é praticamente infindável. Entretanto, algumas delas poderiam, sem muito esforço, ser implementadas na própria instalação experimental utilizada nesta pesquisa. São elas:

- influência da turbulência residual da corrente livre, com a introdução de grelhas de diferentes tramas na entrada da seção de testes;
- influência da rugosidade superficial e das arestas do cilindro;

- influência de vibrações do cilindro e da instalação experimental.

REFERÊNCIAS

BARTOLI, G.; BORSANI, A.; BORRI, C.; PROCINO, L.; VEZZOSI, A. L. The wind and the flying phere. In: EUROPEAN AND AFRICAN CONFERENCE ON WIND ENGINEERING – Eacwe, 5., 2009, Florence. **Proceedings...** Florence Atsugi: IAWE, 2009. 12 p.

BASSAN, R. A.; MANSUR, S. S.; VIEIRA, E. D. R. Rebuilt of a vertical hydrodynamic tunnel. In: BRAZILIAN CONGRESSO MECHANICAL ENGINEERING, 21., 2011, Natal. **Congresso...** Natal:[s.n.], 2011.

BROWN, G. L.; ROSHKO, A. On density effects and large structure in turbulent mixing layers, **Journal of Fluid Mechanics**, Shaftesbury, v. 64, p.775-816, 1974.

BRUUN, H.H. **Hot-wire anemometry** Oxford: Oxford Science Publications, 1995. 507 p.

CHERVRAY, R.; MATHIEU, J. Topics in fluid mechanics. Cambridge: [s.n.], 1993.

CLAYTON, B.R.; MASSEY, B. S. Flow visualization in water: a review of techniques. **Journal of Scientific Instrumentation**, Bristol, v. 44, p. 2-11, 1967.

COHEN, M.J.; RITCHIE, N. J. B. Low-speed three-dimensional contraction design. **Journal of the Royal Aeronautical Society**, London, v. 66, p. 231-236, 1962.

EGUTI, C. C. A.; WOISKI, E. R.; VIEIRA, E. D. R., A laboratory class for introducing hot-wire anemometry in mechanical engineering course. In: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING, 9., 2002, Caxambu. **Anais...** Caxambu: [s.n.] 2002.

EGUTI, C. C. A.; VIEIRA, E. D. R. Calibração estática e dinâmica de um circuito experimental de anemômetro de fio quente. In: CONGRESSO TEMÁTICO DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES - DINCON, 4., 2005, Bauru. **Anais...** Bauru: [s.n.], 2005.

ERICKSON, G. E. **Vortex flow correlation**. [S.l.]: Air Force Wright Aeronautical, 1981. 354 p. Report: AFWAL-TR-80-3143.

FREYMUTH, P. Flow visualization in fluid mechanics. **Review of Scientific Instrumentation**, Melville, v. 64, n. 1, p.1-18. 1993.

GALLON, M. **Application of the hydrogen bubble visualization method to the water tunnels of onera**. [S.l.: s.n.], 1989. p.535-542.

GOLDSTEIN, R. J. (Ed.). **Fluid mechanics measurements**. New York: Hemisphere Publishing, 1983.

HESSELINK, L.; HELMAN, J.; NING, P. Quantitative image processing in fluid mechanics. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Philadelphia, v. 5, p. 605-616. 1992.

HESSELINK, L. Digital image processing in flow visualization. **Annual Review of Fluid Mechanics**, Palo Alto, v. 20, p.421-485. 1988.

HIRAI, A. H.; MANSUR, S. S.; VIEIRA, E. D. R. Vortex flowmeter with square shedders at moderate reynolds numbers. In: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING - ENCIT PAPER CODE – ABCM, 13., 2010, Uberlândia. **Anais...** Uberlandia: [s.n.], 2010. ENC10 0507.

LEWEKE, T.; PROVANSAL, M. The flow behind rings: bluff body wakes without end effects. **Journal of Fluid Mechanics**, New York, v. 288, p.265-310.

LINDQUIST, C.; MANSUR, S. S.; VIEIRA, E. D. R. Estudo experimental do número de strouhal de corpos cilíndricos de base quadrada: Influência da razão de bloqueio. In: ACTS DEL CONGRESO LATINO AMERICANO DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MATERIA, 7., 1995, Salta. **Congresso...** Salta: [s.n.], 1995. v. 2, p. 548-552.

LINDQUIST, C.; VIEIRA, E. D. R.; MANSUR, S. S. Flow visualization of the von kármán vortex street: a tool for fluid mechanics learning. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND COMPUTER EDUCATION, 1999, Rio de Janeiro, **Proceedings...** Rio de Janeiro: [s.n.], 1999. 1 CD-ROM.

LINDQUIST, C.; VIEIRA, E. D. R.; MANSUR, S. S. Flow around square cylinders in several attack angles. In: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING- ENCIT, 13., 2012, UBERLANDIA. **Anais...** Uberlandia: [s.n.], 2010. (ABCM Paper Code, ENC10 0507).

LINDQUIST, C. **Estudo experimental do escoamento ao redor de cilindros de base quadrada e retangular**. 2000. 188 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2000.

MANSUR, S. S; VIEIRA, E. D. R.; SAITO, M.; ESPERANÇA, G. A. S. Visualização experimental do escoamento ao redor de cilindros de base quadrada posicionados transversalmente ao fluxo livre. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS- ENCIT; CONGRESO LATINO AMERICANO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR Y MATERIA- LATCYM, 5., 1996, Florianópolis. **Anais...** Florianopolis: [s.n.], 1996 v. 2. p. 1103-1108.

MARTINUZZI R.; TROPEA C. The flow around surface - monted, prismatic obstacles placed in a fully developed channel flow. **Journal of Fluid Engineering**, New York, v. 115, p. 85-92, March 1993.

MEGA, E. A. F. **Visualização experiemetal do escoamento no interior de cavidades abertas utilizando um canal de superfície livre**. 2009. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

MEGA, E. F.; MORAIS, V. S.; VIEIRA, E. D. R.; MANSUR, S. S. Experimental visualization of the flow inside open cavities. In: BRAZILIAN CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 19., 2007, Brasília. **Anais...** Brasília: [s.n.], 2007. (ABCM Paper Code, COB07 1761).

MERZKIRCH, W. **Flow visualization**. 2. ed. Orlando: Academic Press, 1987.

MORDOFF, K. F. NASA water tunnel aids flow dynamics research. **Aviation Week**, New York, 1986.

ONUR H. S.; BAYDAR E. Laminar channel flow over a square step. **Journal of Science & Engenharia Ambiental**, Nagpur, v. 30, n. 9, p. 1109-1116, 1992.

SAKAMOTO H.; HANIU H. Aerodynamic forces acting on two square prisms placed vertically in a turbulent boundary layer. **Journal of Wind Engineering and Industrial aerodynamics**, Armsterdam, v. 31, p. 41-66, 1988.

TAEYOUNG H.; PATEL, V. C. Flow separation on a spheroid at incidence. **Journal of Fluid Mechanics**, New York, v. 92, p. 643-657, 1979. Doi: 10.1017/S002211207900080X.

TANEDA, S. Visualization of separating stokes flows. **Journal Physical Society Japan**, Minato-Ku, n. 46, June, 1979.

TOVBICH, O. V. Experimental study of the structure of flow over a ribbed wall. **Fluid Mechanics Research**, v. 21, n. 2, March-April 1992.

TRITTON, D. J. **Physical fluid dynamics**. 2. ed. [S.l.]: Oxford Science Publications, 2007.

VIEIRA, E. R. D. **Estudo qualitativo e quantitativo de escoamentos ao redor de corpos não aerodinâmicos utilizando-se técnicas de visualização em meio hidrodinâmico**. 1997. Tese (Doutorado)- Instituto Tecnológico de Aeronáutica- ITA, São José dos Campos, 1997.

VIEIRA, E. D. R.; MANSUR, S. S. Visualização experimental de escoamentos. In: Möller, S.V.; Silvestrini, J. H. (Ed.). **Turbulência**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Ciências e Engenharia Mecânicas - ABCM, 2004. v. 4, p. 33-71. Coleção Cadernos de Turbulência.

VIEIRA, D. G. S. D. R. **Simulação numérica do escoamento de um canal 2D munido com protuberâncias parietais quadradas**. Ilha Solteira: Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, 2007. Trabalho de Iniciação Científica.

VIEIRA, E. D. R.; MANSUR, S.S. Fotografia em mecânica dos fluidos. In: Mansur, S. S.; Vieira, E. D. R.; SILVEIRA NETO, A. (Ed.). **Turbulência**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2010. p. 325-378, Coleção Cadernos de Turbulencia.

WERLÉ, H. Hydrodynamic Flow Visualization. **Annual Review of Fluid Mechanics**, Palo Alto, v. 5, p. 361-382, 1973.

APÊNDICE A – NUMERO DE REYNOLDS (RE)

Em experiências independentes e simultâneas, efetuadas por Hagen e por Poiseuille em 1839 sobre o movimento dos líquidos em tubos de pequenos diâmetro, foi observado que a pressão diminui com o valor da velocidade de forma linear, quando a velocidade é baixa. Também observaram que essa lei de variação não é válida para altas velocidades. Notaram ainda a dependência do diâmetro do tubo e da temperatura do líquido nesse fenômeno.

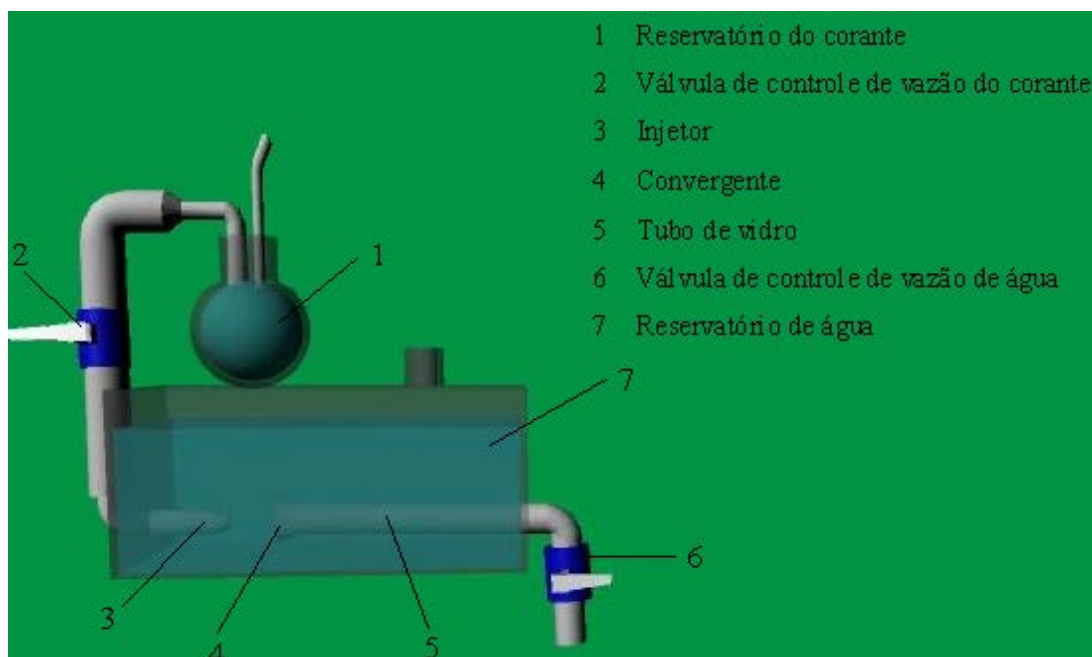
Em 1883, procurando observar o comportamento do escoamento dos líquidos, Osborne Reynolds empregou um dispositivo como esquematizado na figura, que consiste de um tubo transparente inserido em um recipiente com paredes de vidro. Um corante é introduzido na entrada do tubo. Ao abrir gradualmente o obturador T, Reynolds observou a formação de um filete retilíneo. Neste tipo de movimento, definido como laminar, as partículas apresentam trajetórias bem definidas que não se cruzam. Ao abrir mais a torneira, a velocidade aumenta e o filamento se difunde no líquido, como consequência do movimento desordenado das partículas. Este regime denomina-se turbulento. Ao reverter o processo, o filamento regular se restabelece a partir de uma certa velocidade, a qual recebe a denominação de velocidade crítica inferior .

Após investigações experimentais e teóricas, Reynolds concluiu que o critério mais apropriado para se determinar o tipo de escoamento em uma canalização não se atém exclusivamente ao valor da velocidade, mas a uma expressão adimensional na qual a viscosidade do líquido também é levada em consideração. Este adimensional, que passou a ser conhecido como Número de Reynolds, é expresso da seguinte maneira:

$$Re = \frac{\rho V_{\infty} D}{\mu} \quad (A.1)$$

Onde ρ é a densidade do fluido, V_{∞} é a velocidade, D é o diâmetro do conduto e μ é denominada viscosidade dinâmica. O aparato do experimento de Reynolds é esboçado através da Fig. A.1.

Figura A.1 - Aparato experimental de Reynolds.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Osborne Reynolds nasceu em Belfast, cidade da Irlanda, em 23 de agosto de 1842, em meio a uma clerical família Anglicana. Em Cambridge, Reynolds foi um bem sucedido aluno em Matemática, tornando o septuagésimo aluno exemplar em matemática de Cambridge em 1867. Foi eleito, no mesmo ano, membro do "Queen's College", tal como seu pai, e imediatamente após começou a trabalhar na firma de engenharia civil de John Lawson, vindo a falecer em 1912.

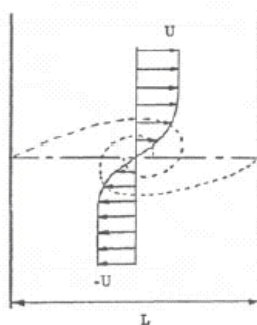
APÊNDICE B – INSTABILIDADE DE KELVIN HELMOLTZ

É comum no cotidiano depararmos com fenômenos na natureza, e admirar o seu comportamento ao longo do tempo e espaço, acontecimentos, tais como as instabilidades de Kelvin Helmholtz, que despertam a curiosidade de quem tem o privilégio de observá-las. Além de ser raro o seu aparecimento, essas instabilidades são geradas através de algumas condições, sendo elas; a velocidade cisalhante que está presente em um único fluido contínuo ou quando há um gradiente de velocidade entre dois fluidos.

Pode-se considerar como exemplo, o vento soprando sobre uma superfície de água, onde o vento causa um movimento relativo entre as camadas estratificadas, ou seja, água e ar. A instabilidade se manifestará em forma de ondas geradas na superfície da água.

Essa teoria também contribui para prever o início das instabilidades, por consequência disso podendo resultar em transição para escoamento turbulento em fluido de densidades desiguais, que se deslocam com gradientes de velocidades. A Fig. (B.1) representa o fenômeno registrado, pelo qual a nuvem é o agente visualizador que possibilita a observação do comportamento físico, e a mesma está situada na região da camada de mistura.

Figura B.1 - Kelvin-Helmholtz visualizado através das nuvens.



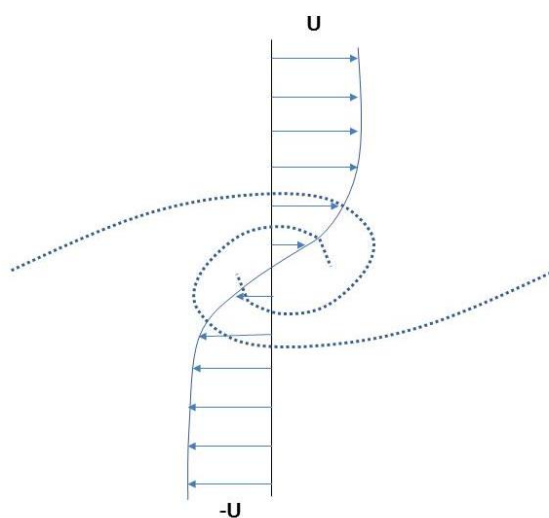
Fonte: Mega et al. (2009).

O perfil de velocidade é um dos fatores que geram as instabilidades de Kelvin-Helmholtz, onde a velocidade podendo estar no mesmo sentido, porém com gradiente, o resultado disso é o atrito entre as linhas de corrente.

A força cisalhante será decorrida da interação das intensidades de velocidade, sendo o vetor menos intenso “atropelado” pelo vetor com maior potência. Esse fenômeno também ocorre nas regiões da camada limite.

Também podem se formar tais estruturas, se as velocidades estiverem com sentidos opostos. A estrutura de Kelvin-Helmholtz dependem pouco dos efeitos viscosos, mas ela é altamente dependente do comportamento dos campos médios de velocidade, que devem ser inflexionais. Como mostra a Fig. B.2.

Figura B.2 - Inflexão do perfil de velocidade.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

APÊNDICE C – DETALHAMENTO DO TÚNEL HIDRODINAMICO VERTICAL

C.1 Reservatório Superior

O reservatório superior, também chamado de câmara de estagnação, foi fabricado com material composto de resina poliéster e fibra de vidro e reforçado com uma estrutura de aço, que lhe confere maior rigidez

Em sua parte superior, existe uma expansão suave, a qual é uma (CS) com seção transversal octogonal, inscrita num círculo de 1m de diâmetro, com uma altura de aproximadamente 0,2 m. Nessa seção encontra-se acoplada uma saída de PVC com 0,1 m, adicionalmente com uma redução para 0,075 m que funciona como ladrão, com a finalidade de evitar o seu transbordamento. No topo do corpo principal do reservatório superior encontra-se uma tela de aço inoxidável de trama fina, com o objetivo de impedir o ingresso de pequenas impurezas no interior do túnel. Sobre o reservatório superior será projetada uma “saia”, que será confeccionada de couro ou material similar no qual protegerá a instalação de impurezas indesejáveis sobre o aparato experimental.

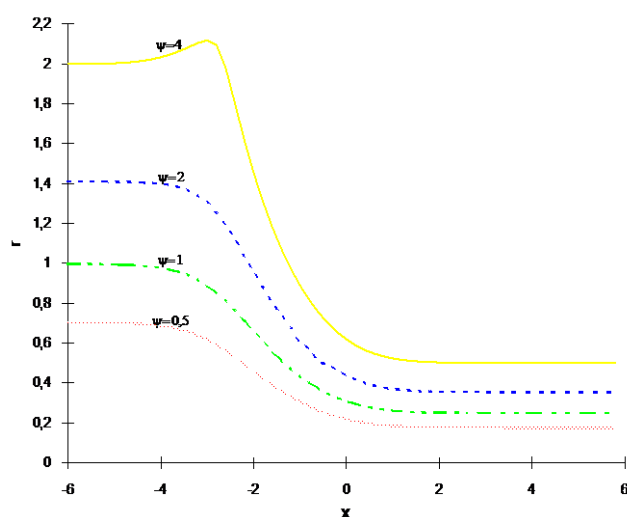
No interior do reservatório superior, próximo à entrada da contração, localiza-se uma camada de colméia de alumínio com células hexagonais regulares. Abaixo da colméia existe uma tela de aço inoxidável, com fios dispostos numa trama quadrada regular. Esse conjunto, envolvido por uma cinta de aço inoxidável, contribui para estabilizar o perfil de velocidade na entrada da contração, reduzir o nível de turbulência e, com isso, fazer com que o fluido não entre em movimento na forma de espiral.

C.2 Contração Inferior

A seção de contração inferior do túnel possui uma razão de contração de 16:1 e um comprimento de 0,6 m. Semelhantemente ao reservatório superior, foi construída em material composto reforçado com cintas de aço. Sua seção de entrada possui o mesmo formato octogonal regular do reservatório superior, enquanto que a seção de saída possui um formato octogonal irregular, semelhante a um quadrado com os cantos cortados.

Esse perfil da contração foi projetado, segundo o método proposto por Cohen & Ritchie (1962). Detalhes sobre o projeto da seção de contração podem ser encontrados no trabalho de Vieira (1997). A Figura C1 apresenta o diagrama das funções de corrente (Ψ) obtidas no projeto da contração. Um valor de $\Psi = 4$ mostra-se evidentemente inconveniente e um valor de $\Psi = 1,0$ gera uma contração excessivamente longa. O valor escolhido, $\Psi = 2$, é aceitável para o contorno da parede por produzir um gradiente de pressão satisfatório nas paredes.

Figura C.1 - Linhas de corrente do projeto da contração.



Fonte: Vieira (1997).

C.3 Contração superior

A contração superior encontra-se no topo do túnel. Sua geometria possui o formato octogonal regular, e onde é instalado o ladrão. Construído com o mesmo material do túnel, inscrita num círculo de 1m de diâmetro.

C.4 Medidor de Vazão Magnético

Logo abaixo da seção de testes do túnel, encontra-se instalado um medidor de vazão magnético marca *Yokogawa* modelo AXF1 OOG. Esse equipamento, além de permitir a monitorização do valor instantâneo da vazão volumétrica do escoamento que flui no interior da seção de testes, possui uma saída analógica

proporcional ao valor medido da vazão, que pode ser utilizado para o controle automático da vazão do túnel.

A velocidade da corrente livre é calculada assumindo-se um perfil de velocidade uniforme no interior da seção de testes, ou seja,

$$V_{\infty} = \frac{Q}{A_{st}} \quad (C1).$$

Na qual Q é a vazão volumétrica do escoamento no interior da seção de testes, $[m^3/s]$, (medida com o auxílio do medidor de vazão eletromagnético), e A_{st} é a área transversal da seção de testes $[m^2]$, imediatamente a montante da posição em que o cilindro encontra-se instalado.

C.5 Reservatório Inferior

O reservatório inferior armazena o fluido que escoar da tubulação de descarga do túnel e supre o sistema de abastecimento com água da rede urbana. Construído em alvenaria no lado de fora do laboratório abaixo do nível do piso, ele possui duas saídas de quatro polegadas e duas entradas de abastecimento com tubulação 3/4 por meio da rede urbana com bóia, e o retorno de 4 polegadas da tubulação de descarga do túnel. Esse reservatório pode armazenar um volume útil de aproximadamente $9,822 \text{ m}^3$.

C.6 Válvulas Controladoras de Vazão

O túnel possui uma válvula controladora de vazão instalada numa posição intermediária da tubulação de descarga, da marca Neles e com diâmetro nominal de 100 mm. A (VB) é do tipo borboleta com acionamento manual.

O acionamento manual da válvula VB é realizado por meio de um volante, que por intermédio de uma redução de 40:1, atua sobre o elemento restritivo da válvula. Essa característica possibilita um ajuste fino da vazão do túnel, que se torna indispensável para a realização de determinados tipos de ensaio.

C.7 Válvula de Escape

A válvula de escape (VE) tem dimensão de $\frac{3}{4}$ e está instalada na tubulação do subsolo entre o (MV) e a (VB), além de servir com uma válvula controladora de vazão, sua funcionalidade é escoar todo o fluido no interior do túnel e principalmente na região entre a (VB) e a (ST) onde forma um sifão.

Esta válvula é do tipo esférica e o fluxo que passa por ela é escoado para um sistema de tratamento de água.

C.8 Tubulação de Descarga

A tubulação de descarga é composta de tubos e conexões de PVC roscável de 4 polegadas e que conduz o fluido utilizado nos ensaios para o reservatório inferior. No início da tubulação de descarga, encontra-se medidor de vazão magnético marca *Yokogawa* modelo AXF1 OO, que precede a válvula (VB) controladora de vazão.

O formato dessa tubulação de descarga é de um sifão, tal configuração esta permite a calibração do medidor de vazão eletromagnético, para que o mesmo possa sempre trabalhar afogado e não prejudicar a aferições de vazão.

C.9 Controlador do Nível do Fluido no Reservatório Superior

O controlador do nível máximo de fluido no reservatório superior também conhecido como ladrão (LD), tem como finalidade de escoar o fluido mantendo o nível sempre constante evitando seu transbordamento. O (LD) opera com as válvulas borboleta manual (VB) e a válvula de alimentação (VA).

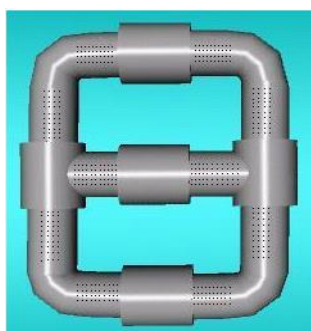
Essa tubulação sai do topo do reservatório superior com uma redução de 4 para 3 polegadas na saída. Sua montagem é feita em tubos de PVC de esgoto de 3 polegadas, dos quais 0,5 m são perpendicularmente ao solo e continuam a jusante com cerca de 4,30 m a 45° do solo e por fim descem 1,90 m perpendicularmente até o subsolo. Parte do (LD), 0,24 m, é de um tubo de acrílico para visualizar o escoamento e estar atento a qualquer variação.

C.10 Sistema de Abastecimento

O sistema de abastecimento do túnel é constituído por uma bomba centrífuga, (BC), uma válvula controladora de vazão, (VA), a tubulação e um difusor de descarga. A bomba centrífuga da marca KSB megachem tipo (32-200), encontra-se na sala de máquinas apoiada sobre uma base maciça de ferro. A tubulação de recalque, confeccionada em tubos de PVC com 0,075 mm de diâmetro nominal, abriga a válvula, (VA), e o difusor de descarga, (DD). A válvula controladora de vazão, (VA), é do tipo borboleta, com acionamento manual por uma alavanca, permitindo o ajuste da vazão de abastecimento do túnel.

O difusor de descarga feito com tubos de 0,075 mm de PVC, na forma de H fechado, seu perímetro de aproximadamente 3.09 metros de tubos, sua massa é de 11 kg vazio e podendo chegar com volume máximo de até 13,65 litros, portanto a massa total do chuveiro com o fluido pode-se chegar até 24 kg. Esse difusor conta com 614 orifícios com diâmetro nominal de 0,003 m, espaçados 0,01 m de centro a centro. Somando-se as áreas dos orifícios feitos no difusor de descarga segundo a equação $614 \pi r^2$ no qual chega-se a área total de $4,33791 \times 10^{-3} \text{ m}^2$. Na Figura C2 mostra-se o difusor de descarga.

Figura C.2 - Difusor de descarga.



(a) Figura ilustrativa
(vista inferior)



(b) geometria final
adotada



(c) teste do difusor

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

C.11 Sistema de Alimentação pela Parte Inferior do Túnel

O sistema de alimentação do túnel pela parte inferior é constituído pela (MA) que se encontra na tubulação do subsolo entre a (VB) e a (ST).

A necessidade de alimentar o reservatório superior pela parte inferior, é para evitar a geração de bolhas no corpo de prova, na parede do túnel e principalmente nas telas e colméias. Esse modo de alimentação é rigorosamente indicado com baixa vazão, pois ele garante o não surgimento de bolsões de ar nas proximidades da colméia.

C.12 Marcador do Nível do Fluido no Reservatório Superior

O marcador do nível do fluido (NF) é constituído de uma mangueira de plástico com as dimensões: 5/16, de diâmetro interno por 3/8, de diâmetro externo, o qual é instalada na parte exterior do reservatório superior. O (NF) inicia-se após a região das telas e colméias e prossegue-se até a extremidade superior do túnel.

Esse marcador é essencial para a verificação do nível do fluido. Ao fazer a alimentação pela (MA), observa-se que a partir do instante que o fluido chega no marcador pode-se dar a partida na bomba centrífuga.

É imprescindível não operar a bomba centrífuga, quando o fluido estiver abaixo do marcador do nível de água, isso significa que o fluido está na região da colméia.

Também é de grande valia a verificação do nível no momento do abastecimento do túnel e preocupar-se para o não transbordamento. Mesmo no instante em que o túnel está sendo operado em modo *blow-down*, o marcador do nível serve para estar atento a uma possível parada para o reabastecimento.

Ao operar o túnel no modo contínuo, o nível indicador do fluido auxilia o operador a posicionar o fluido na localização desejada, por meio das aberturas das válvulas.