



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

**Estudo Experimental da Emissão de Vórtices
em Torno de Corpos Não-Aerodinâmicos
Inseridos em Dutos Circulares para Moderados
Números de Reynolds: Aplicação em
Medidores de Vazão**

Angelo Haruki Hirai

Ilha Solteira - SP

1210001388



**Estudo Experimental da Emissão de Vórtices em Torno de
Corpos Não-Aerodinâmicos Inseridos em Dutos Circulares
para Moderados Números de Reynolds:**

Aplicação em Medidores de Vazão

Angelo Haruki Hirai

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**.

Orientador: Prof. Dr. Edson Del Rio Vieira

Ilha Solteira, Março de 2003

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da FEIS/UNESP

Hirai, Angelo Haruki

H668e Estudo experimental da emissão de vórtices em torno de corpos não- aerodinâmicos inseridos em dutos circulares para moderados números de Reynolds: aplicação em medidores de vazão / Angelo Haruki Hirai. – Ilha Solteira : [s.n.], 2003
xxxiii, , 227 p. il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2003

Orientador: Edson Del Rio Vieira

Bibliografia: p. 163-169

1. Vórtice. 2. Escoamento. 3. Medidores de vazão.

Estudo Experimental da Emissão de Vórtices em Torno de Corpos Não-Aerodinâmicos Inseridos em Dutos Circulares para Moderados Números de Reynolds: Aplicação em Medidores de Vazão

Angelo Haruki Hirai

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE

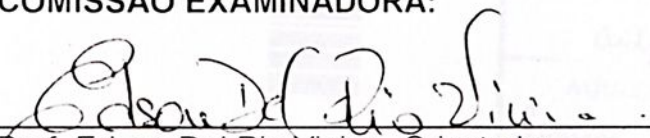
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

NA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM CIÊNCIAS TÉRMICAS E APROVADA
EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

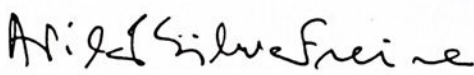


Prof. Dr. João Antonio Pereira - Coordenador

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Edson Del Rio Vieira - Orientador



Prof. PhD. Átila Pantaleão da Silva Freire



Prof. Dr. Ricardo Alan Verdú Ramos

Ilha Solteira – SP, março de 2002

1210001388



Proc. 053/2003-NRD 107/03

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÉCN. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CIRCULAR	DATA DE TÓRPO
28.05.03	30.06.03
RE	TÓRPO
Alza	Tz. 1388
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
Ilza Autor R\$ 10,00	H668e

30500001

Sps 199315

Sps 55464

C

A Deus

à minha família

aos meus amigos

aos meus professores

BCpIS - FEIS - UNESP

unesp



AGRADECIMENTOS

O presente trabalho de caráter experimental foi inteiramente desenvolvido nas dependências do *Laboratório de Visualização de Escoamentos*, vinculado ao Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP – Câmpus de Ilha Solteira. Durante a sua realização, pude contar com a colaboração de várias pessoas e instituições, às quais gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos.

- Ao Prof. Edson Del Rio Vieira, pela orientação e amizade, das quais desfrutei ao longo dos últimos anos;
- Ao meu primeiro orientador o Prof. José Luiz Gasche, pelos ensinamentos e amizade;
- Ao corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica que me proporcionou uma sólida formação profissional, e em especial ao Prof. Sérgio Said Mansur pelo apoio e colaboração e ao Prof. André Luis Seixlack pelo auxílio prestado;
- Aos professores Átila Pantaleão da Silva Freire (UFRJ) e Ricardo Alan Verdú Ramos, membros da banca examinadora que aceitaram a incumbência de julgar esta dissertação;
- Aos técnicos do Departamento de Engenharia Mecânica, Darci, Edivaldo, Marino, Ronaldo, pelo auxílio prestado, e especialmente o técnico Reginaldo Cordeiro pelo auxílio prestado durante a construção e montagem do módulo experimental e acima de tudo pelos ensinamentos profissionais e a amizade. Aos técnicos Cavassano, Gilberto, Mário e Ronaldo, do Departamento de Engenharia Civil pelo empréstimo de equipamentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho experimental;
- Ao técnico de informática Elias, pelo esforço devotado no gerenciamento da rede de computadores;
- À Sandra e ao Alex da secretaria, pela dedicação e apoio;
- Aos meus amigos (as) do curso de pós-graduação: Carla Nagata, Doi, Edlene, Fabiano, Fábio, Gustavo, Kátia, Luciene, Odacir, Paupitz, Rúbia e Ailton;
- À CNPq, pelo suporte financeiro que viabilizou a realização deste trabalho, concedido na forma de uma bolsa de mestrado (Proc.130860/2001-8);
- À PROPP, pelo auxílio à minha participação em eventos científicos.

LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE FIGURAS	XV
LISTA DE SÍMBOLOS	XXV
RESUMO.....	XXVII
ABSTRACT.....	XXIX
PREÂMBULO.....	XXXI

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	01
1.1 Medidores de Vazão.....	01
1.2 Objetivo e Escopo do Trabalho	07

CAPÍTULO 2 – ESCOAMENTO COM A PRESENÇA DE VÓRTICES: ASPECTOS HISTÓRICOS E FENOMENOLÓGICOS, REVISÃO DA LITERATURA E APLICAÇÕES.....	09
2.1 Introdução.....	09
2.2 Medidor de Vazão do Tipo Vórtice.....	25
2.3 Princípio de Funcionamento de um Medidor de Vazão do Tipo Vórtice	27
2.4 Vantagens e Desvantagens de um Medidor de Vazão do Tipo Vórtice.....	29
2.5 Fatores que Influenciam no Desempenho dos Medidores de Vazão do Tipo Vórtice	32
2.5.1 Características do Corpo Gerador de Vórtices	33
2.5.2 Localização do Sensor em Relação ao Corpo Gerador de Vórtices.....	34
2.5.3 Vibrações na Tubulação	36

2.5.4 O Efeito da Turbulência.....	38
2.6 Determinação Experimental da Frequência de Emissão dos Vórtices.....	39
2.6.1 Introdução.....	39
2.6.2 Métodos para Determinação da Frequência de Emissão dos Vórtices.....	41
CAPÍTULO 3 – TÉCNICAS EXPERIMENTAIS	53
3.1 Introdução	53
3.2 Anemômetro de Temperatura Constante	53
3.2.1 Introdução.....	53
3.2.2 Princípio de Funcionamento.....	56
3.2.3 Aplicações	58
3.2.4 Principais Vantagens dos Anemômetros de Temperatura Constante.....	60
3.2.5 Problemas Associados ao Anemômetro de Temperatura Constante.....	61
3.2.6 Calibração das Sondas Anemométricas	62
3.2.7 Contaminação da Sonda e Perda de Calibração	64
3.2.8 Dispositivo e Metodologia de Calibração das Sondas Anemométricas.....	65
3.2.9 Resultados da Calibração	70
3.2.10 Aquisição e Tratamento do Sinal.....	71
3.3 Visualização de Escoamentos.....	76
3.3.1 Introdução.....	76
3.3.2 Visualização de Escoamentos em Meio Líquido	77
CAPÍTULO 4 – INSTALAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL ...	85
4.1 Introdução	85
4.2 Túnel Hidrodinâmico Vertical	85
4.3 Módulo para Teste dos Corpos Geradores de Vórtices	88
4.4 Caracterização do Módulo Experimental.....	93
4.4.1 Perfis de Velocidade.....	93
4.4.2 Intensidade Turbulenta.....	97
4.5 Aquisição e Tratamento do Sinal	99
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	101
5.1 Introdução	101
5.2 Túnel Hidrodinâmico Vertical	101

5.3 Módulo para Teste dos Corpos Geradores de Vórtices	108
5.3.1 Resultados Qualitativos de Visualização	108
5.3.2 Determinação da Frequência de Emissão de Vórtices	128
5.4 Conclusões	157
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES	159
6.1 Recomendações para Futuros Trabalhos.....	161
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	163
APÊNDICE A – VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS.....	171
A.1 Objetivos	171
A.2 Classificação.....	172
A.3 Métodos Básicos de Visualização de escoamentos	173
A.3.1 Métodos Traçadores.....	174
A.3.2 Métodos Ópticos.....	177
A.4 Aspectos Históricos da Visualização de escoamentos	178
A.5 Principais Centros de Pesquisa em Visualização de escoamento em Meio Hidrodinâmico	185
A.6 Instalações Destinadas a Visualização Hidrodinâmica.....	188
A.7 Aplicações.....	192
A.8 Perspectivas.....	194
APÊNDICE B – ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO MÓDULO EXPERIMENTAL.....	195
B.1 Introdução	195
B.2 Reservatório de Nível Constante.....	195



B.3 Contração	201
B.4 Seção de Testes	206
B.5 Corpos de Prova – Corpos Geradores de Vórtices	208
B.6 Válvula Controladora de Vazão.....	210
B.7 Tubulação de Descarga	211
B.8 Reservatório Inferior	211
B.9 Sistema de Abastecimento.....	211
B.10 Caixa Acrílica.....	212
B.11 Dispositivo de Injeção de Corantes Líquidos	214
APÊNDICE C - ANÁLISE DE INCERTEZAS	215
C.1 Introdução.....	215
C.2 Análise de Incerteza para Amostragem Simples.....	215
C.2.1 Fundamentos Matemáticos.....	216
C.3 Análise de Incerteza das Variáveis de Interesse para o Túnel Hidrodinâmico Vertical.....	218
C.4 Análise de Incerteza das Variáveis de Interesse para o Módulo para Teste dos Corpos Geradores de Vórtices.....	223



LISTA DE TABELAS

Capítulo 1

Tabela 1.1 – Principais tipos de medidores de vazão existentes no mercado e o seu princípio de funcionamento	4
Tabela 1.2 – Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de medidores de vazão.....	5

Capítulo 5

Tabela 5.1 – Dimensões nominais dos modelos cilíndricos circulares.	148
Tabela 5.2 – Dimensões nominais dos modelos cilíndricos retangulares	152

Capítulo 6

Tabela 6.1 – Comparação entre as diversas geometrias estudadas	160
--	-----

Apêndice C

Tabela C.1 – Correlações para o cálculo da viscosidade cinemática da água.....	219
Tabela C.2 – Valores típicos da incerteza da velocidade da corrente livre.....	221
Tabela C.3 – Valores típicos da incerteza do número de Reynolds.	222
Tabela C.4 – Valores típicos da incerteza do número de Strouhal.....	223
Tabela C.5 – Valores típicos da incerteza da frequência de emissão dos vórtices.....	224
Tabela C.6 – Valores típicos da incerteza da medição da vazão mássica.....	225
Tabela C.7 – Valores típicos da incerteza da velocidade da corrente livre.....	226
Tabela C.8 – Valores típicos da incerteza do número de Reynolds.	227
Tabela C.9 – Valores típicos da incerteza do número de Strouhal.....	227



LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1 – Alguns dos modelos de medidores de vazão do tipo vórtice encontrados no mercado	06
Figura 1.2 – Diferentes formatos de corpos geradores de vórtices testados no presente trabalho..	07

Capítulo 2

Figura 2.1 – Representações do padrão vórtice que datam da antiguidade (Freymuth, 1993)..	09
Figura 2.2 – Exemplos de algumas estruturas do escoamento retratadas por artistas.....	10
Figura 2.3 – Exemplos de alguns dos esboços do fenômeno de geração de vórtices feitos por Da Vinci (Freymuth, 1993).....	11
Figura 2.4 – Exemplos ilustrando os vórtices de ponta de asa (www.efluids.com).....	12
Figura 2.5 – Mecanismo de formação dos vórtices.....	13
Figura 2.6 – Foto de Vincenz Strouhal, o primeiro a observar o desprendimento alternado de vórtices a partir de um obstáculo sólido, as chamadas " <i>ruas de von Kármán</i> ".	14
Figura 2.7 – Esteira de vórtices de von Kármán	15
Figura 2.8 – Escoamento ao redor de um cilindro circular " <i>creeping flow</i> " $Re = 0,16$	16
Figura 2.9 – Bolha de recirculação produzida na esteira de um cilindro circular. (a) Visualização de escoamentos em meio hidrodinâmico ($Re = 34$) e (b) Simulação numérica - linhas de corrente ($Re = 40$), segundo Campos Silva <i>et al.</i> (1998).....	16
Figura 2.10 – Visualização da desconfiguração da zona de recirculação ($Re = 46$), segundo Gonçalves & Vieira (1998).....	17
Figura 2.11 – Esteira de vórtices de von Kármán ($Re \cong 250$), segundo Lindquist <i>et al.</i> (1999)	18
Figura 2.12 – Regimes de escoamento ao redor de um cilindro circular (Gersten, 1983).	19

Figura 2.13 – Esteira de vórtices de von Kármán formada à jusante de uma ilha (http://daac.gsfc.nasa.gov).....	20
Figura 2.14 – Exemplos do fenômeno de desprendimento de vórtices encontrados na natureza (http://daac.gsfc.nasa.gov).....	21
Figura 2.15 – Esteira de vórtices formada à jusante dos pilares de um píer (http://www.efluids.com).....	22
Figura 2.16 – Destruição da Ponte do Estreito de Tacoma (www.google.com)..	23
Figura 2.17 – Trocador de calor compacto de placas paralelas	24
Figura 2.18 – Medidor de vazão a efeito vórtice (www.omega.com).....	24
Figura 2.19 – Medidor de vazão a efeito vórtice comercial (<i>Yokogawa Electric Co.</i>).....	25
Figura 2.20 – Corpos geradores de vórtice testados por Igarashi (2000).....	27
Figura 2.21 – Esquema de geração de vórtice ao redor de um corpo não-aerodinâmico (www.omega.com).....	28
Figura 2.22 – Medidor de vazão do tipo vórtice com detecção ultrassônica.	36
Figura 2.23 – Esquema do mecanismo utilizado para produzir as vibrações (forças impulsivas) na tubulação e disposição do sensor piezoelétrico e acelerômetros na tubulação.....	37
Figura 2.24 – Desenho esquemático do sensor piezoelétrico instalado no corpo gerador de vórtices.....	37
Figura 2.25 – Desenho esquemático do projeto aperfeiçoado do sensor	38
Figura 2.26 – Variação da velocidade de propagação do ultra-som.....	45
Figura 2.27 – Velocidade de propagação do ultra-som não é afetada	45
Figura 2.28 – Variação da velocidade de propagação do ultra-som devido a presença dos vórtices.....	46
Figura 2.29 – Exemplos de aplicação utilizando o anemômetro <i>laser doppler</i> (www.dantecmt.com).....	47
Figura 2.30 – Exemplos de aplicação utilizando o anemômetro de temperatura constante (www.dantecmt.com).....	48
Figura 2.31 – Exemplos de aplicação utilizando o PIV (www.dantecmt.com).....	49
Figura 2.32 – Exemplos de aplicação utilizando o PDA (www.dantecmt.com).....	51

Capítulo 3

Figura 3.1 – Diferentes tipos de sondas anemométricas de fio e de filme quente.	57
Figura 3.2 – Elementos básicos de um anemômetro de temperatura constante.	58
Figura 3.3 – Análise do escoamento ao redor de plataformas de prospecção de petróleo (www.danmar.dk)..	59
Figura 3.4 – Análise do escoamento ao redor de pontes (www.dantecmt.com)..	59
Figura 3.5 – Resultado típico mostrando a falha da sonda.....	65
Figura 3.6 – Dispositivo para a calibração de sondas de filme quente.....	66
Figura 3.7 – Perfil de velocidade do jato medido a um diâmetro do bocal.....	68
Figura 3.8 – Curva de calibração típica de uma sonda de filme quente <i>Dantec 55R11</i>	70
Figura 3.9 – Interface gráfica da ferramenta de calibração de sondas do programa <i>StreamWare</i>	71
Figura 3.10 – Sinal tipicamente obtido durante a determinação dos perfis de velocidade média da corrente livre (Lindquist, 2000).....	72
Figura 3.11 – Sinal tipicamente obtido durante a determinação da intensidade turbulenta residual da corrente livre (Lindquist, 2000).....	73
Figura 3.12 – Amostra de um sinal tipicamente obtido durante a determinação da frequência de Strouhal, com sua respectiva distribuição de potência espectral, (Lindquist, 2000).	74
Figura 3.13 – Espectro de amplitudes de um sinal de geração de vórtices medido através de um anemômetro de fio quente, (Kawakita, 1992).	75
Figura 3.14 – Idealização do espectro de amplitudes, (Kawakita, 1992).....	75
Figura 3.15 – Exemplo de visualização de escoamento em meio líquido (Dalton <i>et al.</i> , 2001)..	78
Figura 3.16 – Exemplos de visualização de escoamentos utilizando a técnica de injeção de corantes líquidos; (a) esteira de vórtices e (b) linhas de emissão.....	79
Figura 3.17 – Exemplos de visualização de escoamentos obtidos pela técnica de geração de bolhas de hidrogênio; (a) esteira de vórtices e (b) linhas de emissão	81
Figura 3.18 – Visualização das linhas de tempo no escoamento sobre o nariz de uma ogiva (Merzkirch, 1987).	82
Figura 3.19 – Deformação do fluido ao longo de uma contração (Schraub <i>et al.</i> , 1965).....	83

Capítulo 4

Figura 4.1 – Túnel Hidrodinâmico Vertical	86
Figura 4.2 – Perfil de velocidades média e nível de turbulência relativa do túnel hidrodinâmico	87
Figura 4.3 – Dimensões do módulo para teste dos corpos geradores de vórtices (em mm).....	90
Figura 4.4 – Dispositivo experimental construído no presente trabalho.	91
Figura 4.5 – Vista parcial do módulo experimental destacando, a região de entrada e a região de saída	92
Figura 4.6 – Posicionador da sonda de filme quente na direção y (vertical).	94
Figura 4.7 – Dispositivo posicionador de sonda.	94
Figura 4.8 – Posicionador da sonda de filme quente na direção x (horizontal)..	95
Figura 4.9 – Perfil de velocidade na seção de testes na direção x	96
Figura 4.10 – Perfil de velocidade na seção de testes na direção y	96
Figura 4.11 – Comparação entre a intensidade turbulenta relativa na seção de testes para a direção x.....	98
Figura 4.12 – Comparação entre a intensidade turbulenta relativa na seção de testes para a direção y	98
Figura 4.13 – Interface gráfica do programa desenvolvido com o software <i>Matlab</i>	100

Capítulo 5

Figura 5.1 – Dimensões dos corpos de provas.	102
Figura 5.2 – Comportamento de Reynolds <i>versus</i> Strouhal para os corpos de prova CP#2 e CP#4	103
Figura 5.3 – Esteira de vórtices do cilindro prismático CP#4.....	104
Figura 5.4 – Imagens da esteira de vórtices do cilindro prismático CP#2	105
Figura 5.5 – Comparação entre as curvas de Reynolds <i>versus</i> Strouhal para diferentes modelos cilíndricos	106
Figura 5.6 – Imagens da esteira de vórtices obtidas com a técnica de bolhas de hidrogênio	107
Figura 5.7 – Disposição do corpo gerador de vórtices na seção de testes (dimensões em mm).....	109
Figura 5.8 – Aspecto das geometrias do corpo gerador de vórtices	109



Figura 5.9 – Aspecto da seção de testes no momento da aquisição dos resultados de visualização	110
Figura 5.10 – Visualização da esteira de vórtices de von Kármán a jusante de um cilindro circular com fenda (vista superior).	111
Figura 5.11 – Dimensões dos corpos de prova (em mm)	112
Figura 5.12 – Visualização do vórtice de ferradura a jusante de um cilindro circular com fenda (vista superior)..	113
Figura 5.13 – Visualização do vórtice de ferradura a jusante de um cilindro circular com fenda ($Re \approx 6000$).	114
Figura 5.14 – Influência do “gap” no escoamento a jusante de um cilindro circular (vista lateral).	114
Figura 5.15 – Esteira de vórtices formado à jusante de um cilindro trapezoidal com fenda (vista superior).	115
Figura 5.16 – Visualização do vórtice de ferradura a jusante de um cilindro trapezoidal com fenda ($Re \approx 6400$).	115
Figura 5.17 – Influência do “gap” no escoamento a jusante de um cilindro trapezoidal (vista lateral).	116
Figura 5.18 – Esteira de vórtices formado à jusante de um cilindro quadrado com fenda (vista superior)..	116
Figura 5.19 – Visualização do vórtice de ferradura à jusante de um cilindro quadrado com fenda	117
Figura 5.20 – Influência do “gap” no escoamento à jusante de um cilindro quadrado (vista lateral).	117
Figura 5.21 – Nova disposição do corpo gerador de vórtices na seção de testes (dimensões em mm).	118
Figura 5.22 – Corpos de prova remodelados.	118
Figura 5.23 – Visualização da esteira de vórtices de von Kármán a jusante de um cilindro circular sem fenda (vista superior).	119
Figura 5.24 – Visualização do vórtice de ferradura a jusante de um cilindro circular sem fenda	119
Figura 5.25 – Esteira de vórtices formado à jusante de um cilindro trapezoidal, sem fenda (vista superior).	120

Figura 5.26 – Visualização do vórtice de ferradura a jusante de um cilindro trapezoidal sem fenda (vista lateral).	121
Figura 5.27 – Esteira de vórtices formado à jusante de um cilindro quadrado, sem fenda (vista superior).	121
Figura 5.28 – Visualização do vórtice de ferradura à jusante de um cilindro quadrado, sem fenda.	122
Figura 5.29 – Esteira de vórtices formado à jusante de um cilindro trapezoidal reto, sem fenda (vista superior).	122
Figura 5.30 – Visualização do vórtice de ferradura à jusante de um cilindro trapezoidal reto, sem fenda, em função de Reynolds (vista superior).	123
Figura 5.31 – Esteira de vórtices formado à jusante de um cilindro triangular, sem fenda, em função de Reynolds (vista superior).	123
Figura 5.32 – Visualização do vórtice de ferradura à jusante de um cilindro triangular, sem fenda, em função de Reynolds (vista superior).	124
Figura 5.33 – Esteira de vórtices formado à jusante de um cilindro otimizado, sem fenda (vista superior).	124
Figura 5.34 – Visualização do vórtice de ferradura à jusante de um cilindro otimizado, sem fenda.	125
Figura 5.35 – Esteira de vórtices formado à jusante de um cilindro com perfil T, sem fenda (vista superior).	125
Figura 5.36 – Visualização do vórtice de ferradura à jusante de um cilindro com perfil T, sem fenda	126
Figura 5.37 – Esteira de vórtices formado à jusante de um cilindro com perfil T chanfrado sem fenda, em função de Reynolds (vista superior)	126
Figura 5.38 – Visualização do vórtice de ferradura à jusante de um cilindro com perfil T chanfrado sem fenda, em função de Reynolds.	127
Figura 5.39– Aspecto da seção de testes no momento da aquisição do sinal	129
Figura 5.40 – Curva de Strouhal <i>versus</i> Reynolds para um cilindro quadrado	130
Figura 5.41 – Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro quadrado e respectivos espectros de frequência	131
Figura 5.42 – Curva de Strouhal <i>versus</i> Reynolds para um cilindro retangular trapezoidal.	132

Figura 5.43 – Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro retangular trapezoidal e respectivos espectros de frequência.....	133
Figura 5.44 – Curva de Strouhal <i>versus</i> Reynolds para um cilindro trapezoidal.....	134
Figura 5.45 – Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro trapezoidal e respectivos espectros de frequência.....	134
Figura 5.46 – Curva de Strouhal <i>versus</i> Reynolds para um cilindro triangular.....	135
Figura 5.47 – Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro triangular e respectivos espectros de frequência.....	136
Figura 5.48 – Curva de Strouhal <i>versus</i> Reynolds para um cilindro com perfil T.....	137
Figura 5.49 – Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro com perfil T e respectivos espectros de frequência.....	137
Figura 5.50 – Curva de Strouhal <i>versus</i> Reynolds para um cilindro com perfil T chanfrado.....	138
Figura 5.51 – Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro com perfil T chanfrado e respectivos espectros de frequência.....	139
Figura 5.52 – Curva de Strouhal <i>versus</i> Reynolds para um cilindro retangular.....	140
Figura 5.53 – Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro retangular e respectivos espectros de frequência.....	140
Figura 5.54 – Curva de Strouhal <i>versus</i> Reynolds para um cilindro otimizado.....	141
Figura 5.55 – Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro otimizado e respectivos espectros de frequência.....	142
Figura 5.56 – Curva de Strouhal <i>versus</i> Reynolds para um cilindro circular.....	143
Figura 5.57 – Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro circular e respectivos espectros de frequência.....	143
Figura 5.58 – Curva de Strouhal <i>versus</i> Reynolds para um cilindro semi circular.....	144
Figura 5.59 – Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro semi circular e respectivos espectros de frequência.....	145
Figura 5.60 – Curva de Strouhal <i>versus</i> Reynolds para um cilindro semi circular reto.....	146
Figura 5.61 – Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro semi circular reto e respectivos espectros de frequência.....	146
Figura 5.62 – Vista em corte da tubulação na posição em que foi instalado o <i>shedder</i>	148
Figura 5.63 – Modelos cilíndricos circulares com razão de bloqueio variados.....	149

Figura 5.64 – Comparação entre as curvas de Reynolds <i>versus</i> Strouhal para um cilindro circular com razão de bloqueio entre 16% e 49%.....	149
Figura 5.65 – Espectros de frequência para três razões de bloqueio distintas (escalas lineares arbitrárias).	150
Figura 5.66 – Cilindro retangular imerso perpendicularmente no escoamento.....	151
Figura 5.67 – Modelos cilíndricos retangulares com razões de forma variadas.....	152
Figura 5.68 – Comparação entre as curvas de Reynolds <i>versus</i> Strouhal para um cilindro retangular com razão de forma entre 0,5 e 2.....	153
Figura 5.69 – Espectros de frequência para várias razões de forma para um cilindro quadrado (escalas lineares arbitrárias).....	154
Figura 5.70 – Montagem experimental para realizar as medidas de perda de carga	155
Figura 5.71 – Perda de carga relativo a 1m de tubulação.....	156

Apêndice A

Figura A.1 – Exemplo de um túnel aerodinâmico de circuito aberto do tipo aspirado com um modelo aerodinâmico montado na seção de testes (Freymuth, 1993).....	173
Figura A.2 – Através deste dispositivo Osborne Reynolds observou a transição do escoamento laminar para o turbulento (www.google.com).	179
Figura A.3 – Utilizando o dispositivo acima ilustrado Prandtl estabeleceu o conceito de camada limite (www.google.com).	179
Figura A.4 – Leonardo Da Vinci - o “pai da visualização de escoamentos”.....	180
Figura A.5 – Pesquisadores da mecânica dos fluidos que fizeram uso da visualização de escoamentos em suas importantes descobertas.	181
Figura A.6 – Visualização do perfil de velocidade sobre uma placa plana utilizando o método do telúrio (Wortmann, 1953).....	184
Figura A.7 – Vista geral dos três túneis hidrodinâmicos existentes no O.N.E.R.A (www.onera.fr).....	186
Figura A.8 – Alguns dos túneis hidrodinâmicos fabricados pela <i>Eidetics Corporation</i>	187
Figura A.9 – Visualização de escoamentos em túneis hidrodinâmicos destinados a aplicações aeroespaciais (Werlé, 1982)..	189
Figura A.10 – Partes constituintes de um túnel hidrodinâmico: (a) vertical por ação da gravidade e (b) horizontal de circuito fechado.....	190

Figura A.11 – Túnel hidrodinâmico vertical da FEIS operado pela ação da gravidade e algumas imagens geradas.....	190
Figura A.12 – Túnel hidrodinâmico horizontal de circuito fechado da Universidade da Carolina do Norte e algumas imagens geradas (http://www.amath.unc.edu).....	191
Figura A.13 – Aplicações práticas da visualização de escoamentos na engenharia.....	193

Apêndice B

Figura B.1 – Flange de alumínio (dimensões em mm).	196
Figura B.2 – Fixação dos tubos de PVC de 8” na caixa d’ água (dimensões em mm).	197
Figura B.3 – Conjunto flange-tubo PVC 8” (ladrão) fixado no reservatório de nível constante	198
Figura B.4 – Ladrão e tubo de alimentação do túnel fixados no interior do reservatório de nível constante	198
Figura B.5 – Fixação dos tubos no fundo do reservatório de nível constante.....	199
Figura B.6 – Reservatório de nível constante.....	199
Figura B.7 – Direcionadores de escoamento instalados no interior da curva longa de 8”.....	200
Figura B.8 – Posição em que foram instalados os direcionadores de escoamento e detalhes da instalação	200
Figura B.9 – Usinagem em degrau.....	202
Figura B.10 – Aspecto do molde de madeira após a operação de usinagem e acabamento superficial.....	202
Figura B.11 – Aspecto dos moldes após a aplicação de cera.....	204
Figura B.12 – Moldes após a aplicação de gel branco.	204
Figura B.13 – Confeção dos moldes em fibra de vidro	205
Figura B.14 – Aspecto final da contração construída em fibra de vidro	205
Figura B.15 – Dimensões da seção de testes (em mm).....	206
Figura B.16 – Região onde foi inserido o sensor de temperatura da sonda de fio quente.	207
Figura B.17 – Pontos de inserção da sonda de fio quente (dimensões em mm)..	207
Figura B.18 – Detalhes da seção de testes: (a) onde se encontra posicionado o corpo de prova e (b) dispositivo de fixação do corpo de prova.....	208
Figura B.19 – Processo de usinagem dos modelos cilíndricos.....	209
Figura B.20 – Válvula controladora de vazão.....	210



Figura B.21 – Difusor cônico confeccionado em PVC211

Figura B.22 – Sistema de abastecimento do túnel.....212

Figura B.23 – Caixa acrílica: **(a)** vazia, ilustrando a deformação da imagem provocada na seção de testes e **(b)** preenchida com água, para corrigir as distorções provocadas pelo efeito da curvatura do tubo213

Figura B.24 – Dispositivo de injeção de corantes líquidos214

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Arábicos

A	altura da seção transversal retangular do cilindro (maior dimensão) [m]
A_{cp}	área frontal projetada do cilindro [m ²]
A_{st}	área transversal da seção de testes [m ²]
B	base da seção transversal retangular do cilindro (menor dimensão) [m]
d	dimensão característica do cilindro [m]
D	diâmetro interno da tubulação [m]
f	freqüência de emissão dos vórtices de um lado do cilindro [Hz]
F	freqüência de aquisição ou taxa de amostragem dos dados [Hz]
g	aceleração da gravidade [m/s ²]
I_t	intensidade turbulenta
l	comprimento do cilindro [m]
m	vazão mássica do escoamento [kg.s ⁻¹]
n	número de vórtices sobre a superfície lateral de um cilindro retangular
N	número de pontos experimentais adquiridos
Q	vazão volumétrica do escoamento [m ³ .s ⁻¹]
R	resultado de um experimento, calculado a partir de um conjunto de medições
S	desvio padrão da amostra
T	temperatura do fluido [°C]
V_∞	velocidade da corrente livre [m.s ⁻¹]
X_i	variável genérica, medida pelo sistema de medição

Símbolos Gregos

δ	incerteza associada à medição de uma variável
μ	viscosidade dinâmica ou absoluta do fluido [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]
μ_0	viscosidade da água a 273 K [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]
ν	viscosidade cinemática do fluido [m ² .s ⁻¹]
ρ	densidade ou massa específica do fluido [kg.m ⁻³]
σ	desvio padrão da população

Números Adimensionais

Re	número de Reynolds
------	--------------------



St	número de Strouhal
β	razão de bloqueio sólido ou geométrico do escoamento
ϕ	razão de forma do cilindro

Operadores Matemáticos

∂	derivada parcial
$-$	média temporal

Este trabalho refere-se ao estudo experimental da emissão de vórtices no escoamento ao redor de corpos prismáticos não-aerodinâmicos, com diferentes geometrias, inseridos em dutos circulares, para moderados números de Reynolds, visando sua aplicação em medidores de vazão do tipo vórtice. Os ensaios foram conduzidos em dois dispositivos experimentais: o primeiro consiste num túnel hidrodinâmico vertical de baixa turbulência, utilizado exclusivamente para a visualização de escoamentos, com os propósitos de obter uma melhor compreensão qualitativa e quantitativa acerca dos complexos fenômenos associados à geração e desprendimento de vórtices. O segundo dispositivo consiste num módulo experimental especialmente concebido, dentro das atividades desenvolvidas neste trabalho, com o propósito de simular o princípio de funcionamento de um medidor de vazão do tipo vórtice. As geometrias testadas, ao total de nove, são semelhantes às aquelas encontradas nos medidores disponíveis comercialmente. Os ensaios objetivaram obter a geometria ideal que forneça uma curva de Strouhal estável e constante numa ampla faixa de números de Reynolds, principalmente para as regiões de moderados e baixos Reynolds. A frequência de emissão dos vórtices foi determinada a partir da análise espectral do sinal de velocidades, adquirido por anemometria de fio quente, num ponto previamente estabelecido da esteira turbilhonária. Ensaios de visualização de escoamentos também foram realizados para a identificação de padrões do escoamento, no posicionamento ideal das sondas e na interpretação de dados anemométricos. Medidas adicionais de perdas de carga provocadas pelas diferentes geometrias foram também realizadas. Adicionalmente, a influência de fatores como a razão de aspecto e a razão de bloqueio sobre a frequência de emissão de vórtices também foram analisados.

ABSTRACT

This work refers to the experimental study of vortex shedding from non-aerodynamic prismatic bodies, in a moderate Reynolds number flow inside a circular pipe, aiming to apply in vortex shedding flow meters. Tests have been carried out using two experimental devices: the first device consists in a vertical water tunnel of low turbulence used exclusively for flow visualization, with the purpose of obtaining a better qualitative and quantitative understanding concerning to the complex phenomena associated with the generation and detachment of vortices. The second device consists of an experimental setup especially designed to simulate the operation of vortex shedding flow meters. Nine different non-aerodynamic bodies, similar to those usually found in vortex shedding flow meters, were tested. The main goal of the tests was to obtain a geometry that produces a stable and constant Strouhal number in a large range of Reynolds number, mainly for moderate and low Reynolds number. The vortex shedding frequency was determined by spectral analysis of the velocity signal, acquired by hot film anemometer at an especified location in the vortex wake. Flow visualization tests were also accomplished in order to identify the flow patterns, to chose the ideal position of the probes and to help in the interpretation of the anemometry data. Additional measurements of pressure drops produced by different body were also performed. Additionally, the influence of the aspect ratio and the blockage ratio on the frequency of emission of the vortices were also analyzed.



O autor do presente trabalho iniciou as suas atividades no Laboratório de Visualização de Escoamentos da UNESP – Campus de Ilha Solteira, em meados de 1998. Naquela ocasião a FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo) havia financiado o projeto de iniciação científica denominado “Visualização de Escoamentos Através da Técnica de Geração de Bolhas de Hidrogênio” sob o número de processo 98/02700-8. Neste trabalho foi efetuado o projeto, a construção e o teste de um dispositivo experimental para efetuar a visualização de escoamento ao longo de uma contração (razão de contração 3:1) utilizando-se a técnica de geração de micro bolhas de hidrogênio. Este trabalho foi premiado no XI Congresso de Iniciação Científica da Unesp por estar entre os dez melhores trabalhos apresentados.

Em 2000, ainda sob o apoio da FAPESP dava-se continuidade aos trabalhos de iniciação científica no entanto, a partir daí, o assunto estava direcionado ao estudo do escoamento ao redor de corpos prismáticos não-aerodinâmicos, criando bases para a realização do presente trabalho.

Em 2001, agora sob o apoio do CNPq (Conselho nacional de Pesquisa, número de processo 130860/2001-8) dava-se início ao presente trabalho denominado “Estudo Experimental da Emissão de Vórtices em Torno de Corpos Não-Aerodinâmicos Inseridos em Dutos Circulares para Moderados Números de Reynolds” com aplicação prática nos medidores de vazão. Nesta ocasião foi efetuado o projeto, a construção e o teste de um dispositivo experimental que simulasse o princípio de funcionamento de um medidor de vazão do tipo vórtice, exigindo assim, todo o conhecimento adquirido nos trabalhos anteriores. O objetivo principal deste trabalho é obter uma geometria para o corpo gerador de vórtice que forneça um número de Strouhal estável e constante numa ampla faixa de números de Reynolds.

O conjunto de informações que constitui o corpo principal deste trabalho encontra-se organizado em 6 Capítulos, Bibliografia e 3 Apêndices.

Os capítulos foram redigidos de maneira a formarem uma unidade completa contendo introdução, revisão da literatura, desenvolvimento e conclusão, abordando cada assunto com relativa profundidade sem, no entanto, exauri-lo. A organização do texto em capítulos,

entretanto, não os torna totalmente estanques, mas facilita a compreensão global do tema e evita redundâncias.

No Capítulo 1 é feito um levantamento sobre os medidores de vazão, onde é dada ênfase aos medidores de vazão a efeito vórtice e seus principais componentes, mostrando a motivação e os objetivos que nortearam a condução deste trabalho, assim como a maneira com que este documento foi estruturado.

No Capítulo 2 é apresentado o levantamento bibliográfico sobre o estudo do escoamento ao redor de corpos não-aerodinâmicos, visando a sua aplicação em medidores de vazão do tipo vórtice. Além do mais, foi efetuado um estudo detalhado sobre estes tipos de medidores destacando suas qualidades, fatores que influenciam no seu desempenho, dentre outros. Também foi realizado uma ampla abordagem sobre as técnicas utilizadas para obtenção da frequência de emissão de vórtices ao redor de corpos prismáticos, tanto em laboratórios de pesquisa como na indústria, dando-se atenção especial à técnica de anemometria de fio quente, que foi utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

O Capítulo 3, por sua vez, trata das metodologias experimentais, empregadas neste trabalho. Inicialmente é abordado, especificamente, a anemometria de fio quente, técnica experimental utilizada na determinação da frequência de emissão de vórtices característica de cada corpo gerador de vórtice analisado. Após uma breve revisão dos principais conceitos envolvidos no seu funcionamento, são abordados alguns aspectos importantes para a calibração de sondas, bem como resultados obtidos no âmbito deste trabalho, com o emprego desta técnica. Por fim, a segunda parte deste capítulo é destinado à visualização de escoamentos, que teve um importante papel na identificação de padrões de escoamento e na interpretação de dados anemométricos. O presente estudo das técnicas de visualização de escoamentos, deve-se a importância que esta ferramenta alcança na investigação dos escoamentos ao redor de corpos rombudos (“*bluff-bodies*”) e na identificação da estrutura de diferentes escoamentos na presença de vórtices.

O Capítulo 4 descreve o túnel hidrodinâmico vertical e o módulo para teste dos *sheddors*, dispositivos utilizados para a realização das diversas campanhas de ensaios experimentais. Além de seus aspectos construtivos e operacionais, são abordados, também, aspectos relativos às características hidrodinâmicas dos equipamentos.

O Capítulo 5 forma o núcleo central desta dissertação, contendo os resultados experimentais, relativos ao escoamento ao redor dos modelos estudados. Os resultados obtidos são, então, discutidos e comparados com dados de outros autores.

Finalmente, o Capítulo 6 condensa as principais conclusões e observações expressas nos capítulos precedentes, e apresenta, ainda, algumas sugestões e recomendações para futuros trabalhos.

Após a apresentação das Referências Bibliográficas, encontram-se anexados 3 apêndices contendo informações necessárias à compreensão do presente trabalho, que foram destacadas do corpo principal para não interromper a exposição. No Apêndice A, é apresentado um estudo detalhado acerca da visualização de escoamentos, englobando os métodos de visualização existentes, o emprego de túneis hidrodinâmicos para gerar o escoamento a ser visualizado, além de alguns aspectos históricos relacionados à visualização de escoamentos. Já o Apêndice B contém a descrição detalhada do processo de construção do módulo para teste dos corpos geradores de vórtices, incluindo materiais e métodos empregados.

Por fim, o Apêndice C apresenta o cálculo das incertezas experimentais de todos os parâmetros envolvidos no trabalho. Os valores obtidos foram considerados na análise dos resultados, embora isto não apareça explicitamente no texto.



INTRODUÇÃO

1.1 Medidores de Vazão

Nos dias atuais é grande o apelo por parte da indústria, por sistemas de medição de vazão cada vez mais precisos. De fato, o desenvolvimento tecnológico no campo da medição de vazão de fluidos veio a atender, de um lado, à crescente exigência por parte da indústria, visando sistemas cada vez mais eficientes de controle de processos de produção, motivados principalmente pela busca de produtos de melhor qualidade e a preços competitivos e, de outro, senão o mais importante, a necessidade da quantificação exata dos volumes de fluidos, invariavelmente de alto valor intrínseco, objetos de trocas comerciais, tais como as efetuadas na indústria do petróleo e petroquímicas (Kawakita, 1992).

Atualmente, existem disponíveis no mercado uma grande variedade de tipos e modelos de medidores de vazão. Entretanto, apesar desta grande diversidade, não é possível a afirmação pura e simples da existência de um medidor melhor ou pior. Tudo depende da aplicação particular a que se destina o instrumento e da relação básica custo/benefício que se pretende obter no projeto. Segundo Kawakita (1992), a escolha mais adequada do tipo de medidor deve levar em consideração certos parâmetros básicos, como: o tipo de fluido a ser medido (gás, líquido, bifásico, sujo ou limpo), suas propriedades (viscosidade, condutibilidade, etc.), as condições do escoamento (estável, variável ou pulsante), a pressão e a temperatura do fluido, as vazões mínima e máxima, o local da medição, o custo da instrumentação, os níveis de segurança e de automatização exigidos e a exatidão e a incerteza desejada para a medição.

Em geral, os medidores de vazão podem ser classificados como: medidores de vazão por diferença de pressão, medidores de deslocamento positivo, medidores de velocidade e medidores de massa.

Os principais medidores de vazão por diferença de pressão incluem: placas de orifício, medidor Venturi, tubo de Pitot e o bocal medidor de vazão (*"flow-nozzles"*). Os medidores de deslocamento positivo incluem: pistão, engrenagem oval (*"oval gear"*) e pás-rotativas (*"rotary-*

vane"). Os medidores de velocidade, por sua vez, incluem os seguintes tipos: turbina, vórtice, eletromagnético e ultrassônico. Por fim, os medidores de massa incluem o Coriolis e o térmico.

Qualquer um que observar hoje o mercado de medidores de vazão, poderá notar que a procura por alguns tipos de medidores de vazão vem crescendo mais rapidamente em relação a outros. Por exemplo, o uso de medidores de vazão ultrassônicos e do tipo vórtice vem aumentando a uma taxa muito mais elevada que o uso dos medidores de deslocamento positivo ou área variável. Os medidores cujo uso vem crescendo rapidamente são aqueles que agregam novas tecnologias, incluindo os avanços resultantes do processamento computacional aplicado à mecânica dos fluidos.

Uma outra forma de se classificar os medidores de vazão, é a seguinte:

- Medidores de vazão com novas tecnologias;
- Medidores de vazão com tecnologia tradicional.

A seguir, é feita uma distinção entre os medidores de vazão que utilizam novas tecnologias e os que utilizam tecnologias tradicionais.

Os *medidores de vazão com novas tecnologias* utilizam tecnologias que foram introduzidas mais recentemente se comparado as tecnologias tradicionais, como o escoamento diferencial de pressão. A maioria dos *medidores de vazão com novas tecnologias* surgiram no ambiente industrial nos anos 60 e 70. Cada medidor com nova tecnologia é baseado num princípio físico diferente e constitui uma aproximação única para medir o escoamento, incorporam avanços tecnológicos que evitam alguns problemas existentes nos primeiros medidores de vazão e, por isso, tem um custo maior se comparado aos *medidores com tecnologias tradicionais*.

Os medidores de vazão que incorporam novas tecnologias serão aqui denominados medidores de vazão com "*novas tecnologias*". Incluso nesta categoria estão o Coriolis, o magnético, o ultrassônico, o vórtice e o medidor diferencial de pressão multivariável. Todos estes medidores de vazão foram introduzidos no mercado após 1950. Os medidores de vazão magnéticos surgiram no mercado em 1952, enquanto a *Tokimec* (então *Tokyo Keike*) introduziu os medidores ultrassônicos no Japão em 1963. A *Eastech* trouxe ao mercado os medidores de vórtice em 1969 e a *Yokogawa* desenvolveu o seu medidor do tipo vórtice nesta mesma época. A *Micro Motion* introduziu os medidores de vazão do tipo Coriolis em 1977, enquanto a *Bristol Babcock* trouxe ao mercado os medidores de vazão diferencial de pressão multivariável em 1992.

Os medidores de vazão que incorporam as tecnologias mais tradicionais são aqui denominados medidores de vazão com “*tecnologia tradicional*”. Nesta categoria estão inclusos o medidor diferencial de pressão variável simples, deslocamento positivo, turbina, canal aberto, térmico e os medidores de vazão de área variável. Embora estes medidores já não sejam mais o foco de desenvolvimento de novos produtos, os fornecedores ainda continuam a introduzir novos medidores de vazão com tecnologia tradicional.

A história dos medidores de vazão do tipo turbina retorna a meados de 1800, enquanto os medidores diferencial de pressão tiveram o seu uso no início de 1900. Muito dos problemas existentes nos medidores de vazão diferencial de pressão estão associados aos elementos primários utilizados com o transmissor diferencial de pressão. Por exemplo, as placas de orifício podem ter as suas formas modificadas, devido as impurezas existentes no escoamento e, além do mais, são sujeitas ao desgaste. Os medidores de deslocamento positivo e turbina também possuem partes móveis que são sujeitas ao desgaste. Os níveis de acuracidade dos medidores de vazão de canal aberto, térmico e área variável são substancialmente menores que os medidores de vazão com novas tecnologias.

A Tabela 1.1 apresenta alguns dos principais medidores de vazão existentes no mercado e o seu respectivo princípio de funcionamento. A Tabela 1.2, por sua vez, cita as principais vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de medidores de vazão e também o seu campo de aplicação.



Tabela 1.1 - Principais tipos de medidores de vazão existentes no mercado e o seu princípio de funcionamento.

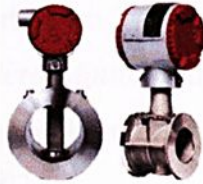
Tipos de Medidores de Vazão	Princípio de Funcionamento
 Canal Aberto	São muito utilizados em barragens e rios e calculam a vazão baseado no nível de líquido.
 Coriolis	O fluido passa através de um tubo vibrando, causando a torção deste. A quantidade de torções é proporcional ao fluxo de massa.
 Deslocamento Positivo	O fluido é drenado para dentro de um reservatório de tamanho conhecido. A vazão é calculada pela contagem de número de vezes que ocorre esta drenagem.
 Magnético	A vazão é calculada pela medida da voltagem gerada pela condutividade elétrica do material que se move através de um campo magnético.
 Massa Térmica	Alguns medidores de massa térmica medem a taxa de calor perdida em um fluido quando um fio termo resistor aquecido é colocado no fluido; outros medem o aumento de temperatura em um fluido quando escoar sobre materiais aquecidos.
 Placa de Orifício	Uma obstrução é colocada no caminho do escoamento, e a diferença de pressão é medida antes e depois desta obstrução. Esta diferença de pressão é usada para calcular a vazão.
 Turbina	O fluido passa através de um rotor montado coaxialmente na linha de centro do corpo do medidor. A vazão é proporcional a velocidade de rotação do rotor.
 Ultrassônico	A vazão é calculada medindo o tempo que leva um pulso ultrassônico na forma de uma onda que percorre uma distância especificada.
 Venturi	O tubo de Venturi é essencialmente uma seção do tubo com uma entrada cônica seguido de uma garganta reta. A diferença de pressão entre esta parte intermediária reta e a entrada cônica é usada para o cálculo da vazão.
 Vórtice	Um corpo não-aerodinâmico posicionado perpendicularmente a um escoamento, gera vórtices alternados e regulares em ambos os lados deste obstáculo sólido. A vazão é determinada pela contagem do número de vórtices gerados num determinado intervalo de tempo.

Tabela 1.2 - Vantagens e Desvantagens dos diferentes tipos de medidores de vazão.

Tipo de Medidor	Vantagens	Desvantagens	Utilizados em Indústria	Mede a vazão de
Canal Aberto	Baixo custo de instalação; simples tecnologia empregada.	Afetado quando a represa é entupida por escombros.	Água, química, refinarias, papel e celulose.	Líquidos
Coriolis	Alta acuracidade, verdadeiro medidor de massa.	Sensível à vibrações, alto custo inicial, inadequado para grandes tubulações	Química, alimentos, bebidas, refinarias, papel e celulose.	Líquidos e alguns gases
Deslocamento positivo	Boa acuracidade, ampla rangeabilidade.	Sujeito a desgaste, uso limitado para grandes tubulações, requer fluidos limpos e custo de manutenção elevado.	Óleo, gás, refinarias, químicas, papel e celulose.	Líquidos e gases
Magnético	Boa acuracidade, não está sujeito a perda de carga, opera bidirecionalmente e é adequado para grandes tubulações.	Requer fluidos condutores e o seu custo é relativamente elevado.	Química, Água, papel e celulose, bebidas e alimentos.	Líquidos
Massa Térmica	Baixo custo, capacidade de medir fluidos de baixa densidade.	Requer limpeza periódica; não possui alta acuracidade.	Química e refinarias.	Gás
Placa de Orifício	Baixo custo inicial, tecnologia familiar, fácil de operar e sem limitação de temperatura e pressão.	Muito sensíveis a perturbações no escoamento, elevada perda de carga, sujeito a desgaste e baixa rangeabilidade.	Química, óleo, gás, refinarias, hidrelétrica.	Todos
Turbina	Boa acuracidade; tecnologia extensamente aceita e comprovada.	Partes móveis sujeitas a desgaste; fluidos com altas velocidades podem danificar o medidor.	Óleo, gás, refinarias, química, água.	Líquidos e gases
Ultrassônico	Baixo custo de manutenção e ampla rangeabilidade.	Alto custo inicial e alguns modelos requerem fluidos limpos.	Água, química, refinaria, óleo e gás.	Líquidos e gases
Venturi	Baixa perda de carga e pode ser usado para medir fluidos sujos com particulados sólidos.	Limitada rangeabilidade, custo elevado e também são pesados e volumosos.	Estações de tratamento de água.	Todos
Vórtice	Boa acuracidade; fácil instalação.	Vibrações podem afetar a acuracidade.	Química, refinaria, hidrelétrica, alimentos e bebidas.	Todos

Dentre os medidores de vazão anteriormente apresentados, o medidor do tipo vórtice (*vortex flowmeter*) vem se destacando por possuir uma configuração relativamente simples, sem peças móveis sujeitas ao desgaste, alta precisão, linearidade, ampla faixa de medição e fraca dependência com a viscosidade do fluido. Por esta razão, este tipo de medidor vem sendo utilizado em refinarias, instalações químicas e petroquímicas, estações geradoras de energia elétrica, linhas de gás e água para consumo público, dentre outros. Este tipo de medidor opera da seguinte forma: quando um corpo rombudo (corpo gerador de vórtice - *shedder*) é posicionado perpendicularmente à direção do escoamento, sob determinadas condições, ocorre a produção de vórtices alternados à partir deste obstáculo sólido, conhecidas como “*estradas de vórtices de von Kármán*”. A frequência de desprendimento dos vórtices é diretamente proporcional à velocidade do escoamento dentro de uma determinada faixa de números de Reynolds. Desta forma, a velocidade do escoamento pode ser determinada, quantificando-se o número de vórtices gerados num determinado intervalo de tempo.

Atualmente, este tipo de medidor ocupa um lugar de destaque no mercado, em virtude de suas inúmeras qualidades.

A título de ilustração, a Figura 1.1 apresenta os diferentes modelos de medidores de vazão do tipo vórtice encontrados no mercado, fornecidos por diversos fabricantes (www.directindustry.com).



Figura 1.1 - Alguns dos modelos de medidores de vazão do tipo vórtice encontrados no mercado.

1.2 Objetivo e Escopo do Trabalho

O presente trabalho procura dar uma contribuição ao estudo do escoamento para moderados números de Reynolds ao redor de corpos cilíndricos não-aerodinâmicos (*shedders*) inseridos em dutos circulares, investigando a influência que os diferentes formatos de corpo gerador de vórtice (Figura 1.2) exercem sobre o comportamento da curva Strouhal *versus* Reynolds. Esta investigação se concentra, basicamente, nos regimes de escoamento com moderados números de Reynolds (inferiores a 4×10^4). Para a presente ocasião, foi construído um módulo experimental, especialmente concebido com o intuito de simular o princípio de funcionamento de um medidor de vazão do tipo vórtice, para efetuar o teste dos corpos geradores de vórtices.

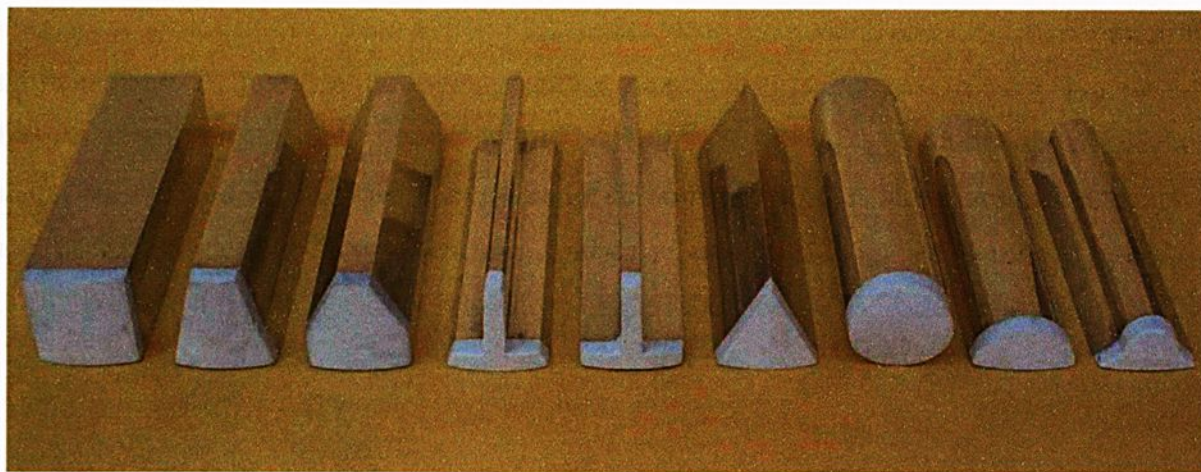
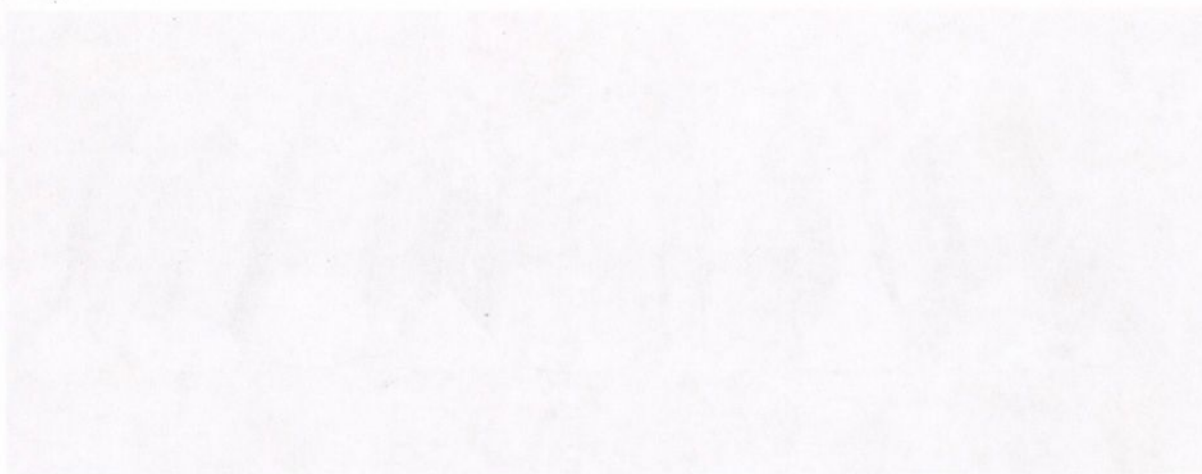


Figura 1.2 - Diferentes formatos de corpos geradores de vórtices testados no presente trabalho.

O projeto de um medidor de vazão do tipo vórtice é dificultado por inúmeros fatores que podem influenciar no fenômeno de desprendimento dos vórtices. Dentre estes fatores, a geometria do obstáculo sólido merece destaque, pois o objeto introduzido no escoamento deve ser capaz de manter boa regularidade na frequência de desprendimento dos vórtices e que, sobretudo, produza uma esteira composta por vórtices facilmente identificáveis e estáveis. Diferentes geometrias de corpos cilíndricos prismáticos posicionados transversalmente em relação ao fluxo principal são exaustivamente testadas pelos fabricantes de medidores de vazão em uma constante busca de emissores de vórtices com uma curva de desprendimento estável e constante em uma larga faixa de Reynolds. Assim, a linearidade e a faixa de trabalho de um

medidor que se utiliza deste fenômeno dependem fundamentalmente do projeto do corpo rombudo.

Como ainda não existe disponível um método teórico claro de projeto baseado em uma modelagem matemática, propôs-se a utilização do sinal de frequência de emissão de vórtices como uma fonte de informação da qualidade do corpo rombudo, isto é, de sua capacidade de gerar vórtices fortes e regulares. A ferramenta básica utilizada na caracterização e análise dos fenômenos turbulentos, provocados por cada perfil avaliado, foi a técnica de anemometria de fio quente, que permite avaliar a qualidade e a frequência de emissão de vórtices. Além do mais, foram efetuadas visualizações das estruturas do escoamento, formadas a partir de cada corpo gerador de vórtice utilizando-se a técnica de injeção de corantes líquidos.



ESCOAMENTOS COM A PRESENÇA DE VÓRTICES: ASPECTOS HISTÓRICOS E FENOMENOLÓGICOS, REVISÃO DA LITERATURA E APLICAÇÕES

2.1 Introdução

Desde a antigüidade, os padrões de vórtice sempre atraíram a atenção de sábios e pesquisadores, devido sobretudo a beleza e complexidade fenomenológica existente neste padrão de escoamento. Como um exemplo, algumas representações do padrão vórtice podem ser observadas em objetos que datam da pré-história e início da história antiga. A título de ilustração, a Figura 2.1 (a) mostra uma estátua de bronze com relevos na forma de espirais que datam do Século VIII d.C., representando complexas estruturas do padrão vórtice. Já na Figura 2.1 (b), pode-se observar vórtices esculpidos numa pedra que data da idade do bronze.



(a)



(b)

Figura 2.1 - Representações do padrão vórtice que datam da antiguidade (Freymuth, 1993).

Em épocas mais recentes, pode-se notar padrões de vórtices ilustrados em obras de arte, tais como as pinturas de *Vincent Van Gogh* e *Hiroshige Utagawa*, apresentada na Figura 2.2.



(a) Pintura de Hiroshige Utagawa representando “Vortices in the Konaruto Stream”.



(b) Pintura de Van Gogh (“*La Nuit Etoilée*”) ilustrando as instabilidades de Kelvin Helmholtz.

Figura 2.2 - Exemplos de algumas estruturas do escoamento retratadas por artistas (<http://www.enseeiht.fr>).

A primeira observação científica do fenômeno de formação e desprendimento de vórtices foi feita por volta de 1513, quando Leonardo Da Vinci produziu desenhos esquemáticos bastante realistas acerca do fenômeno de geração de vórtices em escoamentos como mostrado na Figura 2.3. Ao observar estes esboços é interessante ressaltar que Da Vinci não descreveu que as duas fileiras de vórtices emitidos na esteira de um corpo rombudo são formados alternadamente em ambos os lados do corpo (Figura 2.3 c).

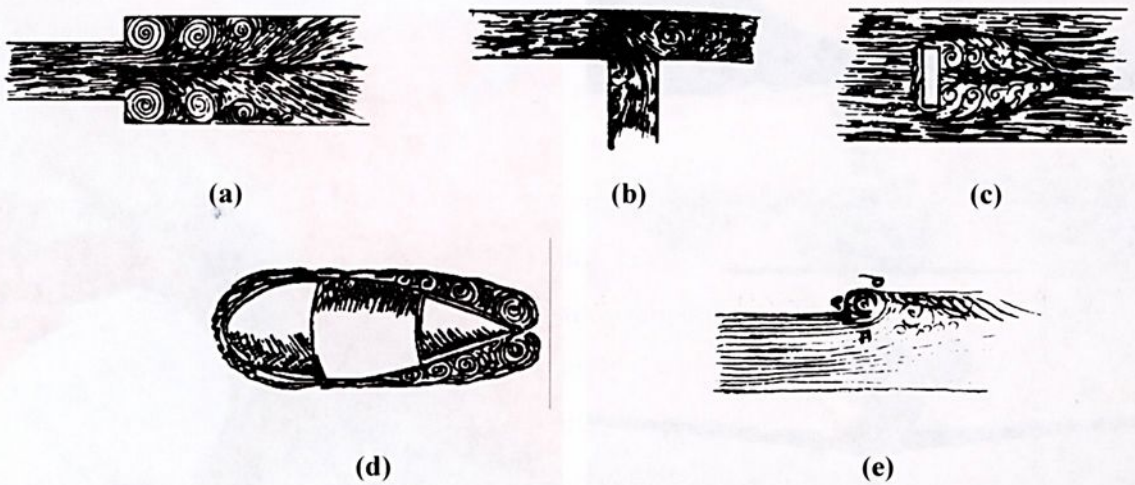
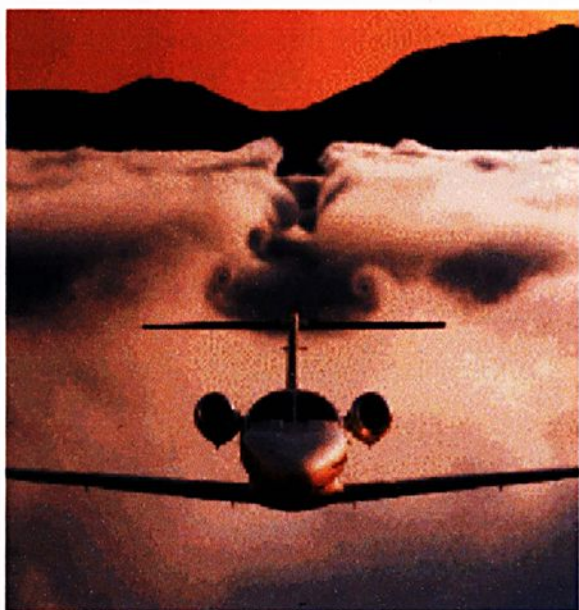


Figura 2.3 - Exemplos de alguns dos esboços do fenômeno de geração de vórtices feitos por Da Vinci (Freymuth, 1993).

Na correria do dia-a-dia, muitas vezes não nos atentamos aos diversos padrões de vórtice que ocorrem ao nosso redor. Sem dúvida, pois em muitas das ocasiões não é possível visualizar os vórtices, pois os mesmos estão invisíveis ao olho humano e, portanto, seria necessário a injeção de algum tipo de traçador, como por exemplo: tintas, corantes, fumaças, dentre outros, para torná-los visíveis.

A todo momento um avião a jato voa através do céu e isto produz dois pequenos tornados. Estes tornados são então denominados vórtices de ponta de asa, como ilustrado na Figura 2.4.

O vórtice de ponta de asa é formado pela diferença de pressão entre a superfície superior da asa do avião e a sua superfície inferior. A elevada pressão na superfície inferior, produz um escoamento de ar, que se enrola de forma ascendente e ao redor da ponta da asa. Quando o escoamento de ar ao redor da ponta da asa transita atrás desta aeronave, os vórtices então formados são fortes o bastante, a ponto de sacudir um outro avião que venha a transitar nesta esteira. Os vórtices também produzem arrasto no avião, diminuindo assim o seu desempenho, resultando num maior consumo de combustível.



(a) Observando as nuvens pode-se notar os vórtices de ponta de asa produzidos por um avião a jato.



(b) Vórtice de ponta de asa num avião pulverizador: neste caso o inseticida torna o vórtice visível.

Figura 2.4 - Exemplos ilustrando os vórtices de ponta de asa (www.efluids.com).

Como pode ser visto, os vórtices podem ser formados de diferentes formas, no entanto, no contexto do presente trabalho o interesse está voltado para os vórtices produzidos a partir do escoamento ao redor de corpos não-aerodinâmicos.

O escoamento ao redor de corpos com perfis não-aerodinâmicos encontra larga aplicação em diversos campos da engenharia, constituindo um tema de pesquisa dos mais relevantes e atuais. Edifícios, monumentos, pontes suspensas e construções civis em geral acham-se expostos à ação natural do vento, assim como cabos de sustentação, linhas e torres de transmissão de energia elétrica. Do mesmo modo, pilares de pontes e estruturas de plataformas de prospecção de petróleo estão submetidos aos efeitos de correntes fluviais ou marítimas. Escoamentos envolvendo a interação fluido-estrutura são, ainda, observados em trocadores de calor, medidores de vazão, componentes de turbomáquinas hidráulicas e inúmeros outros sistemas fluidomecânicos.

Além de sua larga aplicação em diversos campos da engenharia, o estudo do escoamento ao redor de corpos não-aerodinâmicos têm fascinado pesquisadores por um longo período de tempo, devido a sua complexidade intrínseca.

Em todos estes casos anteriormente citados, é de extremo interesse a identificação e análise das forças que atuam no obstáculo sólido no entanto, são vários os aspectos relativos ao fenômeno de geração e desprendimento de vórtices na esteira de cilindros que permanecem, ainda hoje, bastante obscuros, justificando todos os esforços de pesquisa empreendidos nesta área.

Do ponto de vista fenomenológico, o escoamento ao redor de cilindros posicionados perpendicularmente ao fluxo principal apresenta alto grau de complexidade, devido, sobretudo, à interação simultânea entre as várias zonas de forte cisalhamento, presentes no seio do fluido. Neste tipo de escoamento, duas camadas cisalhantes se desprendem de ambos os lados do corpo sólido e se prolongam na direção do escoamento, confinando a região da esteira que se desenvolve à jusante do cilindro. Uma vez que a zona mais interna das camadas cisalhantes, em contato com a esteira, se move mais lentamente do que a sua parte externa, em contato com a corrente livre, estas camadas tendem a enrolar em torno de si mesmas, formando vórtices discretos, cujo comportamento dinâmico dá origem a diversos padrões de escoamento (Lindquist, 2000). O mecanismo de formação de vórtices ao redor de um cilindro circular é ilustrado na Figura 2.5.

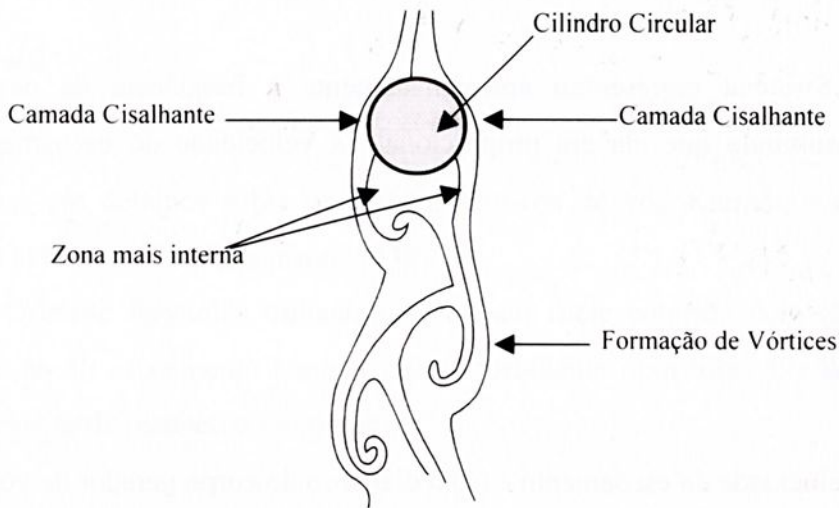


Figura 2.5 - Mecanismo de formação dos vórtices.

As duas fileiras de vórtices, dispostas em “*zigue-zague*”, que ocorrem atrás de um corpo não-aerodinâmico imerso num escoamento ou movendo-se num fluido são chamados de esteira de vórtices de von Kármán.

Esta esteira foi observada pela primeira vez em 1878 por Cenek Vincenz Strouhal (Figura 2.6), um cientista Tcheco (1850-1922).



Figura 2.6 – Foto de Vincenz Strouhal, o primeiro a observar o desprendimento alternado de vórtices a partir de um obstáculo sólido, as chamadas “ruas de von Kármán” (www.google.com).

Vincenz Strouhal representou aproximadamente a frequência de desprendimento de vórtices (f), assumindo que ela era proporcional à velocidade do escoamento, da seguinte maneira:

$$f = \frac{1}{6} \cdot \frac{V}{d} \quad (2.1)$$

onde (V) é a velocidade do escoamento e (d) o diâmetro do corpo gerador de vórtice.

Desde então, análises teóricas e investigações experimentais foram realizadas por inúmeros pesquisadores dentre os quais destacaram-se Mallock em 1907 e von Kármán em 1911.

Em 1911, Theodor von Kármán apresentou a sua célebre teoria referente à esteira de vórtices, que estimulou uma grande quantidade de pesquisas sobre o assunto, mas mesmo nos dias de hoje, ainda não dispõe de um tratamento teórico adequado que explique o mecanismo de geração periódica de vórtices, alternadamente de ambos os lados de um corpo de perfil não-aerodinâmico imerso num escoamento de um fluido.

A partir da ilustração da esteira de vórtices mostrada na Figura 2.7, pode-se verificar que existem três variáveis independentes:

a = distância entre dois vórtices consecutivos de uma mesma fileira;

h = distância entre as fileiras de vórtices;

k = vorticidade de cada vórtice.

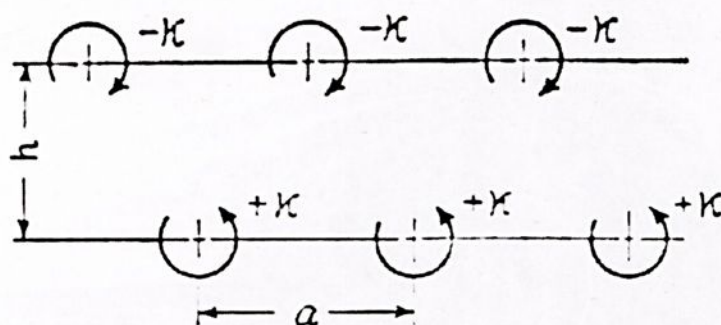


Figura 2.7 - Esteira de vórtices de von Kármán.

Von Kármán estabeleceu que a esteira de vórtices de um fluido ideal move-se com estabilidade quando:

$$\cos \frac{\pi \cdot h}{a} = \sqrt{2} \quad (2.2)$$

Uma análise, em detalhes sobre os estudos teóricos de von Kármán é encontrado nas referências Lamb (1945) e Milne-Thomson (1938).

Em 1883, Osborne Reynolds utilizando-se de um filete colorido com tinta de anilina, observou a transição do escoamento laminar para o turbulento num tubo. Ele descobriu que o parâmetro (que mais tarde recebeu o seu nome)

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (2.3)$$

é um critério pelo qual o regime do escoamento pode ser determinado. O número de Reynolds é a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas.

Quando um escoamento com um perfil uniforme de velocidades contorna um obstáculo sólido a baixo número de Reynolds ($\text{Re} < 1$), produz, na maioria das vezes, uma esteira simétrica

e independente do tempo. Nesta situação, não ocorre descolamento apreciável da camada limite e o escoamento contorna perfeitamente o corpo sólido. De forma ilustrativa, a Figura 2.8 mostra esta situação através de uma imagem visualizada do escoamento ao redor de um cilindro circular, retirada da publicação de Van Dyke (1982).

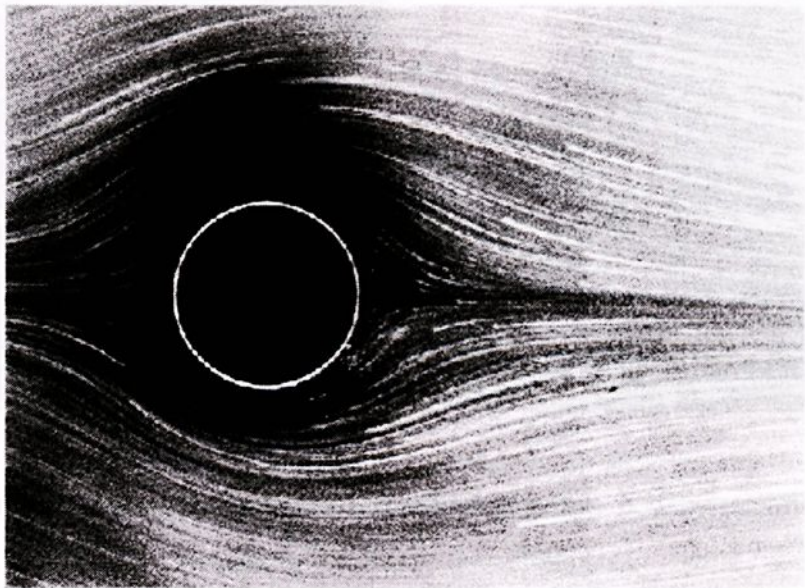


Figura 2.8 - Escoamento ao redor de um cilindro circular "*creeping flow*" ($Re = 0,16$).

À medida que o número de Reynolds aumenta, ocorre a separação do escoamento, no chamado ponto de descolamento, formando um par de vórtices simétricos, conhecidos como bolha de recirculação. Esta bolha de recirculação permanece estacionária e em movimento rotativo atrás do corpo sólido, como mostra a Figura 2.9.

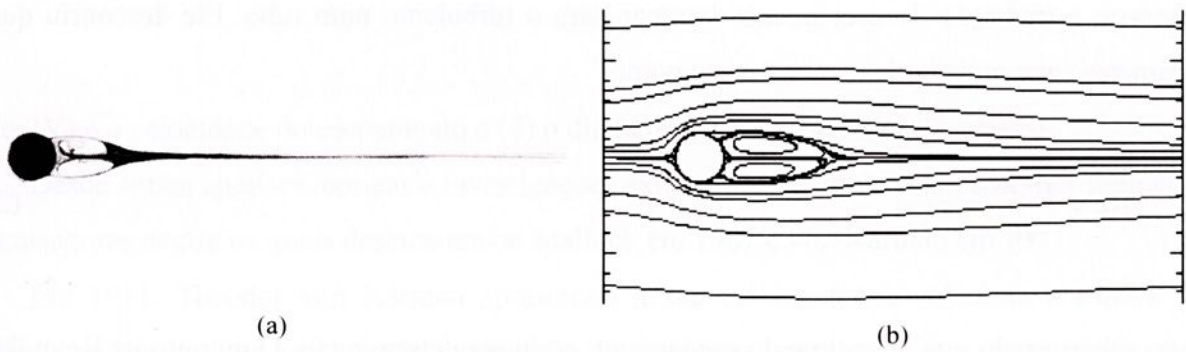


Figura 2.9 - Bolha de recirculação produzida na esteira de um cilindro circular. (a) Visualização de escoamentos em meio hidrodinâmico ($Re = 34$) e (b) Simulação numérica - linhas de corrente ($Re = 40$), segundo Campos Silva *et al.* (1998).

Aumentando-se ainda mais o número de Reynolds, esta região de recirculação cresce, torna-se assimétrica e instável, produzindo oscilações periódicas na esteira do cilindro, como observado na Figura 2.10.

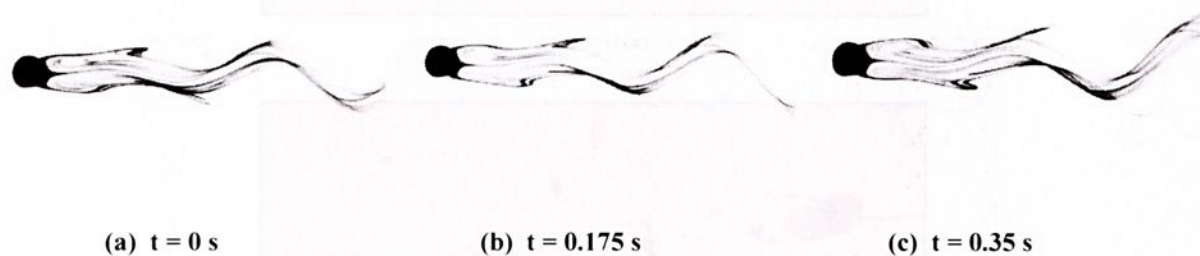


Figura 2.10 - Visualização da desconfiguração da zona de recirculação ($Re = 46$), segundo Gonçalves & Vieira (1998).

Estas instabilidades amplificam-se com o aumento do número de Reynolds, resultando na formação da chamada esteira de von Kármán, caracterizada pela emissão de vórtices alternados, que se desprendem de ambos os lados do corpo, como ilustrado pela sequência de imagens da Figura 2.11.

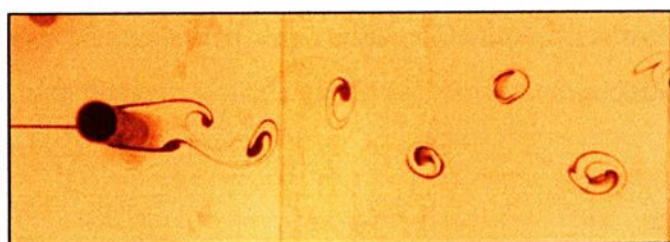
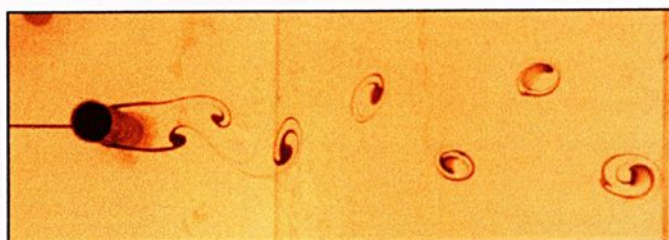
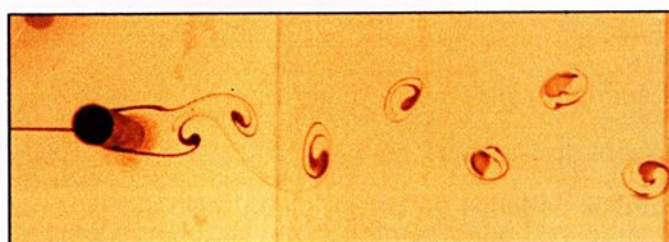
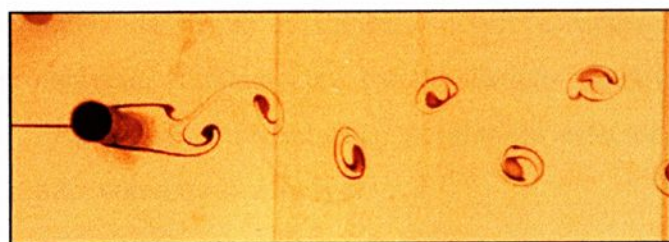
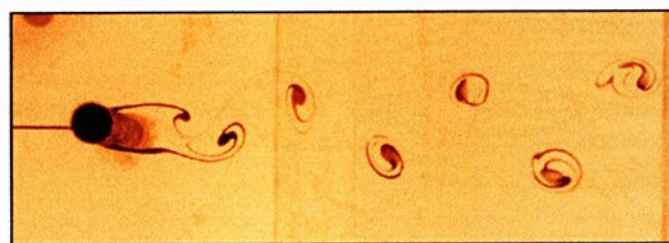
(a) $t = 0.00$ s(b) $t = 0.18$ s(c) $t = 0.35$ s(d) $t = 0.53$ s(e) $t = 0.70$ s

Figura 2.11 - Esteira de vórtices de von Kármán ($Re \cong 250$), segundo Lindquist *et al.* (1999).

A Figura 2.12 apresenta um desenho esquemático dos principais regimes de escoamento que podem ser encontrados à jusante de um cilindro prismático com seção transversal circular.

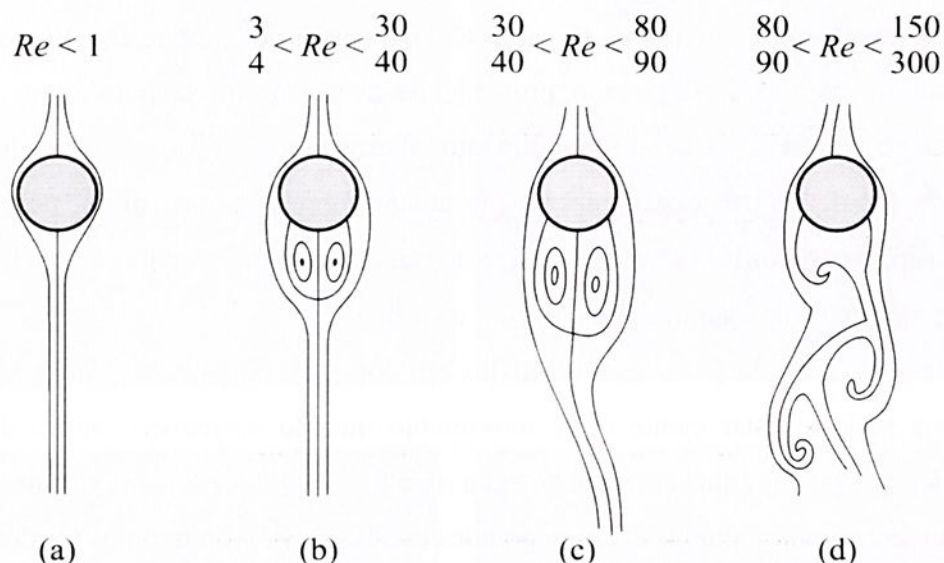


Figura 2.12 - Regimes de escoamento ao redor de um cilindro circular (Gersten, 1983).

Embora estes resultados retratem o escoamento em torno de cilindros com seção transversal circular, padrões de escoamento bastante semelhantes são, também, observados ao redor de outros tipos de corpos rombudos ou não aerodinâmicos, encontrados freqüentemente no interior de dispositivos, máquinas e equipamentos industriais, concebidos com as mais diversas finalidades.

No regime de emissão alternada de vórtices (Figura 2.11), a freqüência de desprendimento dos turbilhões (f) se relaciona com a velocidade da corrente livre não perturbada (V) e com a dimensão característica do corpo sólido (D) através do número de Strouhal (S_t), definido pela relação:

$$S_t = \frac{f \cdot D}{V} \quad (2.4)$$

Este parâmetro adimensional mantém estrita dependência com o regime de escoamento e com a forma geométrica do obstáculo, segundo Kawakita & Silveiras (1993). Dentro de uma larga faixa de velocidades, o número de Strouhal apresenta boa estabilidade, podendo ser considerado constante na maioria das aplicações práticas. Sobre este padrão de comportamento

fenomenológico apoia-se o princípio de funcionamento dos medidores de vazão a efeito vórtice (*vortex flowmeters*), que pode ser assim resumido: uma vez conhecido o número de Strouhal característico do escoamento em torno de uma dada geometria, a velocidade média do fluxo livre pode ser determinada com o auxílio da Equação (2.4), quantificando-se unicamente o número de turbilhões emitidos por unidade de tempo, provenientes de um mesmo lado do corpo.

Com efeito, no regime de desprendimento alternado de vórtices, ocorrem flutuações cíclicas nas forças de arrasto e sustentação que atuam sobre o corpo sólido, podendo causar vibrações estruturais, perturbações acústicas e ressonância, comprometendo o funcionamento, a vida útil ou a segurança de máquinas, instalações e edificações.

O oceano e a atmosfera são ambos fluidos em constante movimento. Em nossa limitada escala humana pode-se estar ciente deste movimento quando sentimos o sopro do vento ou quando nos deparamos com uma corrente de água ao longo da praia enquanto nadamos. Os olhos humanos raramente conseguem observar as grandes escalas do movimento dos fluidos no oceano e na atmosfera. As Figuras 2.13 e 2.14, apresentam imagens do movimento de fluidos na atmosfera obtidas por um satélite da NASA. Neste caso, pode-se observar a esteira de vórtices de von Kármán formada à jusante de uma ilha.

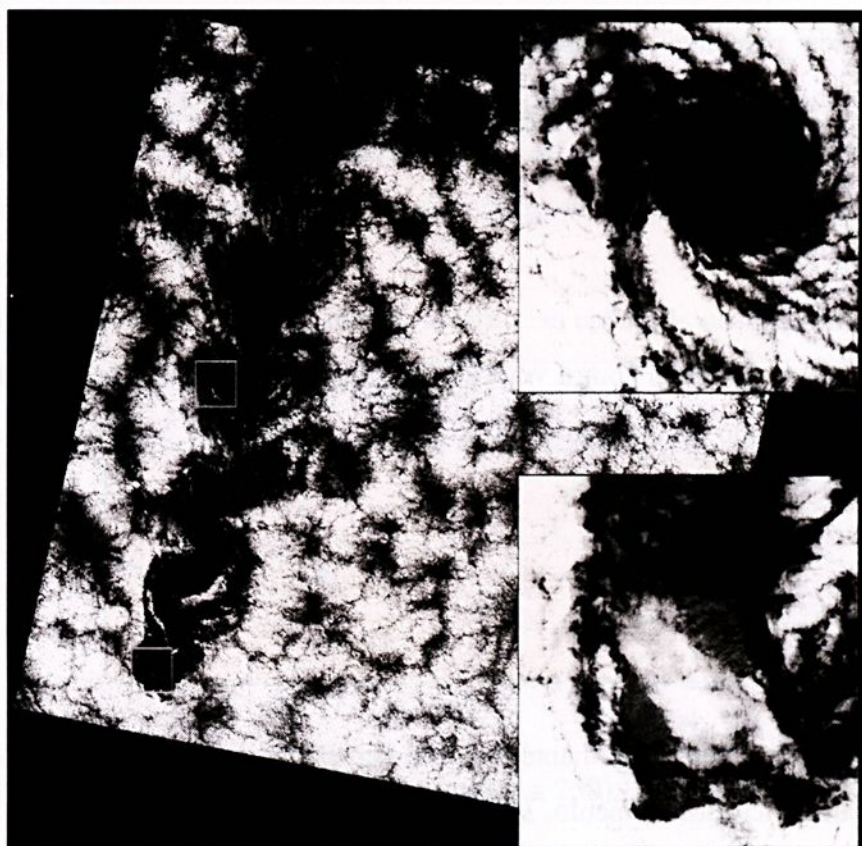


Figura 2.13 - Esteira de vórtices de von Kármán formada à jusante de uma ilha (<http://daac.gsfc.nasa.gov>).

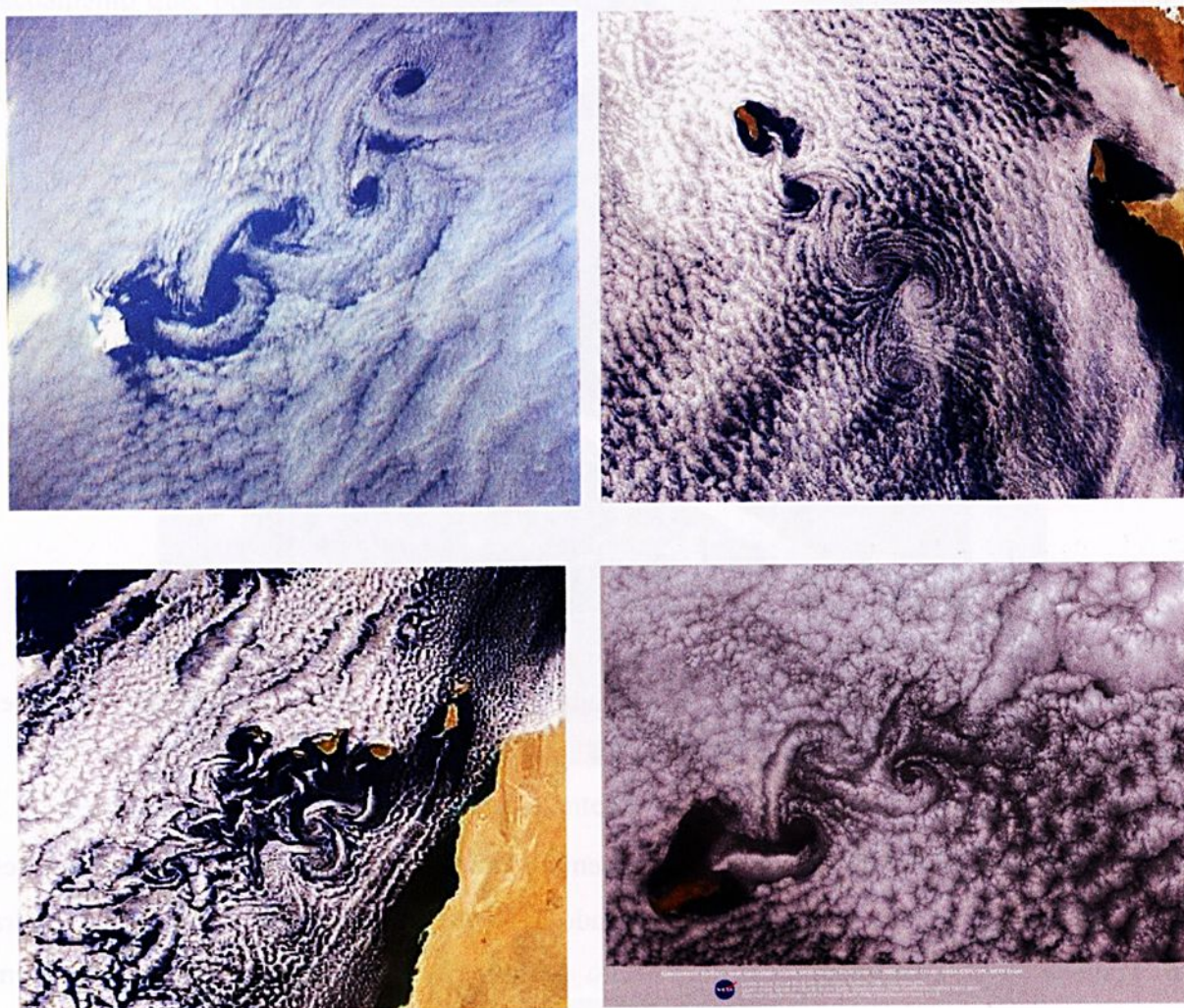


Figura 2.14 - Exemplos do fenômeno de desprendimento de vórtices encontrados na natureza (<http://daac.gsfc.nasa.gov>).

O desprendimento de vórtices também ocorre ao redor de pilares de ponte, estacamentos, estruturas das plataformas de prospecção de petróleo e ao redor de edifícios elevados. Por estas razões, os engenheiros devem levar em conta o fenômeno de desprendimento de vórtices no projeto destas estruturas para evitar danos aos objetos que estejam no caminho das esteiras de vórtices.

A título de ilustração, a Figura 2.15 (retirada de <http://www.efluids.com>) apresenta o escoamento da água do mar ao redor de pilares de sustentação de um píer, onde se observa a formação das esteiras de vórtices de von Karman à jusante dos obstáculos verticais.

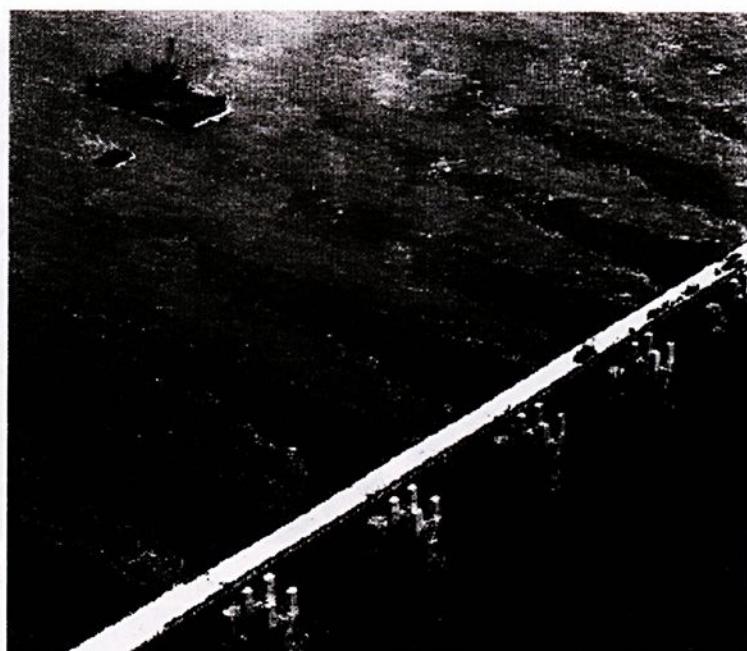


Figura 2.15 - Esteira de vórtices formada à jusante dos pilares de um píer (<http://www.efluids.com>).

Um dos mais célebres exemplos, que demonstram o poder destrutivo das flutuações cíclicas, provocados pelo desprendimento alternado de vórtices, encontra-se ilustrado na Figura 2.16. Trata-se da destruição da Ponte do Estreito de Tacoma, ocorrida nos Estados Unidos em 1940. Neste caso, os efeitos das vibrações induzidas pelo escoamento ao redor desta complexa estrutura foram desconsideradas ou, no mínimo, subestimadas pelos calculistas.

Apesar do poder destrutivo resultante de uma interação arbitrária fluido-estrutura, o conhecimento macroscópico da dinâmica e dos mecanismos intrínsecos de troca de calor e massa no seio do escoamento podem conduzir ao seu efetivo controle, resultando no aprimoramento de projetos estruturais ou criação de novos equipamentos no âmbito dos processos de engenharia.

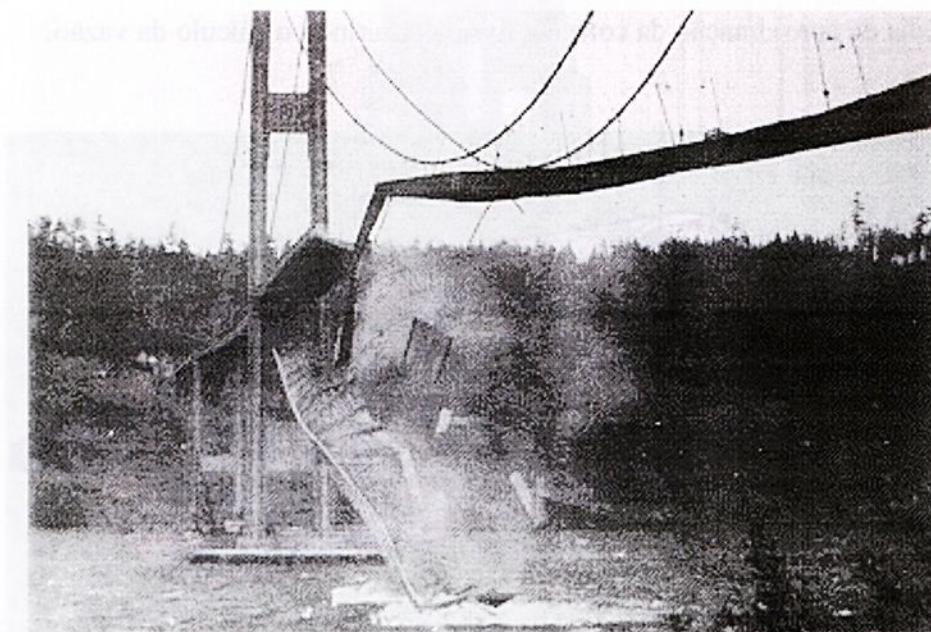
O estudo exaustivo dos pesquisadores em busca de uma melhor compreensão do fenômeno de emissão de vórtices, permitiu sua aplicação de forma útil para a melhoria dos processos de troca de calor e na medição de vazão de fluidos.

Um exemplo mais recente destas aplicações, é ilustrado na Figura 2.17, que representa um trocador de calor compacto de placas paralelas, munido de aletas interrompidas dispostas em quincôncio. Tais equipamentos apresentam, em geral, uma elevada superfície de troca de calor por unidade de volume e são projetados para desenvolverem altos coeficientes de transferência de calor. O desempenho do aparelho mantém estrita dependência com as características do

escoamento que, por sua vez, é fortemente influenciado pela forma, dimensões e espaçamento entre as aletas.



(a) Momentos antes de sua destruição.



(b) No momento do colapso.

Figura 2.16 - Destruição da Ponte do Estreito de Tacoma (www.google.com).

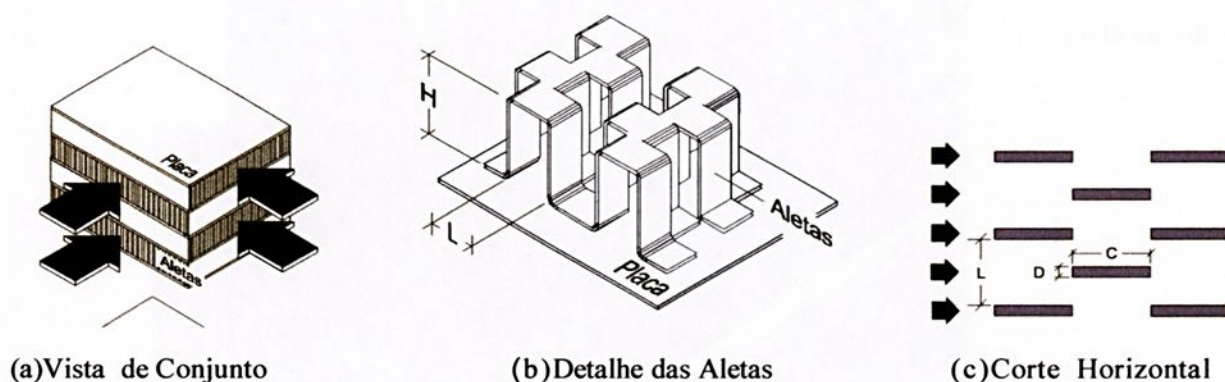


Figura 2.17 - Trocador de calor compacto de placas paralelas (Lindquist, 2000).

Um exemplo de particular interesse no contexto deste trabalho, consiste no medidor de vazão à efeito vórtice representado na Figura 2.18, onde um obstáculo cilíndrico (“shedder”) é introduzido no escoamento cuja vazão se pretende determinar. O sistema é dotado de sensores capazes de captar a frequência das oscilações de pequena amplitude, provocadas pelo desprendimento dos vórtices alternados. Esta frequência pode ser facilmente correlacionada à velocidade média de aproximação da corrente livre, permitindo o cálculo da vazão.

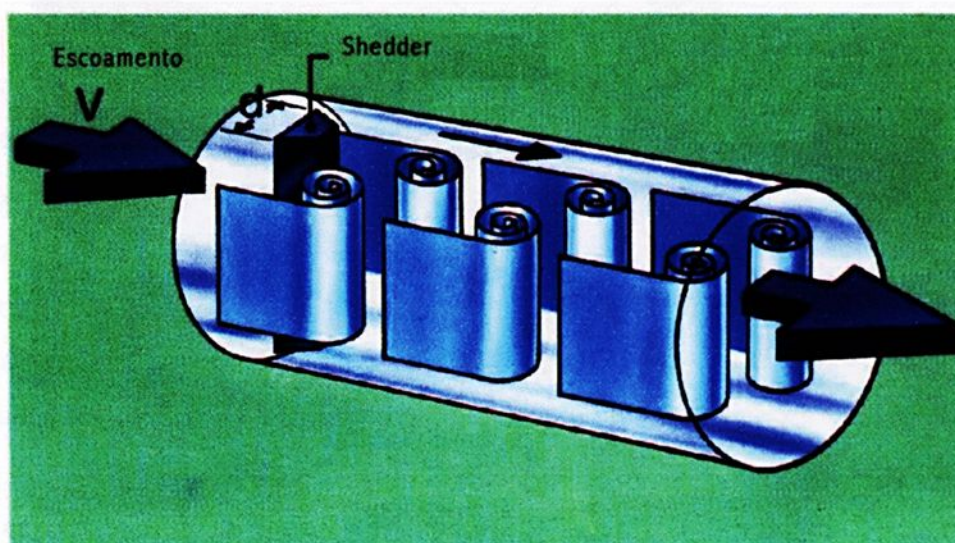


Figura 2.18 - Medidor de vazão a efeito vórtice (www.omega.com).

Anatol Roshko (1955), foi o primeiro a sugerir a utilização do fenômeno de emissão de vórtices num medidor de vazão. Após Roshko alguns trabalhos isolados surgiram, mas a consolidação deste medidor a nível industrial, surgiu apenas em 1968, sendo que a pioneira na

fabricação foi a *Yokogawa Eletric Company*. A cada dia que passa são exigidos medidores de vazão cada vez mais precisos e o medidor tipo vórtice vem se destacando por possuir uma configuração relativamente simples, sem peças móveis sujeitas a desgaste, alta precisão, linearidade, ampla faixa de medição e fraca dependência com a viscosidade do fluido, encontrando, atualmente, utilização corriqueira em muitas aplicações industriais, comerciais e aeronáuticas (Wolochuk *et al.*, 1996, Yokoi & Kamemoto, 1994 e Unal & Rockwell, 1988). A Figura 2.19 ilustra um medidor de vazão a efeito vórtice comercial fabricado pela *Yokogawa Eletric Company*.

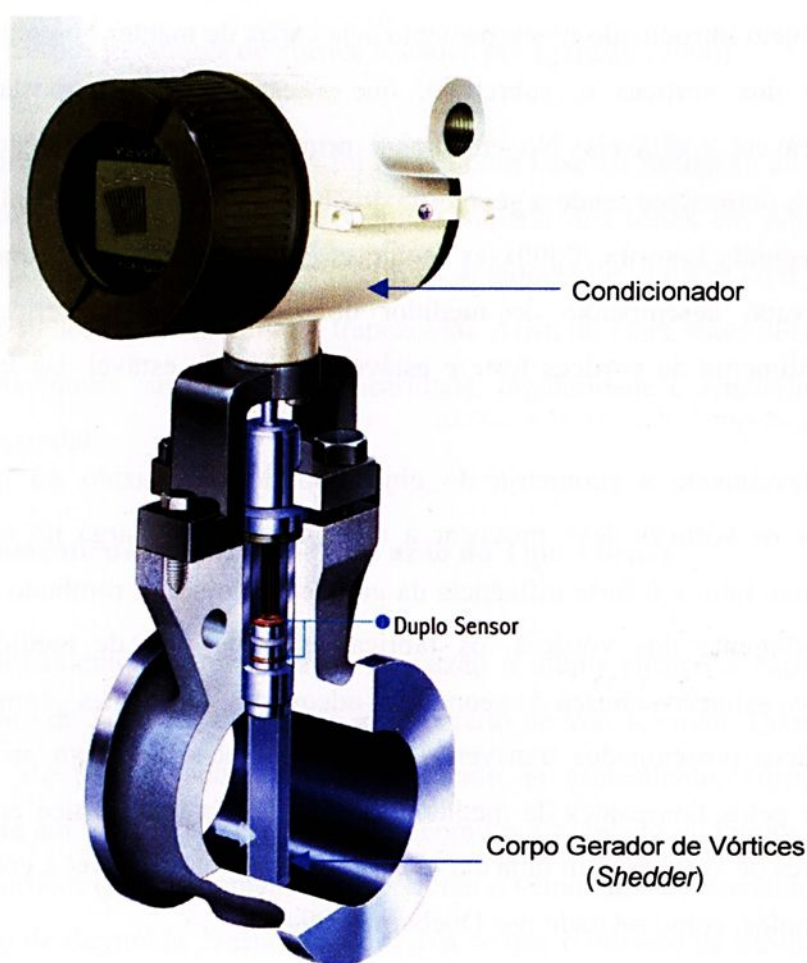


Figura 2.19 - Medidor de vazão a efeito vórtice comercial (*Yokogawa Eletric Co.*).

2.2 Medidor de Vazão do Tipo Vórtice

Quando um corpo não-aerodinâmico é posicionado perpendicularmente à direção do escoamento, vórtices são gerados alternadamente a partir deste obstáculo sólido. Quantificando o

número de vórtices formados a partir de um dos lados da esteira de von Kármán, pode-se através de uma relação conhecida pelo número de Strouhal, determinar a vazão do fluido. Este simples fato é a base da toda a teoria dos medidores de vazão do tipo vórtice.

Apesar de sua concepção razoavelmente simples, o projeto de um medidor de vazão do tipo vórtice é dificultado por inúmeros fatores que podem influenciar o fenômeno de desprendimento dos vórtices. Dentre estes fatores incluem-se: o perfil de velocidades e o nível de turbulência residual a montante do obstáculo, as pulsações de velocidade do fluxo livre, a razão de bloqueio provocada pela presença do corpo sólido, o acabamento superficial do obstáculo, sua razão de esbeltez e os eventuais raios de concordância de suas arestas. Ainda, é imprescindível que o objeto introduzido no escoamento seja capaz de manter boa regularidade na frequência de emissão dos vórtices e, sobretudo, que a esteira seja composta por vórtices facilmente identificáveis e estáveis. No entanto, o principal fator de influência na relação Strouhal x Reynolds permanece sendo a geometria do obstáculo sólido (Pankanin & Krystkiewicz, 1995).

Segundo Igarashi (2000), as seguintes propriedades são de fundamental importância para um elevado desempenho do medidor de vazão do tipo vórtice: baixa perda de carga, desprendimento de vórtices forte e estável e detecção estável das frequências de emissão dos vórtices.

Obviamente a geometria do objeto sólido introduzido no interior da tubulação para produzir os vórtices deve provocar a mínima perda de carga no escoamento. Devido a este importante fator e à forte influência da geometria do corpo rombudo no fenômeno de geração e desprendimento dos vórtices, os fabricantes deste tipo de medidor têm empreendido um exaustivo esforço na busca de geometrias adequadas. Diferentes geometrias de corpos cilíndricos prismáticos posicionados transversalmente em relação ao fluxo principal são exaustivamente testadas pelos fabricantes de medidores de vazão do tipo vórtice em uma constante busca de emissores de vórtices com uma curva de desprendimento estável e constante em uma larga faixa de Reynolds, como relatado por Doebelin (1994).

Mais recentemente, Igarashi (2000) estudou o desempenho de dois novos tipos de corpo gerador de vórtices para medidores de vazão. O primeiro consiste num cilindro circular com uma ranhura bidimensional ao longo do diâmetro e o outro se trata de um corpo composto por um semi-cilindro e um triângulo (Figura 2.20). O dispositivo experimental utilizado é constituído por um longo tubo circular reto de 9,59 m de comprimento e diâmetro interno $D=150$ mm. Os corpos geradores de vórtices a serem ensaiados foram instalados $40 D$ à jusante da entrada da tubulação, o que garantia um escoamento completamente desenvolvido na seção de testes.

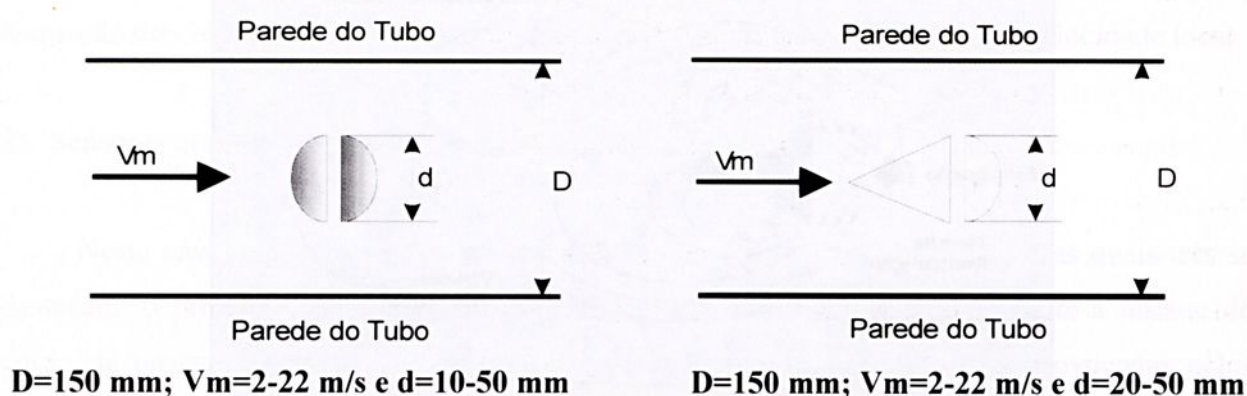


Figura 2.20 - Corpos geradores de vórtice testados por Igarashi (2000).

A frequência de desprendimento dos vórtices foi obtida com base na flutuação da pressão medida na superfície do corpo gerador de vórtice. Como resultado dos testes em laboratório conduzidos por Igarashi, a perda de carga destes dois corpos geradores de vórtices com ranhura foi reduzida por 50 % comparado àquele do cilindro trapezoidal. Além do mais, estes dois corpos geradores de vórtices se mostraram superiores em linearidade, regularidade e sensibilidade se comparado ao cilindro trapezoidal.

2.3 Princípio de Funcionamento de um Medidor de Vazão do Tipo Vórtice

O princípio de funcionamento de um medidor de vazão a efeito vórtice é baseado no fenômeno de desprendimento de vórtices, conhecido como efeito de von Kármán. Quando um corpo rombudo (“*shedder*”) é posicionado perpendicularmente ao escoamento, vórtices são desprendidos alternadamente em ambos os lados do corpo, como representado na Figura 2.21. A frequência de emissão de vórtices (f) é diretamente proporcional a velocidade do escoamento em uma ampla faixa do número de Reynolds. Nesta faixa observa-se que o número de Strouhal (St) permanece constante. É nesta faixa de abrangência que operam a maioria dos medidores de vazão a efeito vórtice disponíveis comercialmente.

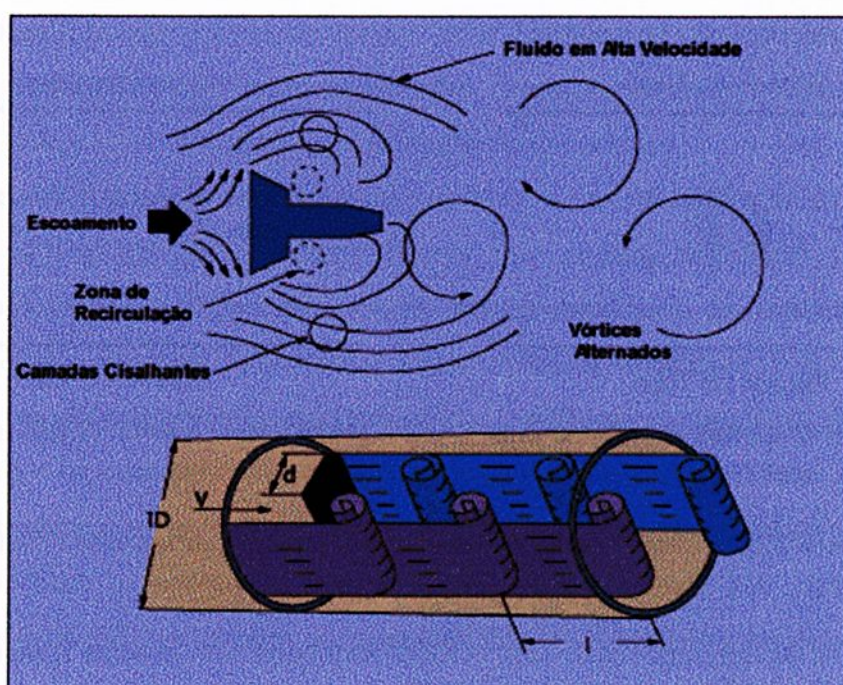


Figura 2.21 - Esquema de geração de vórtice ao redor de um corpo não-aerodinâmico (www.omega.com).

Os medidores de vazão a efeito vórtice são compostos basicamente de três componentes, a saber: o corpo gerador de vórtice, conhecido como “*shedder*”, o sensor que capta a frequência de desprendimento dos vórtices e condicionador de sinais que transmite um sinal de saída que é proporcional a taxa de fluxo.

O corpo gerador de vórtice e a estrutura deste medidor são geralmente fabricados em aço inoxidável ou em ligas a base de níquel, evitando desta forma a deterioração por corrosão. Quanto aos sensores que captam a frequência de desprendimento dos vórtices, diversos tipos de tecnologia foram empregadas ao longo dos anos.

Segundo Basile (1995), existem basicamente duas formas para a detecção dos vórtices, a saber:

- 1) Sensores que detectam a variação da velocidade local devido a presença dos vórtices.

Os primeiros sensores deste tipo foram os térmicos, que detectavam a presença dos vórtices através das variações na transferência de calor de um resistor aquecido em função da variações de velocidade que ocorre localmente. Um outro tipo de detecção da variação da velocidade local é através de sensores que utilizam os princípios ultra-sônicos. Neste caso, um

feixe de ultra-som atravessando de um lado ao outro do tubo através do fluido na região de formação dos vórtices, será modulado pelos mesmos em função da variação de velocidade local.

2) Sensores que detectam as variações da pressão local.

Neste caso, tais sensores podem ser usados de diversas maneiras, dentre as quais três se destacam: o primeiro consiste numa pequena bola ou disco, presos a uma haste a jusante do corpo de prova, que transmite à um *pickup* magnético as ações alternadas provocadas pelos vórtices. O segundo tipo de sensor que detecta as variações de pressão consiste numa pequena barra colocada em balanço após o corpo gerador de vórtice, com um sensor do tipo *strain-gage* montado em seu interior para detectar as flexões sofridas pela barra. O terceiro tipo de sensor de pressão consiste num par de diafragmas soldados em lados opostos do corpo gerador de vórtice, criando-se assim uma célula capacitiva com óleo em seu interior para agir como dielétrico e, deste modo, com a presença dos vórtices, agirão empurrando e puxando os diafragmas mudando, assim, a capacitância.

A grande maioria dos medidores de vazão do tipo vórtice vendidos atualmente empregam sensores piezoelétricos e do tipo capacitivo que respondem à oscilação de pressão ao redor do corpo gerador de vórtice produzindo um sinal de voltagem de saída com a mesma frequência da oscilação. Estes sensores são modulares, de baixo custo, fácil substituição, e podem operar numa ampla faixa de temperatura, que varia desde líquidos criogênicos até vapores super aquecidos. Os sensores podem estar localizados tanto dentro dos corpos geradores de vórtices, quanto externamente ao mesmo. Os medidores de vazão do tipo vórtice com sensores externos são empregados em situações envolvendo fluidos severos, pois este tipo de sensor suporta um elevado tempo médio antes de falhar e minimiza custos de manutenção. Já os medidores com sensores internos, possuem uma melhor faixa de abrangência de medição (maior sensibilidade ao escoamento de baixa velocidade) e são menos sensíveis às vibrações impostas na tubulação.

2.4 As Vantagens e Desvantagens do Medidor de Vazão do Tipo Vórtice

Os medidores de vazão a efeito vórtice tem tido uma considerável aceitação pelo mercado. As suas principais vantagens e desvantagens, segundo Kawakita (1992), Wolochuk *et al.* (1996), Merrett (1995) e Gonçalves & Viera (1999), são:



Vantagens:

- a) A grande maioria dos modelos de medidores disponíveis comercialmente não possui partes móveis;
- b) Geralmente podem medir tanto gases quanto líquidos, limpos ou relativamente sujos, eletricamente condutores ou não. Sua aplicação para medição de alguns escoamentos bifásicos é possível;
- c) Desempenho pouco influenciado pela densidade, pressão e viscosidade e temperatura do fluido;
- d) A pressão máxima de operação é da ordem de 260 bar e a faixa de temperaturas de trabalho é bastante abrangente indo de -200°C a 430°C ;
- e) Possuem uma ampla faixa de operação de vazão;
- f) Possuem uma elevada linearidade e repetibilidade;
- g) Boa estabilidade do sinal ao longo do tempo;
- h) Fornecem saídas analógicas e/ou digital;
- i) Calibração não é sujeita a derivação e é bastante reprodutível uma vez mantidas as dimensões físicas, não sendo necessária calibração individual de cada sensor;
- j) Mantendo as similaridades geométricas, a calibração de um diâmetro nominal de medidor possibilita que a calibração de outros diâmetros seja obtida com exatidão;
- k) Nas bitolas reduzidas, abaixo de 8'', os medidores do tipo vórtice podem ser economicamente mais viáveis do que os medidores por placas de orifício com transdutores de pressão diferencial;

l) Podem ser fabricados para operação segura em áreas de risco e com a utilização de materiais resistentes à corrosão;

m) A instalação é relativamente simples podendo operar com qualquer orientação de seu eixo, como na horizontal, vertical de baixo para cima, de cima para baixo ou mesmo inclinado;

n) Preços comparativos e competitivos com outros medidores como custo de instalação, calibração, operação e de manutenção.

Desvantagens:

a) Na extremidade inferior da faixa de trabalho existe uma limitação fundamental na medida em que os vórtices se tornam irregulares e instáveis para Reynolds reduzidos;

b) Nos medidores de diâmetro pequeno e na extremidade inferior de suas faixas de trabalho, pode haver uma limitação mesmo na presença de vórtices regulares. Esta limitação tem como causa a falta de sensibilidade do detector e da eletrônica associada;

c) Na extremidade superior da faixa de operação, as medições de vazão de líquidos realizadas sob baixa pressão podem ser afetadas pelo fenômeno da cavitação do corpo gerador de vórtices;

d) Para medição de vazão de gases, os problemas podem surgir em velocidades extremamente elevadas devido aos efeitos de compressibilidade e acústico. Nesse caso, se a dimensão da tubulação for da mesma ordem do comprimento de onda da frequência de geração dos vórtices, podem ocorrer ondas estacionárias no interior da linha com prejuízo à calibração do medidor;

e) Os efeitos de escoamentos pulsantes e a presença de altos níveis de vibração não foram ainda totalmente investigados, porém, claramente haveria uma perigosa interferência de fases se a frequência de pulsação e/ou vibração se sobrepusesse à faixa de frequência de geração de vórtices;



f) Em bitola maiores, acima de 8'', as vantagens econômicas sobre as placas de orifício com transmissores de pressão tendem a diminuir e os medidores vão se tornando relativamente mais caros;

g) A perda de carga global de um medidor do tipo vórtice é comparável ao de um medidor do tipo turbina, sendo um pouco menor do que a de uma placa de orifício com relação de diâmetros da ordem de 0,7. Porém, claramente, não se compara favoravelmente com um medidor de vazão do tipo eletromagnético, cuja perda de carga imposta ao escoamento é praticamente desprezível;

h) A exemplo do que ocorre em uma placa de orifício, um medidor do tipo vórtice pode fornecer leituras inexatas se o escoamento na seção de medição for pulsante ou mesmo se não possuir um perfil de velocidades totalmente desenvolvido. Normalmente, são exigidos trechos de 10 diâmetros de tubulação a montante e 5 a jusante do medidor para a estabilização do escoamento. Em alguns casos o trecho reto a jusante pode ser reduzido para 4 diâmetros e em outros aumentando para 40 diâmetros.

2.5 Fatores que Influenciam no Desempenho dos Medidores de Vazão do Tipo Vórtice

Alguns fatores importantes devem ser levados em consideração no projeto e instalação do medidor de vazão do tipo vórtice, para que o mesmo possa obter um elevado desempenho. Vibrações na tubulação, características (formas e dimensões) do corpo emissor, localização do sensor em relação ao *shedder* e a instalação do medidor tipo vórtice na tubulação, são alguns destes fatores. Nos parágrafos seguintes é feita uma descrição detalhada dos fatores que influenciam diretamente no desempenho dos medidores de vazão do tipo vórtice.



2.5.1 Características do Corpo Gerador de Vórtices

Este é o principal fator que deve ser levado em consideração no projeto de um medidor de vazão do tipo vórtice, pois é a forma do corpo gerador que influencia diretamente na frequência de emissão dos vórtices e consequentemente na qualidade do sinal. Portanto, a geometria do corpo gerador de vórtices deve ser otimizada a fim de produzir vórtices regulares para simplificar a detecção de uma frequência bem definida.

Um grande número de investigações experimentais tem sido realizadas no escoamento do fluido ao redor de corpos rombudos, objetivando o seu emprego em medidores de vazão. Igarashi (1985) examinou o escoamento de um fluido ao redor de corpos rombudos de vários formatos e sugeriu que o cilindro circular com uma ranhura bidimensional posicionada ao longo do diâmetro, é a geometria mais adequada para ser utilizada nos medidores de vazão do tipo vórtice. O cilindro circular, comparado com outros corpos rombudos, é responsável por um desprendimento regular de vórtices intensos. Apesar destes resultados, uma grande variedade de medidores de vazão à efeito vórtice disponíveis comercialmente nunca utilizaram um corpo gerador de formato circular. Em geral, os medidores de vazão à efeito vórtice disponíveis comercialmente utilizam corpos com cantos retos, tais como trapezoidal, delta ou corpos rombudos com seção transversal em forma de T.

Segundo Goujon-Durand (1995), a razão para esta escolha é que o corpo gerador de vórtices deve ser construído de tal forma que a relação constante da frequência de desprendimento dos vórtices para o volume do fluido passando através do *shedder* sobre uma ampla faixa de taxas de escoamento é mantida, para assegurar elevada linearidade e acuracidade.

Um dos parâmetros a se levar em consideração para assegurar boa linearidade, é a localização do ponto de desprendimento do vórtice. Para o cilindro circular, o local de formação dos vórtices depende da esteira recirculando e varia com o número de Reynolds. Para os corpos rombudos de aresta pontuda (*sharp edges*), o ponto de descolamento é muito bem definido. O ponto de descolamento crítico é estável para uma larga faixa de números de Reynolds e os cantos retos garantem uma fase espacial inicial constante de desprendimento dos vórtices. É difícil dizer mais sobre este problema, ou fornecer uma relação entre a linearidade e a forma do corpo rombudo, por que apesar da quantidade de trabalhos encontrados a este respeito, inúmeros pesquisadores têm investigado os mecanismos dos vórtices em condições completamente diferentes, seja utilizando túneis com seção circular ou retangular ou ainda, utilizando diferentes

formas do corpo rombudo, diferentes coeficiente de bloqueio, rugosidade da superfície e diferentes números de Reynolds.

A deposição de impurezas contidas em determinados tipos de fluidos podem alterar o acabamento superficial do corpo gerador de vórtice e até mesmo o seu *design*, provocando significativas distorções na qualidade do sinal. Como um exemplo, pode-se citar o trabalho de Menz (1997), o qual utilizou um medidor de vazão do tipo vórtice convencional para captar os sinais em um fluido que proporcionava a deposição de partículas no corpo gerador de vórtices e também em escoamentos bifásicos. Os sinais então obtidos foram distorcidos. De forma inteligente, Menz construiu um medidor de vazão que combinava o resultado de duas formas de aquisição de sinais: o método convencional que capta a frequência de emissão dos vórtices para o cálculo da vazão, mais o que capta o tempo de trânsito dos vórtices. O sistema então construído apresentou um excelente desempenho para uma ampla faixa de medidas e, comparado com o medidor de vórtice convencional, este apresentou uma melhora de 8-10 vezes na acuracidade e um desempenho considerável na aquisição dos sinais para escoamento bifásico e em fluidos onde o *design* do corpo emissor de vórtices original fora modificado pela deposição de impurezas.

Hans *et al.* (1998) estudaram a influência de diferentes geometrias para o corpo emissor no processo de desprendimento dos vórtices. Os ensaios foram realizados num escoamento de ar no interior de um tubo de 100 mm de diâmetro, no qual foram testadas duas geometrias para o corpo gerador de vórtice, sendo um triângulo e um trapézio (que consiste no mesmo triângulo, no entanto com a aresta cortada). Para determinar a frequência de emissão dos vórtices foi utilizado uma barreira ultrassônica posicionada à jusante do corpo emissor. Como resultado dos testes realizados com estas duas geometrias, pôde-se observar que para o caso do corpo emissor trapezoidal, ocorria a produção de vórtices secundários devido a presença da face posterior do corpo. Já para o caso do corpo emissor triangular, não ocorria a formação destes vórtices secundários e, portanto, era possível obter um sinal de pressão mais regular. Os vórtices secundários são desvantajosos por se tornarem visíveis no espectro do sinal, fornecendo um valor duplicado da frequência de emissão dos vórtices.

2.5.2 Localização do Sensor em Relação ao Corpo Gerador de Vórtices

A qualidade do sinal, bem como a linearidade da medida, depende fortemente do projeto do corpo emissor. Entretanto, as formas e dimensões do corpo emissor não é o único fator que influencia nas propriedades do sinal. Como resultado dos testes de laboratório conduzidos por

Pankanin & Krystkowics (1995), o tipo de sensor e a sua localização em relação ao corpo gerador de vórtices, influencia consideravelmente na qualidade do sinal e também na linearidade do medidor. Foram analisados quatro projetos diferentes de sensor, a saber:

- Sensor piezoelétrico *strain gage* fixado numa barra;
- Sensor piezoelétrico fixado nas laterais do corpo gerador de vórtices;
- Sensor piezoelétrico posicionado dentro do corpo gerador de vórtices;
- *Strain gage* de resistência fixado numa barra

De acordo com o projeto do sensor, durante as investigações em laboratório, vários corpos geradores de vórtices foram testados. O cilindro circular com uma ranhura foi utilizado como o tipo básico de corpo gerador. O diâmetro do corpo era igual a 13 mm e a largura da ranhura de 2 mm. No caso do sensor piezoelétrico localizado nas laterais do corpo gerador de vórtice foi utilizado um cilindro retangular (13x13 mm). O sensor piezoelétrico *strain-gage* fixado na barra, foi o que apresentou melhores resultados, fornecendo uma melhor qualidade do sinal para baixos valores da taxa de escoamento.

A maioria dos medidores de vazão industriais utilizam sensores de pressão piezoelétrico localizados dentro do corpo gerador de vórtices para detectar os vórtices e também um *hardware* que faz o processamento análogo do sinal, para calcular a frequência de emissão dos vórtices, a partir do sinal do sensor. Como os vórtices se desenvolvem à jusante do corpo, a posição do sensor é desfavorável e, portanto, a localização do sensor à jusante do corpo emissor seria o mais apropriado para medir a frequência de emissão dos vórtices.

Segundo Hans *et al.* (1998), um sistema de detecção por sensor que fornece melhores resultados e que satisfaz a esta necessidade, seria a utilização de uma barreira ultrassônica posicionada à jusante do corpo gerador de vórtices. A Figura 2.22 apresenta um esquema do sistema de detecção por sensor empregado por estes autores.



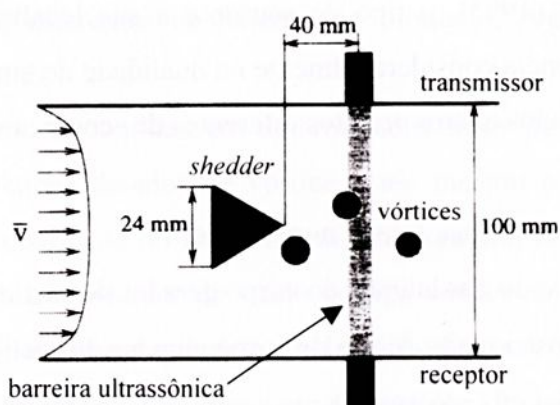


Figura 2.22 - Medidor de vazão do tipo vórtice com detecção ultrassônica.

2.5.3 Vibrações na Tubulação

As vibrações na estrutura da tubulação, podem induzir o corpo gerador de vórtices a movimentos vibrantes, afetando deste modo o desprendimento dos vórtices e, conseqüentemente, colocando em questionamento a acuracidade do medidor.

Miau *et al.* (2000) realizaram inúmeros experimentos para estudar a resposta de um medidor do tipo vórtice às vibrações estruturais devido a forças externas aplicadas na tubulação que podem ser na forma de uma simples força impulsiva ou múltiplas forças impulsivas em seqüência. O dispositivo experimental utilizado, consistia de um túnel hidrodinâmico, cuja seção de testes, um tubo circular de 150 mm de diâmetro, foi instalado o corpo gerador de vórtices em forma de T.

A freqüência de emissão dos vórtices foi obtida com um sensor piezoelétrico instalado internamente ao corpo.

As vibrações induzidas na tubulação com uma massa de ferro ou com um martelo de mão, foram controlados com acelerômetros instalados diretamente na massa de ferro e na parede da tubulação respectivamente (Figura 2.23).

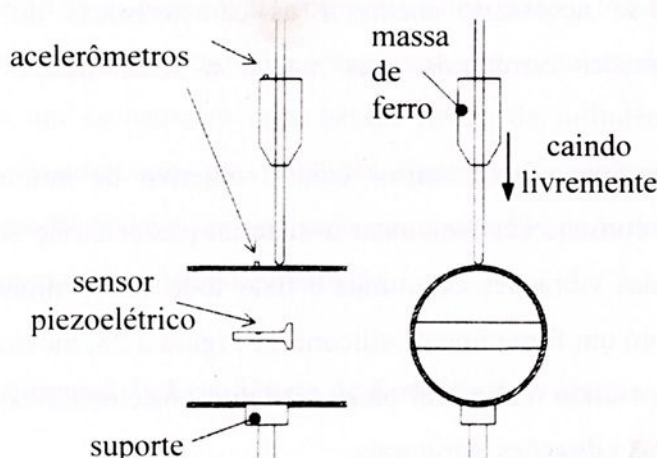


Figura 2.23 - Esquema do mecanismo utilizado para produzir as vibrações (forças impulsivas) na tubulação e disposição do sensor piezoelétrico e acelerômetros na tubulação.

A intensidade do impacto foi medida por dois acelerômetros com faixa de medição entre $0,001g$ e 4×10^4g (onde g é a aceleração da gravidade), fixados na massa de ferro e no tubo respectivamente. Os ensaios iniciais foram realizados com um sensor piezoelétrico inserido numa cavidade interna do corpo gerador de vórtices e fixado apenas por uma cola *epoxy*, ficando, deste modo, sensível a qualquer vibração na tubulação, resultando em consideráveis erros de medida. A Figura 2.24, mostra o sensor piezoelétrico fixado no corpo emissor de vórtice por meio de uma resina *epoxy*.

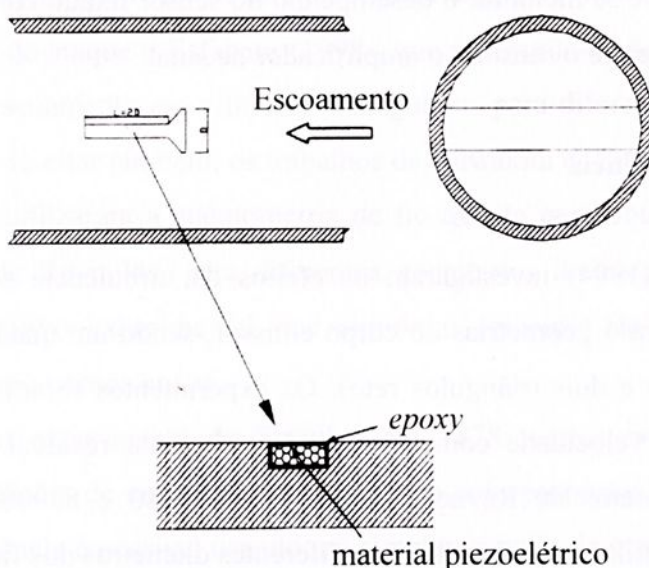


Figura 2.24 - Desenho esquemático do sensor piezoelétrico instalado no corpo gerador de vórtices.

Portanto, torna-se necessário melhorar as características do sensor para reduzir a sensibilidade às vibrações estruturais, mas manter a sensibilidade ao desprendimento dos vórtices.

Um projeto aperfeiçoado do sensor com o objetivo de minimizar a sensibilidade às vibrações estruturais, consiste em posicionar o material piezoelétrico sobre um material do tipo borracha para isolar das vibrações estruturais e fixar todo este conjunto na cavidade do corpo gerador de vórtices com um filme fino de silicone. A Figura 2.25, mostra um esquema do projeto aperfeiçoado do sensor onde o material piezoelétrico é posicionado sobre um material do tipo borracha para isolar das vibrações estruturais.

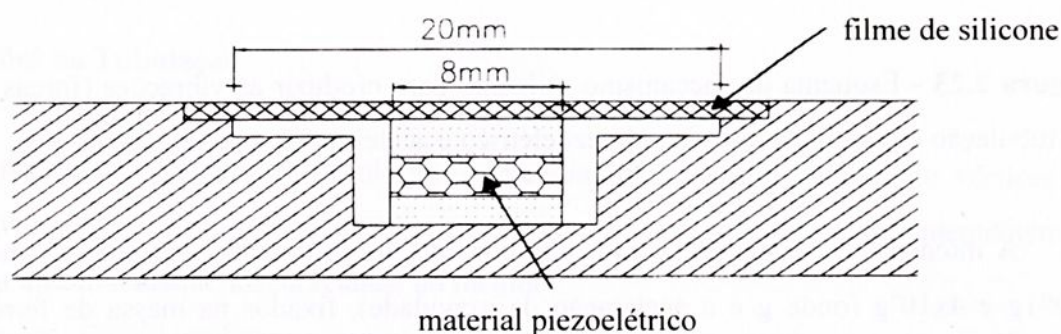


Figura 2.25 - Desenho esquemático do projeto aperfeiçoado do sensor piezoelétrico.

Como resultado, este projeto aperfeiçoado apresentou uma considerável melhora na aquisição do sinal, eliminando assim, parte dos ruídos indesejáveis.

Uma outra forma de se melhorar o desempenho do sensor fixado com *epoxy* é a instalação de um filtro passa baixa entre o sensor e o amplificador de sinal.

2.5.4 O efeito da Turbulência

Wolochuk *et al.* (1994) investigaram os efeitos da turbulência sobre a frequência de emissão dos vórtices para 4 geometrias do corpo emissor, sendo um quadrado e três triângulos (um triângulo equilátero e dois triângulos reto). Os experimentos foram realizados num túnel aerodinâmico de baixa velocidade com intensidade turbulenta residual na seção de ensaios inferior a 0,7 % e números de Reynolds situados entre 480 e 83000. Para o controle da turbulência, os autores utilizaram três telas com diferentes diâmetros dos fios e diferentes malhas (espaço entre os fios), sendo possível obter uma variação de 2,5 % a 10 % no nível de turbulência residual na seção de testes. Para níveis de intensidade turbulenta de 2,5% o número

de Strouhal caiu cerca de 15 % e, para níveis compreendidos entre 2,5% a 10%, foi observado um decréscimo de 12,6 %. Assim, este trabalho comprovou que se um medidor de vazão do tipo vórtice for calibrado em um escoamento com baixos níveis de turbulência e utilizado num escoamento com níveis consideráveis, suas medidas apresentarão erros sensíveis. Portanto, a calibração deste tipo de medidor deve ser realizada em condições de turbulência próximas das encontradas pelo escoamento em seu local de operação.

2.6 Determinação Experimental da Frequência de Emissão de Vórtices

2.6.1 Introdução

O célebre trabalho de Strouhal de 1878, utilizando-se de uma harpa eólica para a determinação da frequência de emissão dos vórtices, ou o trabalho de Anatol Roshko de 1953, utilizando-se da anemometria de fio quente, são exemplos importantes da determinação experimental do comportamento do Strouhal em função de Reynolds para cilindros circulares. Entretanto, o estudo do número de Strouhal de diferentes geometrias da seção transversal do corpo prismático são, ainda hoje, objeto de estudo (Gonçalves & Vieira, 1999).

O comportamento do Strouhal em função de Reynolds para cilindros retangulares e quadrados, mais recentemente tem sido objeto de muitos trabalhos de natureza numérica e experimental, como, por exemplo, Lindquist *et al.* (1999), que realizaram um estudo experimental do escoamento ao redor de cilindros quadrados para moderados Reynolds (>1000) em diferentes ângulos de ataque e Esfahani (1998), que utilizando-se de ferramentas de análise numérica, estudou o escoamento em cilindros retangulares para diferentes ângulos de ataque e razões de forma. Pode-se citar também, os trabalhos de Kawakita & Silares (1992) e Gonçalves & Vieira (2001), que utilizaram a anemometria de fio quente para obter o comportamento do Strouhal em função de Reynolds, para diferentes geometrias do corpo gerador de vórtices, ensaiados num dispositivo experimental que simula o princípio de funcionamento de um medidor de vazão do tipo vórtice em ar.

Desde o famoso experimento de Strouhal em 1878, vários métodos precisos para a determinação da frequência de emissão de vórtices têm sido propostos na literatura técnica. A determinação da frequência é possível usando um simples método de observação do escoamento, ou seja, por meio de rastros de fumaça em conjunto com uma luz estroboscópica. A injeção direta de traçadores gasosos, tais como vapores, fumaças e névoas, usualmente à montante do



modelo de teste, são intensamente utilizados para a visualização qualitativa do escoamento em túneis de vento (Mueller, 1984). De acordo com Ower & Pankhurst (1977), não existem registros publicados do uso direto de um tal método quantitativo, mas isto não é verdade, pois Brown em 1952, utilizando um traçador de fumaça, produzido pela queima da palha de trigo, sob baixa pressão, oxigênio insuficiente e com o auxílio de uma luz estroboscópica mecânica acionada por um motor síncrono, mediu com sucesso a frequência de desprendimento de vórtices a partir de um cilindro circular, num túnel de vento subsônico de baixa turbulência.

Mais recentemente, companhias automobilísticas como *Chrysler* e *Mitsubishi* tem testado o uso de medidores de vórtice para medir o escoamento de ar na admissão dos motores de combustão interna. Os circuitos de controle de injeção de combustível possuem uma multiplicidade de sensores e atuadores que operam para manter as condições ótimas de operação do motor. O medidor de vórtice permite determinar o escoamento de ar volumétrico, utilizando um corpo gerador de vórtice posicionado no coletor de admissão do motor. A frequência de desprendimento dos vórtices é detectada por um arranjo transmissor e receptor ultrassônico. Como o vórtice passa entre o transmissor e o receptor, o sinal elétrico no receptor é interrompido e a frequência de interrupções indica a frequência de desprendimento de vórtice (Sasaki *et. al.*, 1982). O uso de sensores ultrassônicos em aplicações industriais é largamente empregado por serem imunes a ruídos e vibrações na tubulação, além de serem confiáveis (Basile, 1995). Geralmente, em medidores de vazão do tipo vórtice para aplicações industriais, a detecção do desprendimento de vórtices é feita por um sensor magnético montado na extremidade do corpo gerador de vórtices. Este sensor magnético captura pequenas oscilações no corpo devido ao desprendimento de vórtices (Doebelin, 1994). A frequência de desprendimento de vórtices em medidores do tipo vórtice industriais, para a máxima taxa de escoamento são da ordem de 200 a 500 Hz.

Em laboratórios científicos, a frequência de desprendimento dos vórtices podem ser medida por vários meios. Modi & Dikshit (1975) empregaram com sucesso um transdutor de pressão de elevada sensibilidade posicionado na linha de centro da esteira de vórtices. Sarpkaya & Kline (1982), por sua vez, mediram a força de sustentação atuando no corpo gerador de vórtices utilizando pequenos sensores de pressão. Muitos pesquisadores preferem determinar a análise espectral da velocidade do escoamento num ponto fixo da esteira. Neste caso, os sinais de velocidade são obtidos por diversos meios, tais como o anemômetro de fio quente (HWA), anemômetros *laser doppler* (LDA) e, por fim, velocimetria por imagens de partículas (PIV).

Após o célebre trabalho de Strouhal, diversos outros métodos foram empregadas para determinar a frequência de emissão dos vórtices. Nos parágrafos seguintes é feita uma descrição detalhada dos diversos métodos empregados por vários autores para a determinação experimental da frequência de emissão dos vórtices.

2.6.2 Métodos para Determinação da Frequência de Emissão de Vórtices

Técnica de Contagem de Fotogramas

A obtenção da frequência de emissão de vórtices em túnel hidrodinâmico por meio da técnica de contagem de fotogramas, constitui-se numa técnica de simples implementação, fácil manuseio, baixo custo operacional, e permite a obtenção de resultados satisfatórios. Trata-se de uma técnica não intrusiva, baseada exclusivamente na análise e interpretação de imagens do escoamento registradas em fita magnética. A observação em *slow motion* com velocidade controlada, das imagens capturadas em fita magnética, permite a observação precisa do movimento dos vórtices na esteira produzida pelo corpo rombudo em estudo. A existência de um vídeo equipado com uma placa *time code* permite a identificação precisa de todos os fotogramas da imagem capturada e, conseqüentemente, das variações de tempo. Desta forma, pode-se, apenas pela análise das imagens, determinar de forma rápida e precisa a frequência de desprendimento de vórtices. Entretanto, para altas frequências de emissão de vórtices, a técnica de visualização apresenta certas desvantagens, pois a capacidade da câmera de vídeo está limitada ao estudo do escoamento a números de Reynolds não muito elevado, caso contrário, para elevadas frequências de emissão de vórtices, seria necessário a aquisição de uma câmera que pudesse capturar algumas centenas de *frames* por segundo, inviabilizando a implementação desta técnica devido ao encarecimento acentuado destes equipamentos.

Hirai *et al.* (2002) determinaram a frequência de emissão dos vórtices para 5 cilindros prismáticos (sendo 1 triângulo, 3 trapézios e 1 quadrado), utilizando a técnica de contagem de fotogramas. Os ensaios foram realizados num túnel hidrodinâmico vertical de baixa turbulência, operado pela ação da gravidade, com seção de testes de 146 x 146 x 500 mm. Para a captação das imagens dinâmicas do escoamento, foi utilizada uma câmera de vídeo JVC de elevada resolução, modelo KY 27 CU. Os registros em fita magnética obtidos, foram analisados em um vídeo editor JVC BR-S822U, equipado com placas *time code*, *time base corrector* e *digital noise*



reduction, facilitando a determinação do número de Strouhal a partir do princípio de contagem de fotogramas.

Também fizeram o uso desta técnica Vieira (1997), para cilindros circulares numa faixa de número de Reynolds compreendida entre $70 < Re < 600$, Lindquist *et al.* (1997), para cilindros de seção transversal quadrada, posicionados transversalmente ao fluxo, Gonçalves & Vieira (1999) para vários polígonos regulares para $Re < 600$ e Gonçalves & Vieira (2000), para cilindros com seção transversal na forma de meia cana.

Transdutores de Pressão Instalados no Corpo de Prova

Obasaju (1983) estudou o escoamento ao redor de um cilindro quadrado para determinar a frequência de emissão dos vórtices por meio de transdutores de pressão instalados dentro deste corpo de prova. Os ensaios foram realizados num túnel aerodinâmico de circuito fechado de baixa velocidade, com seção de testes de 0,92 m x 0,92 m e 4,9 m de comprimento, com níveis de turbulência inferiores a 0,04%. O corpo de prova utilizado, foi um cilindro quadrado com seção transversal de 51 mm x 51 mm, posicionado horizontalmente a meia altura da seção de testes. O transdutor de pressão instalado dentro deste corpo de prova, coletava os sinais de pressão provocados pelos vórtices sobre a superfície do corpo ensaiado. A análise espectral do sinal de pressão permitiu a determinação da frequência de emissão dos vórtices.

Bearman & Trueman (1972), por sua vez, utilizando um túnel aerodinâmico de circuito fechado de baixa turbulência e com seção de testes octogonal, fizeram o uso de transdutores de pressão montados sobre a superfície do corpo de teste para obter a frequência de emissão dos vórtices para vários cilindros retangulares. Estes modelos cilíndricos tinham a sua altura fixada em 0,03 m e sua largura variando de 0,006 m a 0,036 m. Na parte de maior tamanho, foram realizados cinco tomadas de pressão com 5 mm de distância entre estas e, no lado menor, uma única tomada no centro. Os autores também fizeram o uso da visualização de escoamentos em um túnel hidrodinâmico para as mesmas geometrias ensaiadas no túnel aerodinâmico e observaram que quanto maior a razão de forma, maior a distância de formação dos vórtices, maior a difusão da camada cisalhante e, conseqüentemente, maior a espessura do vórtice no momento da sua formação. Segundo os autores, este fenômeno pode influenciar na frequência de emissão dos vórtices.



Medidas das Flutuações de Pressão da Esteira Turbilhonaria

Modi & Dikshit (1975), realizaram medidas das flutuações de pressão da esteira de vórtices para determinar experimentalmente a frequência de desprendimento de vórtices para 4 cilindros elípticos. Os modelos foram testados num túnel aerodinâmico de seção transversal 0,91 m x 0,69 m, com a velocidade do ar compreendida entre 1,2 e 45,7 m/s e com índices de turbulência relativa inferiores a 0,1%. As medidas das flutuações de pressão da esteira de vórtices foram obtidas com o auxílio de um sistema transdutor de pressão modular Barocel, desenvolvido pela *Datametrics Inc.* de Waltham, Massachussets, ao qual foi conectada uma sonda em forma de disco de 0,006 m de diâmetro, montada sobre uma agulha hipodérmica de 0,025 m de comprimento, conectada a uma haste de 0,36 m de comprimento por 0,006 de diâmetro, posicionada transversalmente ao escoamento, sendo possível obter as variações cíclicas de pressão na esteira de vórtices e determinar a frequência de emissão dos vórtices através da análise espectral do sinal obtido.

Os autores também realizaram ensaios de visualização do campo de escoamento, utilizando a técnica *schlieren* em conjunto com uma câmera fotográfica de alta velocidade (1000 a 2000 *frames/segundo*) para obter informações preliminares sobre o local de separação das camadas cisalhantes, além das suas oscilações e a posição do primeiro vórtice.

Monitoramento Direto das Flutuações das Forças de Sustentação

Vickery (1966), utilizando um túnel aerodinâmico subsônico com seção de teste quadrada de 2,1 m x 2,1 m, obteve a frequência de Strouhal para um cilindro quadrado de seção 0,15 m x 0,15 m, posicionado transversalmente ao escoamento, através do monitoramento direto das flutuações das forças de sustentação. O corpo de prova foi sustentado por uma armação de aço vertical, presa na parte inferior da seção de testes e isolado por meio de amortecedores de borracha. Dentro deste corpo, foi adequadamente instalado um sensível dinamômetro sustentado por suportes elásticos. Um sistema de medida de força por *strain-gages* permite a obtenção da variação temporal da força de sustentação. A análise espectral do sinal obtido foi feita com um analisador de baixa frequência, com uma amostra de 1000 ciclos de desprendimento, o que forneceu uma acuracidade aceitável para pequenas faixas de amplitude, próximas à frequência de Strouhal.

Sarpkaya & Kline (1982), por sua vez, utilizaram um túnel hidrodinâmico vertical de 3,66 m de altura, com seção de testes de 0,61 m x 0,61 m, para realizar medidas das forças atuando em 4 tipos diferentes de geometrias para os corpos geradores de vórtices (sendo um cilindro circular, um cilindro com formato em D, um cilindro em formato de T e uma placa plana), numa faixa de números de Reynolds compreendida entre 20000 e 30000.

Detectores por Ultra-som

O sistema de detecção dos vórtices por ultra-som constitui-se num sistema que mostra ser imune a ruídos e vibrações na tubulação, pois estes detectores encontram-se instalados no lado externo da tubulação, permitindo assim, a sua fácil manutenção, sem a necessidade de retirar o medidor de linha.

Basile (1995), utilizando o sistema de detecção de vórtices por ultra-som, determinou a frequência de emissão dos vórtices para três geometrias de corpos prismáticos, sendo um trapézio, um retângulo e um triângulo. A forma de detecção dos vórtices por este método, baseia-se na variação da velocidade de propagação do som em função da velocidade do fluido. Um sinal de ultra-som propagando-se num meio líquido, terá velocidade de propagação dependente das características físico-químicas do líquido e da velocidade com que esse líquido se desloca. A sequência de imagens da Figura 2.26 ilustra como a velocidade de propagação do ultra-som é afetada pela velocidade de deslocamento do líquido.

Posicionando o feixe de ultra-som numa direção perpendicular à direção da vazão, a velocidade de propagação do ultra-som não será afetada pela velocidade do fluido, conforme mostra a Figura 2.27.

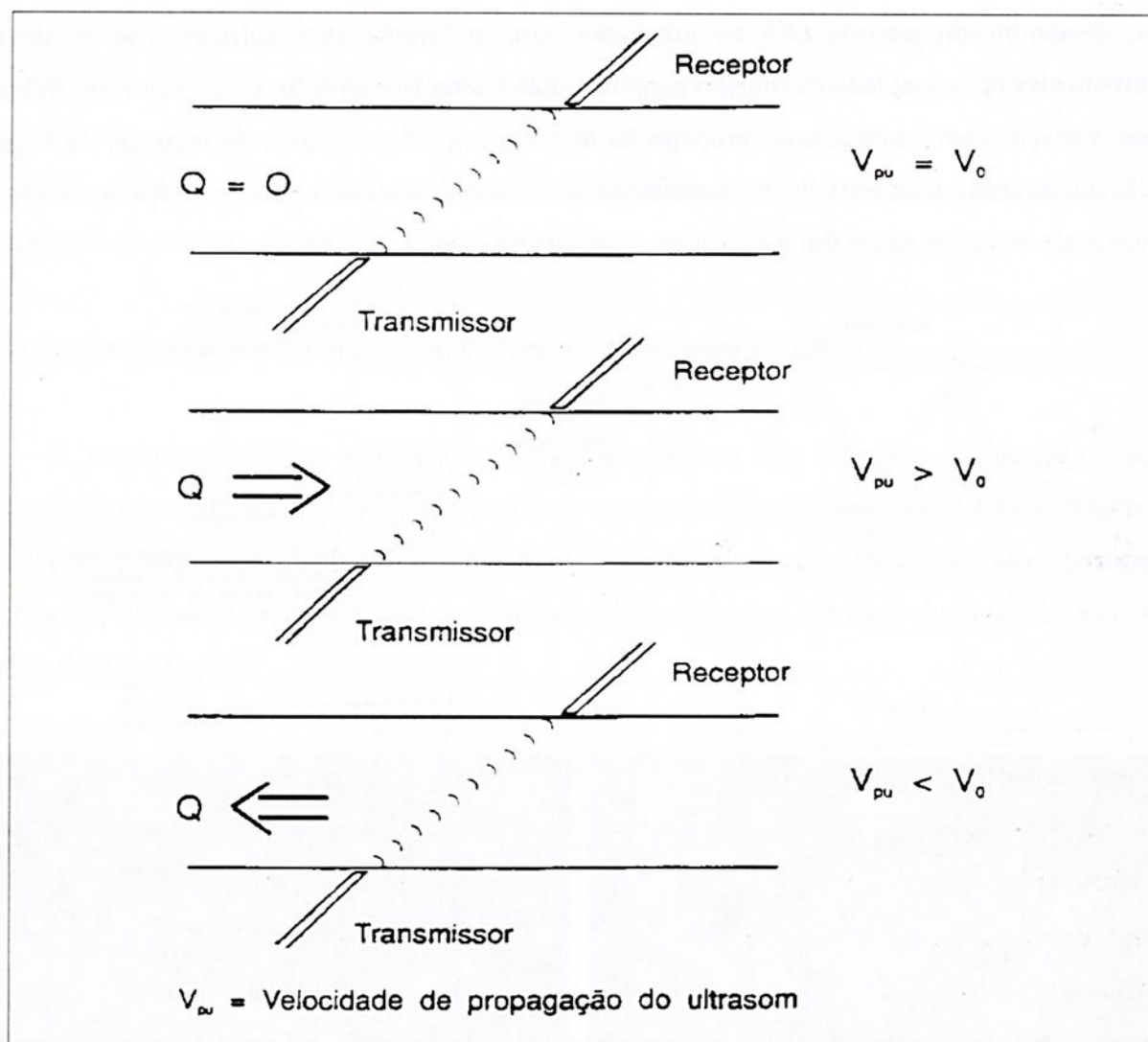


Figura 2.26 - Variação da velocidade de propagação do ultra-som.

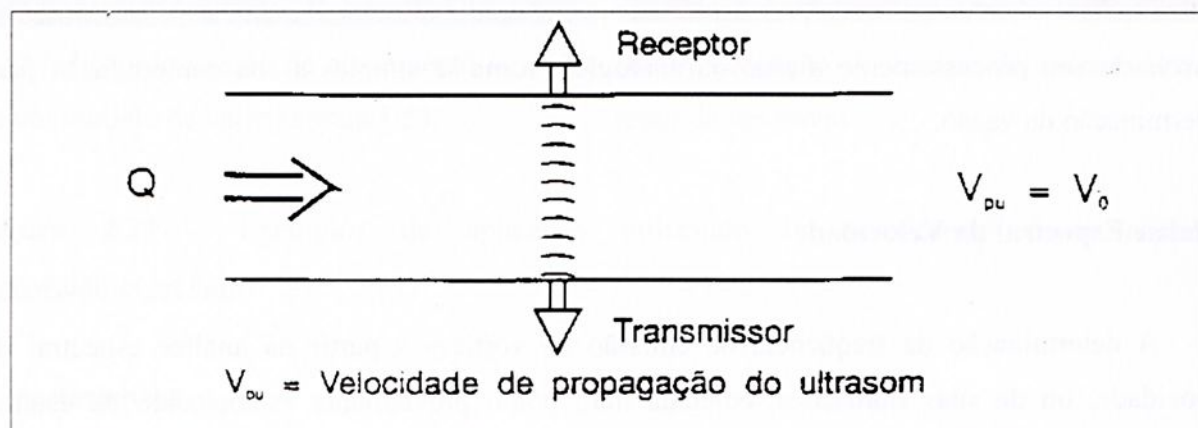


Figura 2.27 - Velocidade de propagação do ultra-som não é afetada.

Posicionando um *shedder* na tubulação para a geração dos vórtices, isto produzirá componentes de velocidade na direção perpendicular à direção da vazão, que serão responsáveis pelas variações na velocidade de propagação do ultra-som. A sequência de imagens da Figura 2.28, ilustra como a velocidade de propagação do ultra-som é afetada pela presença dos vórtices deslocando-se ao longo do fluido.

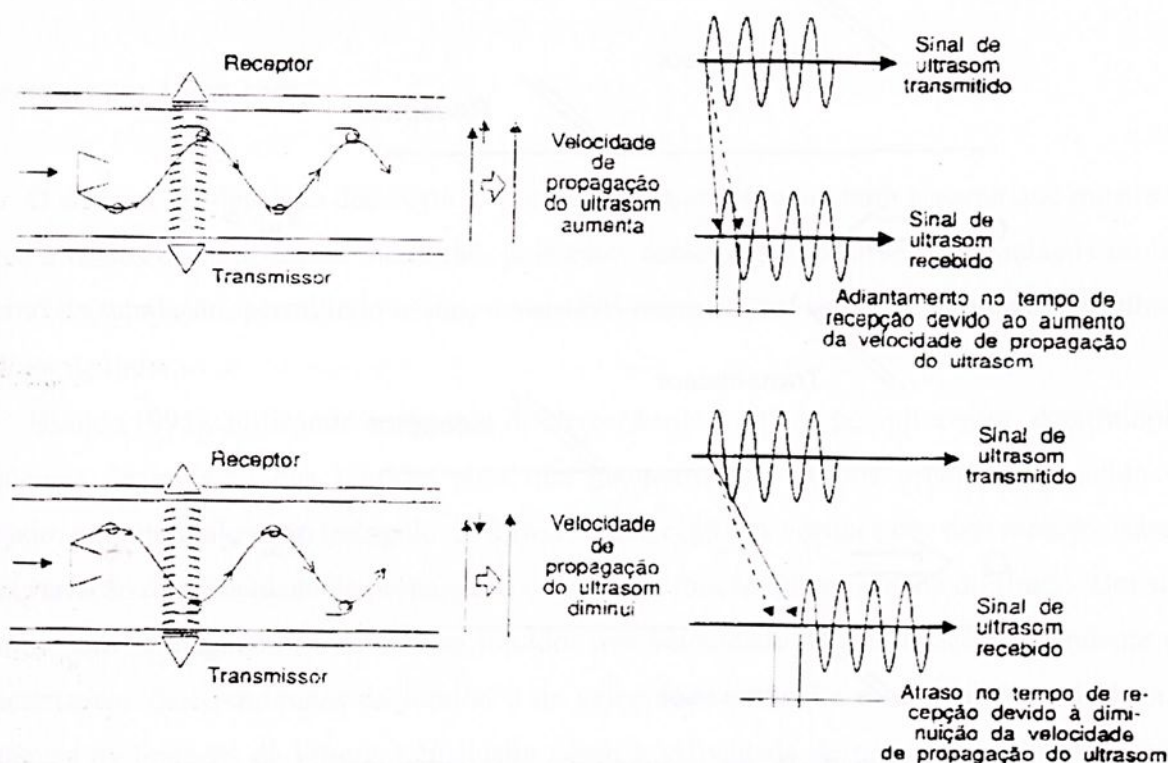


Figura 2.28 - Variação da velocidade de propagação do ultra-som devido a presença dos vórtices.

O sinal recebido pelo receptor de ultra-som foi modulado em frequência pelos vórtices e através do seu processamento digital ou analógico, torna-se simples a sua demodulação para determinação da vazão.

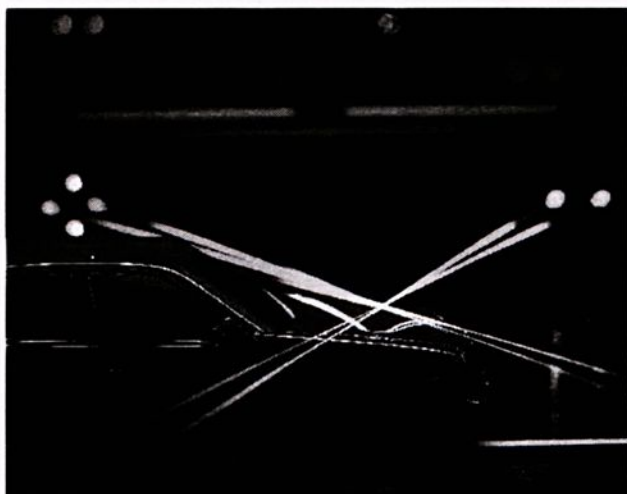
Análise Espectral da Velocidade

A determinação da frequência de emissão de vórtices a partir da análise espectral da velocidade, ou de suas flutuações, coletada num ponto previamente estabelecido da esteira, constituem-se em técnicas bastante utilizadas não somente em nível de laboratório, como também por grandes empresas, tais como a *Boeing*, *Mercedes-Benz*, *Volvo*, etc. Neste caso, o sinal de velocidade pode ser obtido de diferentes formas, dentre os quais destacam-se:

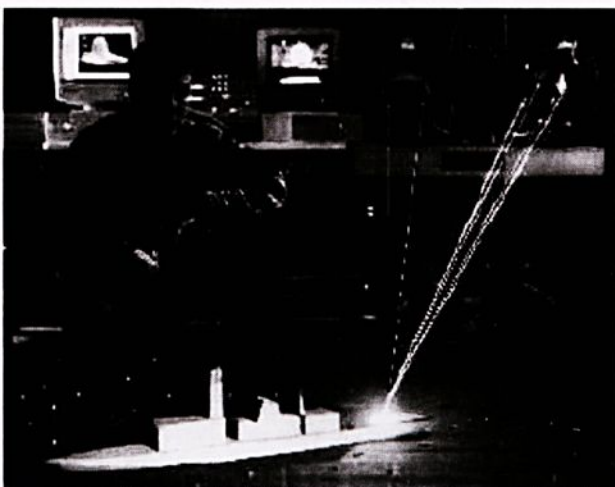
anemometria Laser Doppler (*Laser Doppler Anemometry – LDA*), anemômetro de temperatura constante (*Constant Temperature Anemometry – CTA*), velocimetria de imagens por partículas (*Particle Image Velocimetry – PIV*) e análise dinâmica de partículas (*Particle Dynamics Analysis – PDA*). A seguir é feita uma descrição das técnicas empregadas para a determinação da frequência de emissão de vórtices a partir da análise espectral da velocidade.

a) Anemometria Laser Doppler (*Laser Doppler Anemometry – LDA*)

A anemometria *laser doppler* é uma técnica óptica não intrusiva usada para medir velocidade e turbulência em pontos específicos no escoamento de gases ou líquidos. Algumas aplicações (Figura 2.29) incluem medidas do escoamento livre ao redor de veículos terrestres, aeronaves, navios e medidas dos escoamentos internos em bombas, turbinas e motores (www.dantecmt.com).



(a) Medição do campo de escoamento ao redor de um modelo de carro (escala 1:5).



(b) Investigação do campo de escoamento ao redor de um navio.

Figura 2.29 - Exemplos de aplicação utilizando o anemômetro *laser doppler* (www.dantecmt.com).

Características

- Não intrusiva;
- Não requer calibração;
- Faixa de velocidade de zero a supersônico;

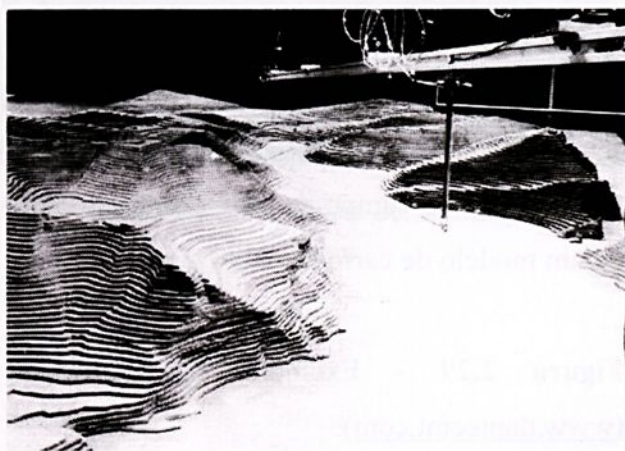
- Mede um, dois ou três componentes da velocidade simultaneamente;
- Distância de medida de centímetros a metros;
- Pode medir escoamentos reversos;
- Elevada resolução espacial e temporal;
- Informação instantânea e média temporal.

b) Anemômetro de Temperatura Constante (*Constant Temperature Anemometry – CTA*)

O anemômetro de temperatura constante é utilizado para a medição das finas estruturas do escoamento turbulento de gases e líquidos. O seu princípio de operação é baseado na transferência de calor convectiva a partir de um fio ou filme aquecido, posicionado no escoamento de um fluido. Qualquer variação nas condições do escoamento do fluido que afete a transferência de calor, a partir do elemento aquecido, será detectado instantaneamente por um sistema de temperatura constante. O CTA mede a velocidade em um ponto e fornece a velocidade contínua em série temporal que podem ser processados em amplitude e estatísticas no domínio do tempo. Alguns exemplos são a velocidade média, intensidade turbulenta, momentos de ordem elevada, autocorrelações e espectro de potência (www.dantecmt.com). Alguns exemplos de aplicação utilizando o anemômetro de temperatura constante são ilustrados na Figura 2.30.



(a) Escoamento ao redor de plataformas de prospecção de petróleo.



(b) Investigação das condições de voo de uma aeronave.

Figura 2.30 - Exemplos de aplicação utilizando o anemômetro de temperatura constante (www.dantecmt.com).

Características

- Mede velocidades a partir de poucos cm/s até supersônico;
- Elevada resolução temporal;
- Elevada resolução espacial;
- Mede os 3 componentes da velocidade simultaneamente;
- Fornece informações instantâneas da velocidade.

c) Velocimetria por Imagem de Partículas (*Particle Image Velocimetry – PIV*)

A velocimetria por imagens de partículas é uma técnica que abrange todo o campo do escoamento, fornecendo medidas instantâneas do vetor velocidade numa seção transversal do escoamento. Duas componentes da velocidade são medidas, mas o uso de uma técnica de fotografia estereoscópica permite registrar todos os três componentes da velocidade, resultando em um vetor velocidade tridimensional instantâneo para toda a área de medida. O uso de modernas câmeras CCD e um robusto sistema computacional possibilitam captar a velocidade em tempo real (www.dantecmt.com). Os principais elementos que compõem a técnica de velocimetria por imagem de partículas são o fluido, as partículas traçadoras, o sistema de iluminação, o sistema de aquisição das imagens e o sistema de processamento das imagens para a extração do campo de velocidade desejado (Azevedo, 2002). Alguns exemplos de aplicação utilizando a técnica PIV são ilustrados na Figura 2.31.



(a) Otimização do escoamento e turbulência num modelo de carro.



(b) Medida do escoamento ao redor de uma aeronave em tempo real.

Figura 2.31 - Exemplos de aplicação utilizando o PIV (www.dantecmt.com).

Características

- A técnica é não intrusiva e mede a velocidade de micro partículas seguindo o escoamento;
- Faixa de velocidade de zero a supersônico;
- Mapeamento instantâneo do vetor velocidade na seção transversal do escoamento;
- Todos os três componentes da velocidade podem ser obtidos com o uso de um arranjo estereoscópico;
- Com seqüências do mapeamento do vetor velocidade, estatísticas, correlação espacial, outros dados relevantes são disponíveis.

d) Análise Dinâmica de Partículas (*Particle Dynamics Analysis – PDA*)

A análise dinâmica de partículas é uma técnica óptica que mede simultaneamente o tamanho e a velocidade de partículas esféricas. Estas partículas podem ser gotas, bolhas ou partículas sólidas, como ocorrem tipicamente em *sprays*, atomização líquida, escoamentos bifásicos e escoamentos multifásicos. As medidas são realizadas nas partículas individuais, permitindo então uma análise detalhada do escoamento com substâncias particuladas. A distribuição de tamanhos estatísticos e momentos de velocidade num campo de escoamento podem ser medidos, bem como a concentração de partículas e a correlação local tamanho-velocidade. O movimento do ponto de medida no escoamento permite o mapeamento de campos de escoamentos inteiros (www.dantecmt.com). A Figura 2.32 apresenta alguns exemplos de aplicação do PDA.

Características

- Tamanho da partícula a partir de sub-mícron até alguns milímetros;
- Faixa de velocidade de zero a supersônico;
- Mede um, dois ou três componentes da velocidade simultaneamente;
- Não requer calibração;
- Informação instantânea e média temporal;
- Elevada resolução espacial e temporal;
- Não intrusiva.



(a) Investigação do escoamento de partículas e (b) Medidas do tamanho e velocidade de gotas processos de separação num modelo de ciclone. num *spray* de querosene gerado por um injetor de combustível.

Figura 2.32 - Exemplos de aplicação utilizando o PDA (www.dantecmt.com).

TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

3.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentadas as metodologias experimentais empregadas durante a realização deste trabalho. Inicialmente é abordado especificamente a anemometria de fio quente¹, técnica experimental utilizada na determinação da frequência de emissão de vórtices característica de cada *shedder* analisado. Após uma breve revisão dos principais conceitos envolvidos no seu funcionamento, são abordados alguns aspectos importantes para a calibração de sondas, bem como resultados tipicamente obtidos neste trabalho, com o emprego desta técnica. Por fim, é abordada a técnica de visualização de escoamentos, que teve um importante papel na identificação de padrões de escoamento e na interpretação de dados anemométricos. O presente estudo das técnicas de visualização de escoamento deve-se a importância que esta ferramenta alcança na investigação dos escoamentos ao redor de corpos rombudos (“*bluff-bodies*”) e na identificação da estrutura de diferentes escoamentos na presença de vórtices.

3.2 Anemômetro de Temperatura Constante

3.2.1 Introdução

Um dos primeiros estudos da transferência de calor a partir de um fio aquecido foi feito por Boussinesq em 1905. Os resultados então obtidos por Boussinesq foram expandidos por King, que verificou experimentalmente seus resultados teóricos. Estas primeiras investigações dos anemômetros de fio quente, consideravam somente as características de transferência de calor média a partir de um fio aquecido. As primeiras medidas quantitativas das flutuações da velocidade em escoamentos incompressíveis subsônicos, foram feitas em 1929 por Dryden e Kuethe, usando um anemômetro de corrente constante, onde a resposta em frequência do fio foi aumentada pelo uso de um amplificador compensador. Em 1934, Ziegler desenvolveu um

¹ O termo anemometria de fio quente está sendo aqui empregado de maneira bastante genérica, para designar a técnica em questão. Para aplicação em meio líquido, entretanto, as sondas utilizadas são constituídas, na verdade, por filmes – e não fios – metálicos protegidos por uma fina camada de quartzo, o que lhes confere maior robustez e durabilidade.



anemômetro de temperatura constante para medir as flutuações da velocidade, utilizando um amplificador com realimentação para manter a temperatura do fio constante acima de uma dada frequência. Nos anos 50, Kovasznay desenvolveu um anemômetro de fio quente para escoamentos compressíveis e a partir deste, pôde descobrir experimentalmente que num escoamento supersônico o fio aquecido era sensível somente ao escoamento de massa e a temperatura total. Kovasznay também desenvolveu uma técnica gráfica para obter estas flutuações, a qual é largamente utilizada em escoamentos supersônicos. Em escoamentos compressíveis subsônicos, a transferência de calor a partir de um fio aquecido é função da velocidade, densidade, temperatura total e temperatura do fio. Devido a esta complexidade, estes regimes de escoamento foram amplamente marginalizados até os anos 70 e 80, quando foram desenvolvidos métodos aplicáveis a estes escoamentos.

Nos anos recentes, os novos e promissores desenvolvimentos em anemometria de fio quente podem ser atribuídos aos avanços na eletrônica, métodos de aquisição/redução de dados e novos desenvolvimentos em técnicas de anemometria básica.

Hoje em dia, próximo de fazer um século após o uso do primeiro HWA (*Hot Wire Anemometer* ou anemômetro de fio quente), este anemômetro térmico permanece a principal ferramenta para pesquisa em medições de escoamento turbulento.

A turbulência é um importante processo em muitos escoamentos de fluidos e contribui significativamente para o transporte de momento, calor e massa. A turbulência é também o fator responsável pela maior parte das perdas por atrito no fluido, o que pode ser observado nas perdas de carga em sistemas de transporte de fluido. Na condição de entender o comportamento do escoamento de fluidos visando o projeto e avaliação de veículos, motores, bombas, etc; o estudo da turbulência é, portanto, essencial. Tais estudos são realizados por meio de instrumentação adequada, tais como os anemômetros de fio quente – HWA (também chamados CTA, *Constant Temperature Anemometer* ou anemômetro de temperatura constante, com referência ao seu princípio de operação), anemômetros *Laser Doppler* (LDA) e, mais recentemente, velocimetria de partículas por imagens (PIV). Estas medições são freqüentemente realizadas como complemento para o modelamento computacional (CFD - *Computational Fluid Dynamics*).

Neste aspecto, o anemômetro de fio quente é designado como instrumentação de pesquisa para escoamentos de turbulência moderada, devido ao seu baixo custo, elevada resposta em frequência, sensores de tamanho reduzido, ampla faixa de velocidade, correção da temperatura, elevada acuracidade, elevada razão sinal-ruído e uma grande variedade de diferentes tipos de sondas.



No passado, por meio de uma investigação experimental do escoamento era possível obter somente informações globais. Recentemente, com o desenvolvimento do *Computational Fluid Dynamics* (CFD), gerando soluções fisicamente realísticas e acuradas, envolvendo modelamento turbulento, tem provocado um forte impacto na investigação experimental do escoamento turbulento. O CFD é capaz de fornecer dados de elevada qualidade, o que implica na necessidade de novos dados experimentais, detalhados e acurados e isto instiga o desenvolvimento adicional de técnicas experimentais na mecânica dos fluidos, a razão para o aparecimento de algumas novas formas de medida em estudos contemporâneos do escoamento.

O anemômetro de fio quente é o mais bem conhecido anemômetro térmico, capaz de medir a velocidade do fluido, a partir da transferência de calor por convecção entre um pequeno elemento metálico aquecido eletricamente e o fluido circundante. Comparado com outros anemômetros, tais como o *Laser Doppler* (LDA) ou o moderno sistema de velocimetria de imagem por partículas (PIV), o HWA permanece a escolha mais usual e econômica.

O HWA é baseado na transferência de calor convectiva a partir de um fio ou filme aquecido, posicionado no escoamento de um fluido. Qualquer variação nas condições do escoamento do fluido que afete a transferência de calor, a partir do elemento aquecido, será detectado instantaneamente por um sistema de temperatura constante HWA. O HWA pode, portanto, ser utilizado para obter informações tais como, a velocidade e a temperatura do escoamento, a variação da concentração em mistura de gases e mudança de fase em escoamentos multifásicos.

O anemômetro de fio quente possui algumas aplicações no ambiente industrial para medir velocidades do fluido e escoamentos volumétricos ou mássicos. Devido as vantagens deste equipamento, tais como baixo custo, fácil condicionamento do sinal, sinal elétrico de saída linear, baixa perda de carga no escoamento, compensação automática da temperatura do fluido, ausência de partes rotativas e possibilidade de trabalho em meios agressivos com reações químicas ou na presença de particulados sólidos no fluido, são intensamente utilizados em processos industriais. Além disso, os anemômetros de fio quente industriais exibem a vantagem de não necessitar de uma freqüente calibração, se comparado às de aplicação em laboratório. As sondas para aplicação industrial são envolvidas por uma camada cerâmica ou cápsula metálica, que garante a sua proteção contra agentes contaminantes existentes no escoamento. O sensor com proteção opera por um longo tempo sem a necessidade de calibração.

A maior desvantagem das sondas com proteção, utilizadas em plantas industriais, é o seu tamanho, muito maior que as sondas sem proteção usualmente empregadas em laboratório e,



além do mais, a proteção da sonda é responsável pelo amortecimento das respostas em frequência das sondas com proteção. Esta é a razão pela qual nos anemômetros térmicos industriais, a resposta em frequência é usualmente limitada a menos de 1 Hz.

O HWA constitui portanto, a ferramenta ideal para fornecer as informações necessárias relacionadas com a velocidade média, campo de temperatura e a magnitude e distribuição da turbulência. O HWA permanece a principal ferramenta para estudos básicos da física dos escoamentos turbulentos. Também pode ser utilizado para identificar fenômenos específicos do escoamento, tais como a transição do escoamento laminar para o turbulento, separação do escoamento e relaminarização.

3.2.2 Princípio de Funcionamento

O anemômetro de temperatura constante (CTA) é usado para medições de finas estruturas do escoamento turbulento de gases e líquidos. O seu princípio de funcionamento baseia-se na transferência de calor por convecção entre um pequeno elemento metálico aquecido eletricamente e o fluido circundante. Deste forma, não apenas a velocidade local do escoamento pode ser medida com o auxílio de um anemômetro de temperatura constante, mas qualquer propriedade capaz de alterar as condições de transferência de calor entre o elemento sensor e o fluido pode ser potencialmente quantificada.

Os anemômetros de fio quente são compostos por duas partes fundamentais, quais sejam: 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, geralmente 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 3.1. A escolha entre os vários tipos de sondas existentes depende fortemente da aplicação a que se destinam.



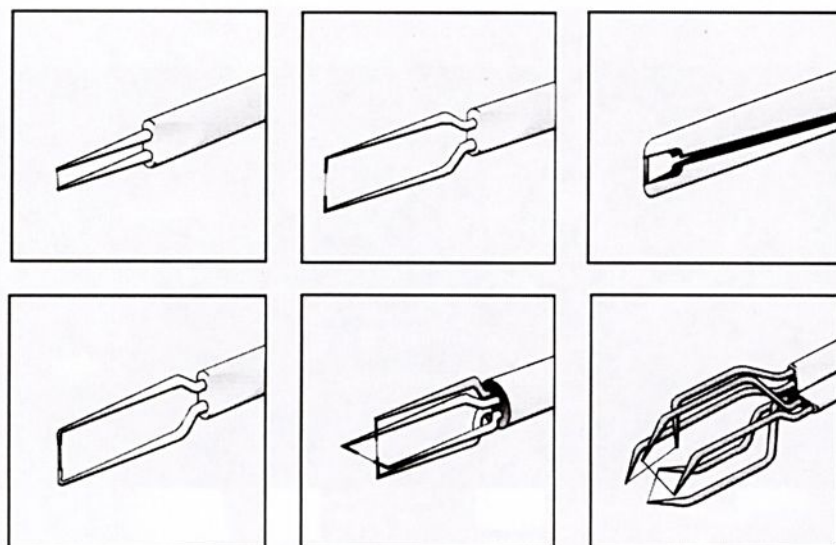


Figura 3.1 - Diferentes tipos de sondas anemométricas de fio e de filme quente.

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 3.2. Quando exposto ao movimento do fluido, este elemento tende a se resfriar, provocando alterações em sua resistência elétrica. Nestas 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. 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 deste sinal elétrico em velocidade, com o auxílio de uma correlação conhecida como “Lei de King”, dada por:

$$E^2 = A + BU^n \quad (3.1)$$

cuja dedução, pode ser encontrada nos trabalhos de Lindquist (2000) e Gonçalves (2001). Nesta expressão, (E) representa a tensão elétrica da sonda, (U) a velocidade relativa entre a sonda e o fluido, e (A), (B) e (n) são constantes empíricas a serem determinadas mediante a calibração da sonda.

Observe que a equação 3.1 é apenas um ajuste dos dados de calibração. Assim sendo, na prática, busca-se outras funções que representem melhor ajuste dos pontos. Neste caso, funções polinomiais de até grau 4 ou 5 são frequentemente encontradas por diferentes laboratórios.

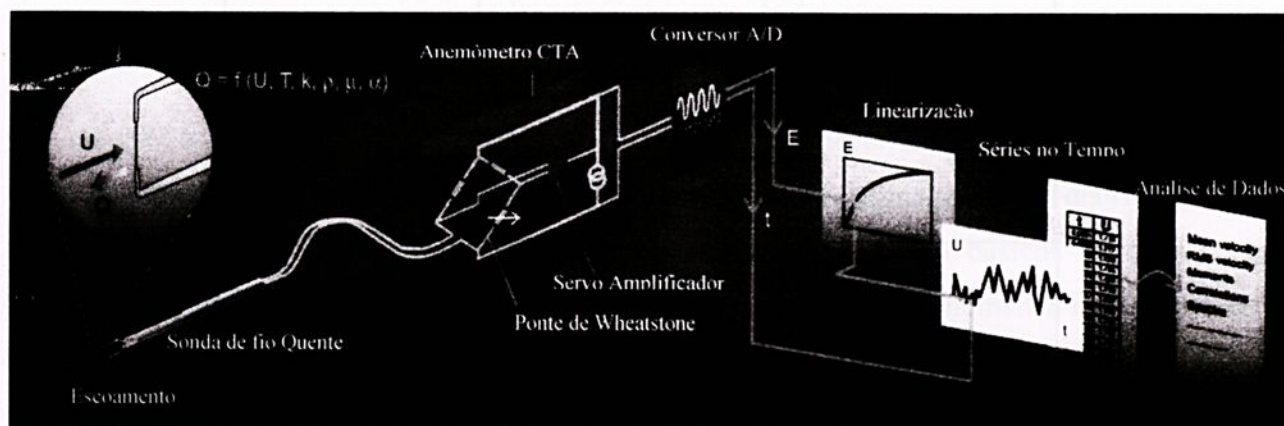


Figura 3.2 - Elementos básicos de um anemômetro de temperatura constante.

3.2.3 Aplicações

O anemômetro de temperatura constante é extensamente utilizado na mecânica dos fluidos experimental dentro das áreas da engenharia mecânica, engenharia aeronáutica, engenharia química, engenharia civil, oceanografia e física experimental.

O CTA é frequentemente empregado em túneis aerodinâmicos e hidrodinâmicos durante o projeto de edifícios e estruturas como: pilares de ponte e plataformas de prospecção de petróleo, para avaliar os possíveis efeitos exercidos pelo vento ou pelas correntes marítimas e fluviais. O CTA é também utilizado no estudo da aerodinâmica e turbulência em aeronaves, automóveis, etc.

As Figuras 3.3 e 3.4 mostram algumas aplicações da técnica de anemometria de fio/filme quente na engenharia.

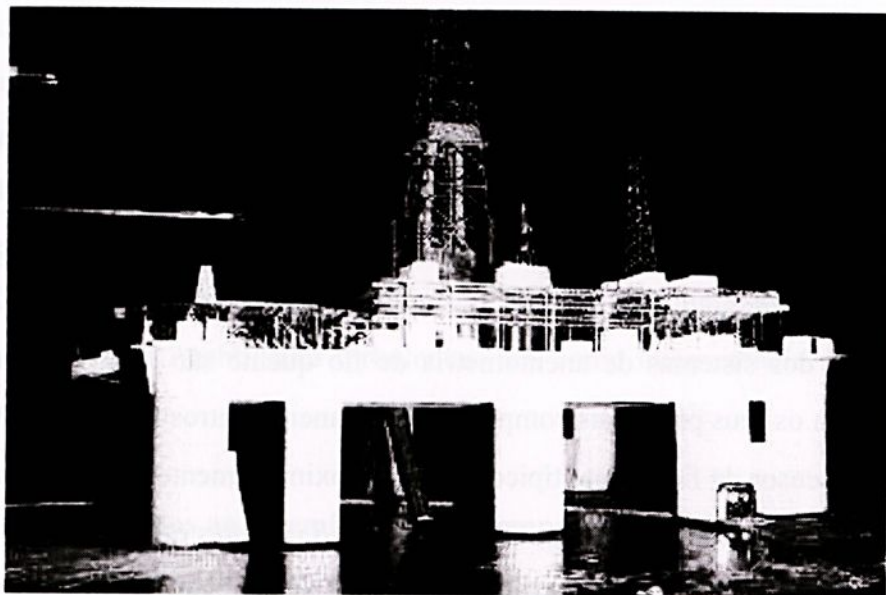


Figura 3.3 - Análise do escoamento ao redor de plataformas de prospecção de petróleo (www.danmar.dk).



Figura 3.4 - Análise do escoamento ao redor de pontes (www.dantecmt.com).

3.2.4 Principais Vantagens dos Anemômetros de Temperatura Constante

O anemômetro de temperatura constante é, provavelmente, a principal ferramenta experimental para o estudo da maior parte dos escoamentos turbulentos de ar/gás, para medidas de baixa e moderada intensidade turbulenta (menor que 25%). As principais vantagens do CTA, segundo Bruun (1995) são:

1. *Custo*: O *custo* dos sistemas de anemometria de fio quente são relativamente baratos, se comparados com os seus principais competidores, os anemômetros *Laser Doppler* (LDA).
2. *Tamanho*: Um sensor de fio quente típico possui aproximadamente 5 μm de diâmetro e 1,25 mm de comprimento, embora existam elementos de fio menores que 1 μm por 0,25 mm. Em contraste, um típico volume de medida do LDA possui 50 μm por 0,25 mm.
3. *Medidas da Velocidade*: As sondas de fio quente com um ou mais sensores, disponíveis comercialmente, permitem a medida das três componentes da velocidade simultaneamente, para pontos específicos no campo do escoamento. Ambos, o HWA e o LDA, possuem uma ampla faixa de medida da velocidade que vai desde escoamentos de baixa velocidade, até escoamentos (compressíveis) de velocidade elevada.
4. *Medidas da Temperatura*: Medidas simultâneas das flutuações de velocidade e do campo de temperatura podem ser obtidas usando uma sonda multi-sensor, que usualmente contém um sensor operando no modo “fio-frio”.
5. *Escoamento Bifásico*: As sondas de filme quente podem ser usadas para medições em escoamentos contendo uma fase contínua turbulenta e bolhas distribuídas (escoamento de líquido/gás ou líquido/líquido).
6. *Acuracidade*: Ambos, o HWA e o LDA, podem fornecer resultados similares e muito acurado (0,1 – 0,2%) em experimentos cuidadosamente controlados. No entanto, em muitas aplicações práticas, uma acuracidade de 1% é o mais apropriado para ambos os sistemas.
7. *Razão sinal-ruído*: Os anemômetros de fio quente são claramente superiores, desde-que possuam níveis de ruído muito baixo. Uma resolução de 1 parte em 10000 é facilmente realizado, enquanto que com o LDA, 1 parte em 1000 é difícil de se realizar com a presente tecnologia.
8. *Seleção da Sonda e Análise*: Um sistema de HWA é relativamente simples de operar e, além do mais, a seleção e o uso da sonda, a calibração requerida, a aquisição dos dados e a sua análise, podem ser realizados dentro de uma estrutura lógica.

9. *Análise do Sinal*: A saída do sistema HWA é um sinal analógico contínuo. Consequentemente, pode-se realizar análises no domínio do tempo e no domínio da frequência.
10. *Informação Espacial*: O uso de duas ou mais sondas separadas espacialmente, possibilita a medida de correlações espacial/temporal das flutuações turbulenta.
11. *Sondas Especiais*: Sondas HWA especiais e análise de sinais relacionadas podem ser utilizadas para avaliar quantidades turbulentas, tais como intermitência, taxa de dissipação, vorticidade, etc.

3.2.5 Problemas Associados ao Anemômetro de Temperatura Constante

Alguns problemas associados à utilização dos anemômetros de temperatura constante são apresentados a seguir:

1. *Escoamentos com elevada intensidade turbulenta*: O HWA convencional está restrito a escoamentos com baixa e moderada intensidade turbulenta. Para escoamentos com elevada intensidade turbulenta, podem ocorrer dois tipos de erros. Para sondas com sensor simples e configuração em x, os erros podem ser causados pela negligência dos termos de ordem elevada na expansão em série para a velocidade efetiva. O segundo tipo de erro é usualmente referido como uma retificação do erro. Devido a sua simetria rotacional, o elemento fio é insensível a uma reversidade da direção do escoamento, que podem ocorrer em escoamentos de elevada intensidade turbulenta.
2. *Perturbação da Sonda*: Ao posicionar uma sonda no escoamento, isto irá modificar o campo de velocidade local. Entretanto, para uma sonda bem projetada, os erros correspondentes serão muito pequenos e as perturbações relacionadas ao escoamento são usualmente incorporadas dentro do procedimento de calibração.
3. *Escoamento de líquidos*: Alguns problemas podem ocorrer quando o HWA for utilizado para o estudo do escoamento líquido de uma fase. O maior problema está associado ao acúmulo de impurezas no elemento sensor. Para minimizar este problema de contaminação, uma unidade de filtração é recomendada quando o dispositivo de testes for utilizado. O segundo problema associado ao escoamento de líquidos é a contaminação da "temperatura" de calibração da sonda, devido a pequena taxa de superaquecimento utilizada. Estas pequenas



- variações na temperatura do líquido resultará em mudanças substanciais na calibração da sonda, necessitando freqüente recalibração das sondas.
4. *Quebra da sonda*: Embora uma sonda de fio/filme quente seja um instrumento muito delicado, ela pode, se manuseada cuidadosamente, durar por muitos meses ou anos. Para estudos do escoamento de ar de baixa velocidade, a causa mais comum da quebra é o manuseio impróprio de operadores inexperientes. Em escoamentos de velocidade elevada as sondas podem ser danificadas devido ao impacto de finas partículas presentes no fluido.
 5. *Contaminação*: A deposição de impurezas no sensor podem alterar dramaticamente as características de calibração e reduzir a resposta em freqüência. Quando isto ocorre, a sonda deverá ser recalibrada e, se necessário, limpar e então recalibrar.

3.2.6 Calibração das Sondas Anemométricas

A correta utilização de um anemômetro de fio quente pressupõe a calibração freqüente e individual das sondas. A sonda de fio quente utilizada nas aplicações em laboratório, constitui-se num sensor extremamente delicado que pode romper com um simples toque ou um pequeno pulso elétrico. As sondas de filme quente geralmente empregadas em meio aquoso, são sensores de custo elevado, vida útil limitada e não suportam manutenção. Por outro lado, as sondas de fio quente utilizadas em plantas industriais, possuem uma proteção, o que permite uma maior resistência à manipulação. A calibração destas sondas em ambiente industrial constitui-se num trabalho árduo, pois geralmente as indústrias não possuem um laboratório para medidas do escoamento. A literatura técnica é rica em informações sobre diferentes técnicas e procedimentos para calibração das sondas de fio e filme quente, mas as aplicações em água, tem recebido consideravelmente menos atenção pelos profissionais que a aplicação em ar. Evidentemente, o uso das sondas de fio quente em ar é uma tarefa mais fácil, quando comparado com o uso destas sondas em meio aquoso.

A necessidade para uma maior sofisticação em certos tipos de investigações faz, de qualquer forma, desejável aplicar a técnica de filme quente, especialmente nos casos onde a estrutura do escoamento turbulento pode ser uma característica crucial.

Um exemplo do uso de um meio aquoso para a calibração de sondas é o trabalho de Persen & Saetran (1984), que utiliza um tanque cheio de água, onde um pequeno carro montado no topo deste tanque se movimenta, com velocidade constante, sobre dois trilhos paralelos. A sonda encontra-se firmemente fixada no carro, que é imerso com calma no tanque de água. A

velocidade do carro é cuidadosamente medida, computando-se o tempo que o carro leva para passar entre duas fotocélulas e a distância entre elas. Segundo os autores, este procedimento apresenta as seguintes vantagens: nível de turbulência nulo na “corrente livre”, a velocidade relativa do fluido é facilmente determinada e este dispositivo é barato e simples de ser construído.

No trabalho de Lee & Budwig (1991) foi efetuada a calibração de uma sonda de fio quente num túnel de vento de baixa velocidade, utilizando a relação Strouhal-Reynolds proposta por Roshko (1955). A velocidade do escoamento foi obtida, medindo a frequência de desprendimento dos vórtices, provocado por um cilindro circular (bastão perfurado) e usando a relação de Roshko. Obviamente, as calibrações efetuadas com desprendimento de vórtices não paralelo podem levar a significantes inacuracidades.

Guellouz & Tavoularis (1995) propõem a utilização de um pêndulo simples, na extremidade do qual deve ser fixada a sonda anemométrica. Segundo os autores, este método mostra-se extremamente vantajoso em relação aos demais por apresentar baixo custo operacional e de fabricação, podendo ser implementado adaptando-se um dispositivo para ensaios Charpy, facilmente encontrado na maioria das escolas e laboratórios de engenharia. Em uma proposta semelhante, Bruun *et al.* (1989) descrevem uma metodologia de calibração de sondas de fio quente para baixas velocidades, utilizando um braço oscilante, sobre o qual é instalada a sonda a ser calibrada. Durante o movimento oscilatório da sonda, o sinal de saída é gravado simultaneamente com o ângulo (α) da posição do braço do instrumento. O conhecimento da variação do ângulo de posição α , permite determinar a velocidade da sonda. Segundo os autores, além de sua simplicidade de construção e operação, esta técnica possibilita a calibração de sondas de fio quente para baixas velocidades, com ótima precisão.

Vieira (2000) propõe o uso de um túnel hidrodinâmico vertical de baixa intensidade turbulenta, como uma primeira experiência do uso de um túnel hidrodinâmico para calibrar sondas de filme quente em aulas de laboratório. A sonda de filme quente foi adequadamente posicionada na corrente livre não perturbada, na linha de centro da seção de testes. A vazão volumétrica foi medida por meio de um sensível medidor de vazão eletromagnético (fabricado pela Yokogawa), permitindo determinar a velocidade do escoamento na seção de testes.

Pluister & Nagib (1975) propõem dois procedimentos de calibração para as sondas de filme quente. Em seu primeiro aparato, as sondas de filme quente foram calibradas usando uma configuração de escoamento laminar completamente desenvolvido num tubo, procedimento também utilizado por Lee & Budwig (1991) e Samways *et al.* (1994). A velocidade máxima na

linha de centro do escoamento laminar completamente desenvolvido num tubo circular é duas vezes a velocidade média, conseqüentemente, posicionando uma sonda na linha de centro, a velocidade correspondente pode ser avaliada medindo a taxa de escoamento por meio de um medidor de vazão. No segundo procedimento, foi utilizado um jato livre, que produz um nível de turbulência muito baixo (menor que 0,1%), para a calibração das sondas anemométricas. Um pequeno túnel de jato livre foi construído por Pluister & Nagib (1975) e a sonda a ser calibrada foi posicionada na linha de centro do jato livre. Este procedimento permite uma excelente acuracidade da curva de calibração resultante (melhor que $\pm 0,2\%$).

Muitas outras propostas para calibrar as sondas de fio/filme quente podem ser encontradas na vasta literatura sobre o tema.

3.2.7 Contaminação da Sonda e Perda de Calibração

A superfície ativa da sonda, está constantemente sujeita a contaminações causadas, principalmente, por pequenos particulados sólidos e íons metálicos presentes em suspensão na água. Os íons metálicos são emitidos pelos dutos metálicos, bombas e outras conexões metálicas em contato com a água. O uso de tubos de PVC e outras partes não metálicas reduzem a presença de íons metálicos no escoamento. De qualquer forma, torna-se necessário o uso de filtros para a retenção de eventuais particulados sólidos que venham a contaminar a sonda. É recomendado para este propósito, o uso de filtros de retenção de particulados sólidos de no mínimo 5 μm . O efeito da contaminação é equivalente a uma diminuição no superaquecimento da sonda. Limpar ocasionalmente as sondas e utilizar líquidos limpos tais como água filtrada, deionizada e deaerada podem minimizar este acúmulo de impurezas, embora para grandes quantidades de água este procedimento não seja prático. No início dos testes, os efeitos da contaminação são negligenciados mas, após uma ou duas horas de trabalho, os efeitos podem ser observados. Após alguns dias de trabalho, se a sonda apresentar leituras instáveis, isto é um indicativo de que a sonda está próxima de falhar. Como um exemplo, a Figura 3.5 retirada de Eguti *et al.* (2002) mostra uma sonda instável operando, cuja velocidade de saída decresce rapidamente, e a falha da sonda é registrada quando a voltagem de saída permanece fixa num baixo valor.

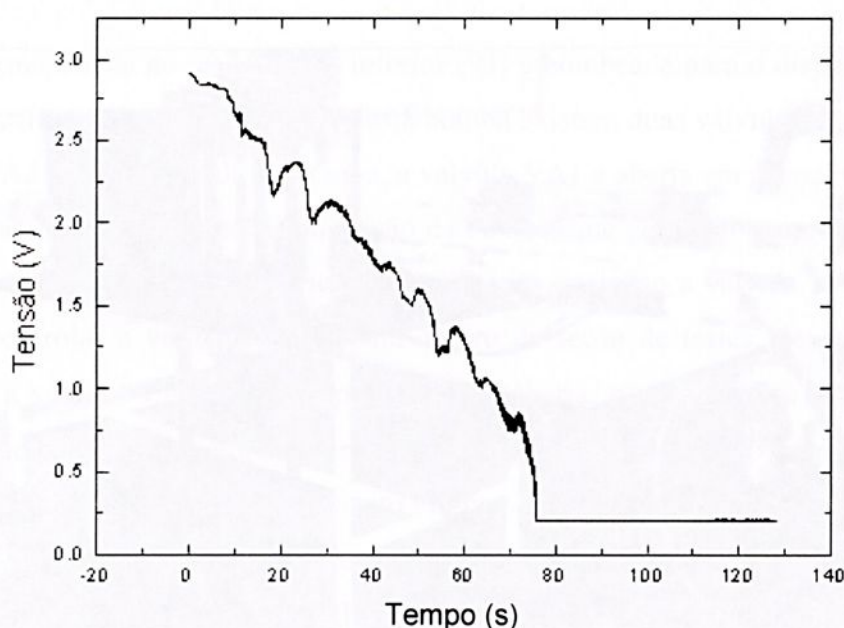
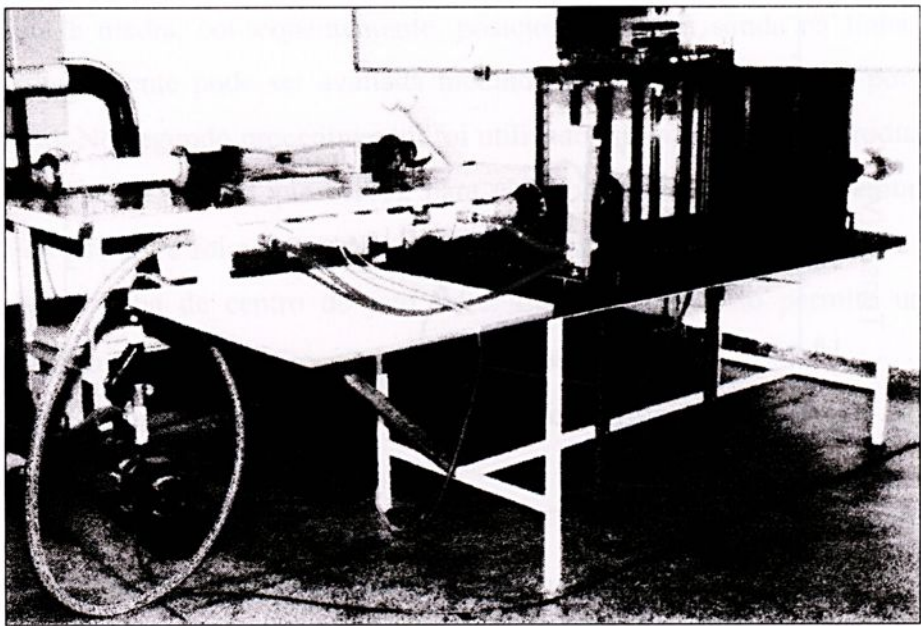


Figura 3.5 - Resultado típico mostrando a falha da sonda.

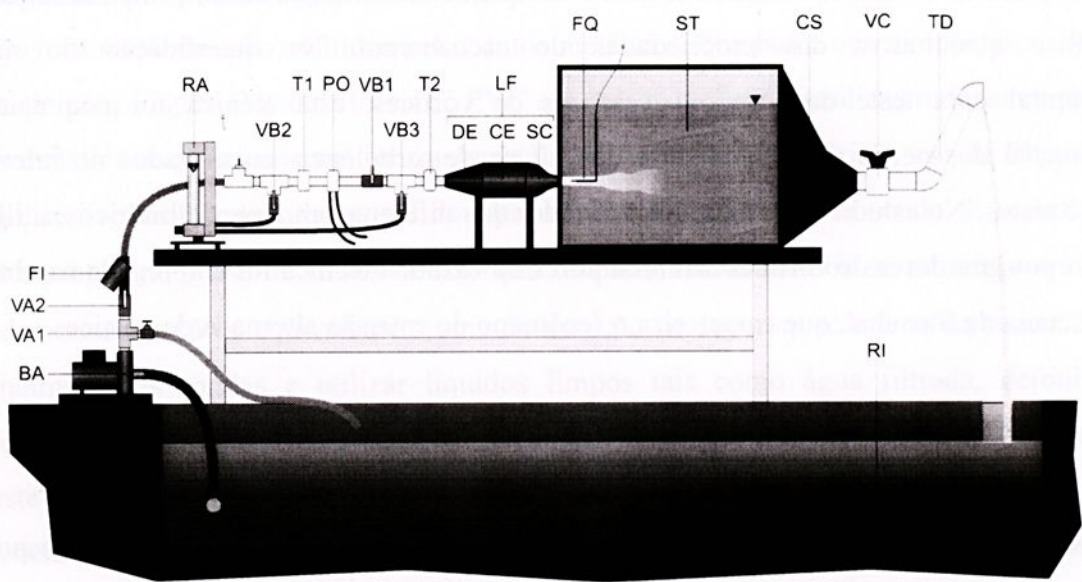
No presente trabalho, a anemometria de fio quente foi utilizada como principal ferramenta de análise quantitativa das propriedades do escoamento. Na qualificação do módulo experimental para teste dos corpos geradores de vórtices, esta técnica foi empregada na determinação dos perfis de velocidade e dos níveis de turbulência encontrados no interior da seção de testes. No estudo do escoamento ao redor dos diferentes modelos cilíndricos, utilizados como corpos geradores de vórtices nos medidores de vazão, a técnica foi empregada na obtenção da frequência de Strouhal, que caracteriza o fenômeno de emissão alternada de vórtices.

3.2.8 Dispositivo e Metodologia de Calibração das Sondas Anemométricas

Neste trabalho, a calibração da sonda anemométrica foi realizada num dispositivo especialmente projetado para produzir um jato livre axissimétrico descarregando em um meio quiescente. Trata-se, na verdade, de um método clássico e consagrado de calibração de sondas anemométricas, empregado tanto para gases quanto para líquidos e descrito por vários autores na literatura, dentre os quais incluem-se Lee & Budwig (1991). Esta metodologia é utilizada, ainda, em calibradores comerciais desenvolvidos por fabricantes de equipamentos de anemometria, tais com a *Dantec* e a *TSI*, para aplicações em laboratório de pesquisa, e a *Kurz* para aplicações industriais. A Figura 3.6(a) apresenta uma fotografia do dispositivo utilizado no trabalho, o qual, para maior facilidade de compreensão, aparece ilustrado, também, no esquema da Figura 3.6(b).



(a) instalação experimental



- | | | |
|---|----------------------------|----------------------------|
| RI - Reservatório Inferior | T1 e T2 - Telas | DE - Difusor de Entrada |
| BA - Bomba Centrífuga | LF - Laminador de Fluxo | CE - Câmara de Estagnação |
| FI - Filtro | FQ - Sonda de Filme Quente | SC - Subseção da Contração |
| VA1, VA2, VB1, VB2, VB3 e VC - Válvulas | RA - Rotâmetro | ST - Seção de Testes |
| CS - Contração de Saída | TD - Tubulação de Descarga | PO - Placa de Orifício |

(b) Ilustração esquemática.

Figura 3.6 - Dispositivo para a calibração de sondas de filme quente.

A água armazenada no reservatório inferior (RI) é bombeada para o dispositivo através de uma bomba centrífuga (BA). No recalque desta bomba existem duas válvulas, identificadas pelas siglas VA1 e VA2. Após a partida da bomba, a válvula VA1 é aberta em primeiro lugar, a fim de rejeitar a água acumulada no tubo de admissão da bomba, que geralmente apresenta resíduos de ferrugem não retidos pelo filtro (FI). Somente após esta operação a válvula VA2, que possui a finalidade de controlar a vazão da água para dentro da seção de testes, deve ser aberta. Para baixas vazões, a válvula VA1 pode ser parcialmente aberta, para que parte da água bombeada volte diretamente para o reservatório inferior, aumentando, assim, a vazão bombeada, e evitando o aquecimento da bomba centrífuga pelo atrito viscoso entre a água e a carcaça da bomba.

A fim de se obter um jato de boa qualidade, o escoamento passa por um conjunto de telas (T2) e segue, então, para o laminador de fluxo (LF), composto das seguintes subseções: o difusor de entrada (DE), com telas que atenuam perturbações causadas pela separação da camada limite hidrodinâmica, a câmara de estagnação (CE), onde o fluxo atravessa uma camada de colmeia seguida de uma tela e finalmente, a subseção de contração (SC), responsável maior pela obtenção de um perfil de velocidade uniforme na saída do bocal. O bocal de injeção foi projetado para gerar, no interior da seção de testes, um jato livre axissimétrico com diâmetro de 24 mm na raiz. O perfil de velocidade do jato, medido com uma sonda de filme quente posicionada a um diâmetro do bocal, é apresentado na Figura 3.7. Como pode-se observar, o jato produzido possui um núcleo com perfil de velocidade suficientemente uniforme, com intensidade turbulenta inferior a 0,5%.

A seção de testes (ST), inteiramente construída em acrílico transparente e com dimensões de $0,6 \times 0,6 \times 1,0$ m, possui uma contração na saída (CS), cujo orifício se encontra alinhado com o eixo de simetria do jato. A seção de testes é dotada de uma abertura em sua parte superior, por onde é introduzida a sonda de filme quente (FQ). A tubulação de descarga (TD), dotada de uma válvula de controle de vazão do tipo esfera (VC), permite o retorno da água para o reservatório inferior. Próximo à sua extremidade, encontra-se uma conexão giratória, que permite variar a altura do bocal de descarga, tornando a seção de testes um reservatório de nível constante.



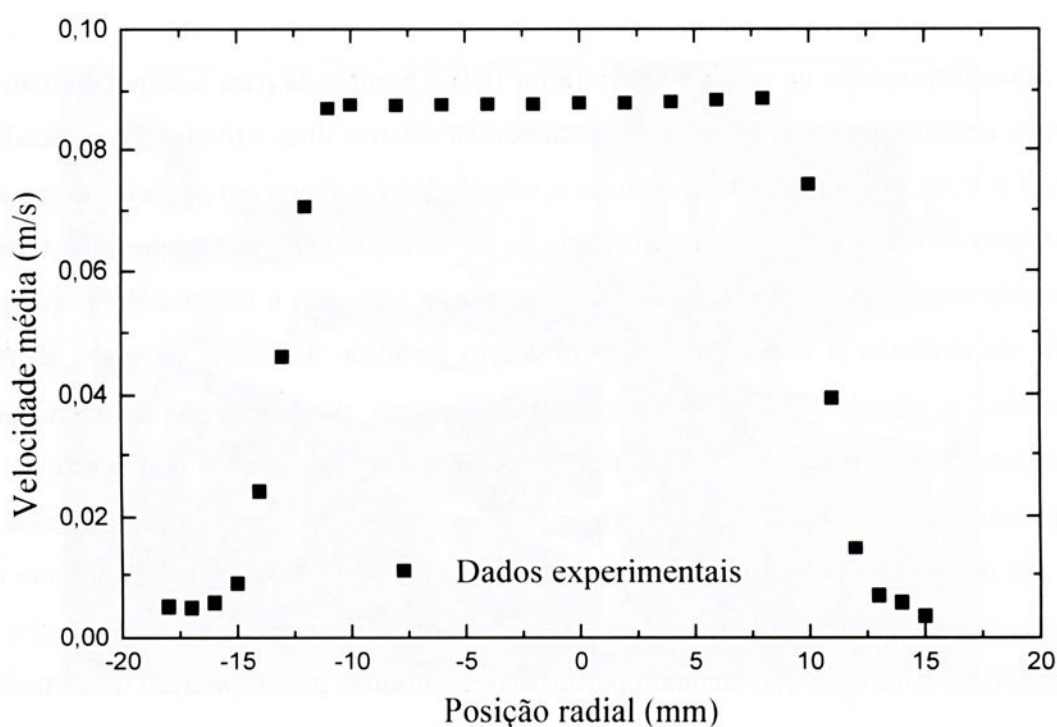


Figura 3.7 - Perfil de velocidade do jato medido a um diâmetro do bocal.

A vazão do jato produzido pode ser medida por três formas diferentes: pelo rotâmetro (RA), pela placa de orifício (PO) ou pelo método direto, coletando-se a água na saída da tubulação de descarga (TD) e medindo-se tempo e a massa escoada. A primeira forma é mais indicada para baixas vazões, em função da capacidade do rotâmetro empregado, e possibilita uma boa precisão (incerteza inferior a 1% do fundo de escala). A placa de orifício, instalada à jusante de um conjunto de telas (T1) para corrigir eventuais distorções no perfil de velocidade no interior do tubo, deve ser usada apenas para vazões maiores, quando a diferença de pressão atinge um nível mínimo (> 100 mm de coluna de água), que possa ser medido adequadamente. Quando o rotâmetro é utilizado, a válvula VB1 é mantida na posição fechada e as válvulas VB2 e VB3 são totalmente abertas; quando a placa de orifício é empregada, a abertura e o fechamento das válvulas são invertidos.

O método direto de medida da vazão pode ser utilizado para toda a faixa de operação do dispositivo, mas apresenta alguns inconvenientes. Em primeiro lugar, toda vez que houver modificação na velocidade do jato, deve-se aguardar o tempo necessário para que o nível de água no interior da seção de testes (ST) se estabilize, antes que se possa iniciar o procedimento de medição. Além disso, para baixas vazões, o tempo necessário para coletar uma quantidade razoável de água (± 10 kg) se torna excessivamente longo. Isso pode acarretar perda da calibração

da sonda, ainda durante o processo de calibração. Em vista disto, optou-se, no âmbito deste trabalho, pela utilização do primeiro método de medida de vazão ou seja, foi utilizado o rotâmetro de precisão.

Os procedimentos seguidos durante a calibração de uma sonda são listados a seguir.

- com as válvulas VA1 e VA2 fechadas, dá-se partida na bomba;
- abre-se a válvula VA1, para rejeitar a água que ficou estagnada no interior da bomba e da tubulação de sucção;
- fecha-se a válvula VA1 e abrem-se as válvulas VA2 e VB1, a fim de abastecer a seção de testes;
- após o enchimento da seção de testes, ajusta-se a vazão desejada, regula-se a válvula VA2 e aguarda-se que o escoamento entre em regime permanente;
- posiciona-se a sonda de filme quente na linha de simetria do jato, à uma distância equivalente a 1 diâmetro do bocal de injeção (24 mm);
- realiza-se a calibração, variando-se a vazão do jato.

Durante o processo de calibração, outros cuidados ainda devem ser tomados:

- a temperatura do escoamento que dá origem ao jato deve ser constantemente monitorada, pois mesmo pequenas variações nesta grandeza podem introduzir erros consideráveis na relação de calibração;
- escoamento deve ser adequadamente aterrado, de forma a evitar eventuais diferenças de potencial entre a sonda e o jato de água, que podem acelerar o processo de desgaste do elemento sensor por corrosão eletrolítica;
- a duração do ensaio de calibração não deve ser muito prolongada, pois a contaminação da sonda pelo escoamento pode alterar as propriedades da sonda durante o próprio processo de calibração.

3.2.9 Resultados da Calibração

A Figura 3.8 apresenta uma curva de calibração típica de uma sonda de filme quente *Dantec 55R11*, obtida de acordo com os procedimentos descritos anteriormente. É interessante ressaltar que a calibração da sonda, utilizada para a medição de velocidade e de intensidade turbulenta do escoamento no interior da seção de testes, foi realizada para uma faixa de valores de velocidade mais estreita, adequada para a realização dos ensaios pretendidos.

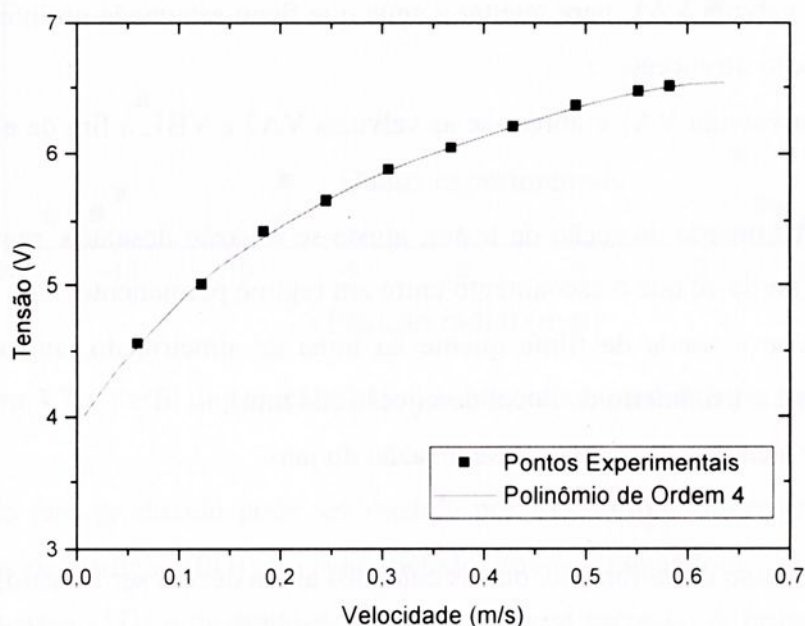


Figura 3.8 – Curva de calibração típica de uma sonda de filme quente *Dantec 55R11*.

O processo de calibração das sondas é facilitado pelo uso das ferramentas específicas disponíveis no software *StreamWare*, que controla o anemômetro empregado. A Figura 3.9 ilustra uma das janelas deste programa, onde se observa a curva de calibração mostrada na Figura 3.8. Como pode-se observar, o polinômio de quarta ordem mostra-se, neste caso, adequado para correlacionar os dados experimentais obtidos, com um desvio máximo menor que 1,4%.

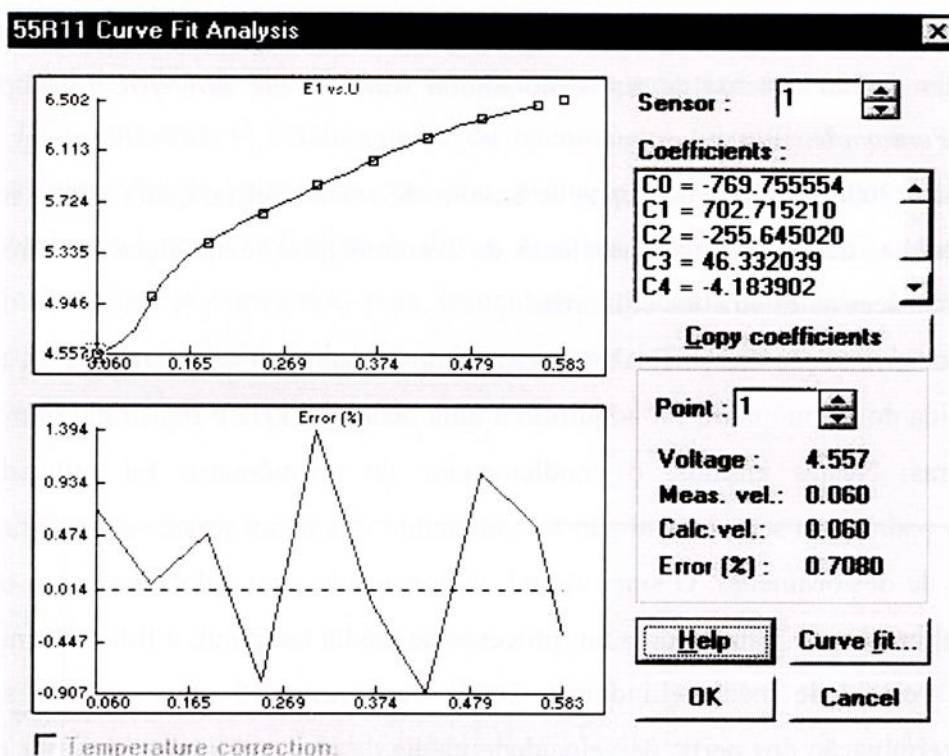


Figura 3.9 – Interface gráfica da ferramenta de calibração de sondas do programa *StreamWare*.

Nunca é demais ressaltar que a calibração de uma sonda é bastante sensível a mudanças nas propriedades de transferência de calor do seu elemento sensor. Desta forma, deve-se lembrar que a relação de calibração é válida apenas nas condições para as quais ela foi obtida. Um dos fatores que mais exerce influência sobre a relação de calibração é a deposição de contaminantes sobre o elemento sensor da sonda, o que altera o seu coeficiente de transferência de calor.

3.2.10 Aquisição e Tratamento do Sinal

O sinal de saída do anemômetro, consiste num sinal elétrico analógico, proporcional à tensão medida no elemento sensor da sonda de filme quente. Para que este sinal possa ser registrado e analisado posteriormente, é conveniente que ele seja adquirido em formato digital.

Existem várias formas de se efetuar o tratamento de sinal provenientes de um anemômetro de fio quente para o cálculo da frequência de emissão de vórtices. Nos parágrafos seguintes, são apresentadas algumas formas de aquisição de sinais utilizadas por alguns pesquisadores.

Lindquist (2000), efetuou um estudo experimental do fenômeno de emissão alternada de vórtices ao redor de cilindros de base quadrada e retangular, posicionados perpendicularmente ao escoamento principal, para números de Reynolds inferiores a 10^3 , utilizando-se da técnica de

anemometria de filme quente. Para a ocasião o autor registrou o sinal de saída do anemômetro com o auxílio de um sistema de aquisição digital *National AT-MIO-16E-1*, acoplado a um computador *Pentium II*.

Lindquist (2000) realizou três tipos de ensaios de anemometria, quais sejam: medições de velocidade média, de intensidade turbulenta da corrente livre, e medições da frequência de emissão dos vórtices na esteira dos cilindros.

Para a determinação dos perfis de velocidade do escoamento no interior da seção de testes, o sinal de saída do anemômetro foi adquirido a uma taxa de 1 kHz e registrado num bloco com 5000 amostras. Nestes ensaios, o condicionador do anemômetro foi utilizado em sua configuração padrão, ou seja, o sinal não foi submetido a nenhum processo de filtragem, ajuste de ganho ou de deslocamento. O sinal digital, já convertido para velocidade com o auxílio da relação de calibração, foi submetido a um processo de média temporal, a fim de fornecer o valor desejado da velocidade média (Lindquist, 2000). A Figura 3.10 apresenta um sinal obtido durante a determinação dos perfis de velocidade média da corrente livre no interior da seção de testes.

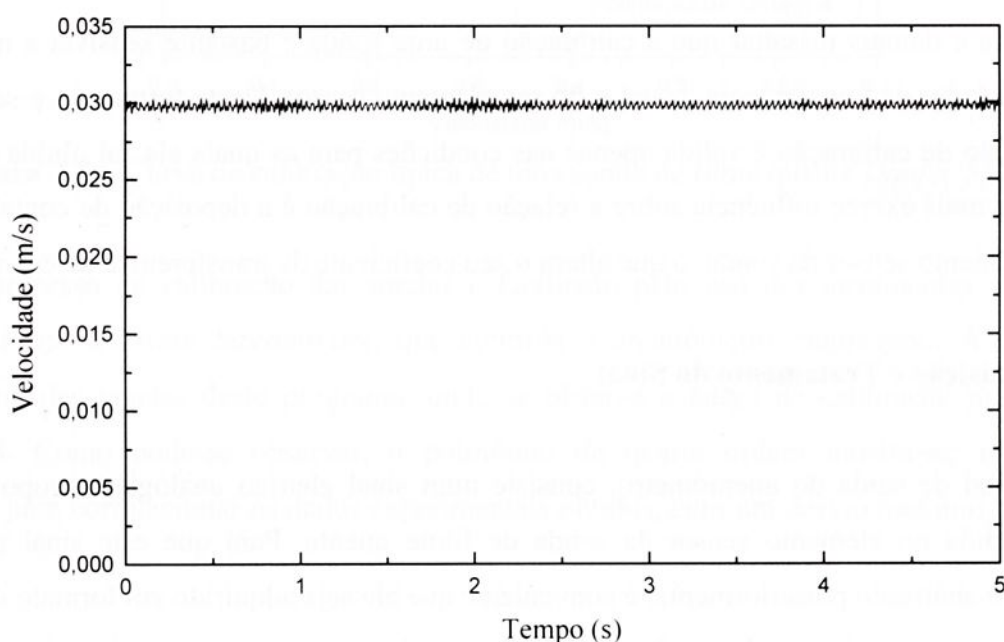


Figura 3.10 – Sinal obtido durante a determinação dos perfis de velocidade média da corrente livre (Lindquist, 2000).

Para a determinação da intensidade turbulenta da corrente livre na linha de centro da seção de testes, o sinal de saída do anemômetro foi adquirido a uma taxa de 1 kHz e registrado num bloco com 1024 amostras. O condicionador do anemômetro foi utilizado para possibilitar a detecção das flutuações de velocidade com boa resolução, por meio do ajuste do ganho e do deslocamento do sinal, sem a utilização de filtros. A intensidade turbulenta foi então calculada a partir do sinal digital, já convertido para velocidade, utilizando a relação de calibração. A Figura 3.11 ilustra um sinal obtido durante a determinação da intensidade turbulenta da corrente livre.

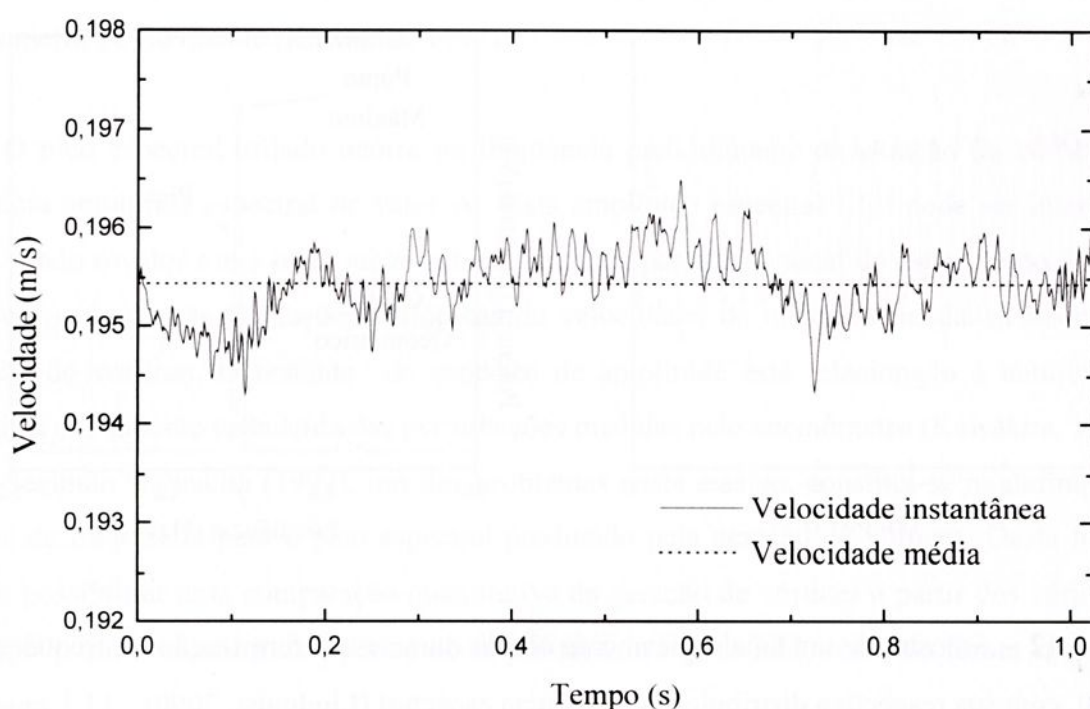


Figura 3.11 – Sinal obtido durante a determinação da intensidade turbulenta residual da corrente livre (Lindquist, 2000).

Para a determinação da frequência de Strouhal (frequência de emissão dos vórtices na esteira turbilhonar), não há a necessidade de calibração da sonda de filme quente utilizada, o que representa uma importante economia de tempo e de trabalho. Nestes ensaios, o condicionador do anemômetro foi utilizado com sua configuração padrão, ou seja, o sinal não foi submetido a nenhum processo de filtragem, ajuste de ganho ou de deslocamento. A taxa de amostragem do sinal (F) e o número de amostras adquiridas (N) foram ajustadas de forma a permitir a passagem de um número suficientemente grande de turbilhões pela sonda anemométrica, tipicamente

superior a 60 vórtices. Em cada ensaio, o sinal foi adquirido e armazenado em cinco blocos, com N pontos cada.

A frequência de emissão dos vórtices foi determinada através da aplicação da transformada discreta de Fourier (FFT- *Fourier Fast Transform*) ao sinal digital adquirido. A partir da média das cinco distribuições de potência espectral calculada, a frequência de Strouhal (f) é determinada com base no centro geométrico do pico dominante verificado. A Figura 3.12 apresenta um sinal temporal obtido para um cilindro quadrado, com seu respectivo espectro de frequência.

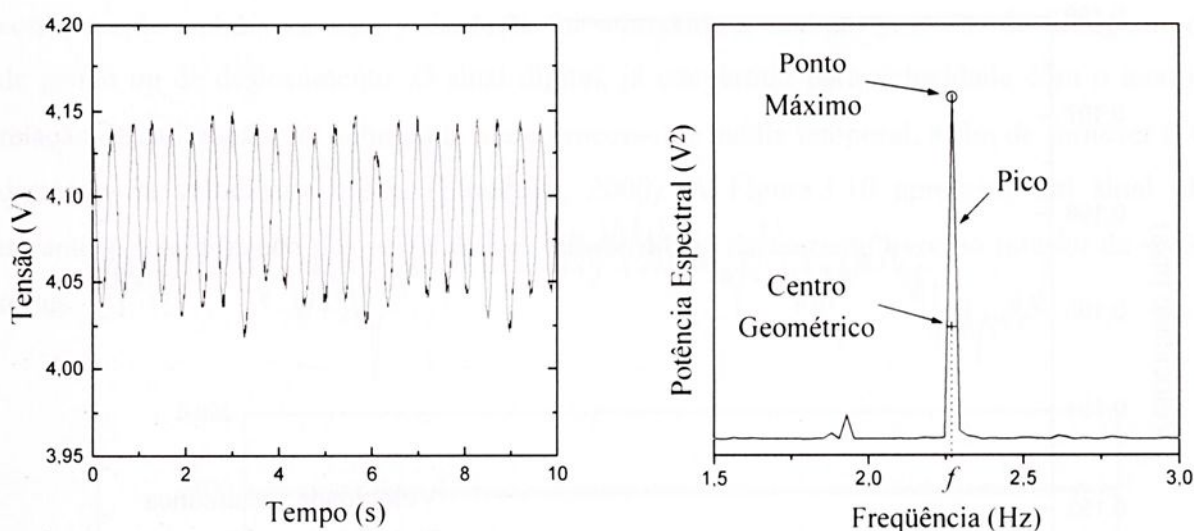


Figura 3.12 – Amostra de um sinal tipicamente obtido durante a determinação da frequência de Strouhal, com sua respectiva distribuição de potência espectral (Lindquist, 2000).

Para cada um dos cinco blocos do sinal adquirido, a FFT e o centro geométrico do pico foram calculados com o auxílio de um programa desenvolvido com o software *MatLab*. A frequência de Strouhal foi então calculada pela média dos valores encontrados.

Kawakita (1992) por sua vez, fez o processamento do sinal medido pelo anemômetro de fio quente, utilizando-se um analisador de espectro digital da *Yokogawa*, modelo 3655E, que apresenta o sinal de geração de vórtices, além do espectro de amplitudes em função dos sinais de emissão de vórtices.

A Figura 3.13, mostra o espectro de amplitudes típico de um processo de geração de vórtices medido pelo anemômetro de fio quente e fornecido pelo analisador.

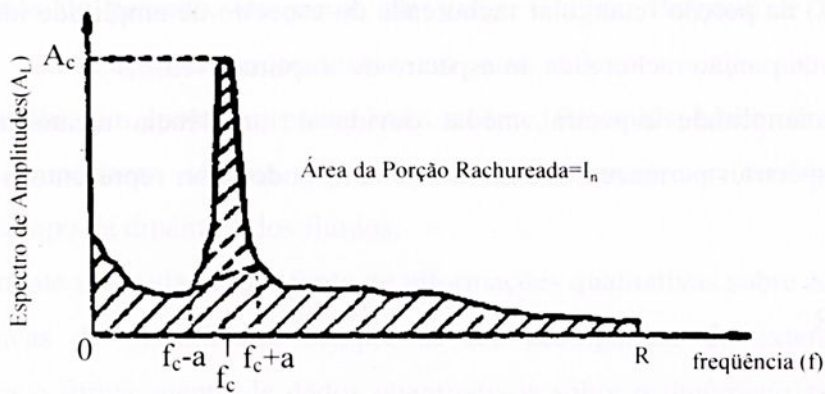


Figura 3.13 – Espectro de amplitudes de um sinal de geração de vórtices medido através de um anemometro de fio quente (Kawakita, 1992).

O pico espectral afilado ocorre na frequência predominante da geração de vórtices (f_c), com uma amplitude espectral de valor A_c . Esta amplitude espectral (A_c) pode ser interpretada como sendo o valor r.m.s (*root mean square*) daquela parcela do sinal do escoamento da esteira que ocorre devido às flutuações periódicas de velocidade, de maior intensidade, associadas à emissão de vórtices. O restante do espectro de amplitude está relacionado à natureza não-periódica e altamente turbulenta das perturbações medidas pelo anemômetro (Kawakita, 1992).

Segundo Kawakita (1992), um dos problemas neste estágio, constitui-se na definição dos limites de frequência para o pico espectral produzido pela geração de vórtices. Desta forma, a fim de possibilitar uma comparação quantitativa da geração de vórtices a partir dos vários tipos de corpo, o autor idealizou o espectro de amplitudes da Figura 3.13, como na forma apresentada na Figura 3.14.

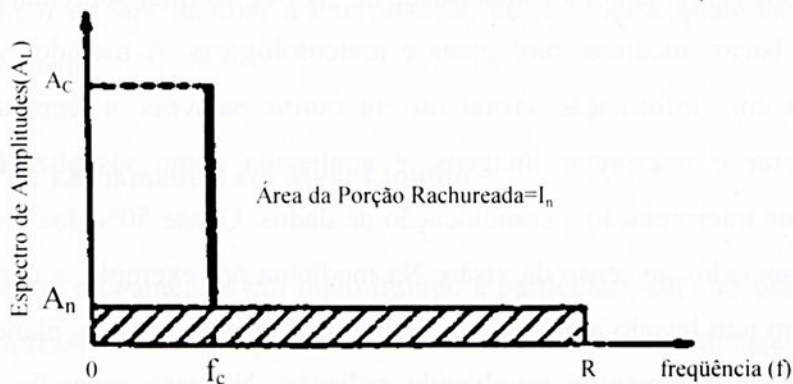


Figura 3.14 – Idealização do espectro de amplitudes (Kawakita, 1992).

A área (I_n) da porção retangular rachureada do espectro de amplitude idealizado, pode ser igualado à área da porção rachureada do espectro de amplitude real.

Assim a amplitude espectral média devida à turbulência aleatória de fundo, para componentes espectrais pertencentes à faixa de 0 a R, poderia ser representada como sendo:

$$A_n = I_n / R.$$

Através deste espectro de amplitude idealizado, Kawakita (1992) calculou uma relação adimensional de sinal/ruído (S/N) igual à relação do valor de pico do espectro de amplitude (A_c) pela amplitude média do espectro de fundo (A_n), ou seja:

$$S/N = A_c / A_n.$$

3.3 Visualização de Escoamentos

3.3.1 Introdução

Muitas atividades humanas trabalham com uma grande quantidade de dados. Cálculo da órbita de satélites, análise de dados astronômicos, projetos de naves espaciais, estudos geofísicos e meteorológicos, e complexos projetos de engenharia, são bons exemplos. O cérebro humano não é capaz de interpretar adequadamente as informações pertencentes a estas atividades, se os dados forem apresentados exclusivamente em formato numérico. Por outro lado, uma única imagem pode condensar uma grande quantidade de dados e facilitar sobremaneira a interpretação de informações físicas, médicas, biológicas e meteorológicas. A metodologia que transforma dados numéricos em informação visual ou em outras palavras, a técnica que os cientistas utilizam para gerar e interpretar imagens, é conhecida como visualização e oferece uma excelente forma de interpretação e comunicação de dados. Quase 50% dos neurônios do cérebro humano estão associados ao senso da visão. Na medicina por exemplo, a computação científica aplicada a imagem tem levado a novas soluções no diagnóstico médico, planejamento cirúrgico, prótese ortopédica e tratamentos envolvendo radiação. No caso específico da mecânica dos fluidos, a visualização foi, durante longo tempo, a única ferramenta disponível para o estudo e a descrição dos escoamentos.

Grandes sábios do passado, tais como Da Vinci, Galileu, Bernoulli e Pascal, usaram intensivamente a visualização de escoamentos em suas reflexões e descobertas acerca do movimento dos fluidos. Em época um pouco mais recente, Reynolds, Mach, Prandtl e Roshko valeram-se desta importante técnica experimental, para interpretar fenômenos e gerar conhecimento no campo da dinâmica dos fluidos.

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 desta combinação, pode-se citar o famoso trabalho de Brown & Roshko, publicado em 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 escoamento, a partir da utilização de técnicas de visualização experimental.

Nos dias atuais, apesar da nítida evolução de outros métodos de análise, a visualização de escoamentos ainda ocupa lugar de destaque no estudo de problemas associados ao transporte de massa, quantidade de movimento e energia. As técnicas de visualização hoje existentes são bastante numerosas, envolvendo diferentes níveis de sofisticação. Além disso, novos métodos são desenvolvidos a cada ano e as técnicas tradicionais são constantemente aprimoradas.

Neste trabalho, a visualização de escoamentos em meio hidrodinâmico foi amplamente utilizada em três situações distintas: como ferramenta de análise qualitativa, na identificação de padrões do 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 quantitativos obtidos por anemometria de fio quente.

3.3.2 Visualização de Escoamentos em Meio Líquido

A visualização de escoamentos em meio líquido é particularmente adequada ao estudo de escoamentos incompressíveis de baixa velocidade, substituindo, com vantagens, a geração de imagens em túneis aerodinâmicos. Com efeito, a literatura especializada mostra que as técnicas de visualização empregadas em meio hidrodinâmico (notadamente emissão de corantes líquidos e geração de bolhas de hidrogênio), além de serem relativamente fáceis de serem executáveis,

são capazes de oferecer imagens de grande nitidez e clareza, caracterizadas pela enorme riqueza de detalhes. Segundo a opinião de vários autores, estas técnicas são capazes de oferecer informações melhores e mais completas sobre o escoamento que o tradicional método de emissão de filetes de fumaça, muito utilizado em túneis de vento. A Figura 3.15 mostra um exemplo de visualização de escoamento em meio líquido obtido pela técnica de injeção de corantes líquidos.



Figura 3.15 - Exemplo de visualização de escoamento em meio líquido (Dalton *et al.*, 2001).

Neste caso, a técnica de visualização de escoamento empregada é o de laser induzido a fluorescência, na qual uma folha de luz laser é utilizada para iluminar uma tinta fluorescente que é injetada a partir da face frontal do cilindro.

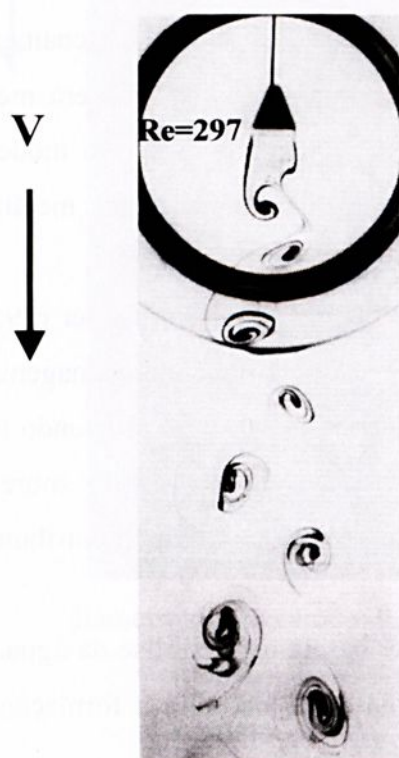
As vantagens da visualização de escoamentos em meio líquido são reconhecidas pela maioria dos pesquisadores que atuam na área. Existe uma grande variedade de técnicas de visualização possíveis de serem implementadas em túneis hidrodinâmicos, a maioria das quais envolvendo a introdução de traçadores líquidos (tintas e corantes) ou gasosos (bolhas de ar ou de hidrogênio) no seio do fluido.

Injeção de corantes líquidos

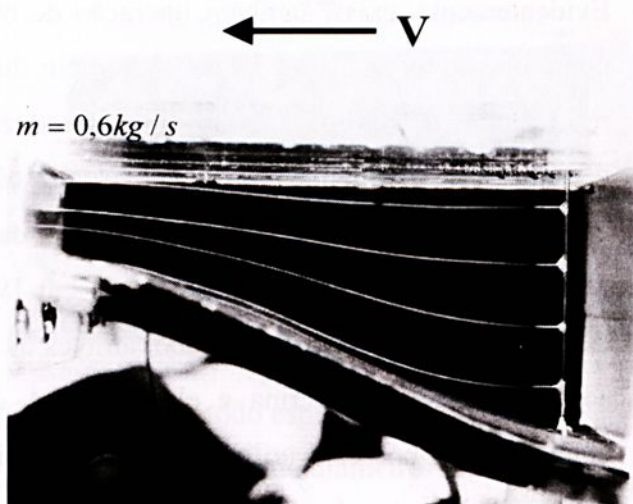
A injeção de traçadores líquidos tem sido exaustivamente utilizada no estudo de diversos tipos de escoamento, devido, sobretudo, à sua facilidade de implementação e ao seu baixo custo operacional.

O processo de injeção pode ser efetuado através de pequenos orifícios existentes na superfície do modelo ensaiado ou, ainda, com o auxílio de uma agulha posicionada no interior do escoamento. Em ambos os casos, a injeção do filete de corante deve ocorrer de forma a introduzir a menor perturbação possível no escoamento. Assim, a velocidade e a pressão de injeção devem ser adequadamente controladas e mantidas em valores próximos àqueles encontrados no escoamento, afim de que o filamento de tinta se mantenha nítido e estável.

Embora existam tintas fabricadas especialmente para a visualização de escoamentos, os traçadores líquidos mais freqüentemente utilizados são os corantes alimentícios e os corantes para pintura, solúveis em água. Dentre as primeiras, destacam-se as tintas fluorescentes, que podem ser excitadas pela luz (Dobrodzicki, 1982), pela ação de componentes químicos (Friedman, 1956), ou através de campos elétricos (Howland *et al.*, 1966). Existem, ainda, as chamadas soluções fotocromáticas, que alteram a sua coloração na presença de radiações eletromagnéticas (Popovich & Hummel, 1967). A Figura 3.16 ilustra alguns exemplos de visualização de escoamentos utilizando a técnica de injeção de corantes líquidos. Nestes casos, foram utilizados como traçador, uma solução aquosa de pigmento para tinta à base de PVA.



(a) Esteira de vórtices, (Hirai *et al.*, 2002).



(b) Linhas de emissão, (Hirai *et al.*, 2000).

Figura 3.16 - Exemplos de visualização de escoamentos utilizando a técnica de injeção de corantes líquidos.

Segundo Werlé (1973), outras substâncias são utilizadas com relativa frequência, tais como: leite, anilina, nanquim, permanganato de potássio, entre outros produtos, geralmente diluídos numa solução de água e álcool. No entanto, a utilização de alguns destes traçadores exige cuidados especiais, posto que os de origem orgânica favorecem a proliferação de microorganismos no fluido de trabalho, enquanto outros podem aderir às janelas de observação, prejudicando a nitidez da imagem.

Bolhas de Hidrogênio

Traçadores gasosos são freqüentemente utilizados em ensaios de visualização em meio líquido, sendo as bolhas de hidrogênio as mais usuais.

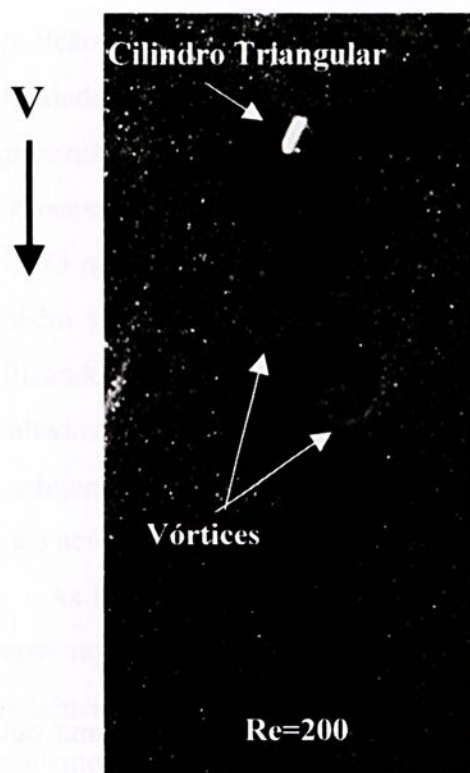
A técnica de visualização de escoamentos por meio de bolhas de hidrogênio envolve a introdução, no interior do fluxo, de um fino fio metálico, ligado a um circuito elétrico de corrente contínua, usado como cátodo (eletrodo negativo). O ânodo (eletrodo positivo) consiste simplesmente num objeto metálico em contato com o escoamento, posicionado nas proximidades do cátodo, à jusante do modelo ensaiado. Se a tensão aplicada for suficiente, ocorrerá a liberação de hidrogênio no cátodo, na forma de bolhas, através da eletrólise da água do escoamento. Evidentemente, existe também liberação de oxigênio no ânodo, mas as bolhas são em menor número e maiores. Esta técnica teve início durante a década de 50 e se trata de um moderno refinamento de velhos métodos que introduziam serragem ou pequenas partículas metálicas dentro de um escoamento para a sua visualização.

A primeira referência sobre a técnica das bolhas de hidrogênio se deve a Geller (1955), provável autor desta técnica. Kolin, já em 1953, havia apresentado resultados de imagens de escoamento no interior de um tubo, através da geração de bolhas de hidrogênio, utilizando uma solução de água, glicerina e eletrólitos. A descrição de Clutter & Smith (1961) sobre os equipamentos por eles utilizados e as possibilidades de aplicação desta técnica contribuíram muito para o crescente interesse no método.

O princípio básico da técnica das bolhas de hidrogênio se baseia na eletrólise da água. Se uma voltagem DC for aplicada entre dois eletrodos imersos na água, ocorrerá a formação de bolhas de hidrogênio no cátodo e bolhas de oxigênio no ânodo.

Desde que as bolhas de hidrogênio são menores e em maior número que as bolhas de oxigênio, a visualização é melhor obtida com a utilização das bolhas de hidrogênio. Para todos os efeitos, segundo Merzkirch (1987), recomenda-se que o tamanho das bolhas seja considerado

da ordem de grandeza do diâmetro do fio utilizado. Os fios geralmente são feitos de platina ou de aço inoxidável com diâmetros da ordem de 0,01 a 0,02mm. Usando fios de tungstênio de 5 a 10 μm de diâmetro, pulsos elétricos espaçados de 1 a 4 μs e voltagens de 100 a 600V, Matsui *et al.* (1979) produziram bolhas de dimensões muito menores do que o diâmetro dos fios e que não se dissolveram na água após sua formação. Schraub *et al.* (1965) observaram as linhas de emissão (*streaklines*) e as linhas de tempo (*timelines*) em uma seção contraída através da utilização de fios de platina de 0,0254 mm ou 0,0508 mm de diâmetro e 152,4 mm de comprimento. O diâmetro das bolhas depende também da condutividade elétrica do fluido, da velocidade do escoamento e da voltagem e corrente empregados. A Figura 3.17, ilustra alguns exemplos de visualização de escoamentos obtidos pela técnica de geração de bolhas de hidrogênio.

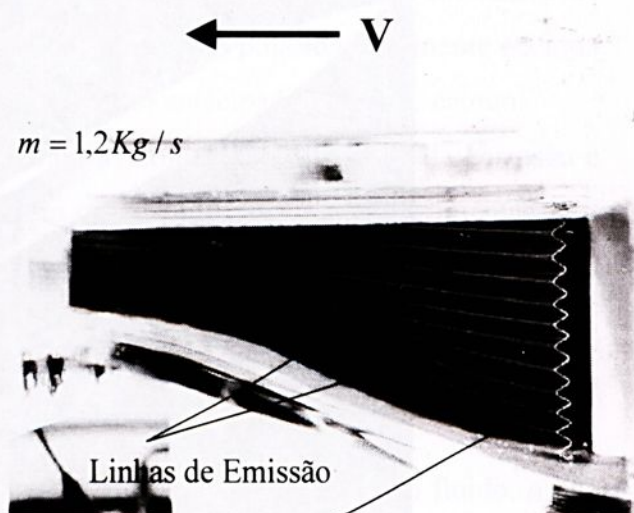


diâmetro do fio cátodo: 0,1 mm

tensão: 40 V

corrente: 0,1 A

(a) Esteira de vórtices (Hirai *et al.*, 2002).



Fio cátodo espiralado

de 0,1 mm de diâmetro

diâmetro do fio cátodo: 0,1 mm

tensão: 50 V

corrente: 0,1 A

(b) Linhas de emissão (Hirai *et al.*, 2000).

Figura 3.17 - Exemplos de visualização de escoamentos obtidos pela técnica de geração de bolhas de hidrogênio.

Em um arranjo convencional um longo fio fino colocado no escoamento é usado como cátodo (eletrodo negativo) de um circuito DC para eletrolizar o fluido. Água da rede urbana pode ser usada como fluido eletrolítico; para aumentar a condutividade elétrica do fluido pode-se adicionar sulfato de sódio – Na_2SO_4 (geralmente a adição de 0,15 g/litro de Na_2SO_4 tem sido suficiente na maior parte dos casos).

Se um fio cátodo reto for colocado normalmente à direção do escoamento e se houver a geração de um pulso elétrico no circuito, uma coluna de bolhas é produzida ao longo do fio. Qualquer posição posterior a estas colunas de partículas traçadoras é chamada de “linhas de tempo” (*time lines*), que é uma medida do perfil de velocidade local. Pulsando-se a voltagem com uma frequência conhecida, obtém-se várias colunas consecutivas de bolhas, como observado na Figura 3.18. Neste caso, a velocidade local pode ser determinada medindo-se a distância entre as colunas e dividindo-se pelo tempo entre os pulsos elétricos.

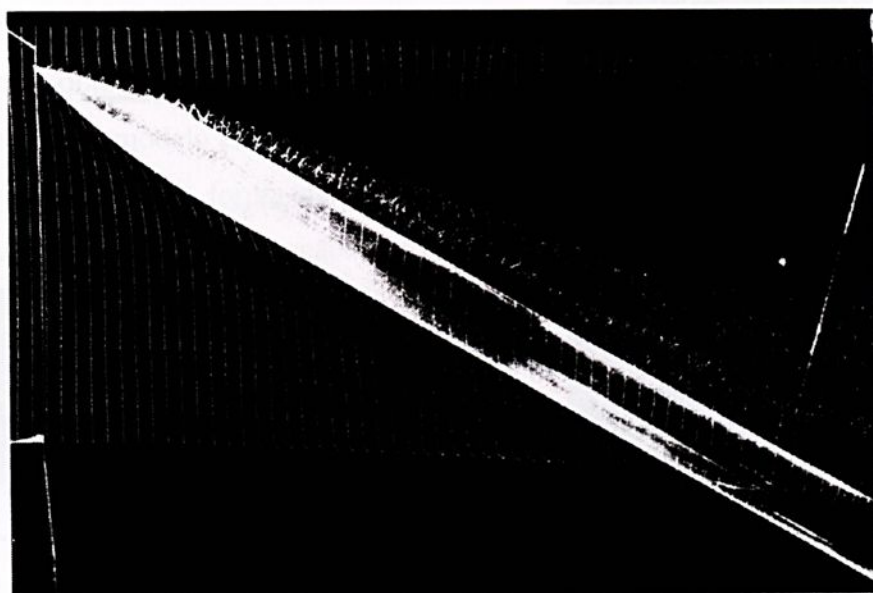


Figura 3.18 - Visualização das linhas de tempo no escoamento sobre o nariz de uma ogiva (Merzkirch, 1987).

Outras configurações do fio cátodo também podem ser utilizadas para-se obter características distintas do escoamento. Isolando-se partes do cátodo, por exemplo, e aumentando-se o tempo dos pulsos, pode-se gerar retângulos de bolhas de hidrogênio. Seguindo-se estes retângulos, pode-se observar a deformação do fluido ao longo do escoamento, como pode ser observado na Figura 3.19.



Figura 3.19 - Deformação do fluido ao longo de uma contração (Schraub *et al.*, 1965).

Deve-se ter o cuidado para obter-se uma voltagem uniforme e, desse modo, uma produção uniforme de bolhas ao longo do fio. Um circuito elétrico apropriado é necessário para a produção uniforme de bolhas durante o experimento e evitar a formação de bolhas grandes na parte inicial de cada experimento. Tem-se observado que a qualidade e uniformidade das bolhas modificam-se substancialmente após alguns minutos de operação contínua, como resultado da deposição de materiais contaminantes no cátodo. Isto pode ser, em parte, corrigido revertendo a polaridade do circuito elétrico durante alguns minutos. Na prática, porém, a existência de impurezas na água provoca eletroerosão no cátodo e a inversão de polaridade somente acentua tal processo, provocando, na maioria das vezes, o rompimento antecipado do fio de cátodo.

O material usado para produzir os fios que geram as bolhas sofrem a ação da corrosão e também são muito frágeis e, por isso, não se excluem críticas por parte dos experimentadores. Utilizando fios de platina, cobre e aço inoxidável, Schraub *et al.* (1965) obtiveram bons resultados em seus experimentos. Os fios inoxidáveis são resistentes e fáceis de manusear. Usualmente, prefere-se utilizar fios de platina porque eles não sofrem corrosão e apresentam pouco acúmulo de sujeira por aderência.

As bolhas podem ser observadas no fluxo até a sua completa dissolução no fluido, o que ocorre rapidamente. A dissolução do hidrogênio na água é extremamente favorecida pela turbulência do escoamento, o que, aparentemente, limitaria a aplicação desta técnica em fluxos turbulentos de altas velocidades. Merzkirch (1987) chega a restringir a utilização da técnica apenas a velocidades de escoamentos inferiores a 0,30 m/s na água. Entretanto, Criminale & Nowell (1965) obtiveram resultados satisfatórios utilizando esta técnica em escoamentos com velocidades na corrente livre da ordem de 6 m/s.

A presença do fino fio metálico de cátodo, cujo diâmetro, em geral, é inferior a 0,3 mm, não causa sérias perturbações no escoamento, o que constitui uma vantagem adicional atribuída a esta técnica. Por outro lado, a geometria e a velocidade das bolhas são afetadas pela esteira

turbulenta produzida pelo fio de cátodo. No entanto, para todos os fins práticos, estima-se em menos de 70 diâmetros do fio cátodo a distância necessária para que as bolhas adquiram a velocidade da corrente livre.

A maior dificuldade do método está no controle da qualidade das bolhas geradas. São necessárias grandes correntes para obter uma densidade óptica suficiente das bolhas para um registro fotográfico adequado. Um dos problemas mais comuns na implantação desta técnica encontra-se no diâmetro ideal das bolhas geradas, que devem seguir o escoamento com o mínimo escorregamento (isto é, sem diferença apreciável de velocidade entre a bolha e o fluxo). As dimensões da bolha não devem ser muito grandes, o que causaria flutuação devido ao efeito de empuxo de Arquimedes, e nem muito pequenas, ao ponto de desaparecerem, em função da dissolução do hidrogênio na água. Um outro problema na implantação desta técnica está relacionado à obtenção da correta iluminação. É necessário também ter uma intensidade de iluminação forte para pequenos tempos de exposição, na obtenção do registro fotográfico.

A técnica de geração de bolhas de hidrogênio, foi utilizada no presente trabalho, para efetuar a visualização das estruturas do escoamento formadas a partir dos corpos cilíndricos, para os ensaios realizados somente no túnel hidrodinâmico vertical.

Para os ensaios conduzidos no túnel hidrodinâmico vertical, as imagens do escoamento foram capturadas em película fotográfica ou em fita magnética, dependendo do tipo de ensaio a ser realizado e, em seguida, digitalizadas e processadas, fornecendo informações qualitativas sobre o escoamento. Já para o módulo experimental construído exclusivamente para o teste dos corpos geradores de vórtices, as imagens do escoamento foram capturadas, utilizando uma câmera digital Sony CD Mavica.

INSTALAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

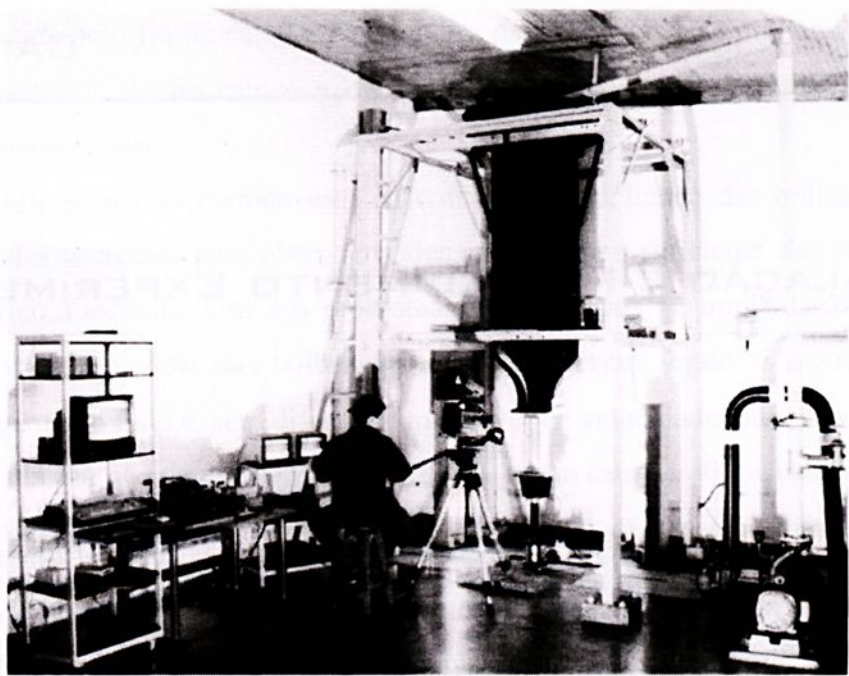
4.1 Introdução

No presente trabalho, de caráter puramente experimental, os ensaios foram realizados em dois dispositivos. O primeiro consiste num túnel hidrodinâmico vertical operado pela ação da gravidade, no qual foram realizados os ensaios para baixos números de Reynolds ($Re < 1000$), afim de se obter uma melhor compreensão qualitativa e quantitativa acerca do fenômeno de geração e desprendimento de vórtices ao redor de corpos com perfis não aerodinâmicos. Já o segundo dispositivo, que será aqui denominado de módulo para teste dos corpos geradores de vórtices, foi especialmente construído para o desenvolvimento do presente trabalho com a finalidade de simular o princípio de funcionamento de um medidor de vazão do tipo vórtice. Neste dispositivo foram conduzidos os testes para números de Reynolds mais elevados (Re até 4×10^4), constituindo a maior parte dos ensaios realizados.

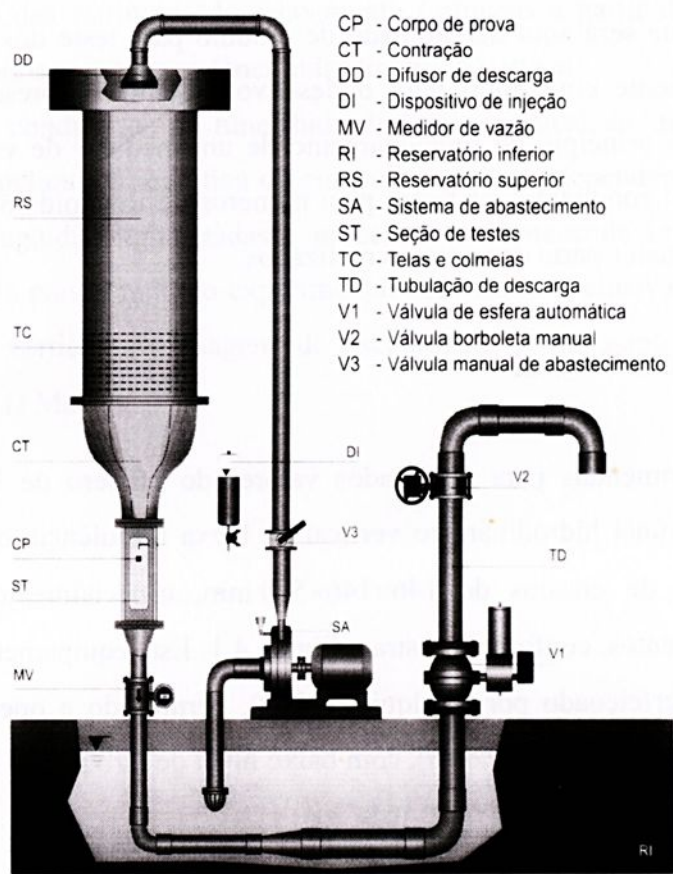
4.2 Túnel Hidrodinâmico Vertical

Os ensaios experimentais para moderados valores do número de Reynolds ($Re < 1000$) foram realizados num túnel hidrodinâmico vertical de baixa turbulência operado pela ação da gravidade, com seção de ensaios de $146 \times 146 \times 500$ mm, especialmente concebido para a visualização de escoamentos, conforme mostra a Figura 4.1. Este equipamento, foi desenvolvido por Vieira (1997) e aperfeiçoado por Lindquist, (2000), permitindo a operação em regime de fluxo contínuo ou intermitente (*blow-down*), com baixo nível de turbulência na seção de teste.





(a) Vista parcial.



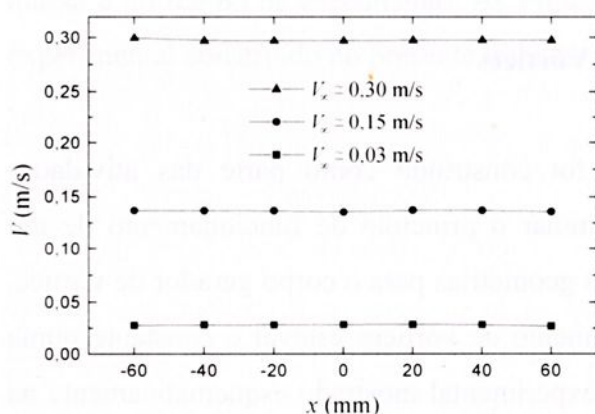
(b) Desenho esquemático.

Figura 4.1 – Detalhes do túnel hidrodinâmico vertical.

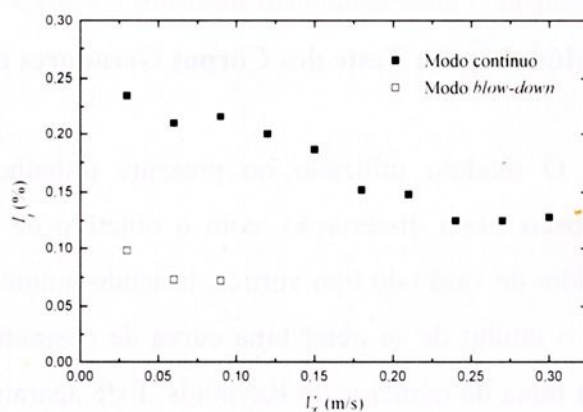
No modo contínuo de funcionamento, as válvulas (V_1), (V_2) e (V_3) são reguladas simultaneamente, de tal maneira que o reservatório superior (RS) se mantenha constante, mantendo desta forma a velocidade média constante na seção de testes (ST). Já no modo *blow-down*, as válvulas (V_1) e (V_2) permanecem fechadas, até que o nível do reservatório superior atinja sua capacidade máxima. Neste instante, o sistema de acionamento do túnel (SA) é então desligado, aguardando-se o tempo necessário para que o fluido no interior do reservatório (RS) se tranqüilize. Neste modo de operação, as válvulas (V_1) e (V_2) são parcialmente abertas dando início ao ensaio propriamente dito. No modo *blow-down* é possível obter baixos níveis de turbulência na corrente não perturbada, no entanto, a velocidade do escoamento na seção de teste diminui continuamente, em decorrência da redução do nível de água no interior do reservatório (RS), limitando significativamente os ensaios.

A seção de ensaios (ou seção de testes) do túnel possui seção transversal quadrada de 146×146 mm com cantos cortados e 500 mm de comprimento. Construída em alumínio, a seção de testes possui quatro amplas janelas de observação, que a tornam particularmente adequada para a realização de ensaios de visualização de escoamentos.

Este túnel hidrodinâmico produz, em sua seção de testes, um escoamento com um perfil de velocidades relativamente homogêneo e de turbulência relativa baixa. A Figura 4.2 mostra o perfil de velocidades média e o nível de turbulência relativa colhidos na linha de centro da seção de testes na posição em que o corpo de ensaio é montado. Estes dados foram obtidos com anemometria de filme quente.



(a) Velocidade média.



(b) Nível de turbulência relativa.

Figura 4.2 - Perfil de velocidades média e nível de turbulência relativa do túnel hidrodinâmico.

Corpos prismáticos com diferentes geometrias de seção transversal, foram usinados em alumínio aeronáutico, com acabamento superficial polido e posicionados no interior da seção de testes do túnel hidrodinâmico, para a obtenção do comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds. A geometria dos corpos de testes, foram definidas após um estudo das geometria utilizadas nos medidores comerciais. Os corpos de testes foram inseridos ortogonalmente em relação ao escoamento não perturbado e a razão de bloqueio foi mantida sempre menor que 6 % e a razão de esbeltez (relação entre o comprimento e o diâmetro característico do corpo emissor de vórtices) menor que 24.

Os ensaios de visualização foram realizados utilizando a técnica de injeção de corantes líquidos a montante do corpo rombudo, por intermédio de longas agulhas hipodérmicas e, também, por meio da técnica de bolhas de hidrogênio. O corante líquido empregado, consiste numa solução aquosa de pigmento para tinta à base de PVA, que possui grande poder de tingimento e baixo custo, podendo ser facilmente encontrado no mercado. Imagens estáticas do escoamento foram capturadas também utilizando a técnica de micro bolhas de hidrogênio. Estas micro bolhas foram produzidas utilizando um fio de tungstênio de 0,025 mm de diâmetro e tensão de 100 V. Maiores detalhes sobre a técnica de bolhas de hidrogênio, podem ser encontrados no trabalho de Hirai *et al.* (1999).

Para a obtenção dos resultados quantitativos do escoamento (curva Re versus St) foi utilizada a técnica de contagem de fotogramas. Maiores detalhes construtivos e operacionais do túnel hidrodinâmico e da técnica de contagem de fotogramas podem ser obtidos nos trabalhos de Lindquist (2000) e Vieira (1997).

4.3 Módulo para Teste dos Corpos Geradores de Vórtices

O módulo utilizado no presente trabalho, foi construído como parte das atividades propostas nesta dissertação, com o objetivo de simular o princípio de funcionamento de um medidor de vazão do tipo vórtice, testando inúmeras geometrias para o corpo gerador de vórtice, com o intuito de se obter uma curva de desprendimento de vórtices estável e constante numa larga faixa de números de Reynolds. Este aparato experimental mostrado esquematicamente na Figura 4.3 consiste de um reservatório elevado, de nível constante, construído em material plástico de 1 m³ de capacidade volumétrica, o qual encontra-se ligado a uma tubulação de 8" de diâmetro para minimizar as perdas de cargas. Inicialmente o escoamento de água produzido pelo reservatório de nível constante passa por uma curva longa de PVC de 8" (203,2 mm). No interior

desta curva longa foram instalados defletores de escoamento (“*vanes*”), constituídos por 3 chapas de aço inoxidável de 1 mm de espessura, a fim de eliminar velocidades secundárias indesejáveis na seção de testes.

Após a curva longa, o escoamento de água passa por uma tubulação de PVC de 8” com 1,5 m de comprimento, utilizada para regularizar o escoamento. Após ser regularizado, o escoamento passa por um bocal (contração) fabricado em fibra de vidro e resina poliéster de baixa absorção de água, que faz a transição do tubo de PVC de 8” para a seção de testes, constituída por um tubo acrílico de 4”(101,6 mm) e 2 m de comprimento. Esta contração foi projetada segundo Cohen & Ritchie (1962) e construída de acordo com o recomendado por Aparecido & Vieira (1999). A presença da contração tem por objetivo provocar uma diminuição apreciável no nível de turbulência relativa, uma homogeneização do perfil de velocidades e um achatamento da camada limite, conforme Bradshaw & Pankhurst (1964).

Imediatamente após a contração, foi instalado uma tubulação de paredes de acrílico (também denominado de seção de testes), para facilitar o acesso óptico ao interior do escoamento. Nesta tubulação de acrílico foi devidamente posicionado o corpo emissor de vórtices e a sonda de filme quente para a obtenção da velocidade na esteira de vórtices.

Finalmente, um bocal confeccionado em PVC faz a transição da seção de testes para a válvula controladora de vazão de 3” (76,2 mm). A água utilizada no experimento, proveniente da rede urbana de abastecimento, fica armazenada em um reservatório, posicionado abaixo do nível do piso, e é bombeada posteriormente para o reservatório de nível constante. Para isto, é utilizada uma bomba centrífuga. A vazão foi obtida pelo método direto, através da medição da massa e do tempo de escoamento. As Figuras 4.4 e 4.5 mostram detalhadamente o dispositivo experimental construído no presente trabalho.

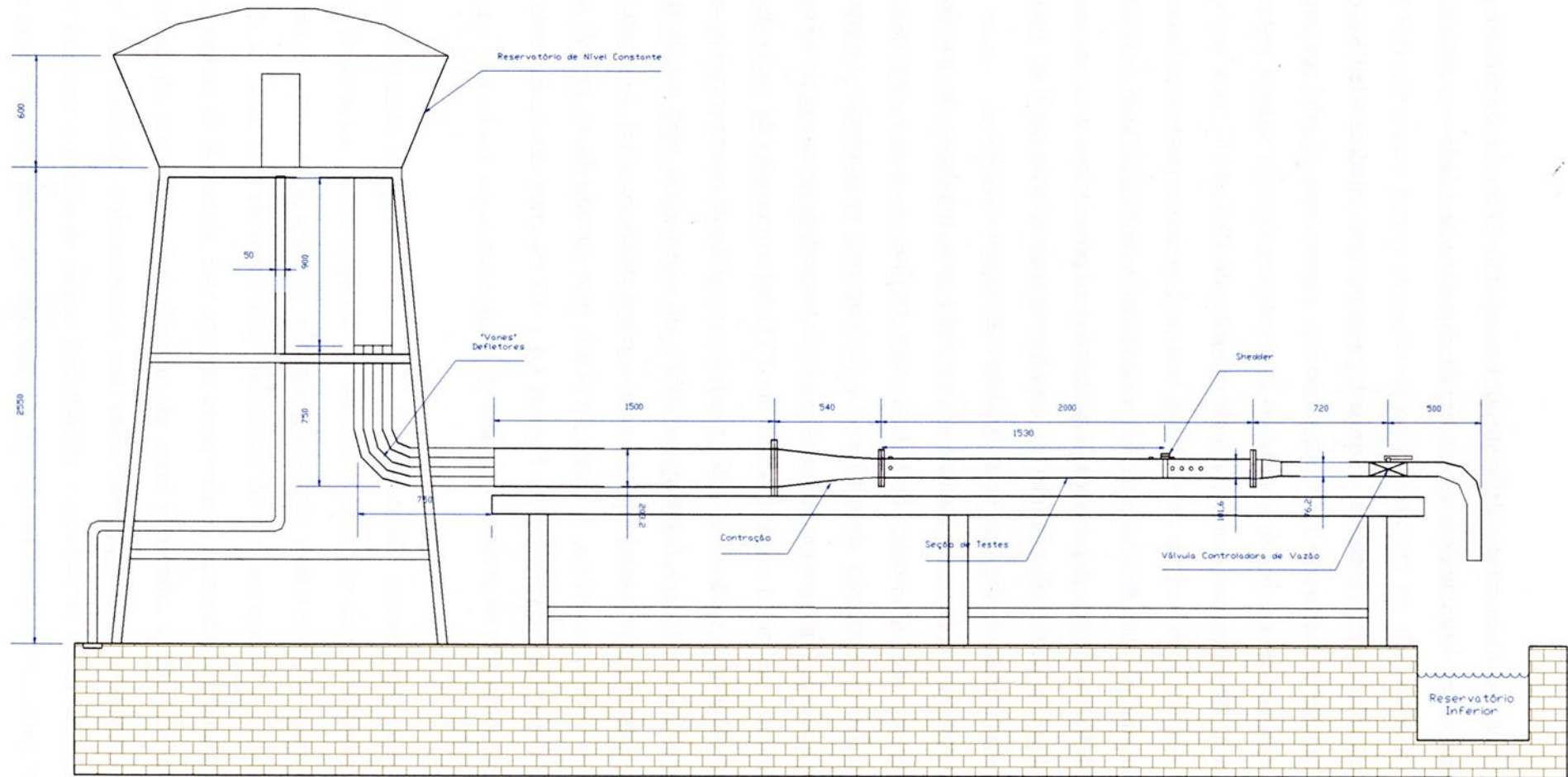


Figura 4.3 - Dimensões do módulo para teste dos corpos geradores de vórtices (em mm).

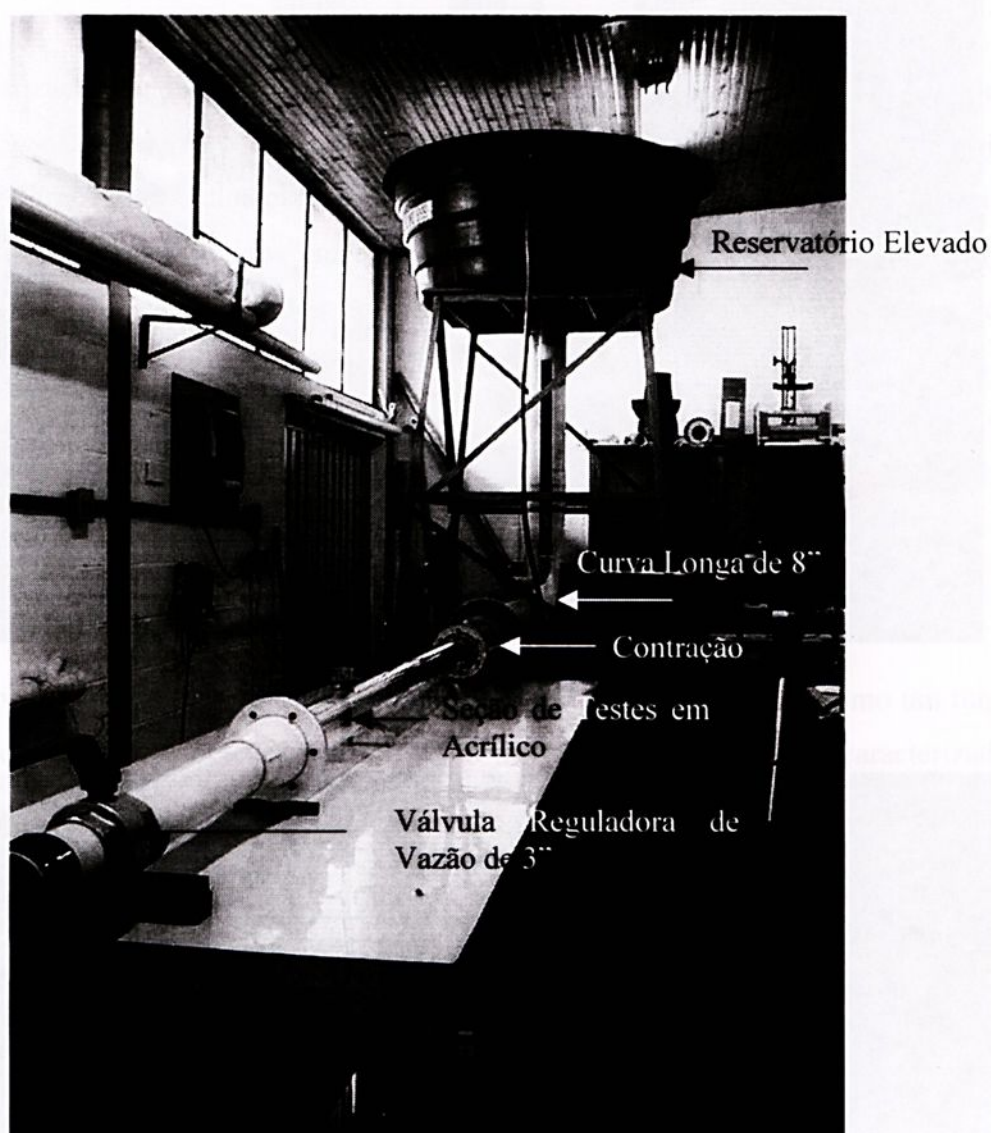
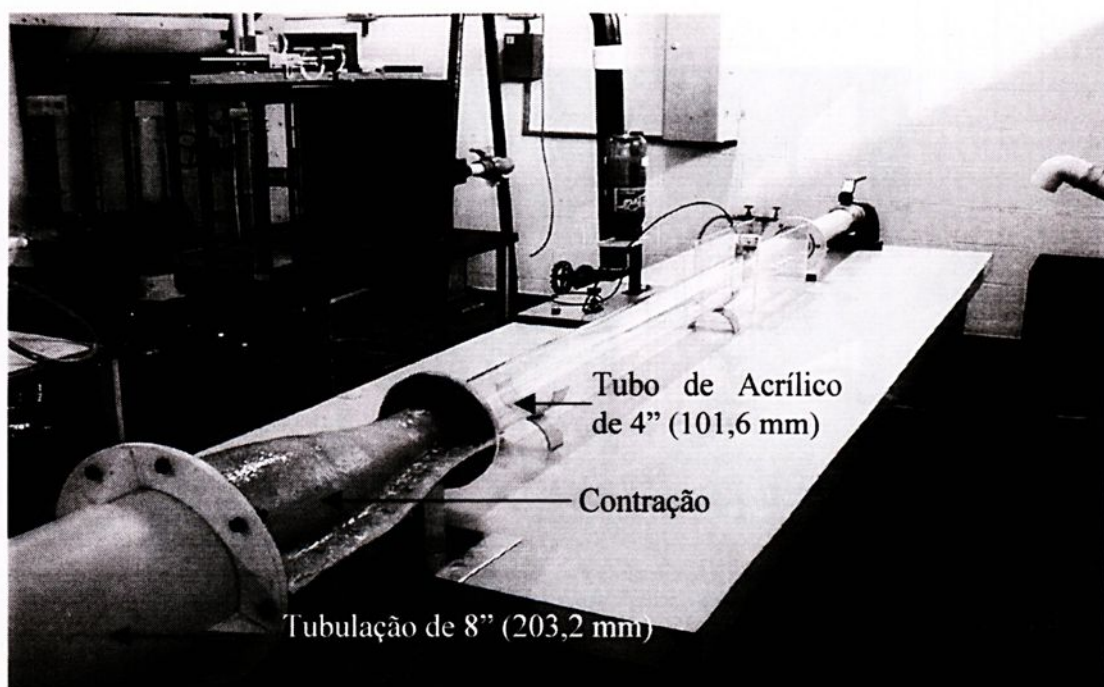
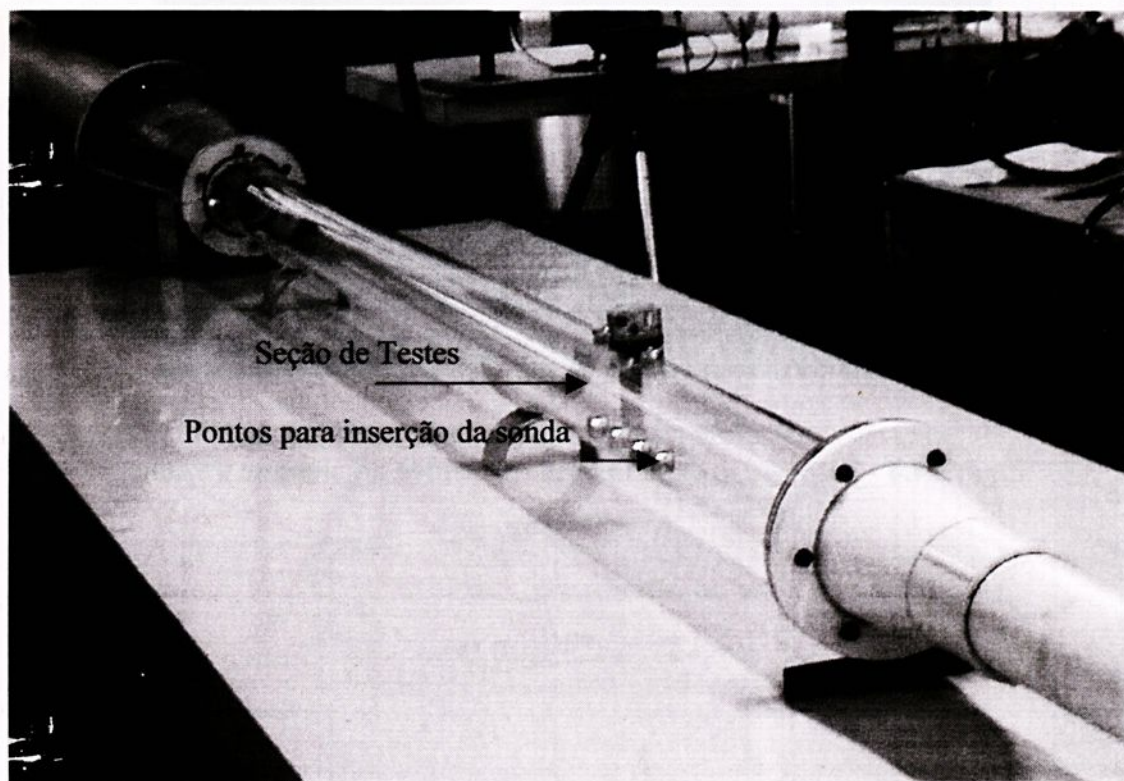


Figura 4.4 - Dispositivo experimental construído no presente trabalho.



(a) Região de entrada.



(b) Região de saída.

Figura 4.5 - Vista parcial do módulo experimental destacando a região de entrada e a região de saída.

4.4 Caracterização do Módulo Experimental

A caracterização de uma instalação experimental é um passo necessário antes de sua utilização judiciosa. As informações obtidas nesta etapa, além de atestar a qualidade do projeto e da construção e fornecer subsídios para a sua eficiente utilização, possibilitam também a correta interpretação dos resultados obtidos em experimentos posteriores. A seguir são apresentados alguns resultados dos testes realizados no módulo experimental, sem a presença dos corpos geradores de vórtices na seção de testes, objetivando a determinação de algumas de suas características, tais como o perfil de velocidade e a intensidade turbulenta do escoamento na região de inserção dos corpos de provas.

4.4.1 Perfis de Velocidade

Um dos objetivos que norteia o projeto de uma instalação experimental como um túnel de vento ou hidrodinâmico, é a obtenção de um perfil de velocidade muito bem caracterizado no interior da seção de testes. O conhecimento dos perfis de velocidade do escoamento ao longo da seção de testes é de fundamental importância para a interpretação dos resultados obtidos em comparação com resultados obtidos em outras instalações.

Os perfis de velocidade tanto na direção x (horizontal) como na direção y (vertical) no interior da seção de testes, foram obtidos com o auxílio da técnica de anemometria de filme quente. Antes de cada medição do perfil de velocidade, a sonda de filme quente foi calibrada de acordo com os passos descritos na seção 3.2.

Para as direções x e y , a sonda de filme quente foi posicionada no interior da seção de testes com o auxílio de dois posicionadores. O deslocamento da sonda ao longo do eixo y , foi efetuado com auxílio de um dispositivo posicionador (Figura 4.6), que consiste basicamente de um paquímetro (0,05 mm de precisão) acoplado a um parafuso micrométrico, como mostrado na Figura 4.7. Já para a direção x , foi utilizado o mesmo dispositivo posicionador citado anteriormente, no entanto nesta ocasião o dispositivo se encontrava acoplado a uma mesa de coordenadas (Figura 4.8). Estes dispositivos foram alinhados em relação a seção de testes, com o auxílio de um nível óptico de alta resolução. A referência da posição inicial da sonda, foi obtida encostando-se o suporte da sonda em uma das faces internas da parede do tubo e posteriormente varrendo todo diâmetro da tubulação ate que a sonda encostasse na outra parede do tubo. A incerteza da posição inicial da sonda foi estimada em menos que $\pm 0,2$ mm.



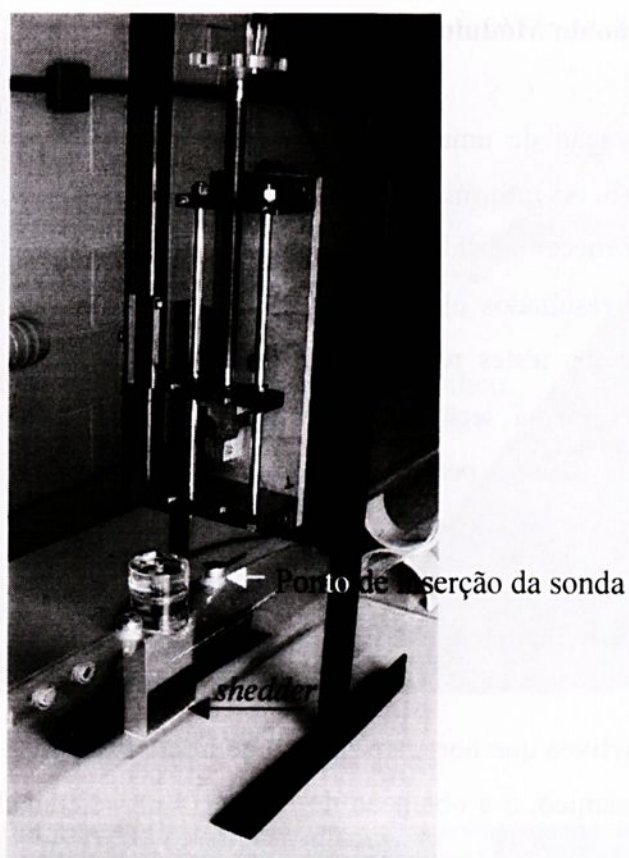


Figura 4.6 - Posicionador da sonda de filme quente na direção y (vertical).

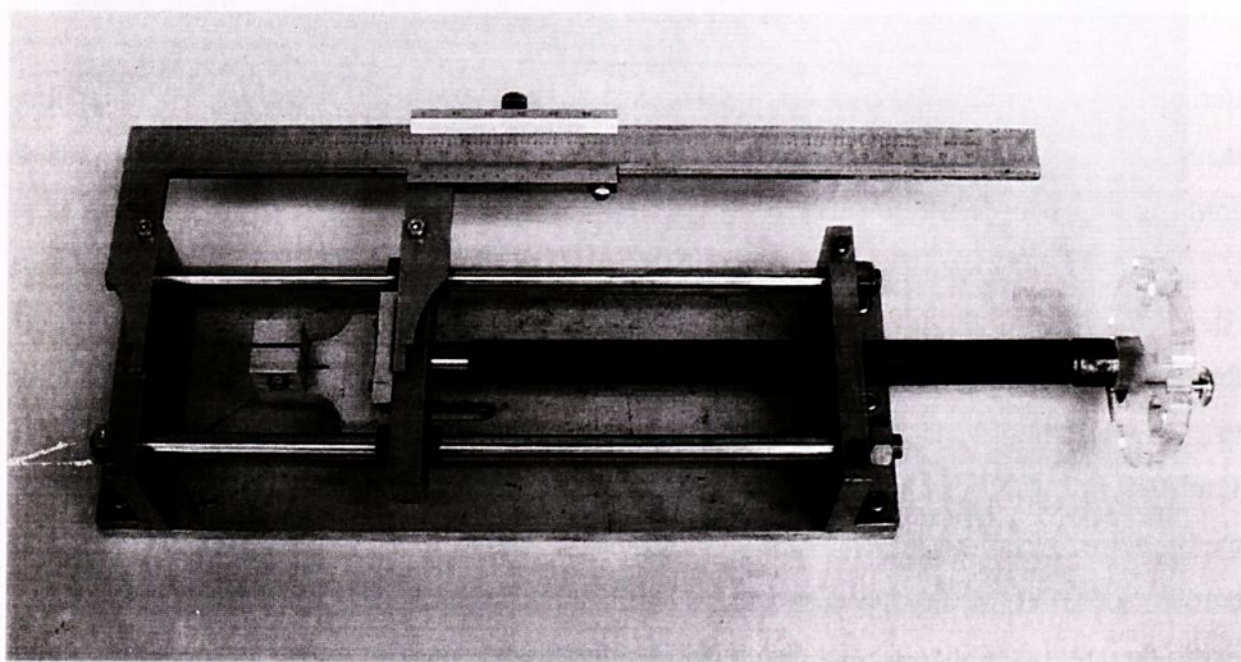


Figura 4.7 – Dispositivo posicionador de sonda.

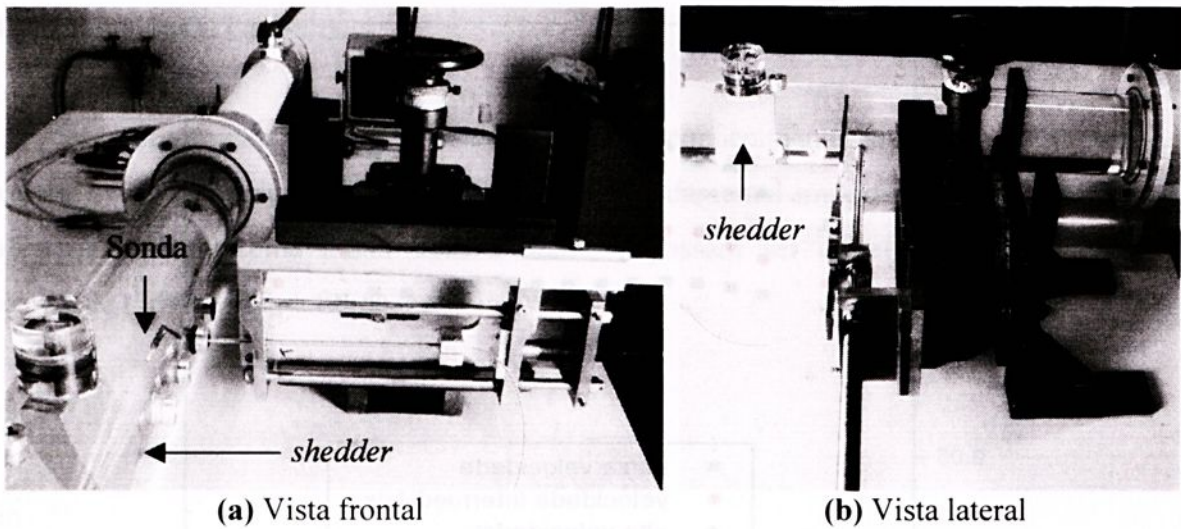


Figura 4.8 - Posicionador da sonda de filme quente na direção x (horizontal).

Ao todo foram investigados 94 mm ao longo do diâmetro nas direções transversais, sendo efetuada uma varredura de 16 pontos em cada direção. A partir da parede da tubulação os 15 pontos estavam separados entre si por 6 mm, enquanto que o último ponto estava a 4mm da outra extremidade do tubo. Ao todo foram conduzidos ensaios para três velocidades diferentes.

Os resultados obtidos podem ser observados nas Figuras 4.9 e 4.10. A velocidade apresentada nestes gráficos, representa o valor médio da série temporal adquirida durante 2 s, uma amostragem de 2048 pontos e uma frequência de amostragem de 2000 Hz foi utilizada. O zero no eixo das abscissas localiza-se sobre o eixo longitudinal de simetria da seção de testes e os limites laterais do gráfico representam as paredes laterais da seção de testes (± 47 mm).

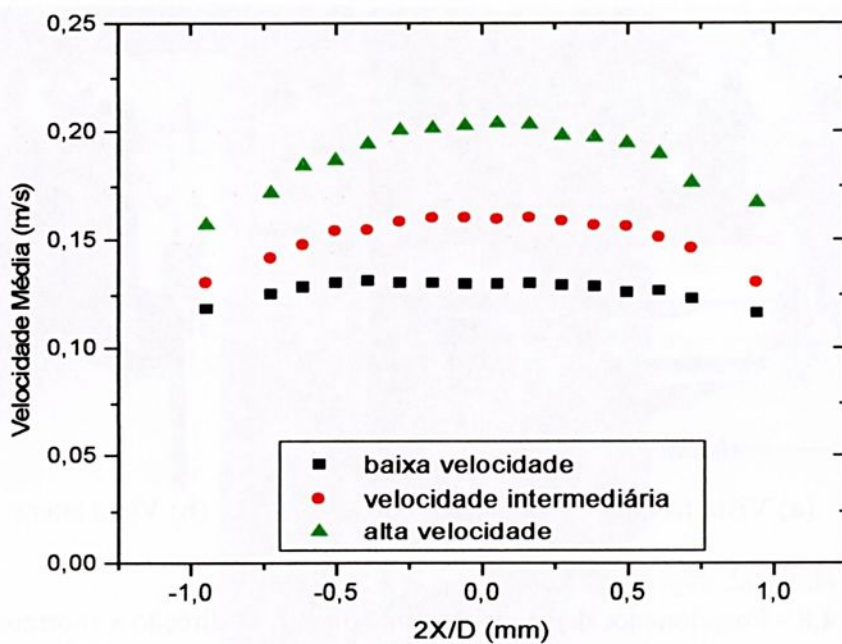


Figura 4.9 - Perfil de velocidade na seção de testes na direção x.

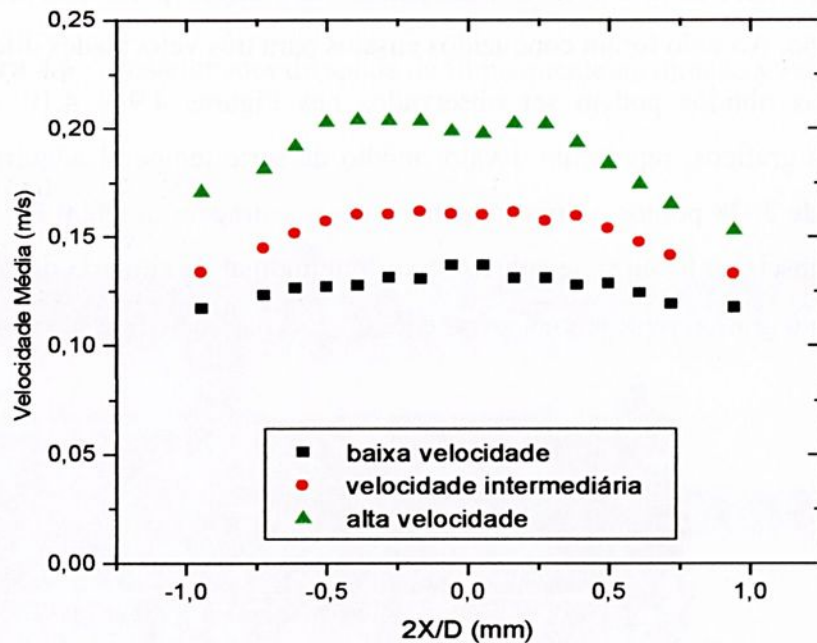


Figura 4.10 - Perfil de velocidade na seção de testes na direção y.

4.4.2 Intensidade Turbulenta

De modo semelhante ao perfil de velocidade, o conhecimento da intensidade turbulenta da corrente livre no interior da seção de testes é de fundamental importância para que os ensaios realizados possuam uma maior confiabilidade e possam ser corretamente interpretados. A intensidade turbulenta é definida como

$$I_t = \frac{V'}{\bar{V}} \quad (4.1)$$

com

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (4.2)$$

e

$$V' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(V_i - \bar{V})^2} \quad (4.3)$$

onde V_i é o valor medido da velocidade no i -ésimo instante, e N é o número de amostras adquiridas.

No presente caso, a intensidade turbulenta foi medida ao longo do diâmetro da tubulação nas direções x e y , usando o mesmo procedimento para obtenção dos perfis de velocidade.

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram o nível da intensidade turbulenta na seção de ensaios para três velocidade distintas.

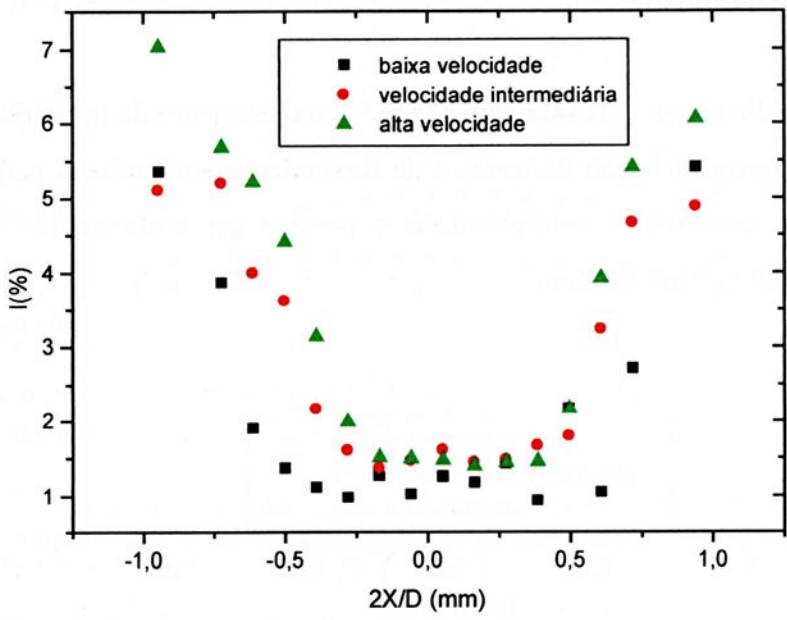


Figura 4.11 - Comparação entre a intensidade turbulenta relativa na seção de testes para a direção x.

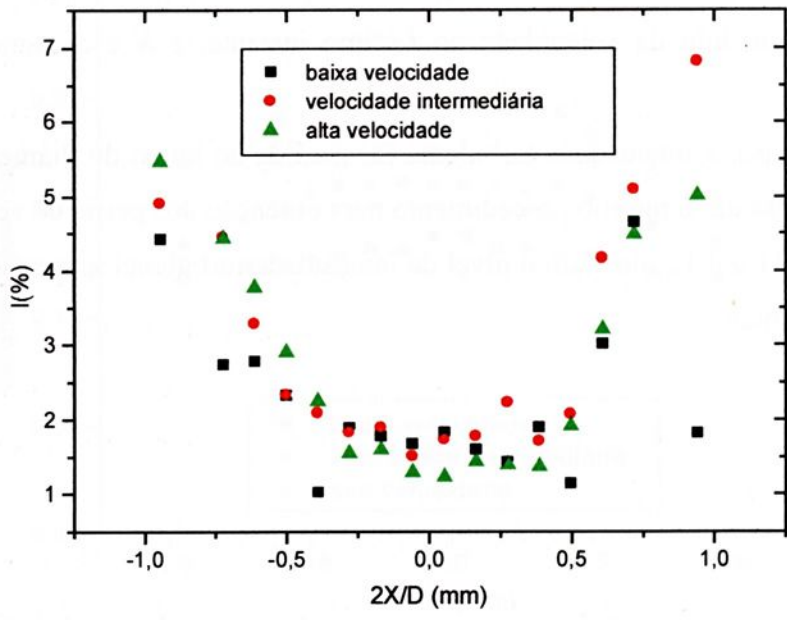


Figura 4.12 - Comparação entre a intensidade turbulenta relativa na seção de testes para a direção y.

4.5 Aquisição e Tratamento do Sinal

A aquisição e tratamento do sinal realizado no presente trabalho, foi efetuado de maneira similar ao realizado por Lindquist (2000), descrito em detalhes no Capítulo 3, salvo algumas modificações quanto ao número de amostra e a frequência de aquisição.

Da mesma forma que Lindquist (2000), três tipos de ensaios de anemometria foram realizados no contexto deste trabalho, que consistem: medições de velocidade média, da intensidade turbulenta da corrente livre, e da frequência de emissão dos vórtices na esteira dos cilindros.

Para a determinação dos perfis de velocidade do escoamento no interior da seção de testes, o sinal de saída do anemômetro foi adquirido a uma amostragem de 2048 pontos. Para cada ponto do perfil de velocidade, foi coletado cinco tomadas de velocidade e depois realizada a média entre estes.

Já para a determinação da frequência adimensional de emissão dos turbilhões, também denominado de número de Strouhal, o condicionador do anemômetro foi utilizado com sua configuração padrão, ou seja, o sinal não foi submetido a nenhum processo de filtragem, ajuste de ganho ou de deslocamento. A taxa de amostragem do sinal (F) e o número de amostras adquiridas (N) foram ajustadas de forma a permitir a passagem de um número suficientemente grande de turbilhões pela sonda anemométrica, no mínimo 20 picos por tomada e em alguns casos até mais de 50 picos foram observados.

Em cada ensaio, o sinal foi adquirido e armazenado digitalmente. A frequência de emissão dos vórtices foi determinada através da aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*) ao sinal digital adquirido. A partir da média das distribuições de potência espectral calculadas, a frequência de Strouhal (f) foi determinada com base no centro geométrico do pico dominante verificado.

A partir do sinal adquirido, a FFT e o centro geométrico do pico foram calculados com o auxílio de um programa desenvolvido com o software *MatLab*, de acordo com a metodologia descrita em Almeida (2001). A Figura 4.13 apresenta a interface gráfica deste programa.



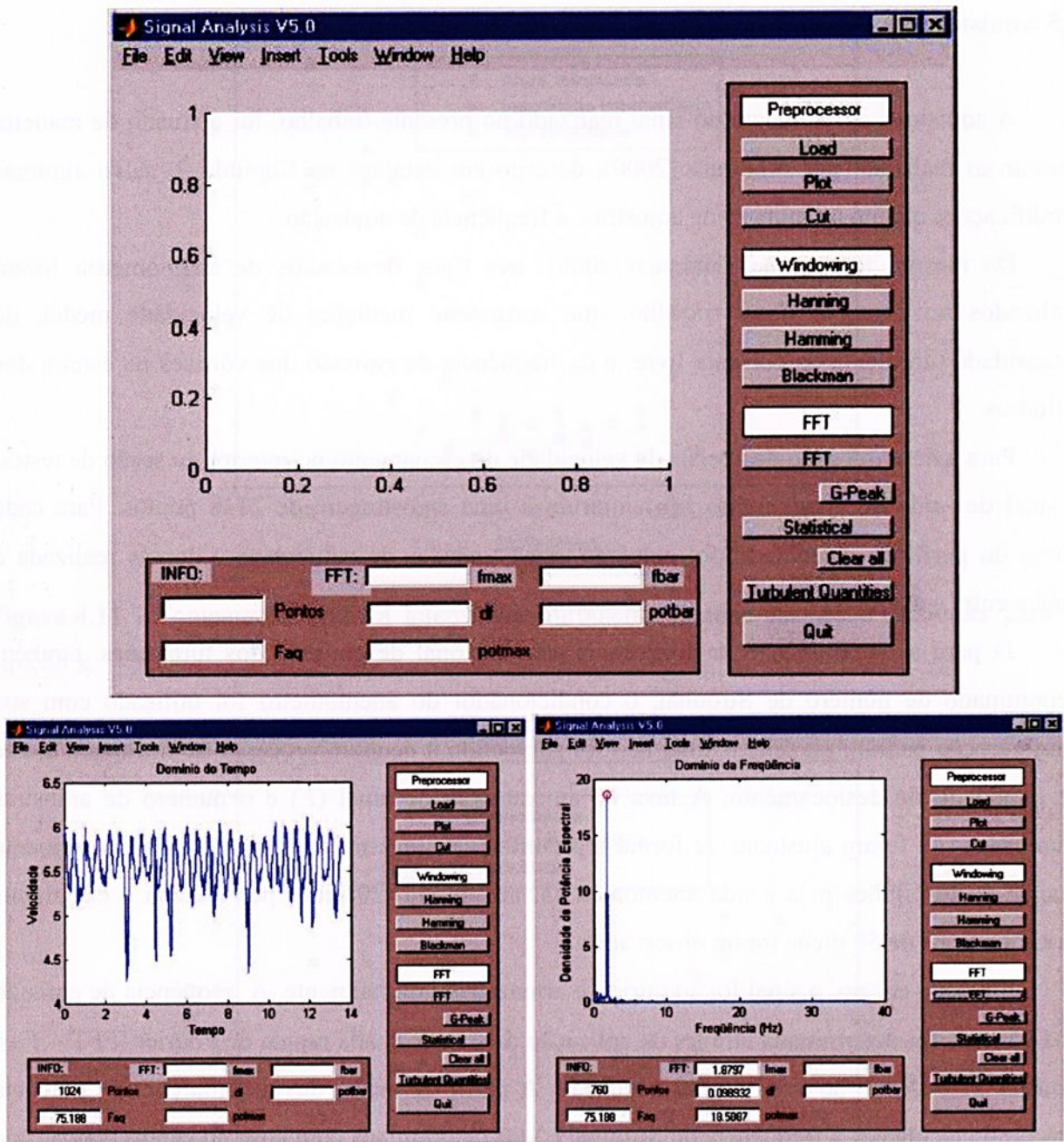


Figura 4.13 – Interface gráfica do programa desenvolvido com o software *Matlab*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no presente trabalho. Inicialmente são apresentados os resultados obtidos no túnel hidrodinâmico vertical para baixos números de Reynolds ($Re < 1000$). Os ensaios realizados no túnel hidrodinâmico tiveram como objetivo melhorar a compreensão qualitativa e quantitativa acerca do fenômeno de emissão de vórtices ao redor de corpos prismáticos não-aerodinâmicos. Os ensaios para números de Reynolds mais elevados (Re até 4×10^4) foram realizados num dispositivo especialmente concebido com o propósito de simular o princípio de funcionamento de um medidor de vazão do tipo vórtice. Para a ocasião foram testados inúmeras geometrias para o corpo gerador de vórtice com a finalidade de se obter aquela que fornecesse uma curva de desprendimento estável e constante numa ampla faixa de números de Reynolds.

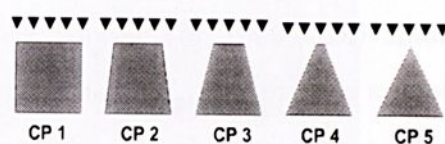
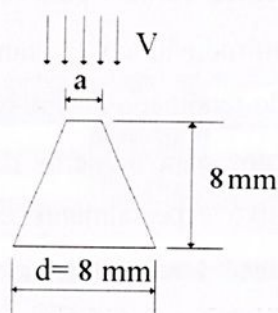
5.2 Túnel Hidrodinâmico Vertical

No presente trabalho, os resultados obtidos no túnel hidrodinâmico vertical possuem caráter puramente fenomenológico, ou seja, procura dar um pequena contribuição, qualitativa e quantitativa à difícil tarefa de compreensão dos complexos fenômenos associados à geração e desprendimento de vórtices ao redor de corpos com perfis não-aerodinâmicos. Tais resultados constituem um poderosa ferramenta com diversas aplicações em diferentes campos da engenharia, inclusive na validação de códigos computacionais.

Os ensaios de visualização foram conduzidos no túnel hidrodinâmico vertical, operado em modo contínuo, quando realizada a aquisição das imagens por intermédio da câmera de vídeo e operado em modo intermitente (*blow down*), quando realizado o ensaio fotográfico para captura das imagens estáticas. As imagens geradas no túnel hidrodinâmico foram capturadas utilizando uma câmera de vídeo JVC (modelo KY 27 B) de 3 CCD e 800 linhas de resolução horizontal e

também uma câmera fotográfica Nikon F4s SLR (*single lens reflex*). A observação, em *slow motion* com velocidade controlada, das imagens capturadas em fita magnética, permite a observação precisa do movimento dos vórtices na esteira produzida pelo corpo rombudo em estudo. A existência de uma placa *time code* permite a identificação precisa de todos os fotogramas da imagem capturada e, conseqüentemente, das variações de tempo. Desta forma, pode-se apenas pela análise das imagens determinar de forma precisa e rápida a frequência de desprendimento de vórtices.

A geometria básica dos cinco corpos de prova (CP) ensaiados no presente trabalho está representado na Figura 5.1.



CP # 1	$a = 8 \text{ mm}$ (quadrado)
CP # 2	$a = 6 \text{ mm}$
CP # 3	$a = 4 \text{ mm}$
CP # 4	$a = 2 \text{ mm}$
CP # 5	$a = 0 \text{ mm}$ (triângulo)

Figura 5.1 - Dimensões dos corpos de provas.

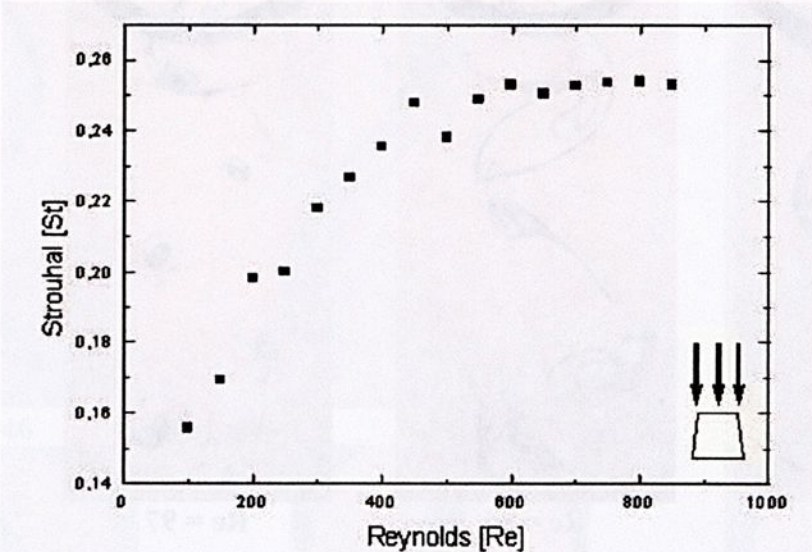
A rigor, qualquer dimensão do cilindro poderia ser utilizada como dimensão característica do escoamento. Entretanto, é sempre interessante que a escolha da dimensão característica não seja completamente arbitrária, pois esta deve ser representativa da física do problema. Em geral, a dimensão característica de um cilindro imerso perpendicularmente à corrente livre é definida com base na sua dimensão transversal ao escoamento e neste caso, a dimensão $d = 8 \text{ mm}$ dos corpos prismáticos, foi utilizada para o cálculo dos números de Reynolds e Strouhal.

A velocidade da corrente livre foi determinada com base na leitura da vazão, fornecido pelo medidor de vazão eletromagnético. A velocidade V_∞ foi calculada assumindo-se um perfil de velocidade uniforme no interior da seção de testes, ou seja,

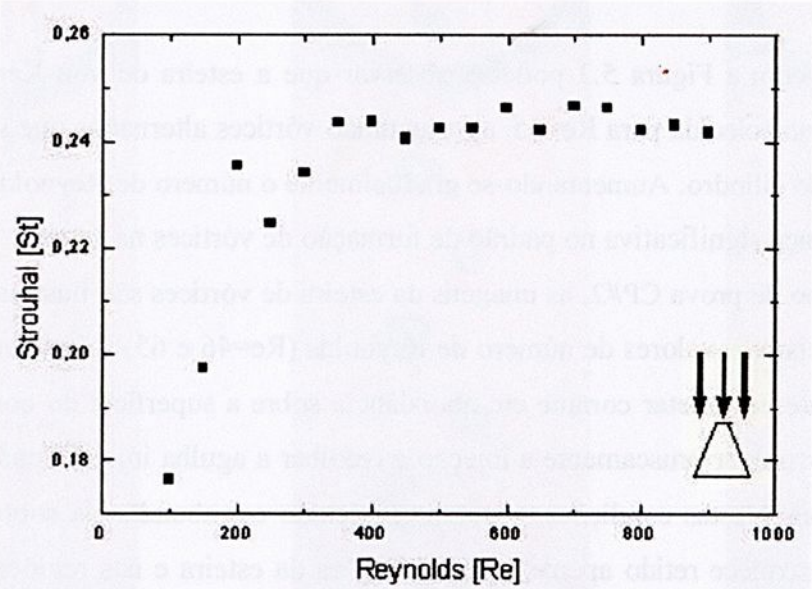
$$V_{\infty} = \frac{Q}{A_{ST}} \tag{5.1}$$

onde Q é a vazão volumétrica no interior da seção de testes e A_{ST} é a área transversal da seção de testes, imediatamente à montante da posição em que o cilindro foi instalado.

A Figura 5.2 mostra, como um exemplo, as curvas de Reynolds *versus* Strouhal para os corpos de prova CP#2 e CP#4, respectivamente.



(a) Curva de Reynolds x Strouhal para o corpo de prova CP#2.



(b) Curva de Reynolds x Strouhal para o corpo de prova CP#4.

Figura 5.2 - Comportamento de Reynolds *versus* Strouhal para os corpos de prova CP#2 e CP#4.

A Figura 5.3 mostra imagens da esteira de vórtices para diferentes números de Reynolds para o CP#4, obtidos com a técnica de injeção de corantes líquidos.

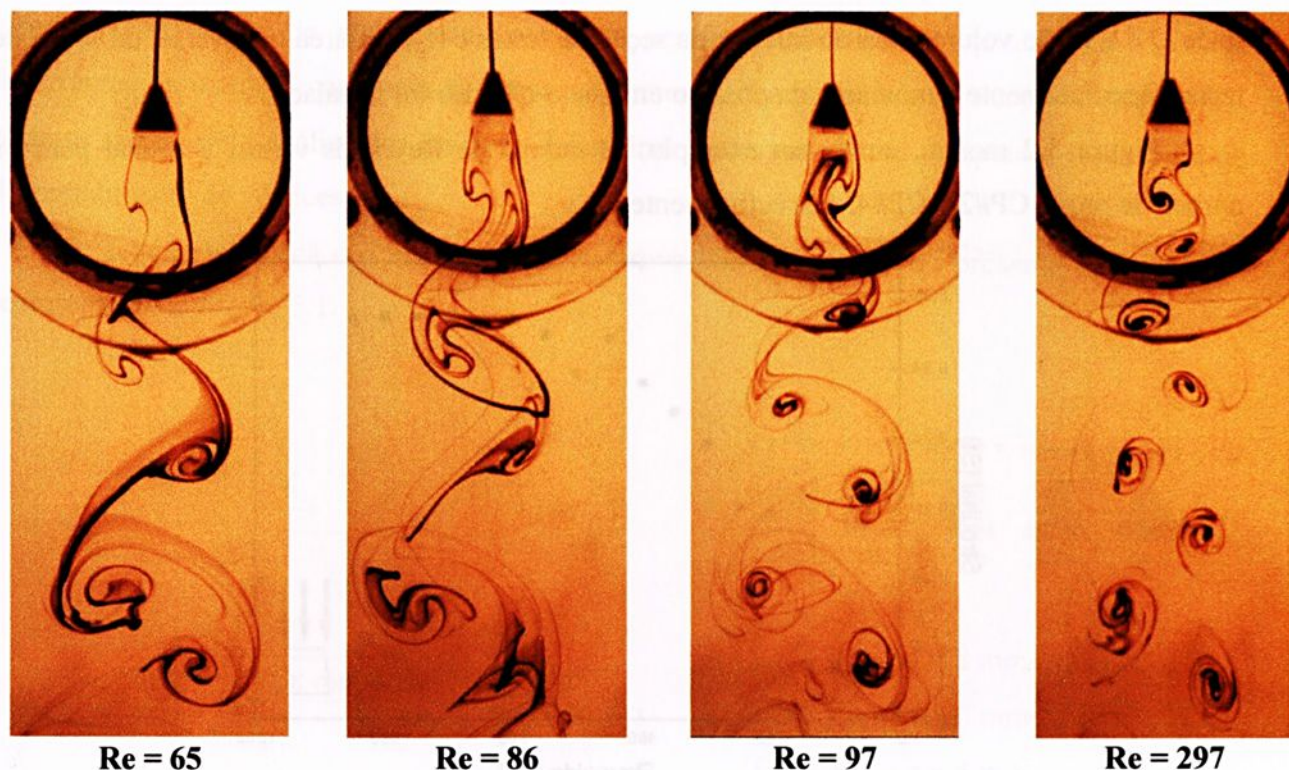


Figura 5.3 - Esteira de vórtices do cilindro prismático CP#4.

De acordo com a Figura 5.3 pode-se observar que a esteira de von Kármán encontra-se completamente estabelecida para $Re=65$, apresentando vórtices alternados que se desprendem de ambos os lados do cilindro. Aumentando-se gradualmente o número de Reynolds, verifica-se que não ocorre mudança significativa no padrão de formação de vórtices na esteira.

Para o corpo de prova CP#2, as imagens da esteira de vórtices são ilustradas na Figura 5.4. Neste caso, para baixos valores de número de Reynolds ($Re=46$ e 65) foi utilizada a técnica *dye wash*, que consiste em injetar corante em abundância sobre a superfície do corpo sólido e logo em seguida, interromper bruscamente a injeção e recolher a agulha injetora para junto da parede da seção de testes. Nestas condições, o corante, injetado em abundância sobre a superfície do corpo sólido, permanece retido apenas nas imediações da esteira e nas regiões de recirculação, sendo lavado rapidamente nas demais regiões do escoamento, onde a velocidade se mostra mais elevada. Este procedimento permite visualizar claramente por alguns segundos, a imagem da esteira. Para outros valores de número de Reynolds foi empregada a técnica do filete, que consiste basicamente na injeção contínua de um filete de tinta sobre a superfície do corpo sólido.

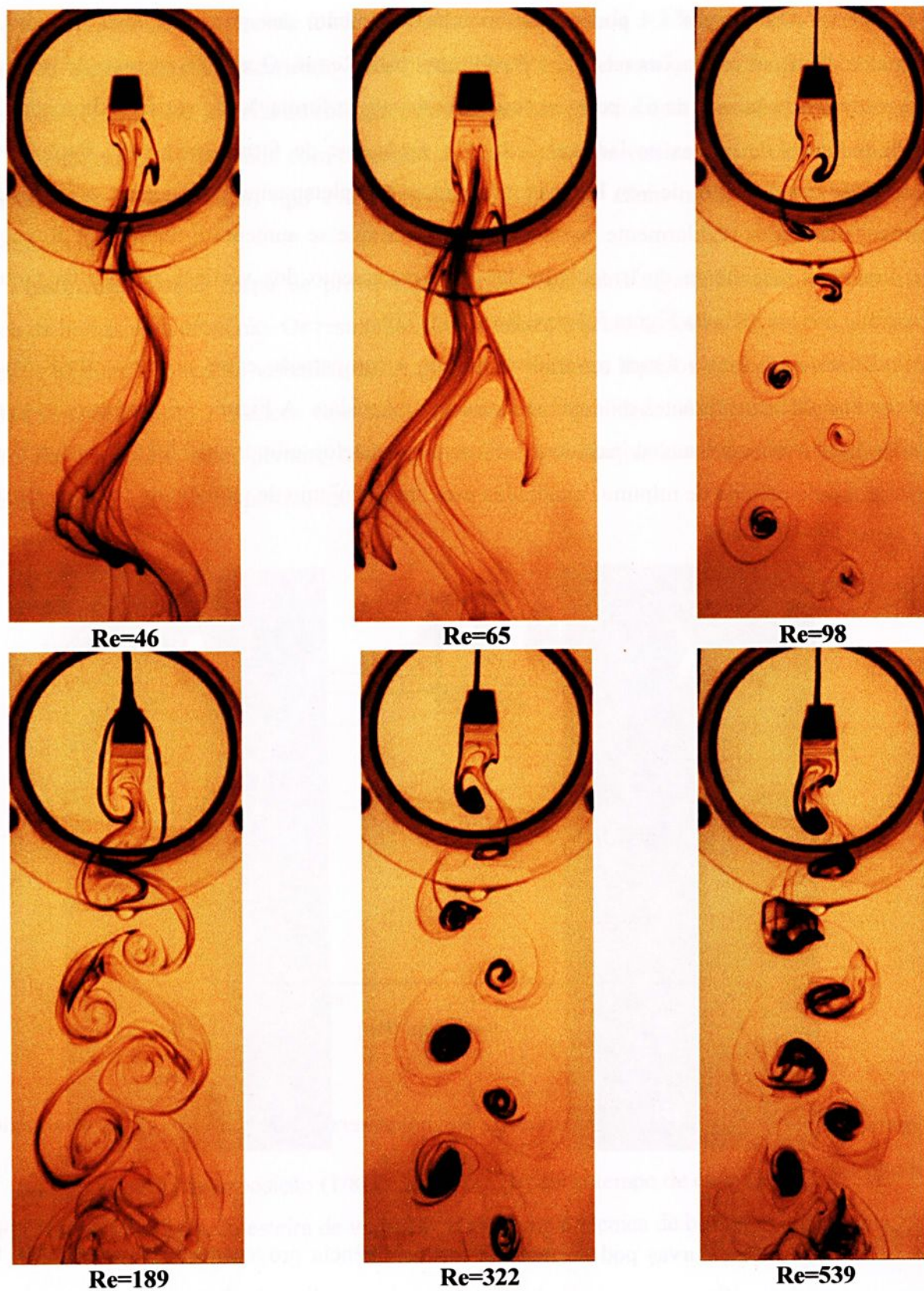


Figura 5.4 - Imagens da esteira de vórtices do cilindro prismático CP#2.

A partir da Figura 5.4 pode-se observar o surgimento das primeiras instabilidades, na forma de pequenas oscilações na esteira do cilindro, para $Re=46$. Quando o número de Reynolds atinge valores próximos de 65, pode-se observar o início da formação de vórtices alternados que se desprendem de ambos os lados do cilindro, ainda que de forma incipiente. Para $Re=98$, observa-se que a esteira de von Kármán encontra-se completamente estabelecida, apresentando vórtices alternados regularmente espaçados. À medida que se aumenta o número de Reynolds, verifica-se o surgimento de irregularidades no espaçamento dos vórtices na esteira, como é mostrado nas imagens da Figura 5.4 para $Re=322$ e 539 .

Ensaio adicionais foram realizados, visando a comparação entre as curvas de Reynolds *versus* Strouhal de diferentes modelos cilíndricos trapezoidais. A Figura 5.5 apresenta as curvas de Reynolds *versus* Strouhal para estes diferentes modelos cilíndricos. Estas curvas foram ajustadas pelo método de mínimos quadrados para um polinômio de grau 4 com um erro máximo de ajuste inferior a 4 %.

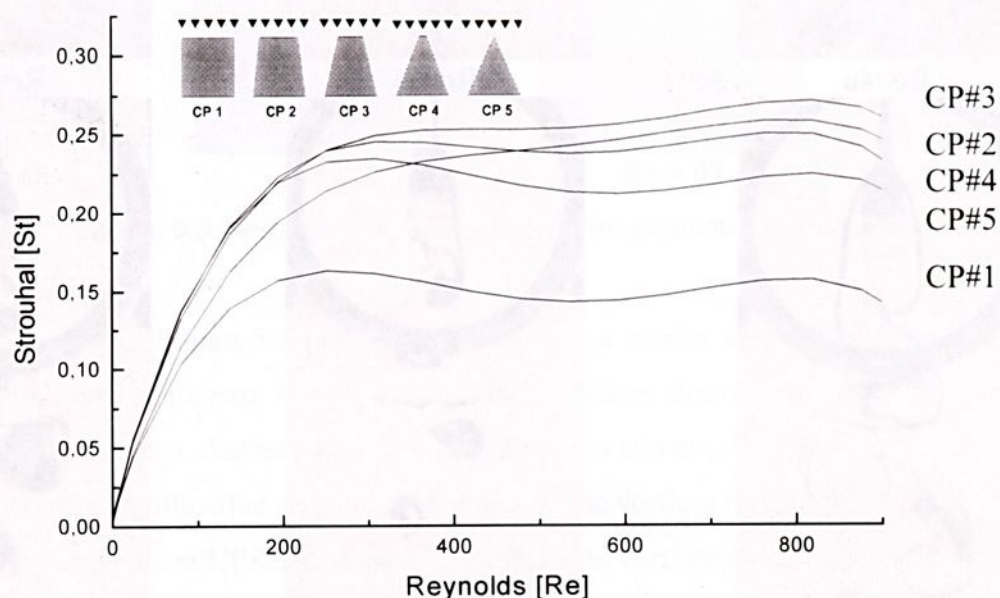


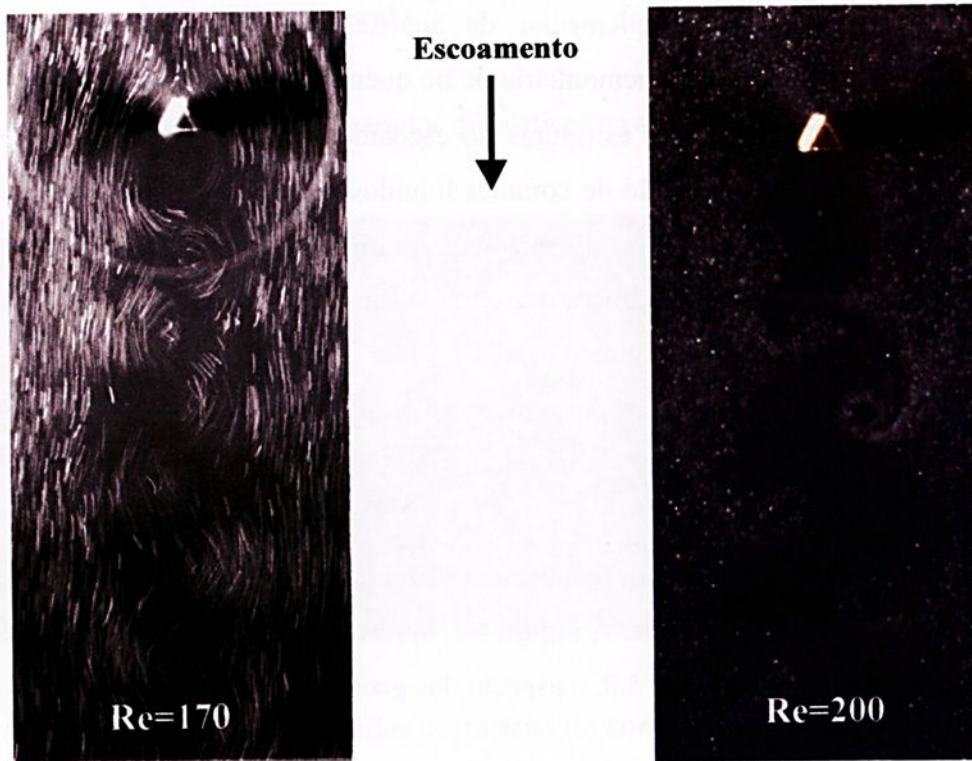
Figura 5.5 - Comparação entre as curvas de Reynolds *versus* Strouhal para diferentes modelos cilíndricos.

A partir destas curvas pode-se notar a forte influência provocada pela presença da face superior, que intensifica o mecanismo de formação e desprendimento de vórtices.

A velocidade do escoamento foi determinada com um erro de $\pm 3\%$ através de um sistema de medida eletromagnético fabricado pela YOKOGAWA. A determinação da frequência de emissão de vórtices pelo método de contagem de fotogramas permite uma precisão de $\pm 4\%$.

A iluminação foi realizada com o auxílio de dois conjuntos verticais com cinco lâmpadas incandescentes (150 W cada) tipo *Photo Flood* da G.E., que aliam baixo custo a uma boa temperatura de cor.

Finalmente, para o corpo de prova CP#5 foram realizados alguns ensaios utilizando a técnica de bolhas de hidrogênio. Os resultados destes testes, representados na Figura 5.6, permite comparar as duas técnicas de visualização. A injeção de corantes líquidos consiste numa técnica de fácil implementação e fornece resultados de excelente qualidade. A técnica de bolhas de hidrogênio, por outro lado, permite também a análise quantitativa empregando a técnica de velocimetria por imagens de partículas.



(a) longo tempo de exposição (1/8s).

(b) curto tempo de exposição (1/125s).

Figura 5.6 - Imagens da esteira de vórtices obtidas com a técnica de bolhas de hidrogênio.

5.3 Módulo para Teste dos Corpos Geradores de Vórtices

Neste item, referente aos resultados obtidos no módulo experimental construído, os dados foram apresentados em duas partes: a primeira, contém os resultados qualitativos de visualização, obtidos pela técnica de injeção de corantes líquidos e a segunda parte, os resultados quantitativos (curva $Re \times St$) obtidos por anemometria de fio quente.

5.3.1 Resultados Qualitativos de Visualização

No presente trabalho, a visualização de escoamentos em meio hidrodinâmico foi amplamente utilizada em três situações distintas: como ferramenta de análise qualitativa identificando diferentes padrões do escoamento, como mecanismo de apoio à realização de medidas experimentais auxiliando no correto posicionamento das sondas anemométricas e, finalmente, como instrumento complementar de análise para facilitar a interpretação de resultados quantitativos obtidos por anemometria de fio quente.

Para efetuar a visualização das estruturas do escoamento formadas à partir do corpo de prova foi utilizada a técnica de injeção de corantes líquidos, devido sobretudo, à sua facilidade de implementação e ao seu baixo custo operacional. As imagens das estruturas do escoamento foram capturadas por meio de uma câmera digital Mavica – Sony CD em 1600x1200 pixel (2 Mega pixels) e em 8 bits (256 tons de cinza).

O dispositivo experimental utilizado para gerar o escoamento a ser visualizado, consiste num módulo experimental, que simula o princípio de funcionamento de um medidor de vazão do tipo vórtice.

Os ensaios de visualização foram realizados utilizando-se a técnica de injeção de corantes líquidos à montante do modelo de teste. A Figura 5.7, apresenta a disposição do corpo gerador de vórtices na seção de testes e a Figura 5.8, o aspecto das geometrias testadas.

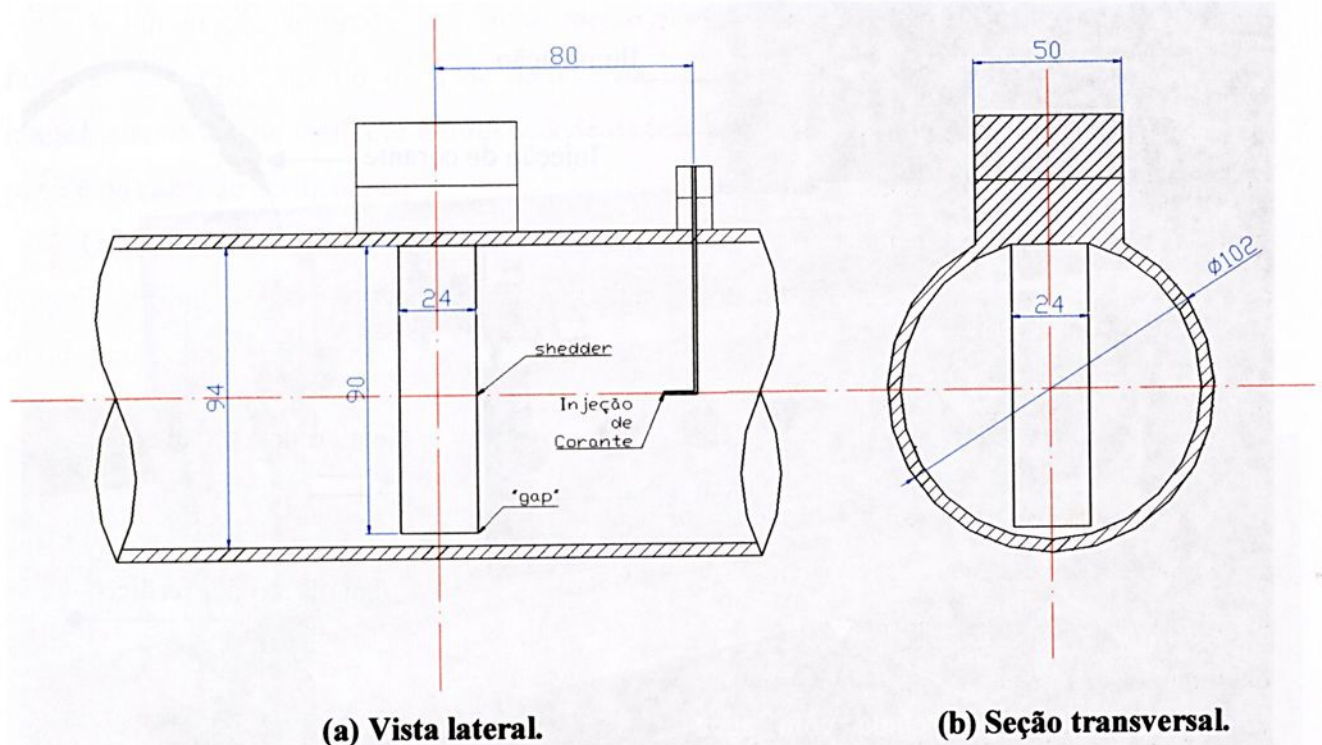
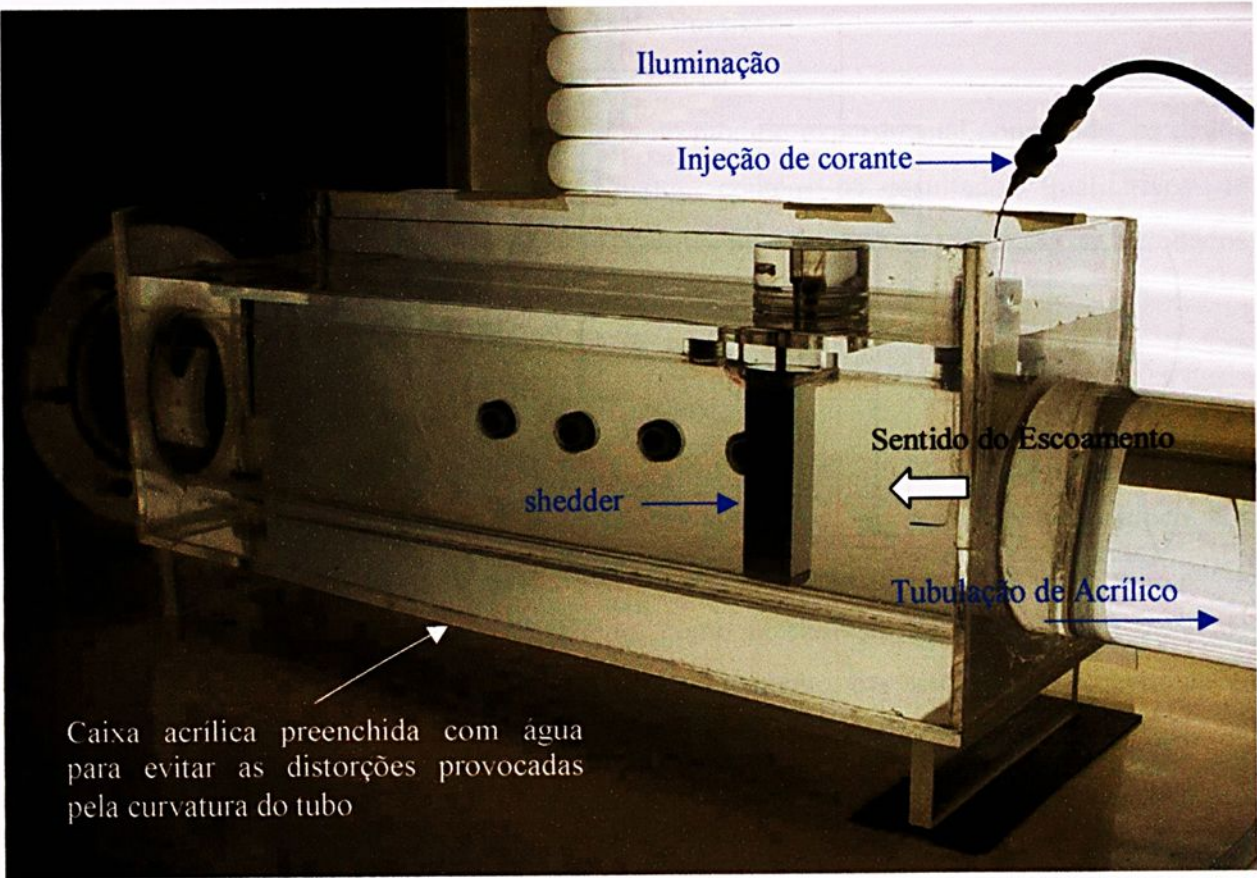


Figura 5.7 - Disposição do corpo gerador de vórtices na seção de testes (dimensões em mm).

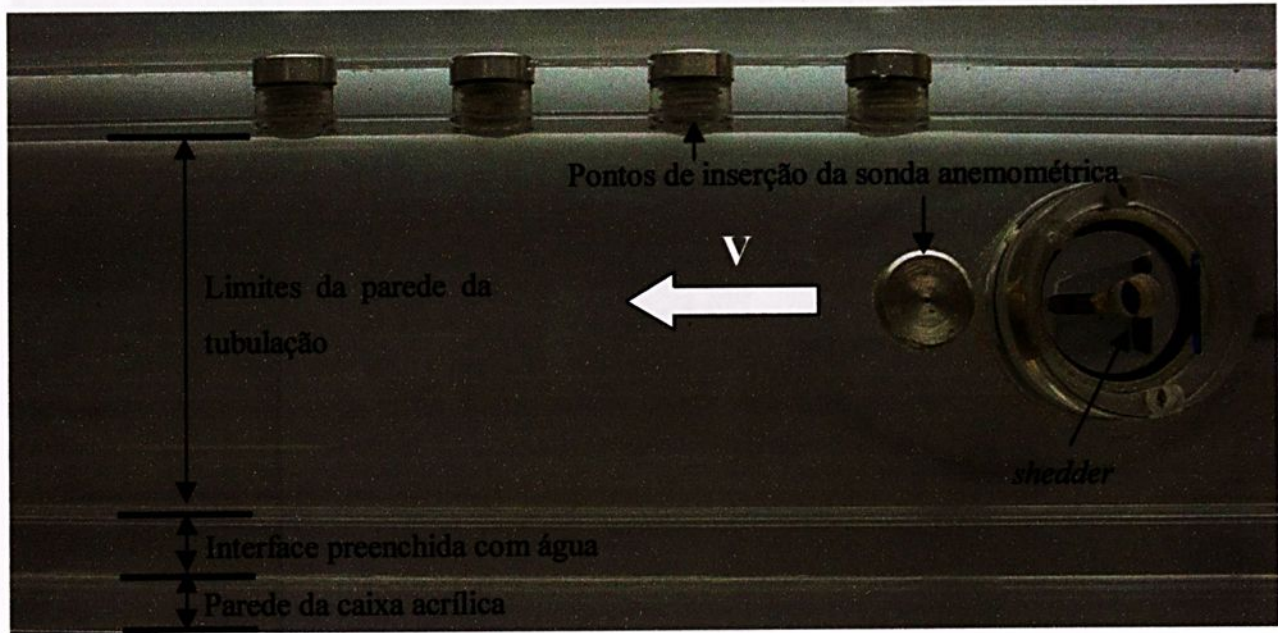


Figura 5.8 – Aspecto das geometrias do corpo gerador de vórtices.

Já a Figura 5.9 apresenta o aspecto da seção de testes para a realização da visualização de escoamento.



(a) Vista Lateral.



(b) Vista Superior.

Figura 5.9 - Aspecto da seção de testes no momento da aquisição dos resultados de visualização.

A iluminação utilizada nos experimentos, consiste num conjunto de oito lâmpadas fluorescentes, tipo “luz do dia”, de 40W cada, que produz uma iluminação difusa de alta intensidade. A fim de melhorar a difusividade da luz, foi colocada uma folha de papel vegetal na parede da caixa de acrílico.

Os primeiros ensaios de visualização foram realizados na presença de uma abertura (“gap”), existente entre o *shedder* e a parede do tubo (ver Figura 5.7). Os resultados então obtidos com um cilindro circular são ilustrados nas Figuras 5.10, 5.12 e 5.13.



Figura 5.10 - Visualização da esteira de vórtices de von Kármán a jusante de um cilindro circular com fenda (vista superior).

A Figura 5.10 ilustra a formação da esteira de vórtices de von Kármán à jusante de um cilindro circular para $Re \approx 6000$. Analisando esta figura, pode-se notar que ocorre a rápida dissipação dos vórtices no escoamento, devido aos efeitos da parede. Neste caso, a injeção de corante foi efetuada a meia altura do corpo de prova. As dimensões dos corpos de provas encontram-se detalhadas na Figura 5.11.

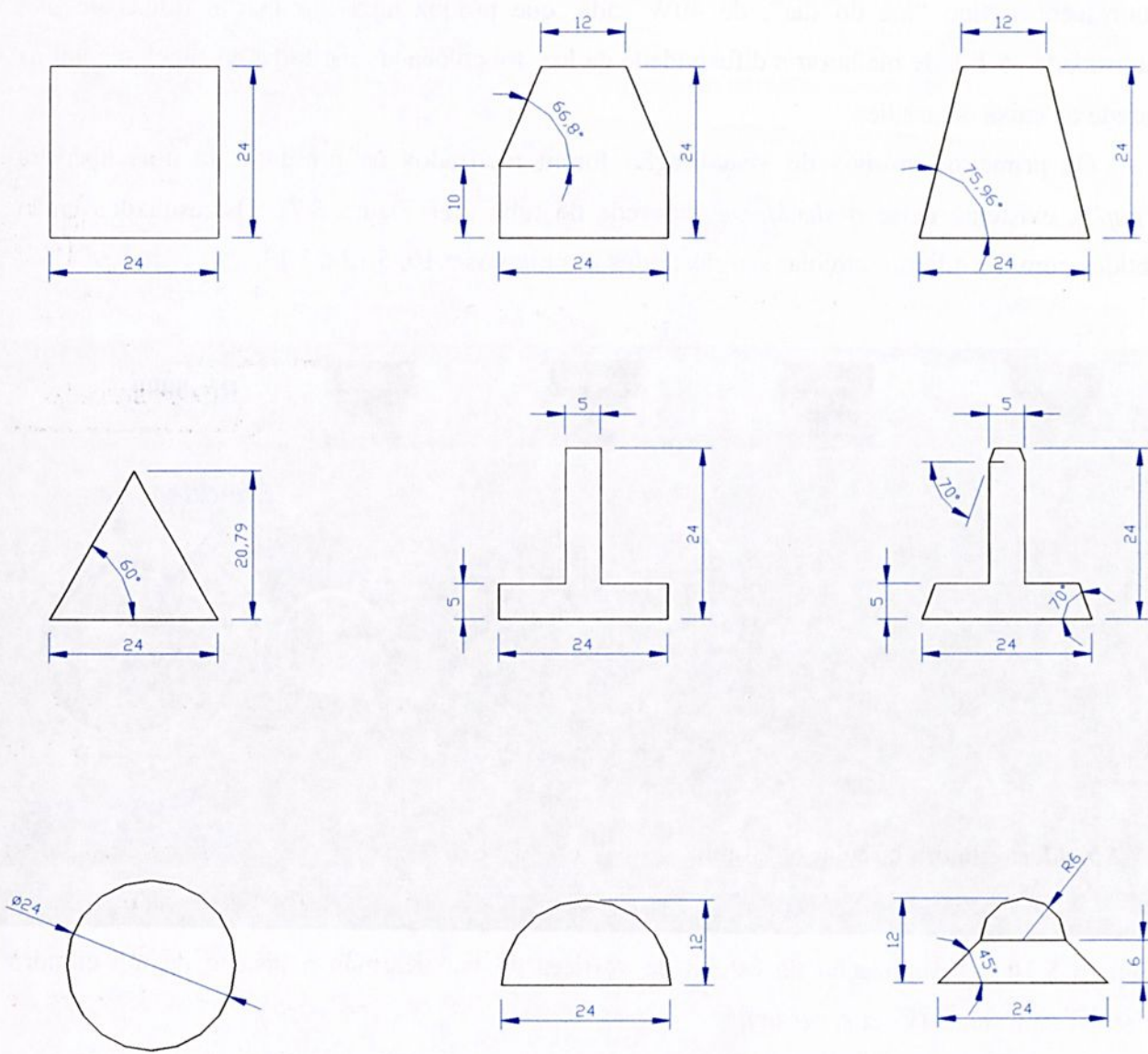


Figura 5.11 - Dimensões dos corpos de prova (em mm).



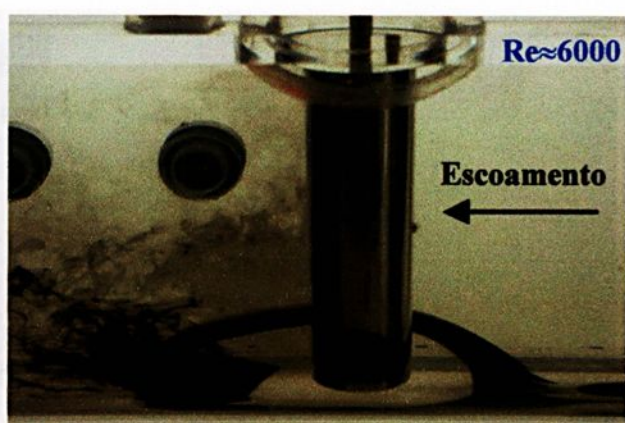
Figura 5.12 - Visualização do vórtice de ferradura a jusante de um cilindro circular com fenda (vista superior).

A Figura 5.12 por sua vez, ilustra o vórtice de ferradura formado ao redor da base do cilindro circular. Neste caso, a injeção de corante foi efetuada próximo a parede inferior da tubulação.

O escoamento ao redor da base de um cilindro consiste de duas estruturas básicas de escoamento: uma delas é o então chamado vórtice de ferradura “*horseshoe-vortex*” que é formado a montante do cilindro e o outro, é o padrão de escoamento formado nas suas laterais, os “*lee-side vórtices*”. O vórtice de ferradura é causado pela rotação no escoamento de entrada: a camada limite no leito, a montante do cilindro, submetido a uma separação tridimensional sob a influência do gradiente de pressão adverso produzido pelo cilindro e a camada limite separada, se enrola para formar um vórtice girando ao redor deste cilindro que viaja corrente abaixo. Os “*lee-side vórtices*” por outro lado, são causados pela rotação na camada limite sob a superfície do cilindro: as camadas cisalhantes que se desprendem a partir das laterais do cilindro enrolam-se para formar estes vórtices. Estes efeitos do escoamento podem provocar a erosão do cilindro e podem reduzir a estabilidade de estruturas marinhas suportadas por pilares tais como, plataformas e pontes, ocasionando então a sua falha (Sumer *et al.*, 1997).



(a) Vista superior.



(b) Vista lateral.

Figura 5.13 - Visualização do vórtice de ferradura a jusante de um cilindro circular com fenda ($Re \approx 6000$).

Já a Figura 5.13, ilustra o vórtice de ferradura formado ao redor da base do cilindro circular para a injeção de corante efetuada junto a parede inferior da tubulação. A Figura 5.14 por sua vez, mostra a influência da abertura (fenda) existente entre o corpo gerador de vórtice e a parede do tubo.

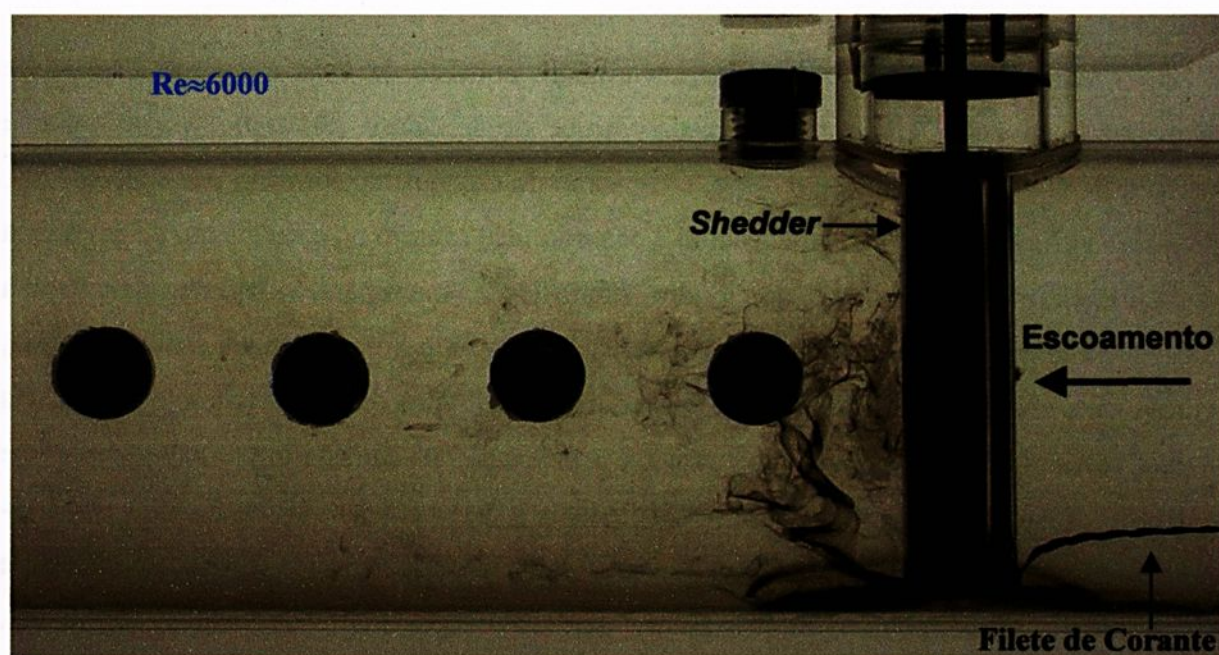


Figura 5.14 - Influência do “gap” no escoamento a jusante de um cilindro circular (vista lateral).

Analisando esta figura, pode-se observar a influência desta fenda no escoamento. O filete de tinta injetado à montante do corpo de prova passa entre esta abertura e forma uma forte zona de recirculação imediatamente à jusante do corpo gerador de vórtice, influenciando deste modo no desprendimento de vórtices, provocando uma tridimensionalização da esteira.

As Figuras 5.15, 5.16 e 5.17, mostram os resultados de visualização obtidos com um cilindro trapezoidal. Para estes casos, a injeção de corante foi efetuada de modo semelhante a aquela do cilindro circular ou seja, para a visualização da esteira de vórtices a agulha foi posicionada a meia altura do corpo de prova enquanto que, para a visualização do vórtice de ferradura, a injeção de corante foi efetuada próximo a parede inferior da tubulação.

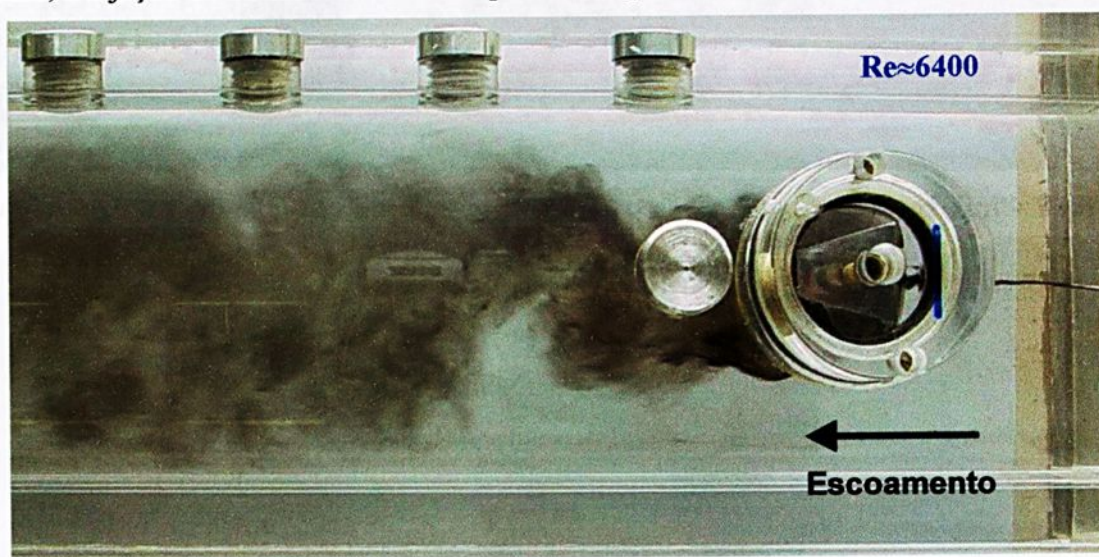
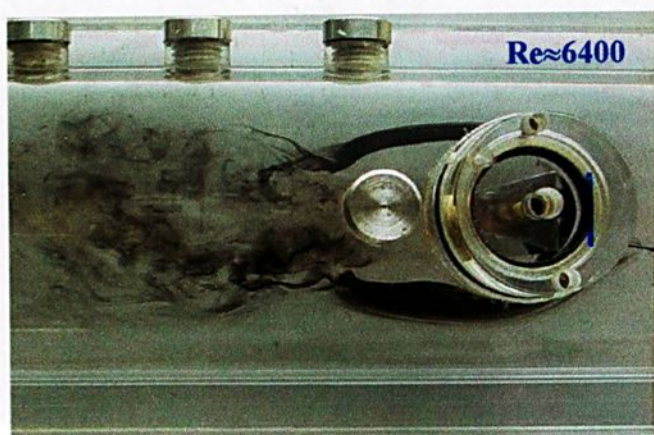
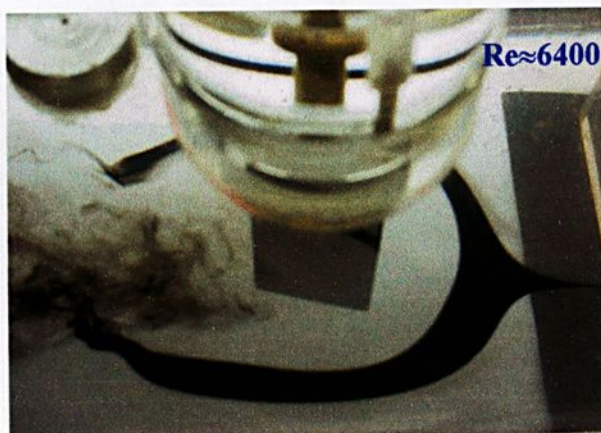


Figura 5.15 - Esteira de vórtices formado à jusante de um cilindro trapezoidal com fenda (vista superior).



(a) Vista superior.



(b) Vista lateral.

Figura 5.16 - Visualização do vórtice de ferradura a jusante de um cilindro trapezoidal com fenda ($Re \approx 6400$).



Figura 5.17 - Influência do “gap” no escoamento a jusante de um cilindro trapezoidal (vista lateral).

As Figuras 5.18, 5.19 e 5.20, mostram os resultados de visualização obtidos com um cilindro quadrado, para $Re \approx 6100$.

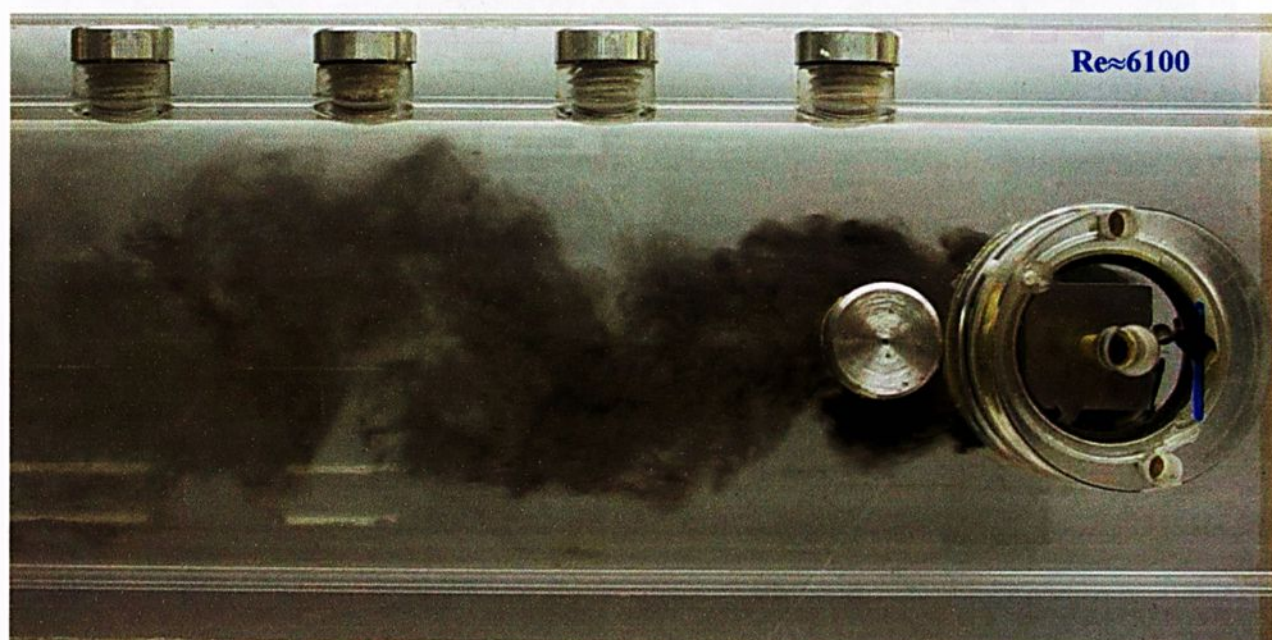
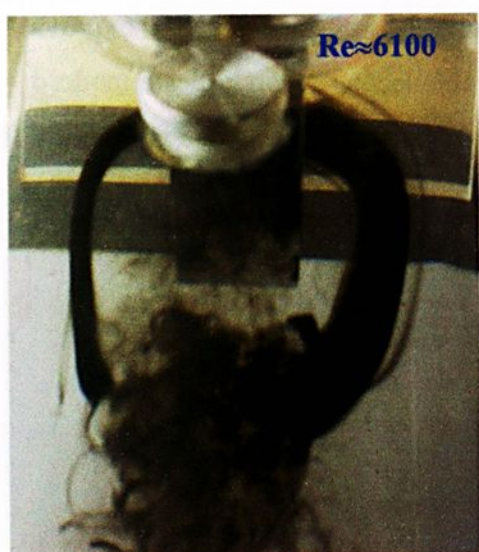


Figura 5.18 - Esteira de vórtices formado à jusante de um cilindro quadrado com fenda (vista superior).



(a) Vista posterior.



(b) Vista lateral.

Figura 5.19 - Visualização do vórtice de ferradura a jusante de um cilindro quadrado com fenda.

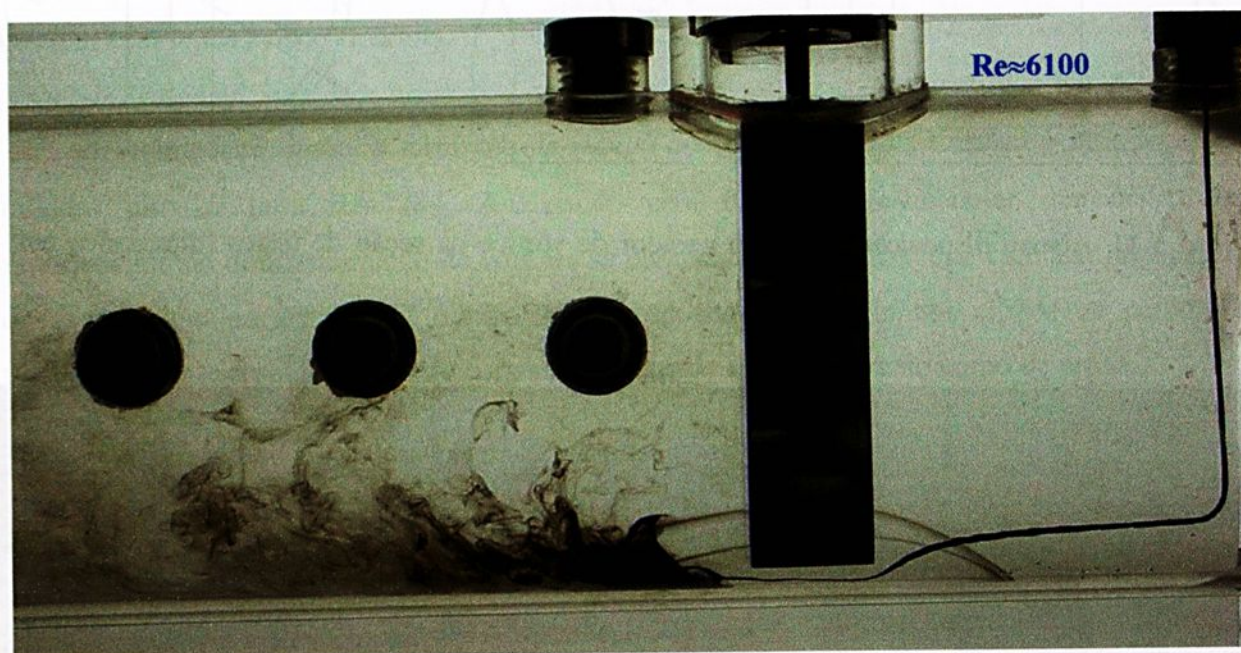


Figura 5.20 - Influência do “gap” no escoamento a jusante de um cilindro quadrado (vista lateral).

É interessante ressaltar que nos medidores de vazão do tipo vórtice comerciais avaliados no presente trabalho não foi observado esta abertura entre o corpo gerador de vórtice e a parede inferior do corpo do medidor. Nestes medidores, o *shedder* prolonga-se até a parede inferior do corpo do medidor ou ainda, em outros casos (diga-se outros fabricantes) existe um suporte para o *shedder*, com seção transversal circular, que elimina esta abertura.

Visando eliminar os efeitos provocados por esta abertura (“gap”), os corpos de prova tiveram o seu comprimento estendido até a parede inferior da tubulação, evitando deste modo o fluxo de água por esta abertura. Esta extensão foi efetuada com resina poliéster. A disposição do corpo gerador de vórtice na seção de testes e as características dos corpos estendidos são ilustrados nas Figuras 5.21 e 5.22, respectivamente.

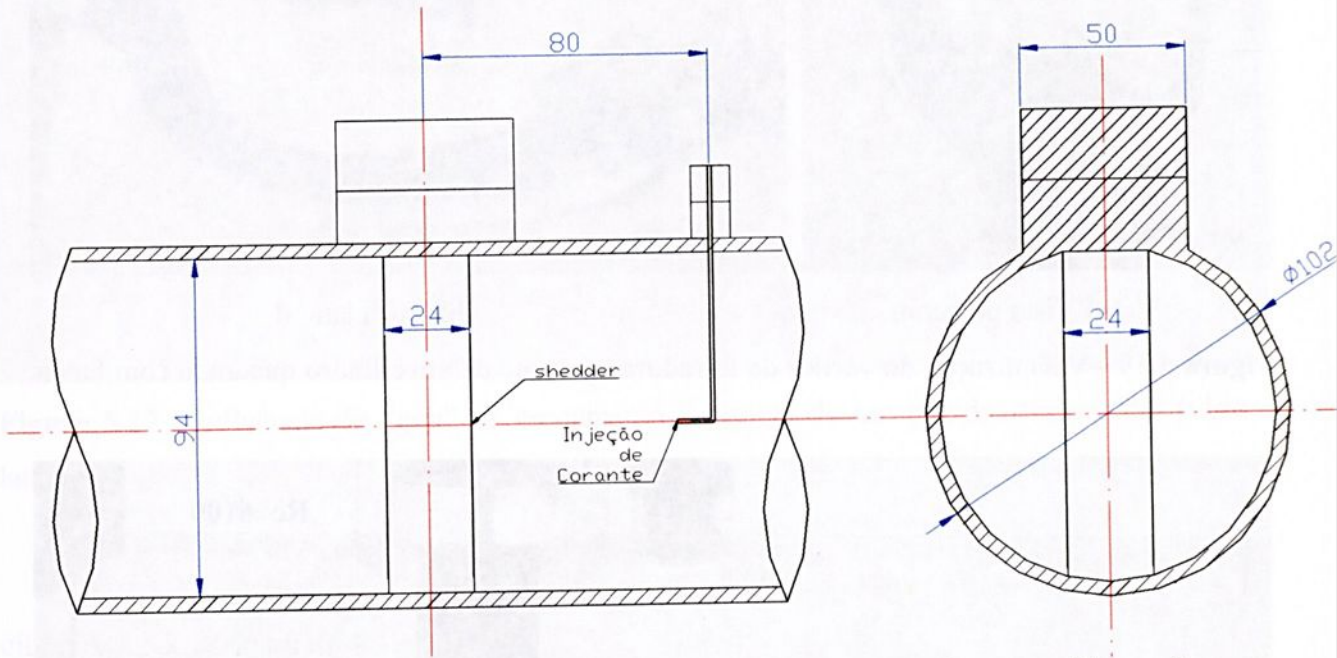


Figura 5.21 – Nova disposição do corpo gerador de vórtice na seção de testes (dimensões em mm).

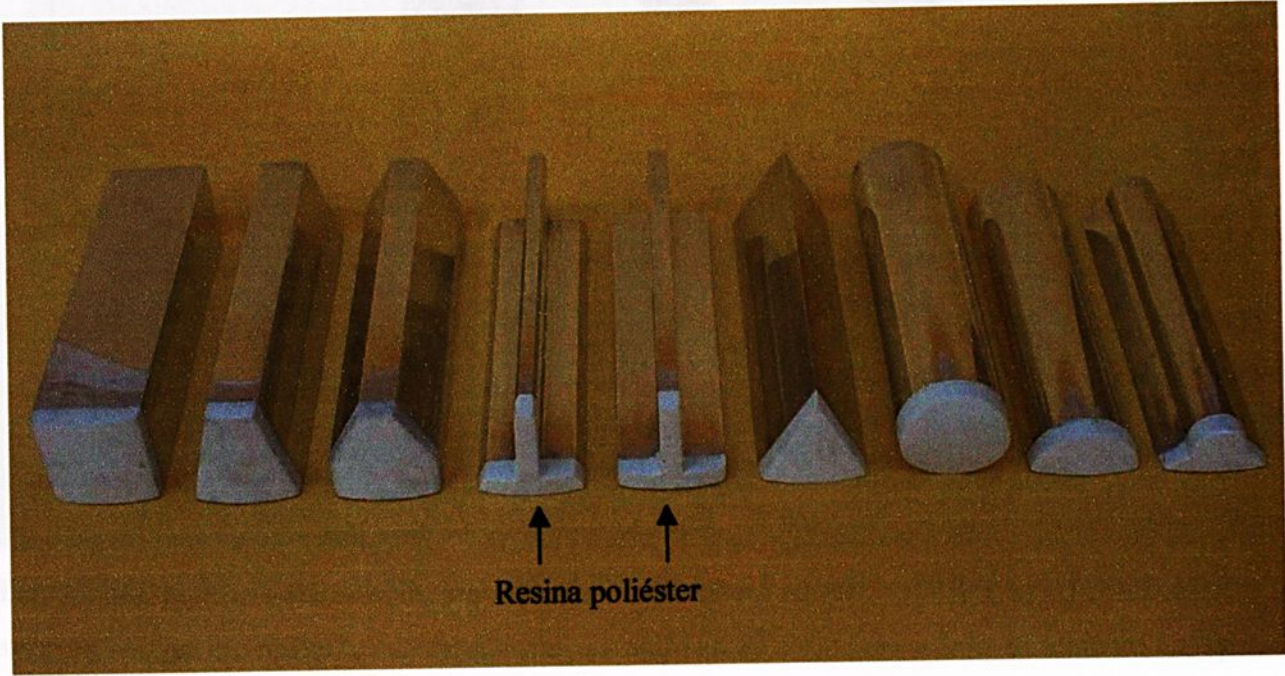


Figura 5.22 - Corpos de prova remodelados.

Os resultados de visualização então obtidos na ausência da fenda são ilustrados nas Figuras 5.23 e 5.24.

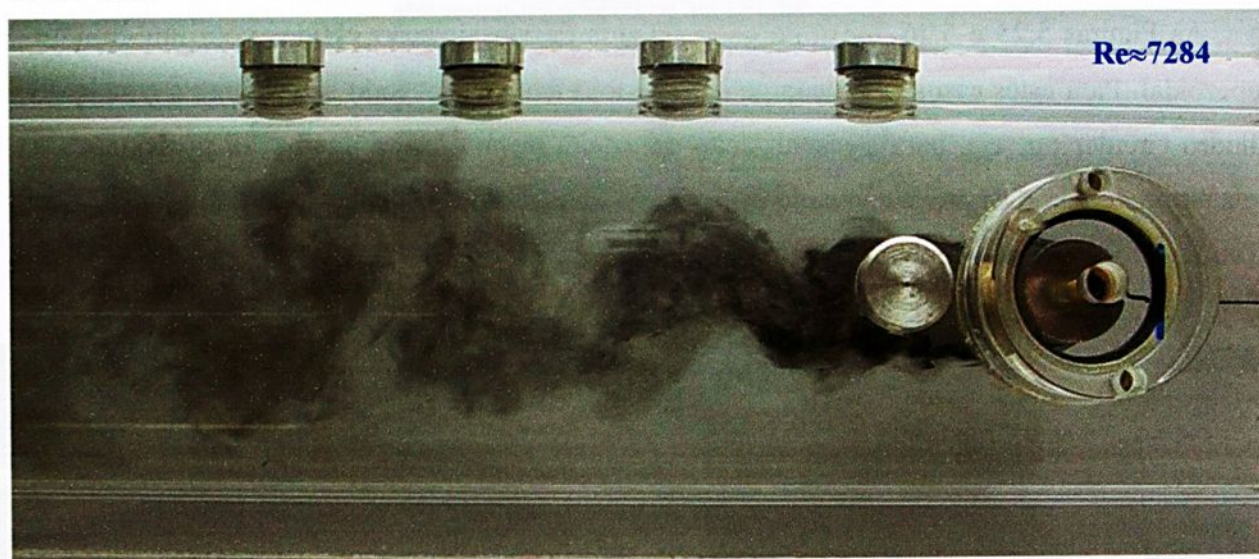
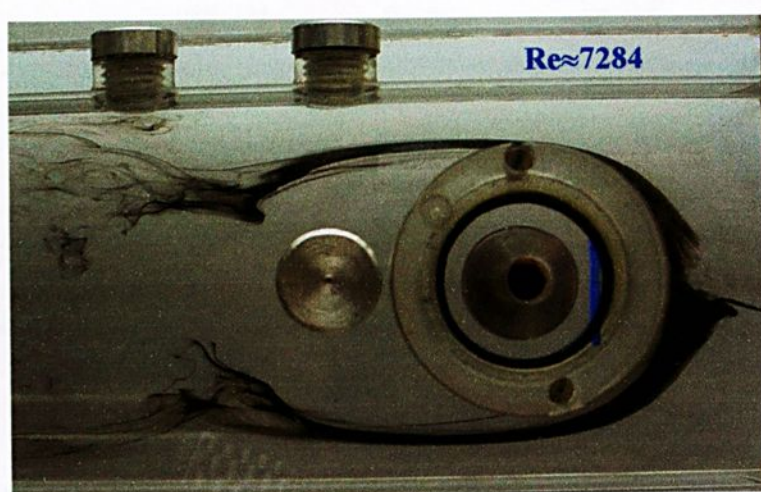


Figura 5.23 - Visualização da esteira de vórtices de von Kármán a jusante de um cilindro circular sem fenda (vista superior).

A Figura 5.23 ilustra a formação da esteira de vórtices de von Kármán à jusante de um cilindro circular para $Re \approx 7284$. Analisando esta figura, pode-se notar que ocorre um retardamento no desprendimento de vórtices se comparado ao mesmo teste efetuado na ausência da fenda, além de sua rápida dissipação no escoamento, devido aos efeitos da parede da tubulação. Neste caso, a injeção de corante foi efetuada a meia altura do corpo de prova.



(a) Vista superior.



(b) Vista superior frontal.

Figura 5.24 - Visualização do vórtice de ferradura a jusante de um cilindro circular sem fenda.

Já a Figura 5.24, ilustra o vórtice de ferradura formado ao redor da base do cilindro circular para a injeção de corante efetuada junto a parede inferior da tubulação.

As Figuras 5.25 e 5.26, mostram os resultados de visualização obtidos com um cilindro trapezoidal. Para estes casos, a injeção de corante foi efetuada de modo semelhante a aquela do cilindro circular ou seja, para a visualização da esteira de vórtices a agulha foi posicionada a meia altura do corpo de prova enquanto que para a visualização do vórtice de ferradura, a injeção de corante foi efetuada próximo a parede inferior da tubulação.



Figura 5.25 - Esteira de vórtices formado à jusante de um cilindro trapezoidal, sem fenda (vista superior).

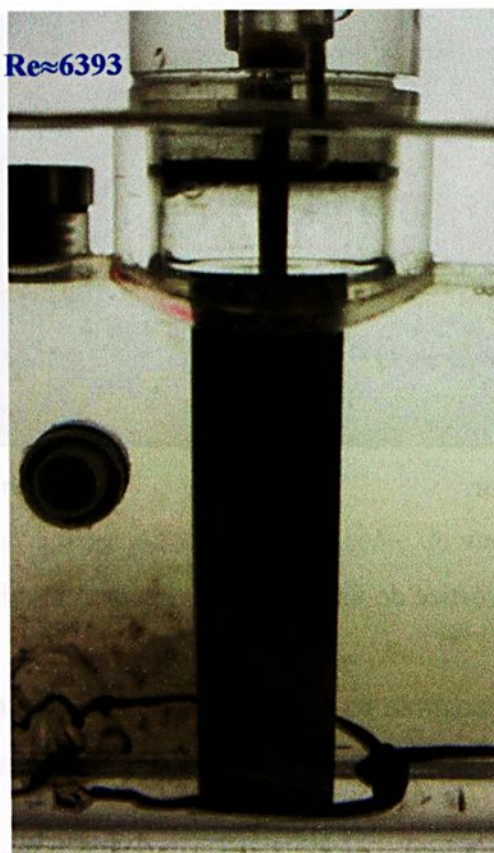


Figura 5.26 - Visualização do vórtice de ferradura a jusante de um cilindro trapezoidal sem fenda (vista lateral).

As Figuras 5.27 e 5.28, mostram os resultados de visualização obtidos com um cilindro quadrado.

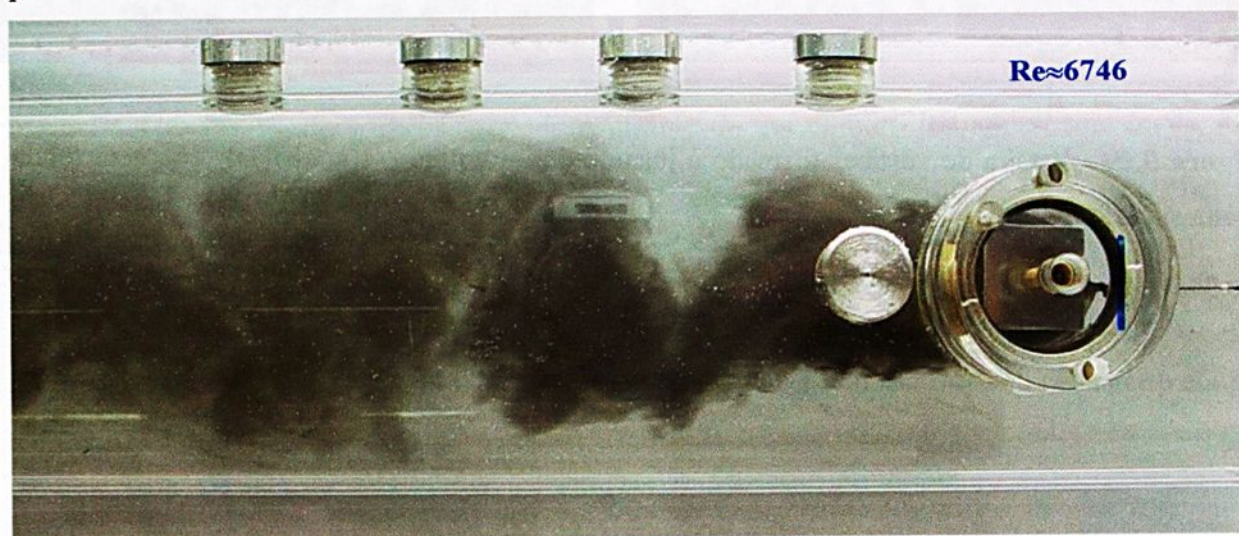
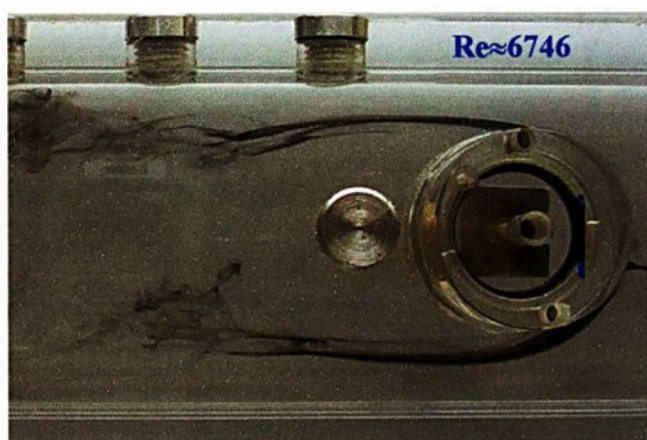
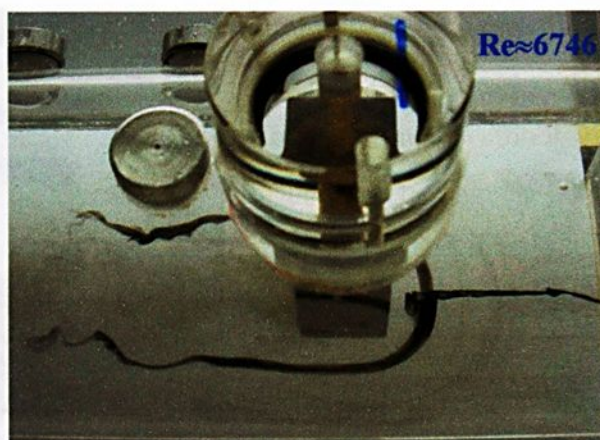


Figura 5.27 - Esteira de vórtices formado à jusante de um cilindro quadrado, sem fenda (vista superior).



(a) Vista superior.



(b) Vista lateral.

Figura 5.28 - Visualização do vórtice de ferradura a jusante de um cilindro quadrado sem fenda.

As Figuras 5.29 e 5.30, mostram os resultados de visualização obtidos com um cilindro trapezoidal reto para diferentes números de Reynolds.



Figura 5.29 - Esteira de vórtices formado à jusante de um cilindro trapezoidal reto, sem fenda (vista superior).

A medida que ocorre o aumento do número de Reynolds no escoamento, observa-se a rápida dissipação dos vórtices no escoamento, provocados pelo forte efeito da parede do tubo.



Figura 5.30 - Visualização do vórtice de ferradura a jusante de um cilindro trapezoidal reto, sem fenda, em função de Reynolds (vista superior).

As Figuras 5.31 e 5.32, mostram os resultados de visualização obtidos com um cilindro triangular para diferentes números de Reynolds.



Figura 5.31 - Esteira de vórtices formado à jusante de um cilindro triangular, sem fenda, em função de Reynolds (vista superior).



Figura 5.32 - Visualização do vórtice de ferradura a jusante de um cilindro triangular, sem fenda, em função de Reynolds (vista superior).

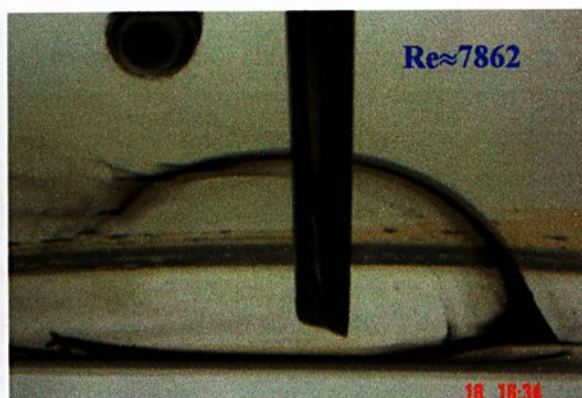
As Figuras 5.33 e 5.34, mostram os resultados de visualização obtidos com o cilindro denominado de otimizado.



Figura 5.33 - Esteira de vórtices formado à jusante de um cilindro otimizado, sem fenda (vista superior).



(a) Vista superior.



(b) Vista lateral.

Figura 5.34 - Visualização do vórtice de ferradura a jusante de um cilindro otimizado, sem fenda.

As Figuras 5.35 e 5.36, mostram os resultados de visualização obtidos com um cilindro com perfil T.

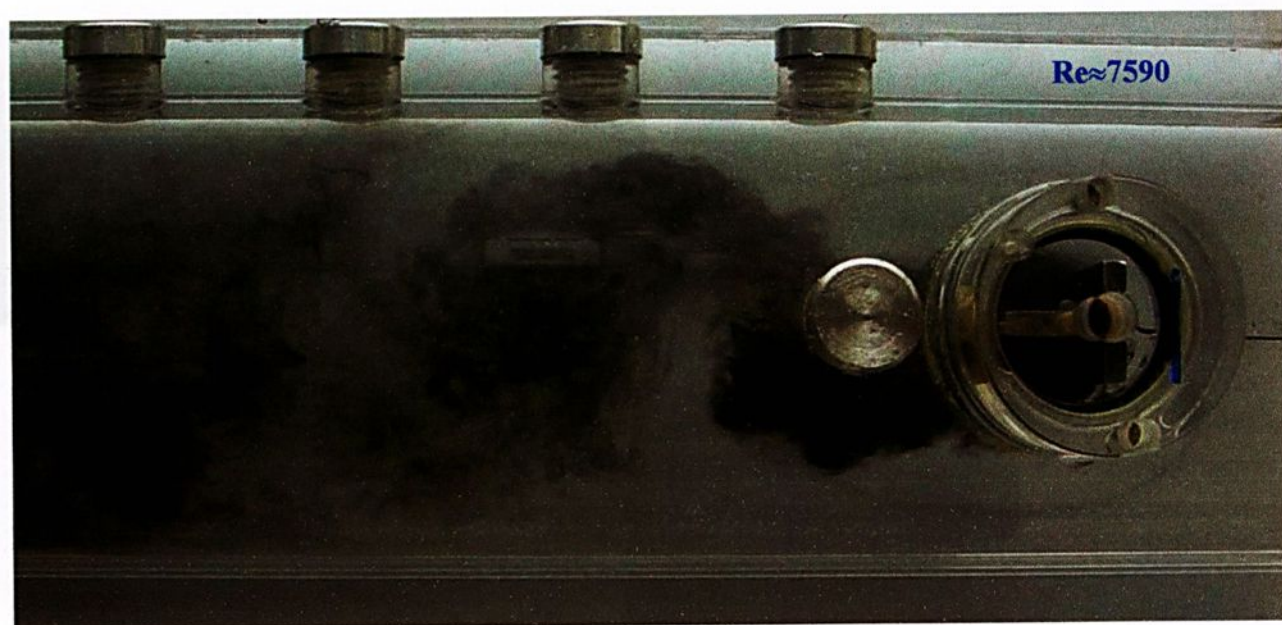
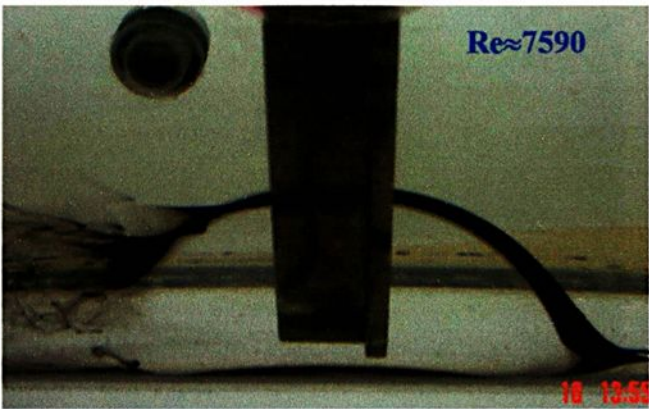


Figura 5.35 - Esteira de vórtices formado à jusante de um cilindro com perfil T, sem fenda (vista superior).



(a) Vista superior.



(b) Vista lateral.

Figura 5.36 - Visualização do vórtice de ferradura a jusante de um cilindro com perfil T, sem fenda.

As Figuras 5.37 e 5.38, mostram os resultados de visualização obtidos com um cilindro com perfil T chanfrado para diferentes números de Reynolds.



Figura 5.37 - Esteira de vórtices formado à jusante de um cilindro com perfil T chanfrado, sem fenda, em função de Reynolds (vista superior).

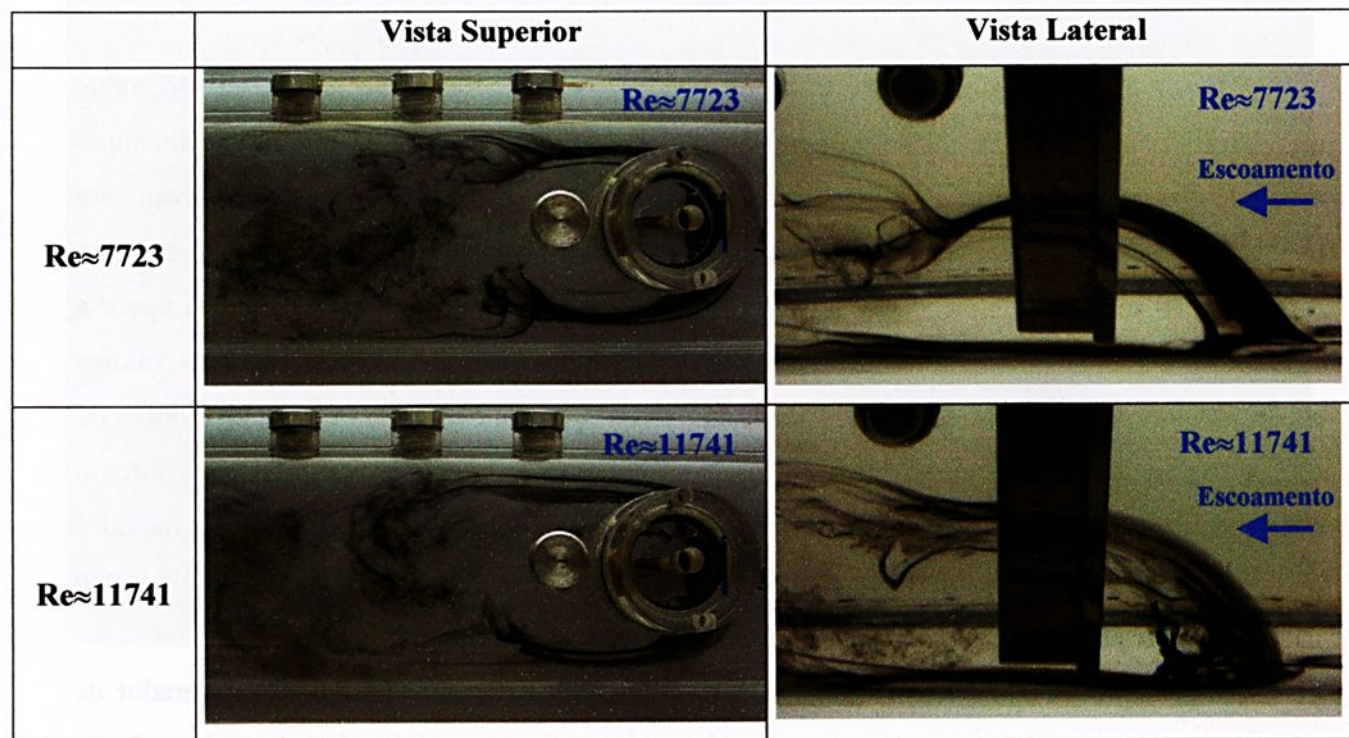


Figura 5.38 - Visualização do vórtice de ferradura a jusante de um cilindro com perfil T chanfrado, sem fenda, em função de Reynolds.

A partir dos resultados de visualização, obtidos nos ensaios realizados na ausência da fenda, pode-se observar nitidamente que ocorre a produção de vórtices mais intensos e facilmente detectáveis, se comparados aos resultados de visualização obtidos na presença da fenda, no qual a esteira de vórtices se mostrou fortemente influenciada pela forte zona de recirculação, provocado por esta abertura. Em vista disso, os ensaios utilizando o anemômetro de filme quente para a obtenção da frequência de emissão dos vórtices, foram realizados na ausência do “gap”.

Além do mais, é interessante ressaltar que os ensaios de visualização foram realizados para baixos números de Reynolds ($6 \times 10^3 < Re < 8 \times 10^3$), pois para Reynolds mais elevados ocorria a rápida dissipação do corante no escoamento, dificultando sobremaneira a captura das imagens.

Para os resultados de visualização anteriormente apresentados, o número de Reynolds foi calculado baseado no diâmetro interno da tubulação, ou seja $D = 94,0$ mm. A velocidade foi obtida pela medida da vazão mássica em cada ensaio e a densidade (ρ) e a viscosidade (μ), retirada de White (1999), de acordo com a temperatura da água no momento do ensaio.

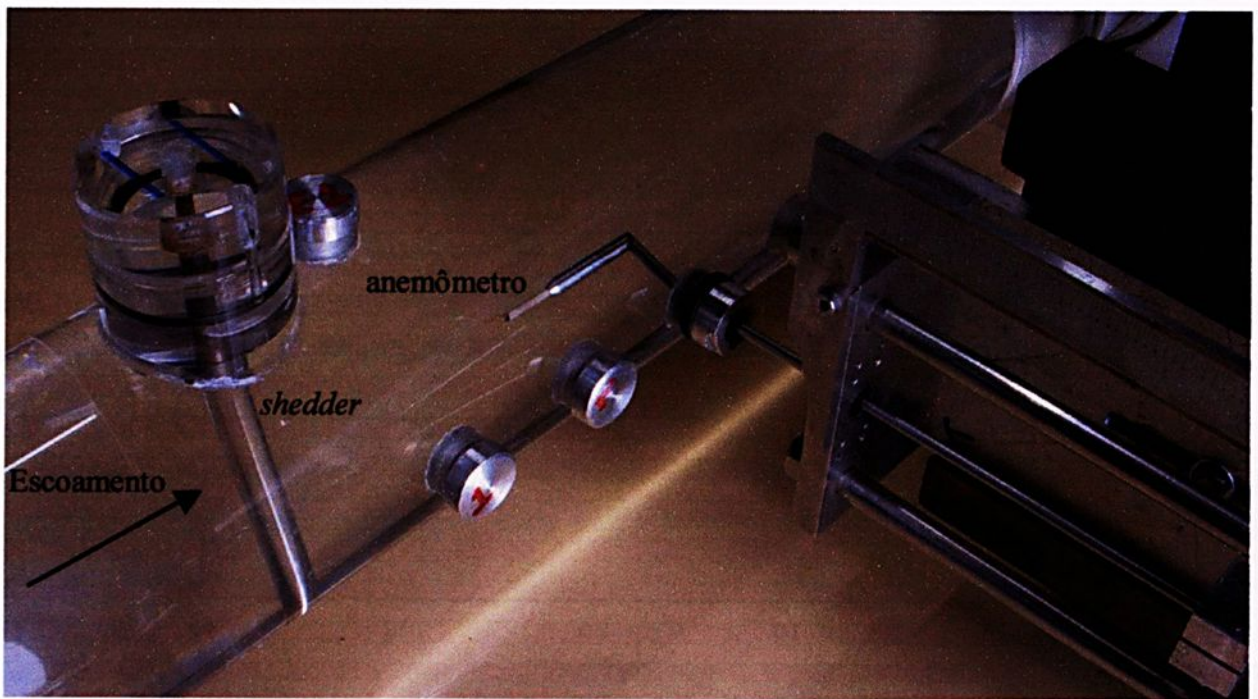
5.3.2 Determinação da Frequência de Emissão de Vórtices de Corpos Rombudos

Para os propósitos do presente trabalho, que visa a experimentação de corpos rombudos utilizados nos medidores de vazão do tipo vórtice, os resultados obtidos no túnel hidrodinâmico vertical possuem forte restrição em sua aplicação em decorrência dos valores relativamente baixos dos números de Reynolds e das características distintas do escoamento à montante. Desta forma, torna-se evidente a necessidade de se utilizar um dispositivo experimental, que opere a valores de números de Reynolds significativamente mais elevados, próximos àqueles valores encontrados nos medidores de vazão. Entretanto, os ensaios para teste dos corpos geradores de vórtices realizados no presente trabalho foram limitados a números de Reynolds inferiores a 4×10^4 , pois o propósito deste trabalho é analisar os problemas que ocorrem neste tipo de medidor para números de Reynolds inferiores a 2×10^4 , justamente na faixa em que os medidores de vazão não operam, objetivando estender a sua faixa de operação.

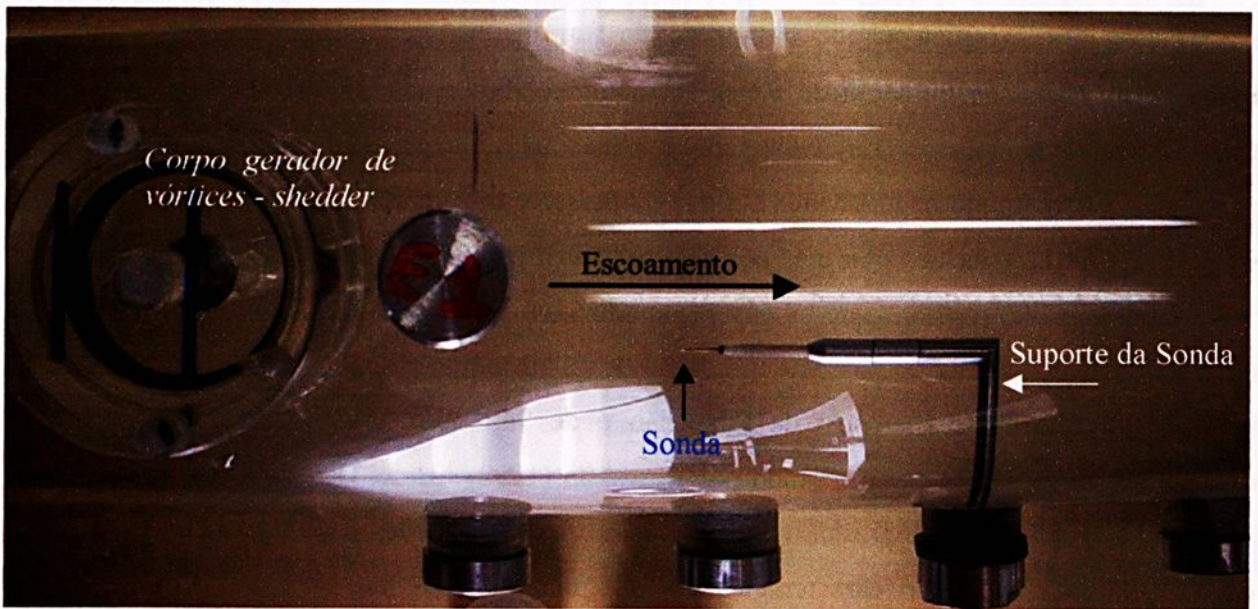
No presente trabalho, foram testadas nove geometrias diferentes para o corpo gerador de vórtices, próximas àquelas utilizadas nos medidores de vazão comerciais, visando a obtenção da curva Strouhal *versus* Reynolds e adicionalmente, foram analisados alguns fatores que podem influenciar no desempenho destes corpos geradores de vórtice, tais como a razão de forma, a razão de bloqueio e a perda de carga imposta por cada uma destas geometrias estudadas.

Os resultados obtidos no presente trabalho foram amplamente comparados com os de Kawakita (1992) e Gonçalves (2001). Os testes experimentais conduzidos por estes autores foram realizados num aparato experimental, cuja seção de testes era constituído por uma tubulação de acrílico, utilizando ar como fluido de trabalho.

A Figura 5.39 apresenta o aspecto da seção de testes no momento da aquisição dos sinais utilizando o anemômetro de filme quente.



(a) Vista Lateral.



(b) Vista Superior.

Figura 5.39 – Aspecto da seção de testes no momento da aquisição do sinal.

Já a Figura 5.40, apresenta o comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds, para um cilindro quadrado.

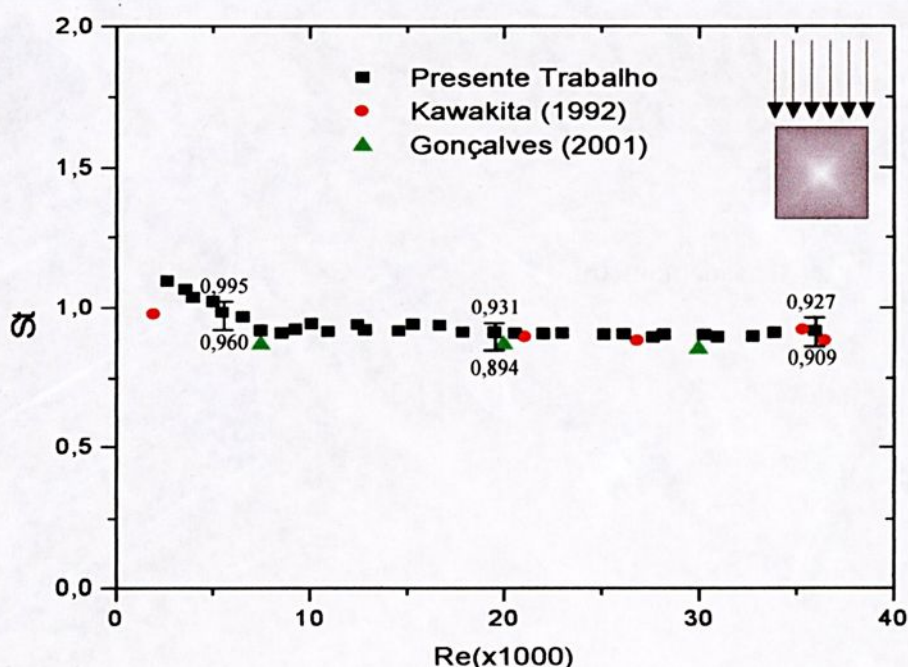


Figura 5.40 - Curva de Strouhal *versus* Reynolds para um cilindro quadrado.

Neste caso, verifica-se que o número de Strouhal manteve-se praticamente constante ($St \approx 0,91$) na faixa de números de Reynolds compreendida entre $17,5 \times 10^3 < Re < 36 \times 10^3$. Para outras faixas de números de Reynolds pode-se notar que o número de Strouhal sofre constantes alterações. Comparando os resultados obtidos no presente trabalho com os de Kawakita (1992) e Gonçalves (2001), pode-se notar uma boa concordância entre os valores do número de Strouhal.

É interessante ressaltar que os ensaios conduzidos por Kawakita (1992) foram realizados num dispositivo, constituído por uma tubulação de 104,0 mm de diâmetro interno, enquanto que no presente trabalho o diâmetro da tubulação é de 94,0 mm. Além do mais, a dimensão característica de cada *shedder* adotado por Kawakita (1992) foi de 31,5 mm, enquanto que no presente trabalho foi de 24,0 mm, resultando em diferentes razões de bloqueio. Já Gonçalves (2001) adotou a dimensão característica de 24,6 mm para os seus *shedders*, utilizando um aparato experimental constituído por uma tubulação de 3" (76,2 mm).

Para o cálculo do número de Strouhal apresentado no presente trabalho, foi adotado em todos os ensaios, como dimensão característica (d), o diâmetro da tubulação, ou seja $D=94,0$ mm.

Os intervalos de incerteza apresentados no gráfico, indicam o desvio padrão da média ou seja, a faixa na qual este valor médio pode ser encontrado com 95% de certeza. Os intervalos de

incerteza demarcados no gráfico não estão em escala, pois em alguns casos estes intervalos são tão pequenos que se confundem com o símbolo adotado para plotar o gráfico.

A título de ilustração, a Figura 5.41 apresenta exemplos típicos do sinal adquirido na esteira do cilindro quadrado, bem como suas respectivas distribuições de potência espectral para diferentes números de Reynolds. Os sinais provenientes do anemômetro foram armazenados em três blocos com 1024 pontos cada. Através de um programa elaborado a partir do software *Matlab*, a frequência de emissão dos vórtices foi obtida aplicando a FFT (*Fast Fourier Transform*) em cada um destes blocos. Já para os pontos da curva $Re \times St$, onde são apresentados os intervalos de incerteza, os sinais provenientes do anemômetro foram armazenados em vinte blocos com 1024 pontos cada, foi aplicada a FFT em cada um destes blocos, obtendo assim o valor da frequência.

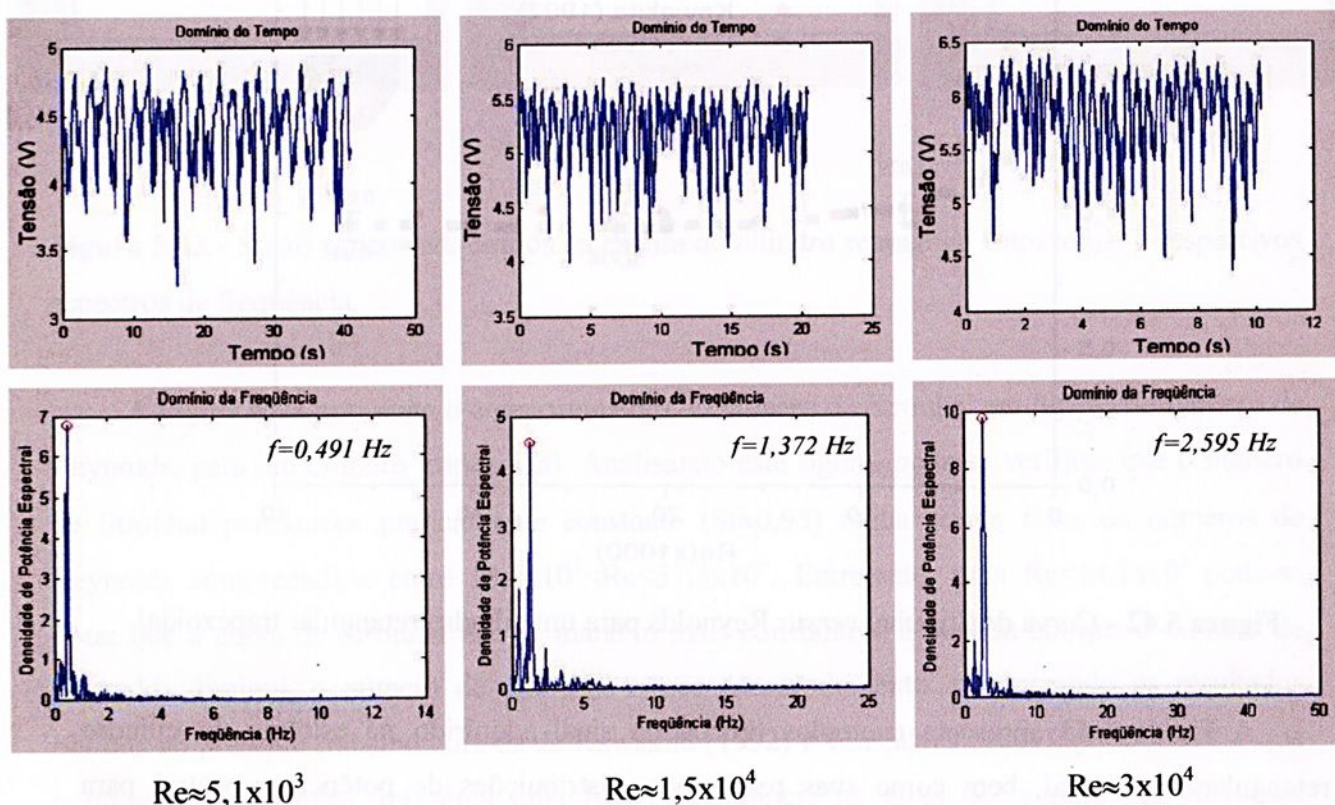


Figura 5.41 - Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro quadrado e respectivos espectros de frequência.

A partir desta figura, pode-se notar que para toda a faixa de números de Reynolds investigada, a frequência de emissão dos vórtices pode ser facilmente determinada. Entretanto,

durante a realização dos ensaios para este perfil de *shedder*, notou-se que, para um mesmo número de Reynolds, ocorria uma forte variação na frequência de emissão dos vórtices, resultando na modificação do número de Strouhal, ficando claro que este tipo de geometria não é adequado para ser utilizado como corpo gerador de vórtices em medidores de vazão.

A Figura 5.42 apresenta o comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds, para um cilindro retangular trapezoidal. Analisando esta figura, pode-se notar que o número de Strouhal permanece praticamente constante ($St \approx 0,94$) na faixa de números de Reynolds compreendida entre $12,6 \times 10^3 < Re < 36,2 \times 10^3$. Entretanto, para $Re < 12,6 \times 10^3$ pode-se notar que a curva de Strouhal não se mantém mais constante e, para $Re < 6 \times 10^3$ o número de Strouhal cresce rapidamente à medida em que o número de Reynolds diminui.

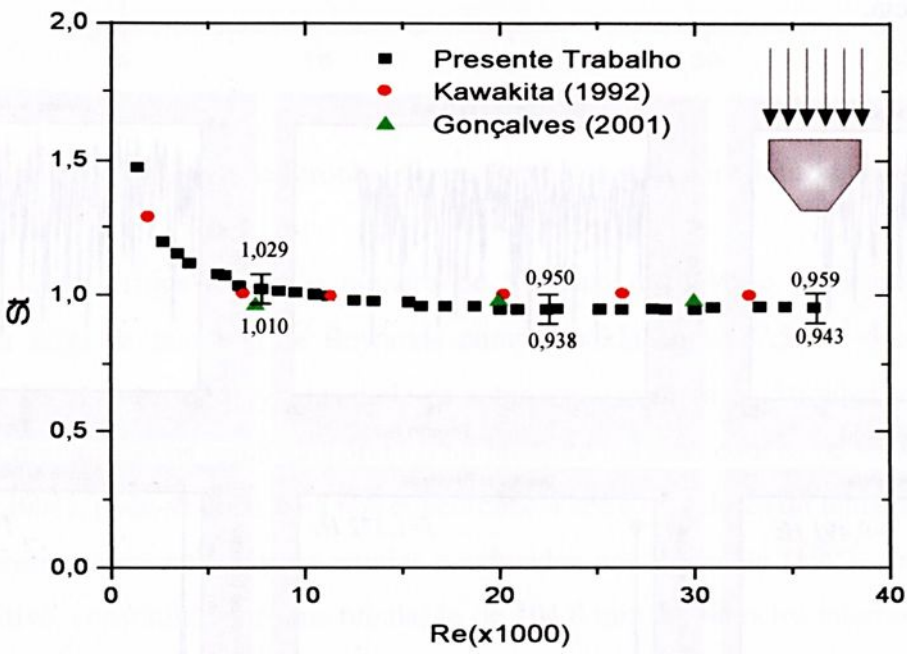


Figura 5.42 - Curva de Strouhal versus Reynolds para um cilindro retangular trapezoidal.

A Figura 5.43 apresenta exemplos típicos do sinal adquirido na esteira do cilindro retangular trapezoidal, bem como suas respectivas distribuições de potência espectral para diferentes números de Reynolds. Neste caso, pode-se verificar que o espectro de frequência apresenta um pico bem definido, para toda faixa de números de Reynolds investigada, podendo facilmente determinar a frequência de emissão dos vórtices.

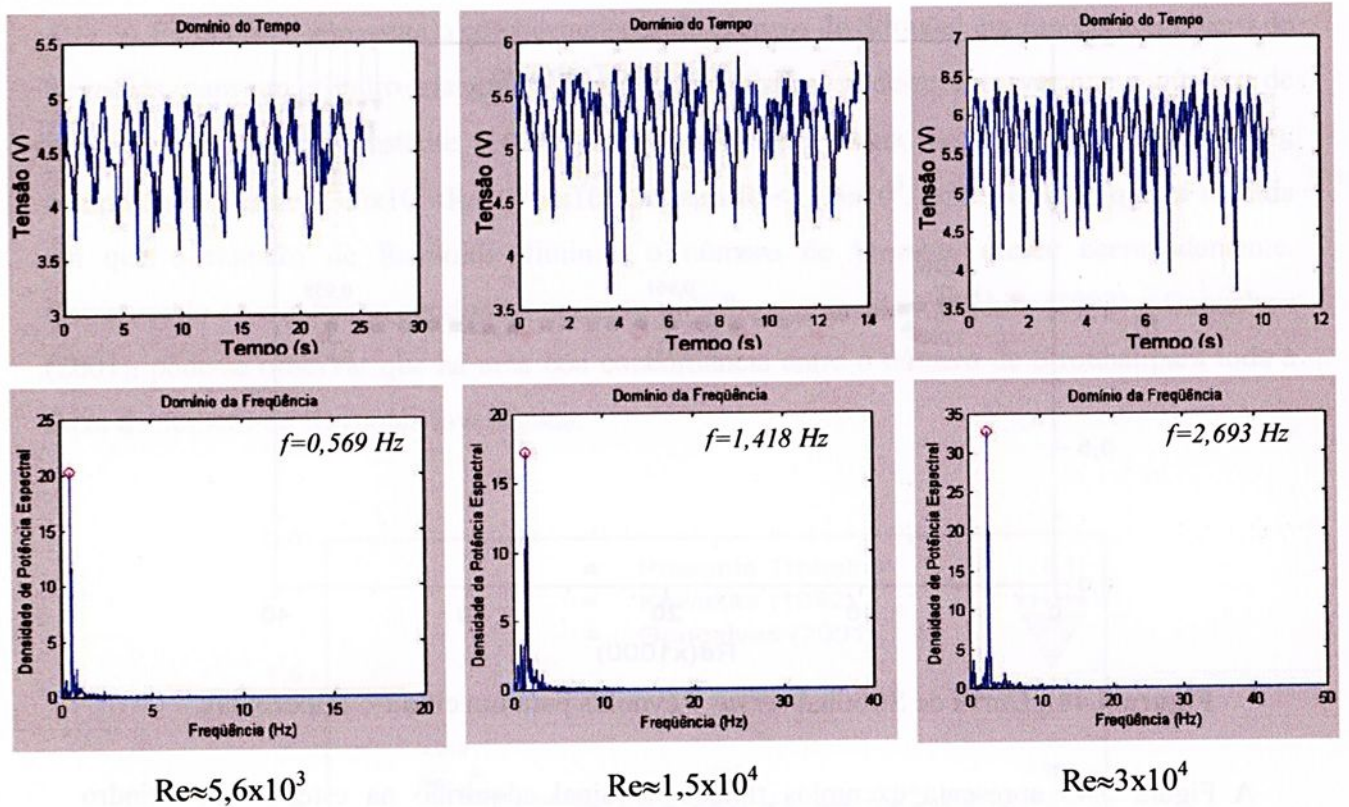


Figura 5.43 - Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro retangular trapezoidal e respectivos espectros de frequência.

A Figura 5.44 apresenta o comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds, para um cilindro trapezoidal. Analisando esta figura, pode-se verificar que o número de Strouhal permanece praticamente constante ($St \approx 0,95$) numa ampla faixa de números de Reynolds compreendida entre $14,1 \times 10^3 < Re < 37,3 \times 10^3$. Entretanto, para $Re < 14,1 \times 10^3$ pode-se notar que a curva de Strouhal não se mantém mais constante e à medida em que o número de Reynolds diminui, o número de Strouhal cresce acentuadamente. Comparando os resultados obtidos no presente trabalho com os de Kawakita (1992) e Gonçalves (2001), pode-se notar que o número de Strouhal apresenta uma boa concordância na faixa de números de Reynolds compreendida entre $12,3 \times 10^3 < Re < 37,3 \times 10^3$. No entanto, para $Re < 12,3 \times 10^3$ o número de Strouhal do presente trabalho apresenta uma dispersão nos resultados.

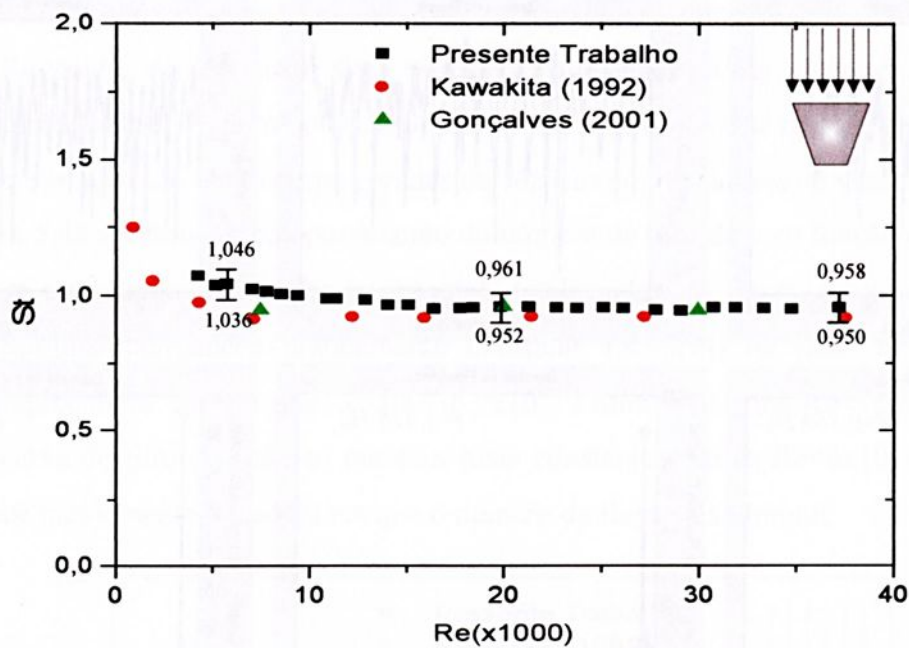


Figura 5.44 - Curva de Strouhal versus Reynolds para um cilindro trapezoidal.

A Figura 5.45 apresenta exemplos típicos do sinal adquirido na esteira do cilindro trapezoidal, bem como suas respectivas distribuições de potência espectral para diferentes números de Reynolds. Segundo Kawakita (1992) este tipo de geometria apresenta emissão de vórtices intensos sendo qualificada para ser utilizada em medidores de vazão do tipo vórtice.

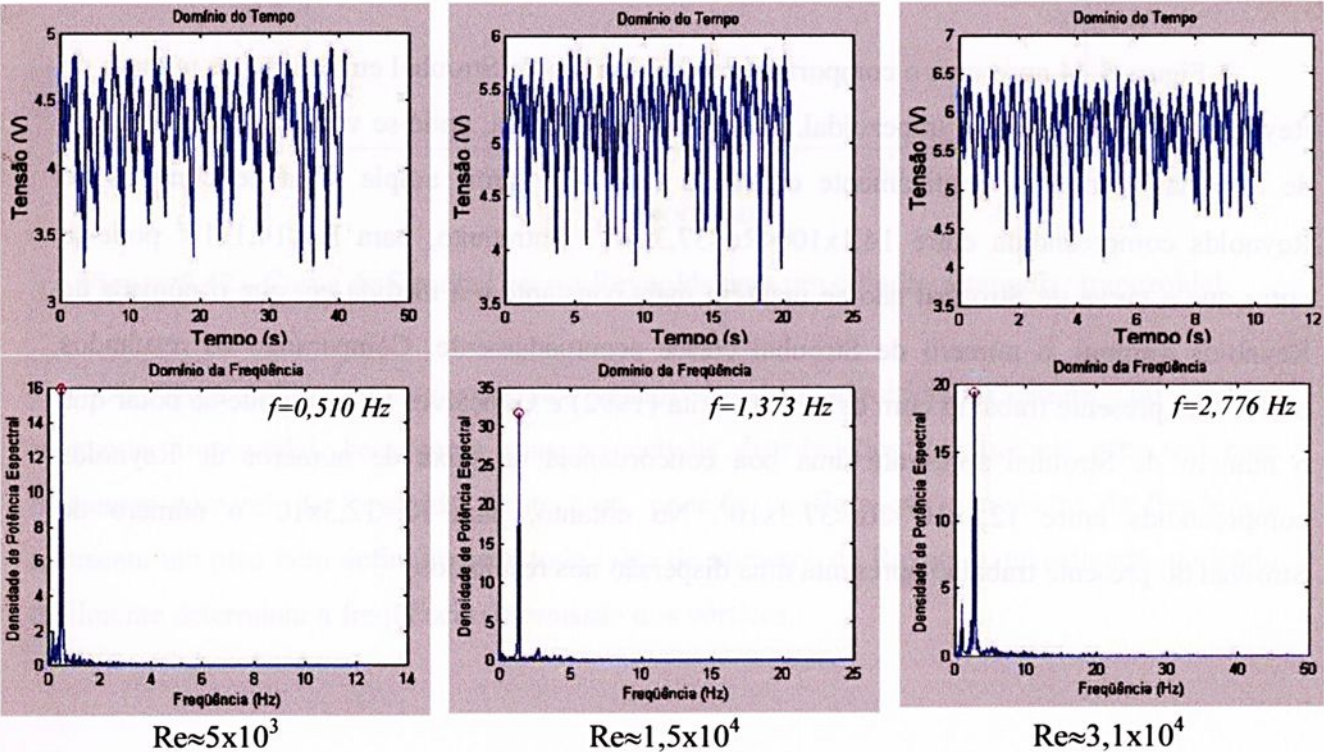


Figura 5.45 - Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro trapezoidal e respectivos espectros de frequência.

A Figura 5.46 apresenta o comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds, para um cilindro triangular. Através desta figura, pode-se observar que o número de Strouhal permanece constante ($St \approx 1,00$) numa ampla faixa de números de Reynolds, compreendida entre $13,6 \times 10^3 < Re < 37,3 \times 10^3$. Já para $Re < 13,6 \times 10^3$, pode-se notar que, a medida em que o número de Reynolds diminui, o número de Strouhal cresce acentuadamente. Comparando os resultados obtidos no presente trabalho com os de Kawakita (1992) e Gonçalves (2001), pode-se observar que há uma boa concordância entre o número de Strouhal para toda a faixa de número de Reynolds investigada.

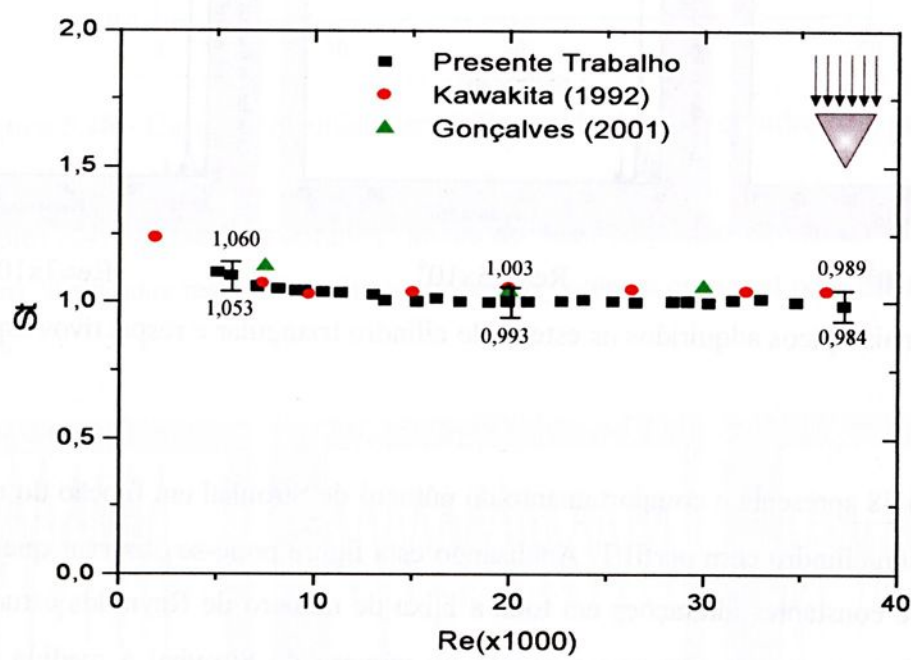


Figura 5.46 - Curva de Strouhal *versus* Reynolds para um cilindro triangular.

A Figura 5.47 apresenta exemplos típicos do sinal adquirido na esteira do cilindro triangular, bem como suas respectivas distribuições de potência espectral para diferentes números de Reynolds.

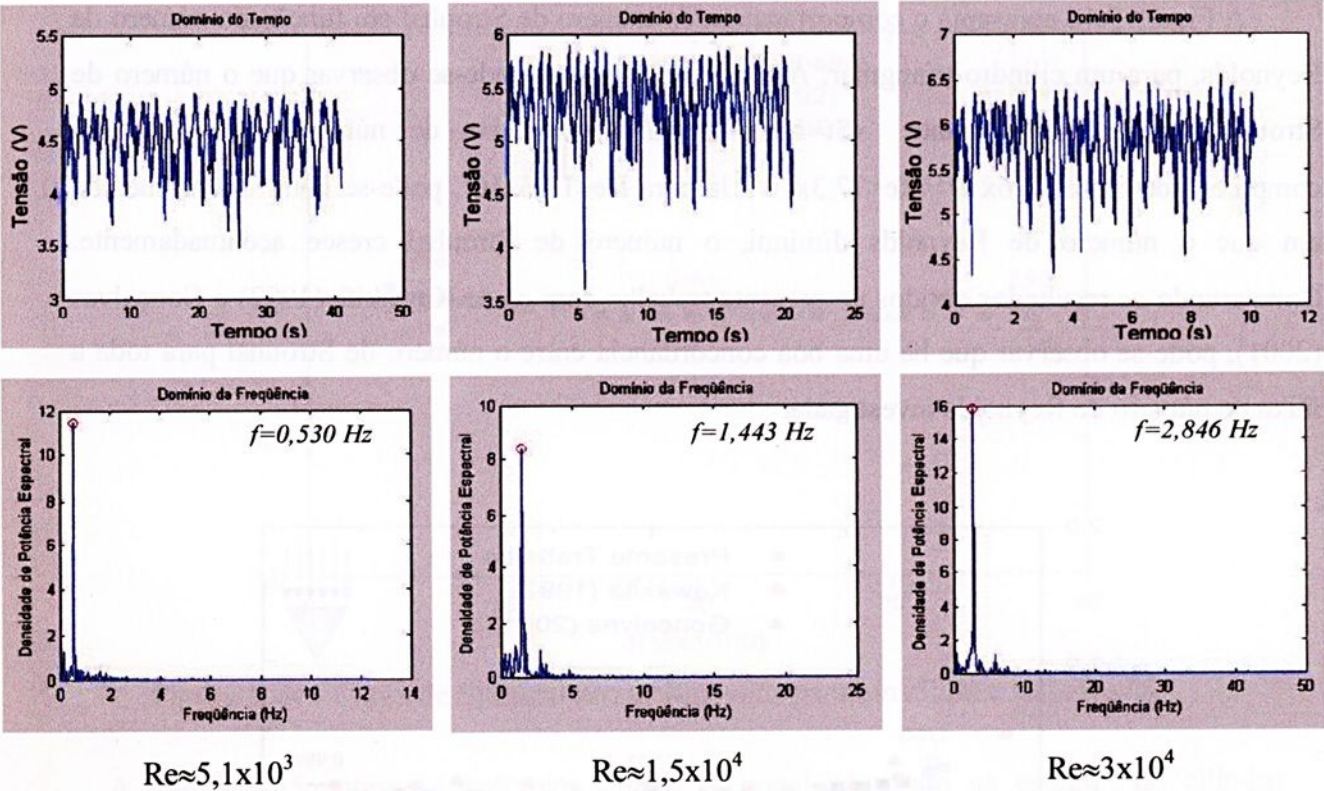


Figura 5.47 - Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro triangular e respectivos espectros de frequência.

A Figura 5.48 apresenta o comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds, para um cilindro com perfil T. Analisando esta figura pode-se observar que o número de Strouhal sofre constantes alterações em toda a faixa de número de Reynolds estudada. Para $Re < 12 \times 10^3$, pode-se notar um pequeno aumento no número de Strouhal à medida em que o número de Reynolds diminui. Comparando os resultados obtidos no presente trabalho com os de Kawakita (1992), pode-se notar que o número de Strouhal apresenta uma boa concordância na faixa de números de Reynolds compreendida entre $12,3 \times 10^3 < Re < 38,2 \times 10^3$.

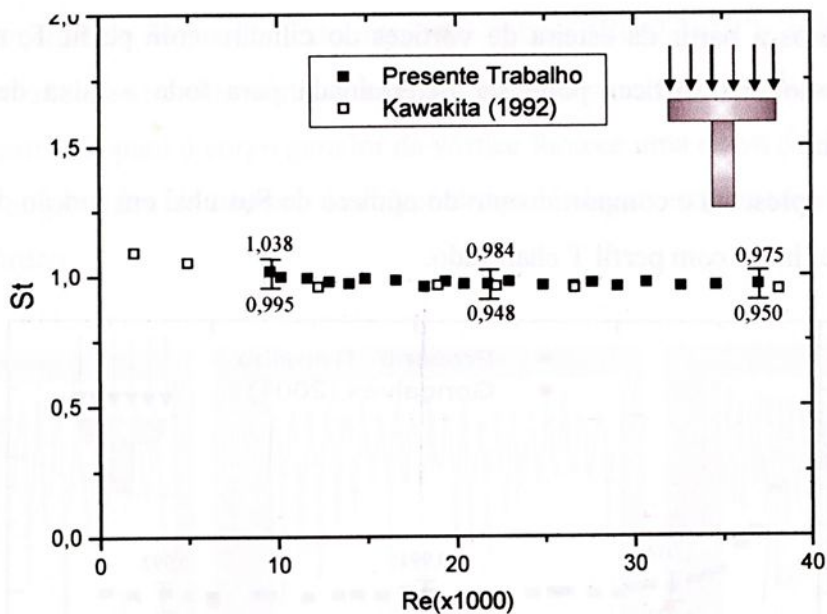


Figura 5.48 - Curva de Strouhal *versus* Reynolds para um cilindro com perfil T.

A Figura 5.49 apresenta exemplos típicos do sinal adquirido na esteira do cilindro com perfil T, bem como suas respectivas distribuições de potência espectral para diferentes números de Reynolds.

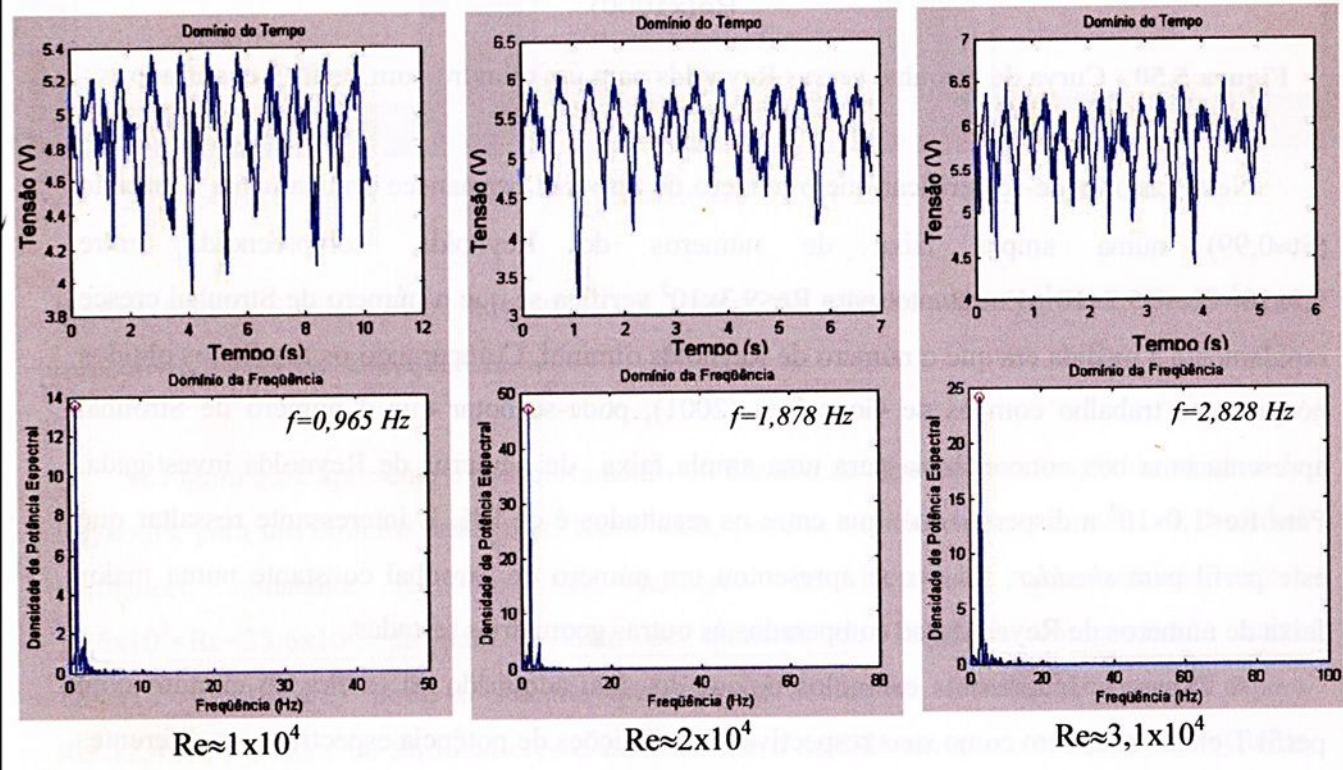


Figura 5.49 - Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro com perfil T e respectivos espectros de frequência.

Os sinais obtidos a partir da esteira de vórtices do cilindro com perfil T, mostra que a frequência de emissão dos vórtices pode ser determinada para toda a faixa de número de Reynolds investigada.

A Figura 5.50 apresenta o comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds, para um cilindro com perfil T chanfrado.

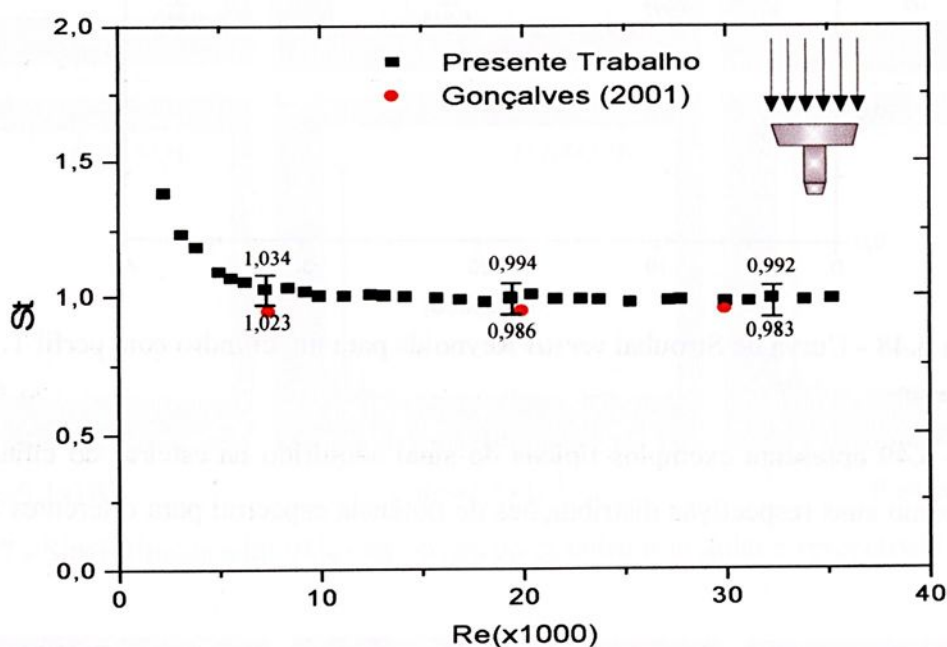


Figura 5.50 - Curva de Strouhal *versus* Reynolds para um cilindro com perfil T chanfrado.

Neste caso, pode-se verificar que o número de Strouhal permanece praticamente constante ($St \approx 0,99$) numa ampla faixa de números de Reynolds, compreendida entre $9,3 \times 10^3 < Re < 35,2 \times 10^3$. Entretanto, para $Re < 9,3 \times 10^3$ verifica-se que o número de Strouhal cresce rapidamente à medida em que o número de Reynolds diminui. Comparando os resultados obtidos no presente trabalho com os de Gonçalves (2001), pode-se notar que o número de Strouhal apresenta uma boa concordância para uma ampla faixa de números de Reynolds investigada. Para $Re < 1,0 \times 10^4$ a dispersão máxima entre os resultados é de 8%. É interessante ressaltar que este perfil para *shedder*, foi o que apresentou um número de Strouhal constante numa maior faixa de números de Reynolds, se comparados às outras geometrias testadas.

A Figura 5.51 apresenta exemplos típicos do sinal adquirido na esteira do cilindro com perfil T chanfrado, bem como suas respectivas distribuições de potência espectral para diferentes números de Reynolds. Analisando esta figura, pode-se observar que para toda a faixa de número de Reynolds investigada, a frequência de emissão dos vórtices pode ser facilmente determinada,

mesmo para números de Reynolds extremamente baixos ($Re \approx 2,3 \times 10^3$), indicando que esta geometria para o *shedder* produz vórtices intensos e facilmente detectáveis pelo anemômetro. Portanto, esta geometria para o corpo gerador de vórtice fornece uma curva de Strouhal estável e constante numa ampla faixa de número de Reynolds, podendo ser empregado nos medidores de vazão do tipo vórtice.

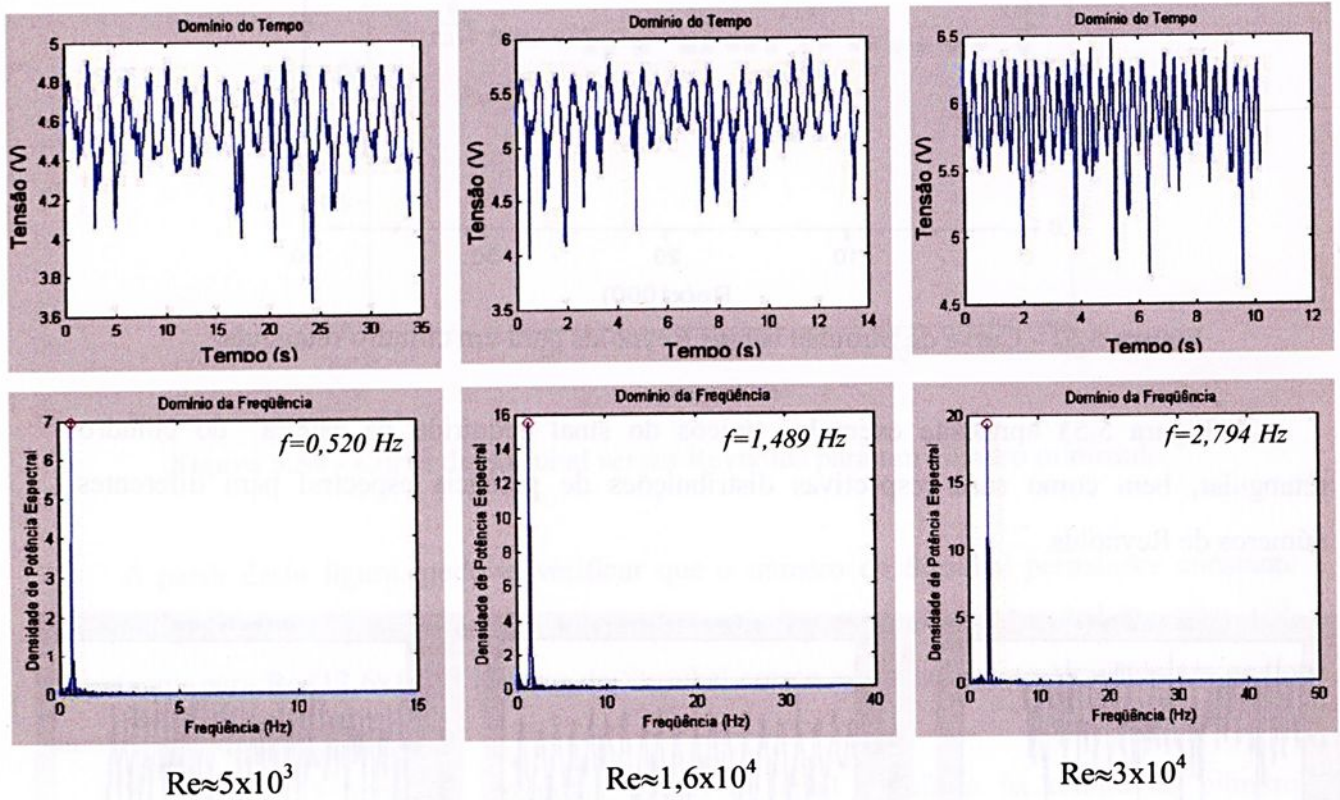


Figura 5.51 - Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro com perfil T chanfrado e respectivos espectros de frequência.

A Figura 5.52 apresenta o comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds, para um cilindro retangular. Neste caso, pode-se verificar que o número de Strouhal permanece constante na faixa de números de Reynolds compreendida entre $16,6 \times 10^3 < Re < 35,6 \times 10^3$. Já para a faixa de números de Reynolds compreendida entre $12,4 \times 10^3 < Re < 16,6 \times 10^3$ pode-se observar que ocorrem oscilações no valor de Strouhal e para $Re < 12,4 \times 10^3$, o valor de Strouhal cresce rapidamente à medida em que o número de Reynolds diminui.

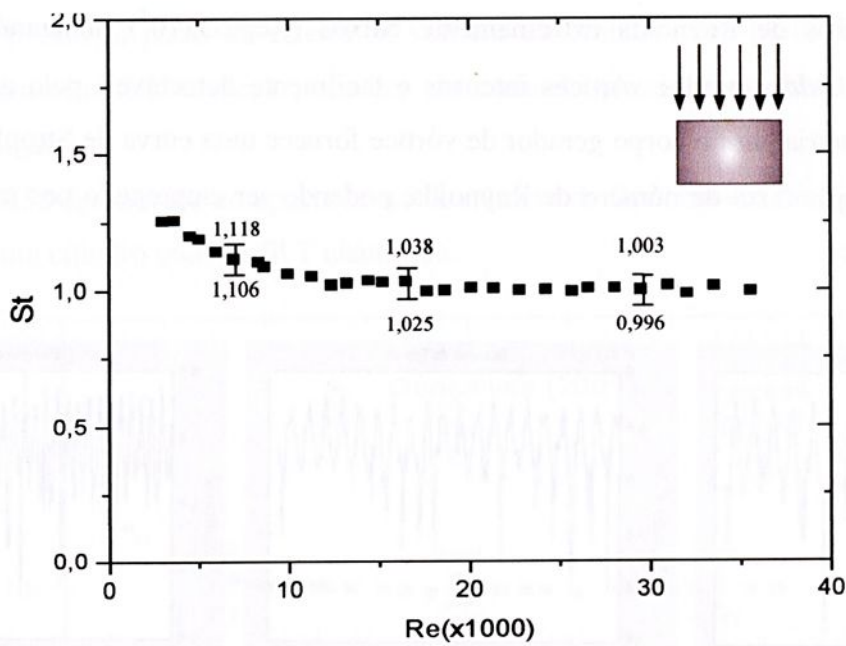


Figura 5.52 - Curva de Strouhal versus Reynolds para um cilindro retangular.

A Figura 5.53 apresenta exemplos típicos do sinal adquirido na esteira do cilindro retangular, bem como suas respectivas distribuições de potência espectral para diferentes números de Reynolds.

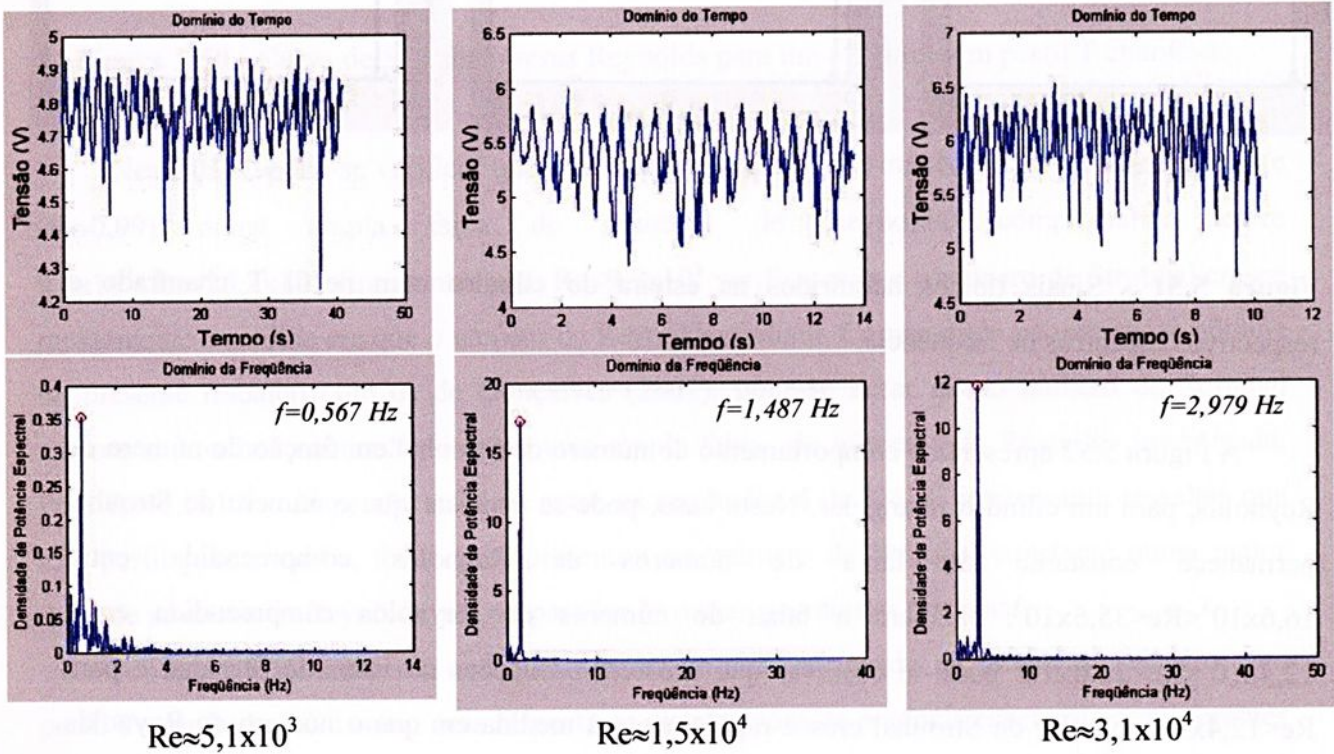


Figura 5.53 - Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro retangular e respectivos espectros de frequência.

A Figura 5.54 apresenta o comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds, para um cilindro otimizado.

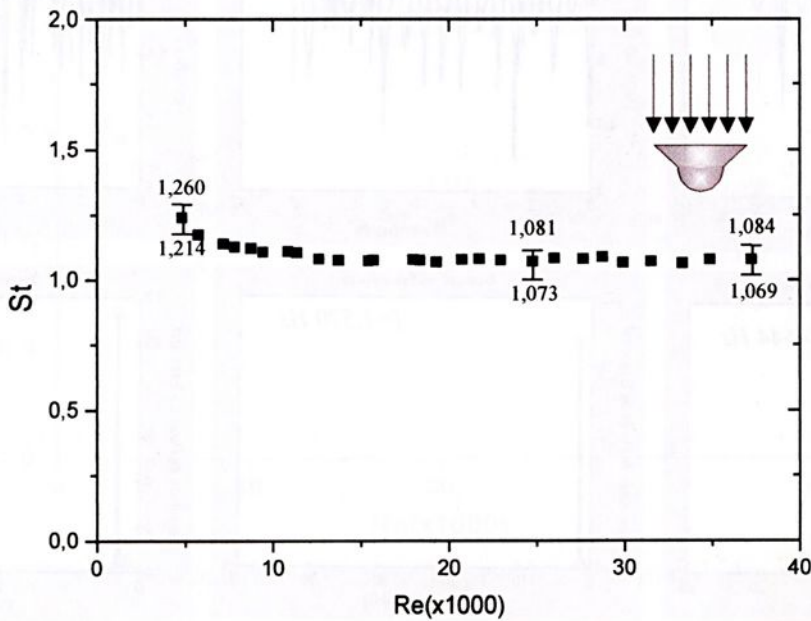


Figura 5.54 - Curva de Strouhal *versus* Reynolds para um cilindro otimizado.

A partir desta figura, pode-se verificar que o número de Strouhal permanece constante numa ampla faixa de números de Reynolds, compreendida entre $12,6 \times 10^3 < Re < 37,3 \times 10^3$. Entretanto, para $Re < 12,6 \times 10^3$ o número de Strouhal cresce acentuadamente à medida em que o número de Reynolds diminui.

A Figura 5.55 apresenta exemplos típicos do sinal adquirido na esteira do cilindro otimizado, bem como suas respectivas distribuições de potência espectral para diferentes números de Reynolds.

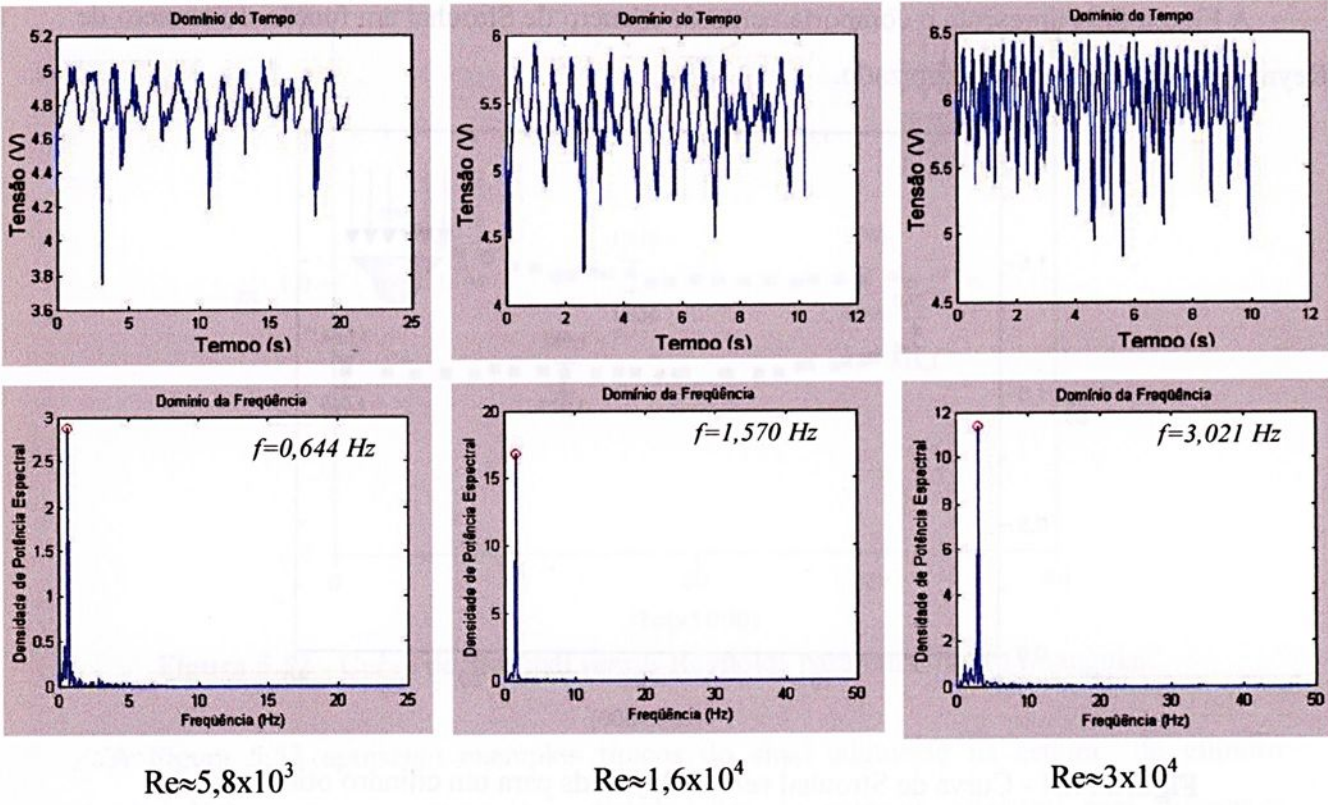


Figura 5.55 - Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro otimizado e respectivos espectros de frequência.

A Figura 5.56 apresenta o comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds, para um cilindro circular. Analisando esta figura, pode-se verificar que o número de Strouhal permanece praticamente constante ($St \approx 1,11$) numa ampla faixa de números de Reynolds, compreendida entre $10,3 \times 10^3 < Re < 34,7 \times 10^3$. Entretanto, para $Re < 10,3 \times 10^3$ verifica-se que o número de Strouhal cresce rapidamente à medida em que o número de Reynolds diminui.

O cilindro circular emite vórtices com frequência pouco constante para um determinado número de Reynolds fixo, ao contrário do que ocorre com a maioria dos cilindros que possuem uma aresta definida. Esta aresta mostra ser necessária para se definir com precisão o local da emissão dos vórtices no corpo e isto resulta em uma relação mais linear entre os números de Strouhal e de Reynolds, característica essencial para o medidor de vazão. Desta forma, o cilindro circular simples não é adequado para ser utilizado como corpo gerador de vórtices em medidores de vazão que se utilizam deste princípio.

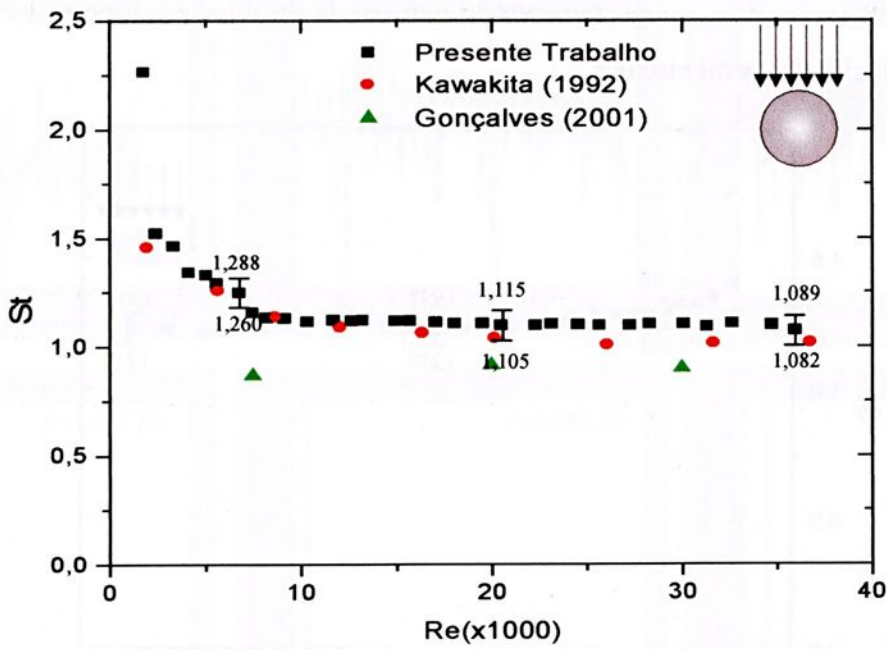


Figura 5.56 - Curva de Strouhal *versus* Reynolds para um cilindro circular.

A Figura 5.57 apresenta exemplos típicos do sinal adquirido na esteira do cilindro circular, bem como suas respectivas distribuições de potência espectral para diferentes números de Reynolds.

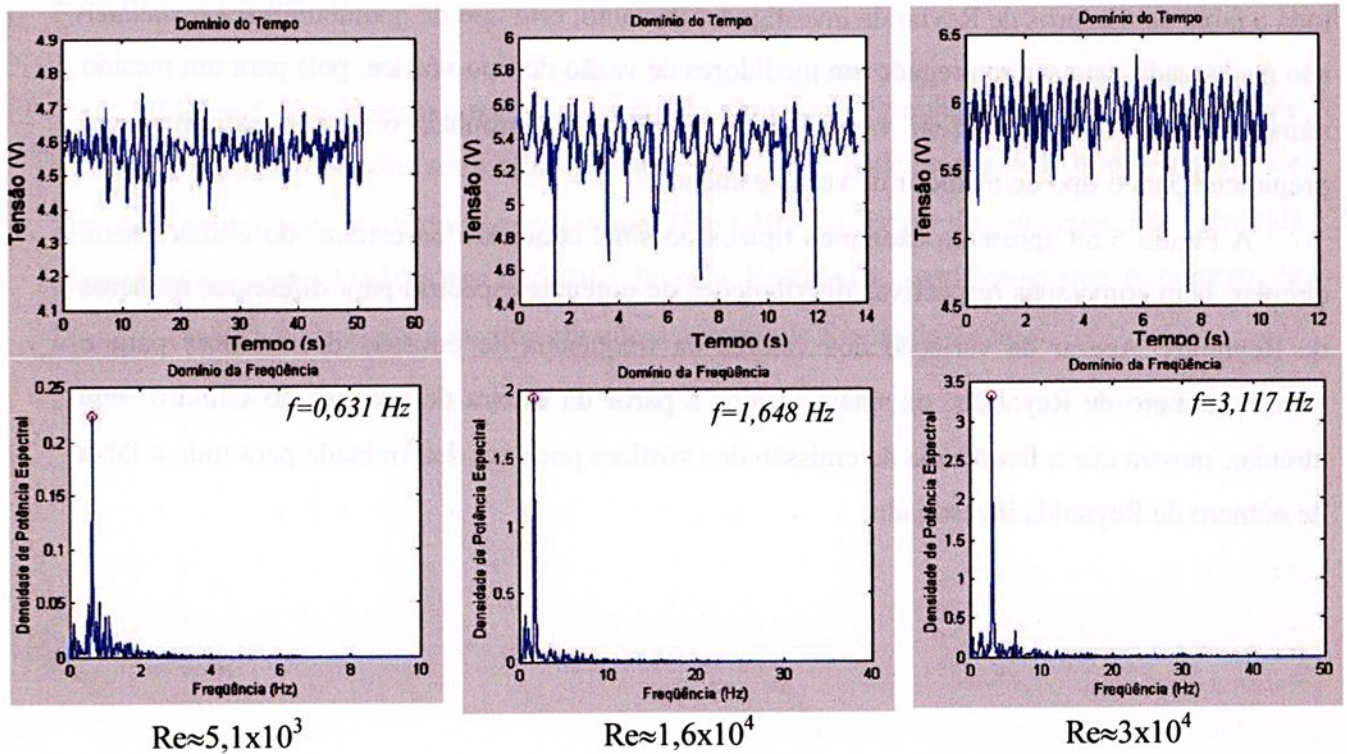


Figura 5.57 - Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro circular e respectivos espectros de frequência.

A Figura 5.58 apresenta o comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds, para um cilindro semi circular.

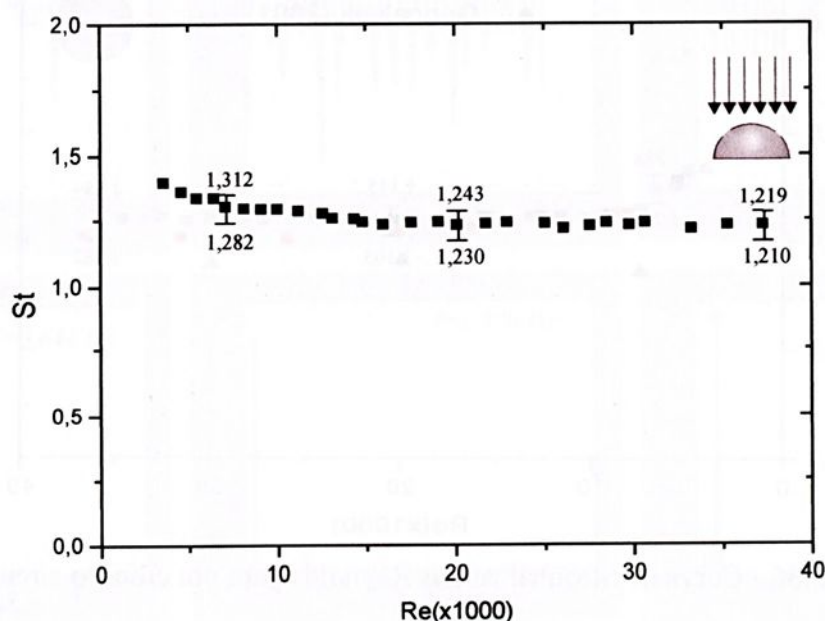


Figura 5.58 - Curva de Strouhal *versus* Reynolds para um cilindro semi circular.

Neste caso, observa-se que o número de Strouhal sofre constantes alterações ao longo de toda a faixa de números de Reynolds investigada. Portanto, este tipo de geometria para o *shedder* não é adequado para ser empregado em medidores de vazão do tipo vórtice, pois para um mesmo número de Reynolds, ocorrem variações no número de Strouhal, o que é extremamente prejudicial para o tipo de medidor de vazão estudado.

A Figura 5.59 apresenta exemplos típicos do sinal adquirido na esteira do cilindro semi circular, bem como suas respectivas distribuições de potência espectral para diferentes números de Reynolds. Apesar da variação dos valores da frequência de emissão dos vórtices para o mesmo número de Reynolds, os sinais obtidos a partir da esteira de vórtices do cilindro semi circular, mostra que a frequência de emissão dos vórtices pode ser determinada para toda a faixa de número de Reynolds investigada.

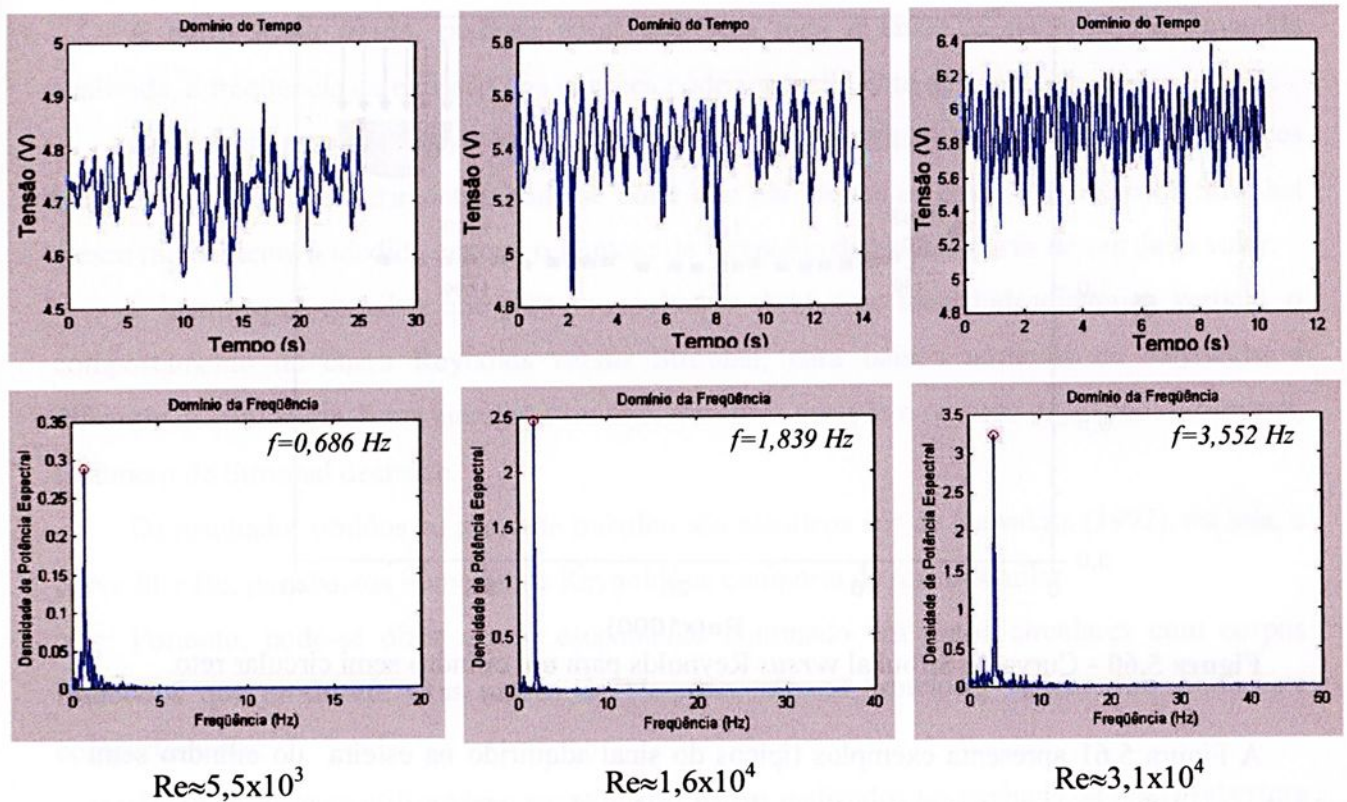


Figura 5.59 - Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro semi circular e respectivos espectros de frequência.

A Figura 5.60 apresenta o comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds, para um cilindro semi circular reto. Neste caso, pode-se verificar que o número de Strouhal permanece praticamente constante ($St \approx 1,10$) na faixa de números de Reynolds compreendida entre $11 \times 10^3 < Re < 35,5 \times 10^3$. Já para $Re < 11 \times 10^3$, verifica-se que o número de Strouhal cresce rapidamente à medida em que o número de Reynolds diminui.

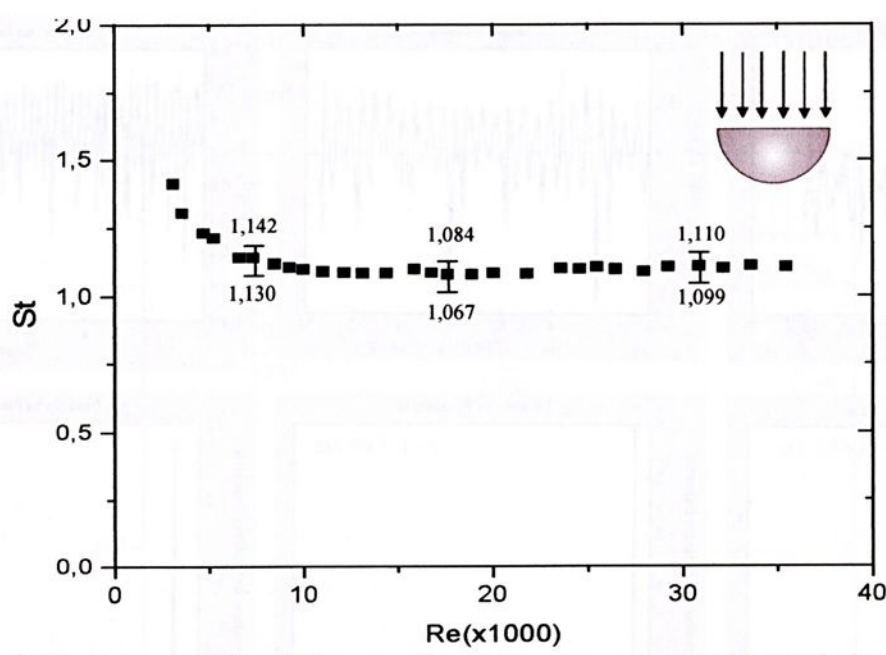


Figura 5.60 - Curva de Strouhal *versus* Reynolds para um cilindro semi circular reto.

A Figura 5.61 apresenta exemplos típicos do sinal adquirido na esteira do cilindro semi circular reto, bem como suas respectivas distribuições de potência espectral para diferentes números de Reynolds.

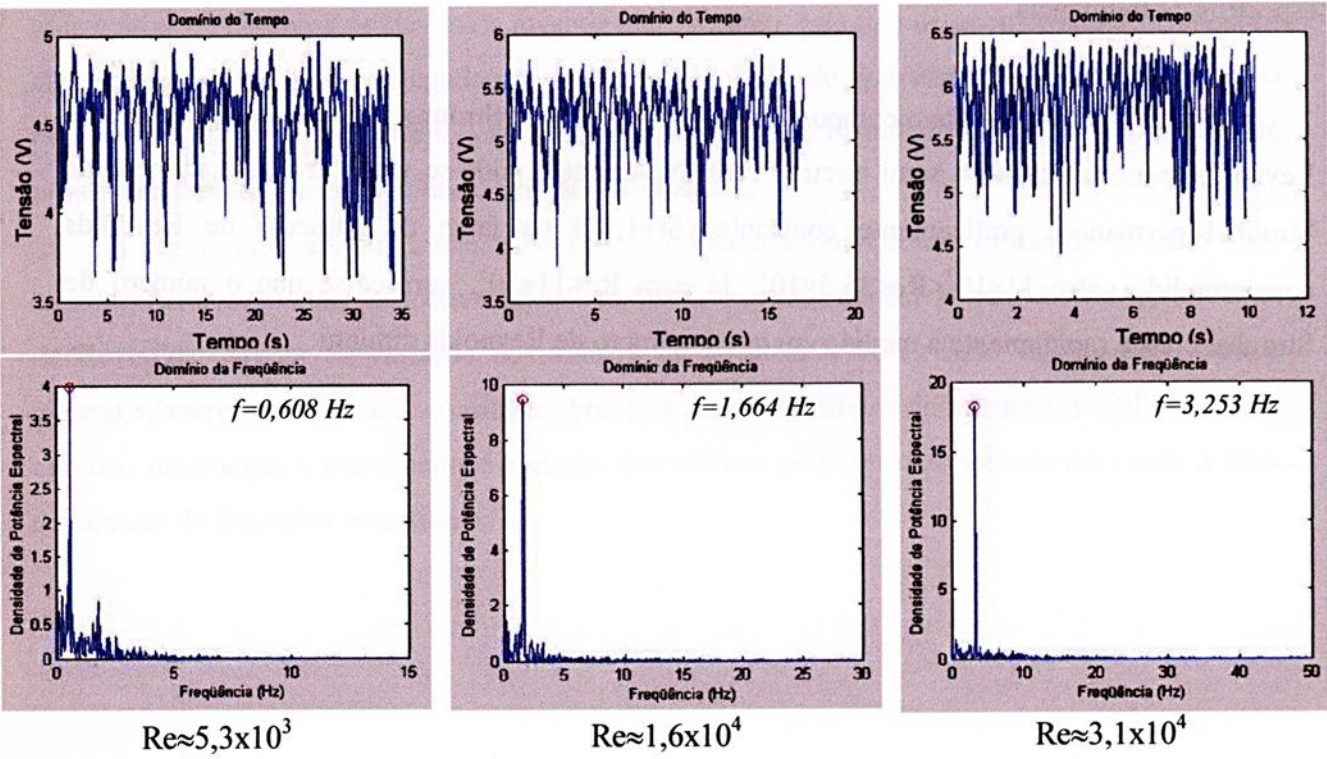


Figura 5.61 - Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro semi circular reto e respectivos espectros de frequência.

A partir desta figura, pode-se notar que para toda a faixa de números de Reynolds analisada, a frequência de emissão dos vórtices pôde ser facilmente determinada.

Analisando as curvas Reynolds versus Strouhal dos diferentes corpos geradores de vórtices testados no módulo experimental, pode-se notar que para todos os casos o número de Strouhal cresce rapidamente à medida em que o número de Reynolds diminui, a partir de um dado valor.

É interessante ressaltar que para os resultados obtidos no túnel hidrodinâmico vertical, o comportamento da curva Reynolds *versus* Strouhal, para baixos números de Reynolds, é diferente do obtido em dutos circulares ou seja, à medida em que o número de Reynolds diminui, o número de Strouhal decresce.

Os resultados obtidos no presente trabalho são idênticos aos de Kawakita (1992), ou seja, a curva $St \times Re$, para baixos números de Reynolds se comporta de forma similar.

Portanto, pode-se dizer que o escoamento confinado em dutos circulares com corpos rombudos que produzem altas razões de bloqueio, são os principais fatores que ditam este comportamento.

Todos os ensaios utilizando o anemômetro foram realizados na ausência da fenda (abertura existente entre o corpo gerador de vórtice e a parede inferior da tubulação).

Razão de Bloqueio

O bloqueio do escoamento provoca uma profunda alteração no perfil de velocidade do escoamento que incide sobre o corpo cilíndrico. Além disso, o escoamento na seção bloqueada pode ser fortemente acelerado, devido à restrição imposta pelo corpo de prova.

No presente trabalho, foi investigada a influência da razão de bloqueio (β) sobre o escoamento ao redor de cilindros circulares, para números de Reynolds inferiores a 4×10^4 . Esta razão de bloqueio representa a obstrução parcial do escoamento pelo corpo sólido e pode ser definida como:

$$\beta = \frac{A_{cp}}{A_{st}} \cdot 100\% \quad (5.2)$$

onde A_{cp} é a área frontal projetada do corpo de prova e A_{st} é a área transversal da seção de testes.

A Tabela 5.1 apresenta as principais características dimensionais destes corpos de prova.

Tabela 5.1 - Dimensões nominais dos modelos cilíndricos circulares.

Modelo	d (mm)	β (%)
A ₁	12	16
A ₂	24	33
A ₃	36	49
A ₄	48	65

A Figura 5.62 ilustra a seção transversal da tubulação onde foi instalado o *shedder*.

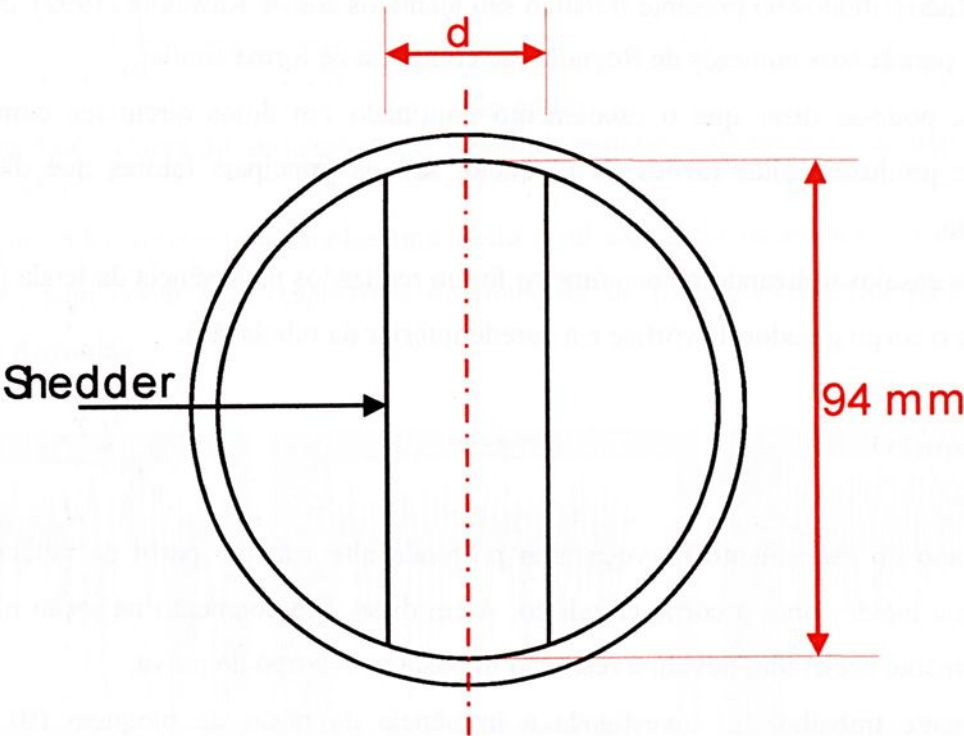


Figura 5.62 - Vista em corte da tubulação na posição em que foi instalado o *shedder*.

A Figura 5.63, por sua vez, apresenta o aspecto dos modelos cilíndricos com razão de bloqueio variados.



Figura 5.63 – Modelos cilíndricos circulares com razão de bloqueio variados.

Já a Figura 5.64 apresenta a influência da razão de bloqueio na frequência de emissão dos vórtices.

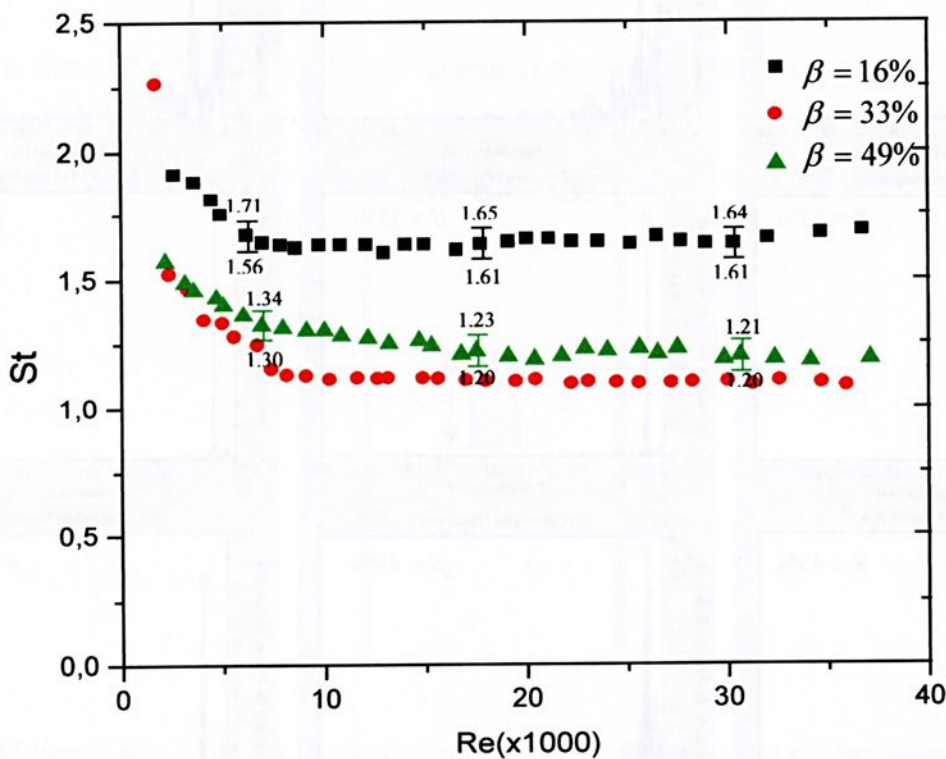


Figura 5.64 – Comparação entre as curvas de Reynolds versus Strouhal para um cilindro circular com razão de bloqueio entre 16% e 49%.

Analisando a Figura 5.64, pode-se notar que a razão de bloqueio (β) têm influência significativa no número de Strouhal. Para razões de bloqueio de 33 e 49%, pode-se notar que quanto maior a razão de bloqueio, maior é o número de Strouhal. Exceção para razão de bloqueio de 16 %, que apresenta o maior número de Strouhal.

Além destes resultados apresentados, foi efetuado um outro ensaio utilizando um cilindro circular com razão de bloqueio de 65%. Através dos resultados então obtidos era difícil de se obter corretamente a frequência de emissão dos vórtices, pois para um mesmo número de Reynolds era possível obter várias frequências, dispersas numa faixa muito grande, impossibilitando assim o cálculo do número de Strouhal.

A Figura 5.65 apresenta os espectros de frequência para três razões de bloqueio distintas, para diferentes números de Reynolds.

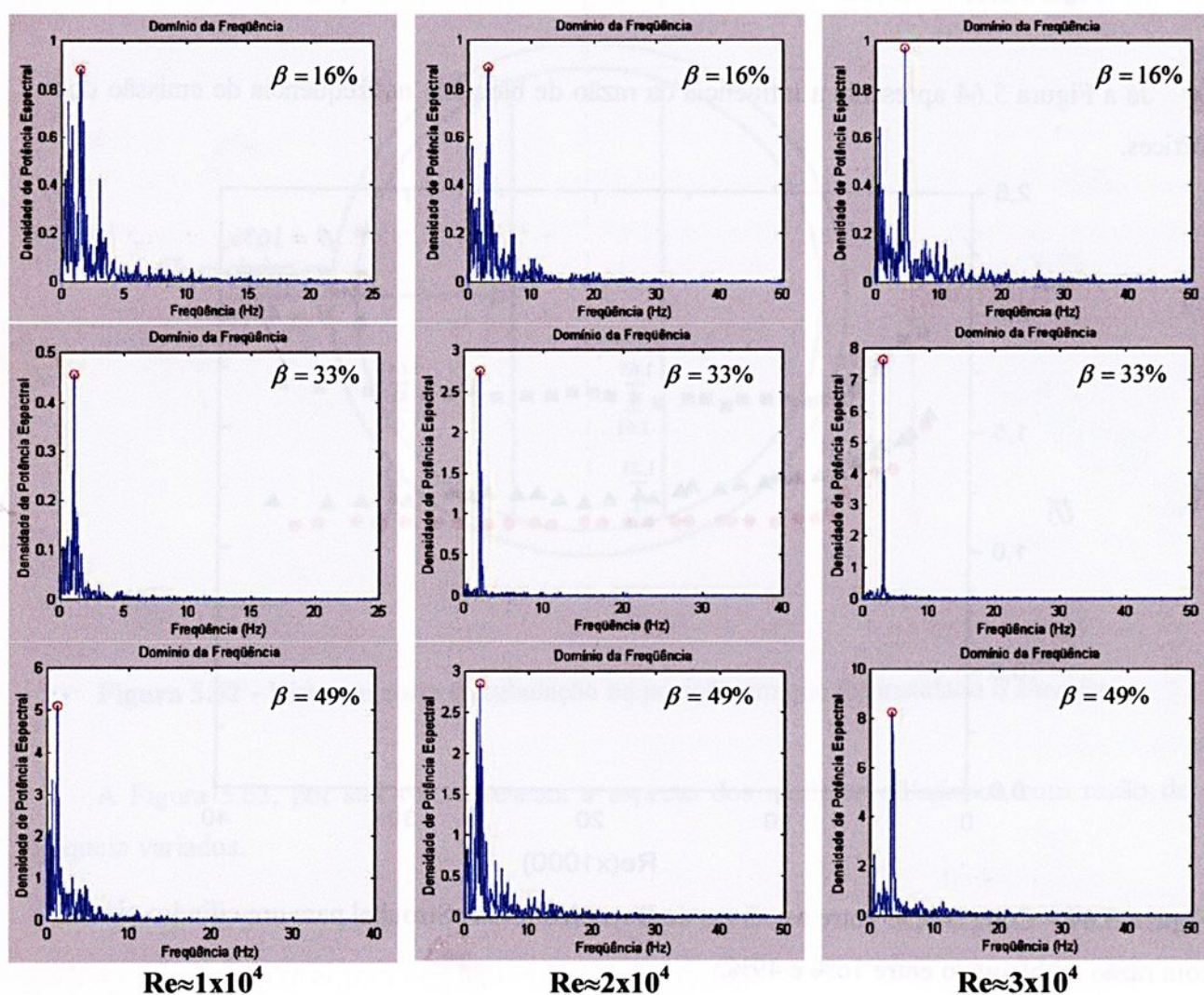


Figura 5.65 - Espectros de frequência para três razões de bloqueio distintas (escalas lineares arbitrárias).

Analisando a figura anterior, pode-se notar a presença de uma segunda frequência, para razões de bloqueio da ordem de 16 e 49%. Já para a razão de bloqueio de 33%, observa-se a presença de uma frequência dominante, sem a presença de frequências secundárias. Desta forma os modelos cilíndricos testados no presente trabalho possuem uma razão de bloqueio satisfatória, que permite a obtenção de um espectro de frequência com uma frequência dominante bem definida.

Razão de Forma

Os modelos cilíndricos retangulares foram confeccionados com diferentes razões de forma, que é definido como:

$$\phi = \frac{A}{B} \quad (5.3)$$

onde A é a dimensão da altura e B é a dimensão da base da seção transversal retangular do modelo cilíndrico – Figura 5.66.

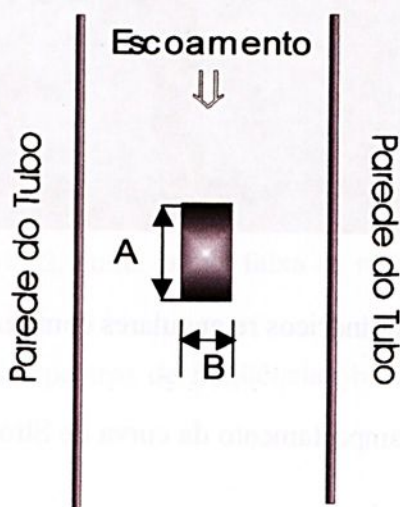


Figura 5.66 - Cilindro retangular imerso perpendicularmente no escoamento.

A Tabela 5.2 apresenta as principais características dimensionais destes modelos cilíndricos.

Tabela 5.2 - Dimensões nominais dos modelos cilíndricos retangulares.

Modelo	A (mm)	B (mm)	$\phi = A/B$
B ₁	12	24	0,5
B ₂	24	24	1,0
B ₃	36	24	1,5
B ₄	48	24	2,0

A Figura 5.67 apresenta o aspecto dos modelos cilíndricos retangulares com razão de forma variadas.

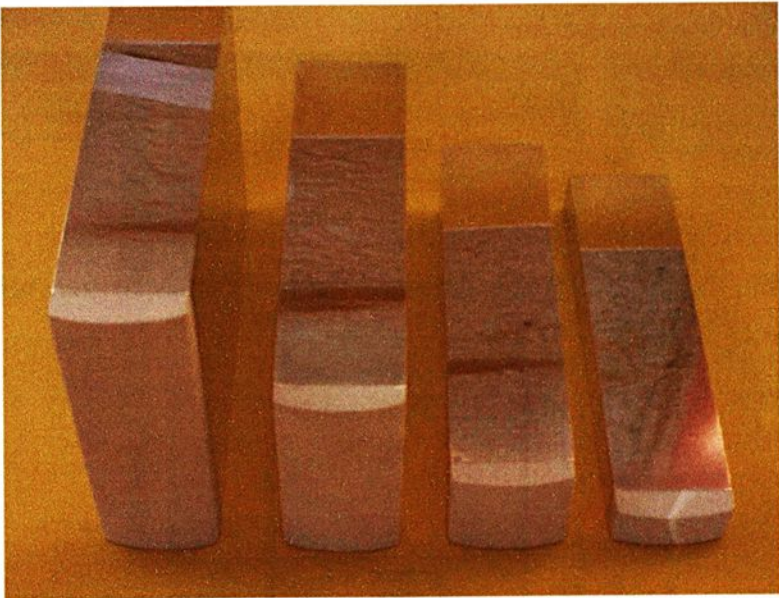


Figura 5.67 - Modelos cilíndricos retangulares com razões de forma variadas.

Já a Figura 5.68 mostra o comportamento da curva de Strouhal para um cilindro retangular com várias razões de forma (ϕ).

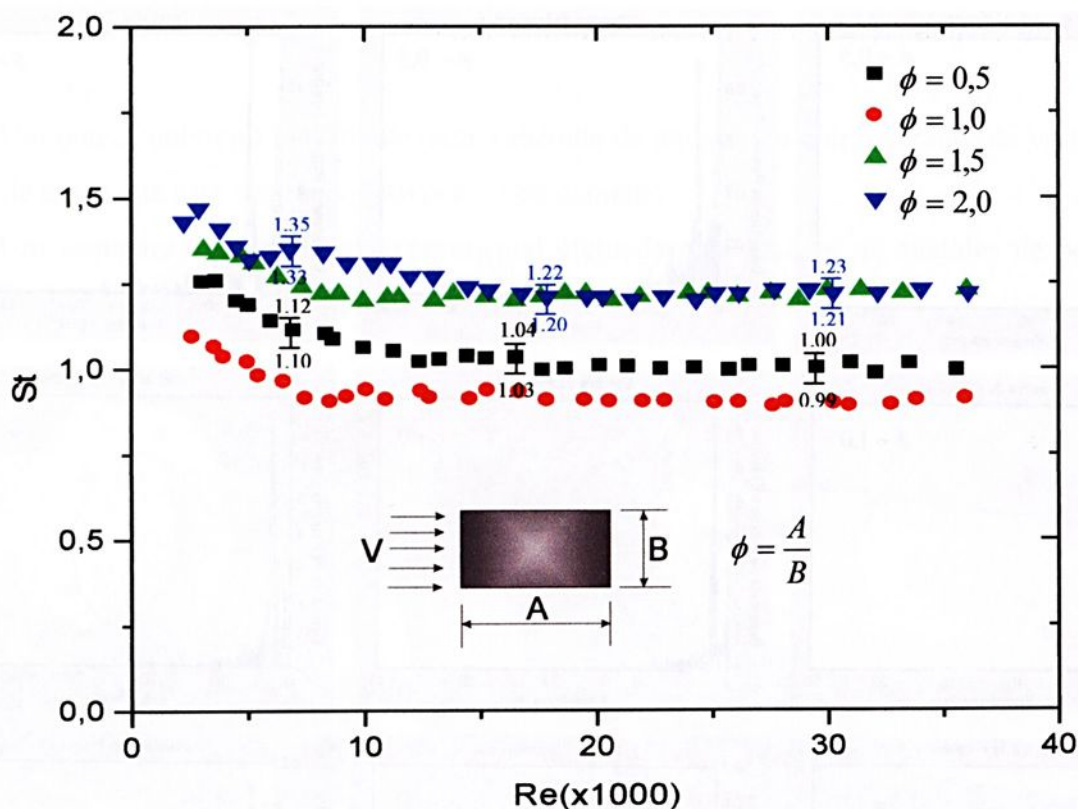


Figura 5.68 – Comparação entre as curvas de Reynolds *versus* Strouhal para um cilindro retangular com razão de forma entre 0,5 e 2.

Cilindros retangulares com razões de forma 0,5 e 1,0 possuem número de Strouhal bem definidos ($St \approx 1,0$ e $0,9$, respectivamente), característicos de cada geometria. Já para os cilindros retangulares com razões de forma 1,5 e 2,0, as respectivas curvas de Strouhal comportam-se de maneira idênticas e fixas em $St \approx 1,22$, numa ampla faixa de números de Reynolds compreendida entre $1,4 \times 10^4 < Re < 3,6 \times 10^4$.

A Figura 5.69 apresenta os espectros de frequência obtidos a partir do cilindro retangular com várias razões de forma.

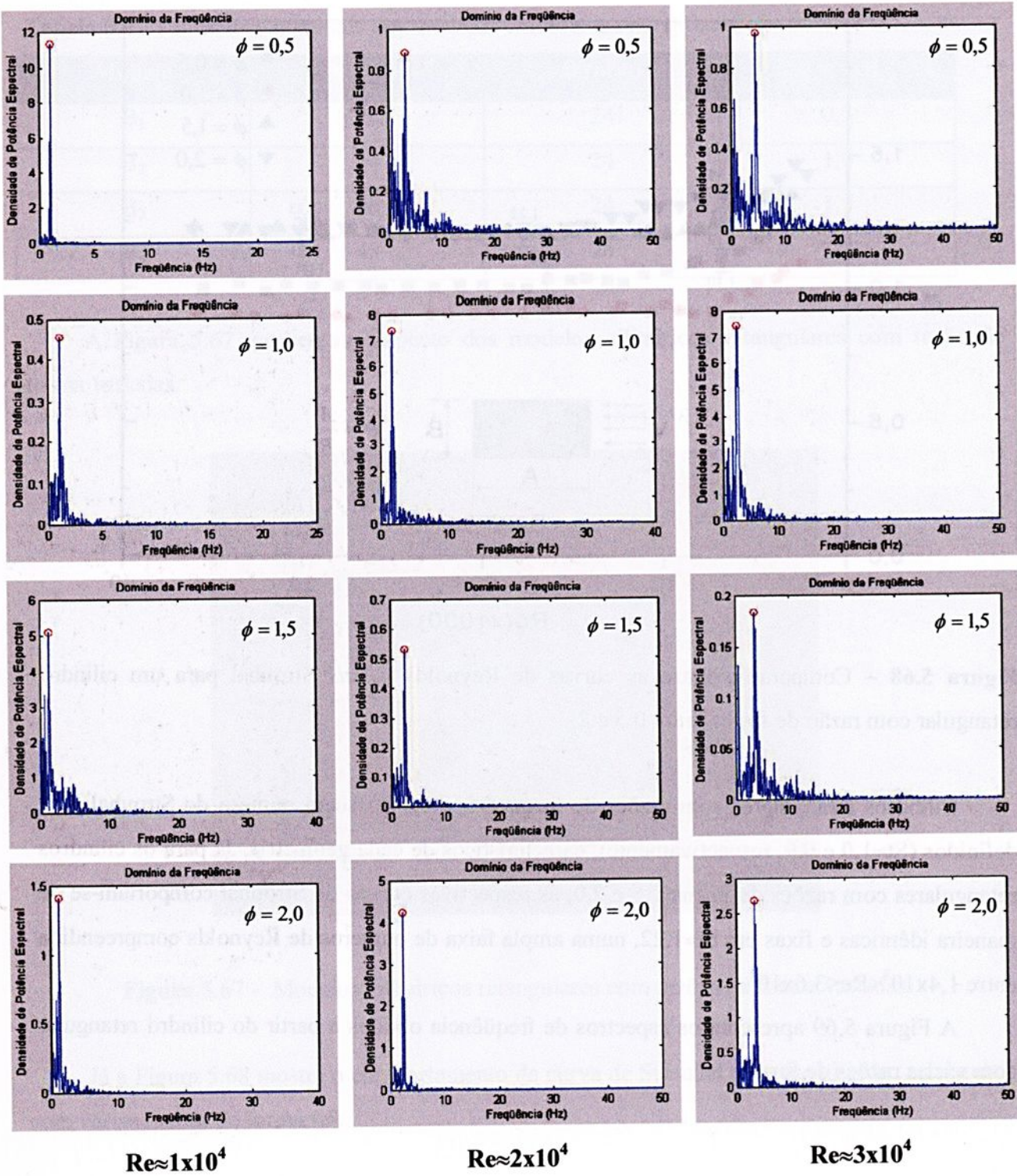


Figura 5.69 - Espectros de freqüência para várias razões de forma para um cilindro quadrado (escalas lineares arbitrárias).

Perda de Carga

Um outro parâmetro importante para a escolha de um melhor corpo gerador de vórtice, é a perda de carga que esta obstrução provoca no escoamento.

Um esquema da montagem experimental efetuada para realizar as medidas de perda de carga são apresentadas na Figura 5.70.

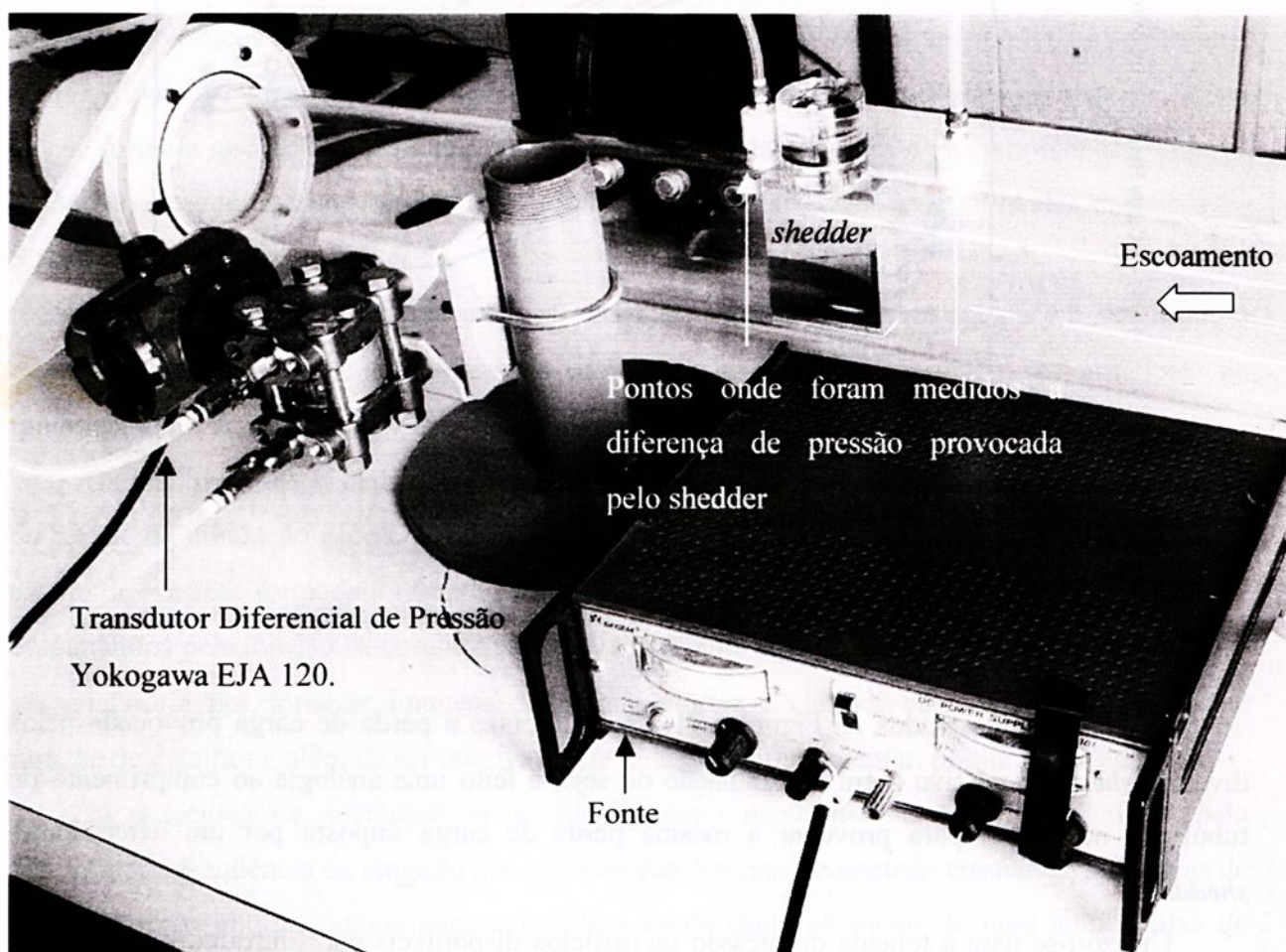


Figura 5.70 – Montagem experimental para realizar as medidas de perda de carga.

A diferença de pressão provocada pelas diversas geometrias de *shedder*, foram medidas por meio de um transdutor diferencial de pressão Yokogawa modelo EJA 120 – DES4A-22DC/D4.

A seguir são apresentadas as perdas de carga provocadas pelas diversas geometrias de *shedder*, relativo a 1m de tubulação de 94 mm de diâmetro interno. Nestes ensaios, foram medidas as perdas de carga provocadas por cada *shedder* (Y) e também a perda de carga

referente a 1m de tubulação (X). Dividindo estes valores (Y/X) é possível obter os resultados apresentados na Figura 5.71.

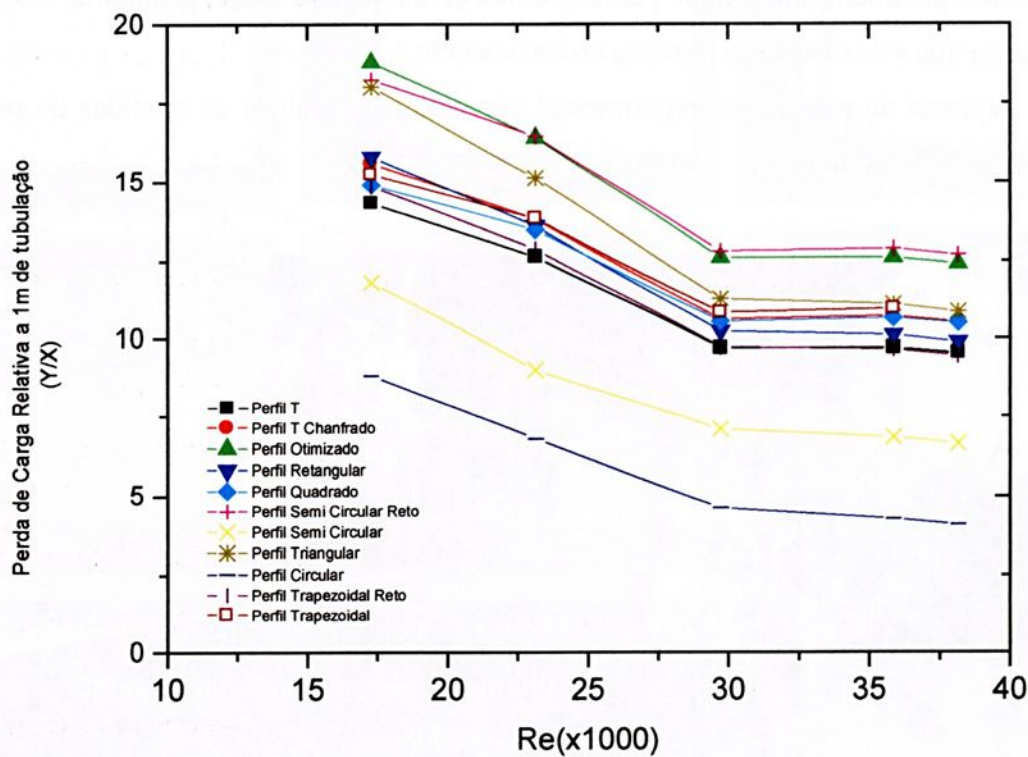


Figura 5.71 – Perda de carga relativo a 1m de tubulação.

Os dados apresentados na Figura 5.71, são referentes a perda de carga provocada pelos diversos *shedders* relativo a 1m de tubulação ou seja, é feito uma analogia ao comprimento de tubulação necessária para provocar a mesma perda de carga imposta por um determinado *shedder*.

Utilizou-se para a tomada de pressão os orifícios disponíveis para introdução das sondas anemométricas. Desta forma não foram utilizados anéis piezométricos.

5.4 Conclusões

Neste capítulo, foi apresentado um estudo da determinação experimental da frequência de emissão de vórtices ao redor de corpos prismáticos não-aerodinâmicos posicionados perpendicularmente ao escoamento.

Para baixos números de Reynolds ($Re < 10^3$) foi utilizado um túnel hidrodinâmico vertical e com o auxílio da técnica de contagem de fotogramas foi possível determinar a frequência de emissão de vórtices para cada cilindro investigado e estudar o comportamento da curva Strouhal *versus* Reynolds. Através da visualização do escoamento, foram adquiridas imagens da esteira que se forma a jusante dos cilindros, sendo uma ferramenta poderosa para compreender não só o fenômeno de geração de vórtices bem como avaliar as possíveis irregularidades na curva de Strouhal.

Para números de Reynolds mais elevados os ensaios foram realizados em um módulo experimental, especialmente concebido com a finalidade de simular o princípio de funcionamento de um medidor de vazão do tipo vórtice.

Os resultados de visualização obtidos no módulo experimental mostram a forte influência da parede da tubulação no escoamento, provocando a rápida dissipação do corante marcador da esteira de vórtices formada à jusante do corpo gerador de vórtices. A técnica de visualização de escoamentos pela injeção de corantes líquidos à montante do corpo gerador de vórtices, mostrou-se satisfatória por fornecer imagens de grande nitidez e clareza, caracterizada pela enorme riqueza de detalhes e além de ser relativamente fácil de se implementar, possui baixo custo.

Já a técnica de anemometria de filme quente mostrou-se extremamente eficaz para determinar a frequência de emissão dos vórtices das diversas geometrias ensaiadas. As curvas de $St \times Re$ então obtidas, apresentaram uma boa estabilidade ao longo de uma ampla faixa de números de Reynolds analisada.

Por fim, os resultados de perda de carga apresentados no presente trabalho são apenas de caráter preliminar, pois na realidade o ideal seria a confecção de um anel piezométrico à montante e à jusante do corpo gerador de vórtices para efetuar as medidas de diferença de pressão provocadas por esta obstrução.



CONCLUSÕES

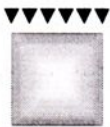
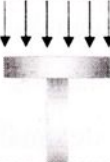
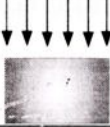
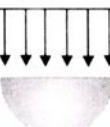
Este trabalho refere-se ao estudo experimental da emissão de vórtices ao redor de corpos não-aerodinâmicos inseridos em dutos circulares, para moderados números de Reynolds com aplicação prática nos medidores de vazão. Para este propósito foi construído um módulo experimental que simula o princípio de funcionamento de um medidor de vazão do tipo vórtice e também confeccionados inúmeros *shedders*, cujas geometrias são originalmente empregadas neste tipo de medidor. Além do mais, foi utilizado um túnel hidrodinâmico vertical visando uma melhor compreensão acerca dos complexos fenômenos associados à geração e desprendimento de vórtices ao redor de corpos prismáticos não-aerodinâmicos.

Basicamente, duas técnicas experimentais foram amplamente empregadas, ao longo de todo o trabalho: a anemometria de fio quente e a visualização de escoamentos. A anemometria foi utilizada, primeiramente, para a qualificação do módulo experimental e, em seguida, na determinação da frequência de emissão dos vórtices na esteira dos modelos cilíndricos. A visualização de escoamentos, por sua vez, apresentou-se como uma ferramenta de análise qualitativa, permitindo a identificação de padrões dos escoamentos e auxiliando na interpretação dos resultados quantitativos.

Neste trabalho foram obtidas as curvas de $St \times Re$ de diferentes geometrias para o corpo gerador de vórtices e além do mais foram investigados diversos parâmetros, que podem exercer influência sobre o comportamento no número de Strouhal, tais como a razão de forma e bloqueio. A Tabela 6.1 condensa os resultados obtidos para as diversas geometrias de corpo gerador de vórtice analisadas. Nesta tabela é apresentada a faixa de Strouhal estável e constante de cada geometria analisada, o intervalo de confiança para o número de Strouhal e a perda de carga relativa imposta por cada corpo. O intervalo de confiança aqui apresentado foi retirado das diversas curvas de $Re \times St$ apresentados na seção 5.3. Como um exemplo, para o cilindro quadrado para $Re \approx 5000$ o intervalo de confiança para o número de Strouhal é de $0,995-0,960=0,035$. Um maior intervalo de confiança apresentado nesta tabela, indica uma maior faixa na qual o número de Strouhal pode variar ou seja, uma ampla variação na frequência de emissão

de vórtices para um mesmo número de Reynolds, característica indesejável para qualquer corpo gerador de vórtice a ser empregado em medidores de vazão que se utilizam deste fenômeno.

Tabela 6.1 – Comparação entre as diversas geometrias estudadas.

Geometria do Corpo Gerador de Vórtices	Faixa de Strouhal Estável e Constante	Intervalo de Confiança para o Número de Strouhal			Perda de Carga Relativa
		Re≈5000	Re≈20000	Re≈35000	
	$17,0 \times 10^3 < Re < 30,0 \times 10^3$	0,035	0,037	0,018	intermediário
	$12,6 \times 10^3 < Re < 36,2 \times 10^3$	0,019	0,012	0,016	baixa
	$14,1 \times 10^3 < Re < 37,3 \times 10^3$	0,010	0,009	0,008	intermediário
	$13,6 \times 10^3 < Re < 37,3 \times 10^3$	0,007	0,010	0,005	elevada
	O número de Strouhal sofre constantes alterações em toda a faixa analisada.	0,043	0,036	0,025	baixa
	$9,3 \times 10^3 < Re < 35,2 \times 10^3$	0,010	0,008	0,009	intermediário
	$16,6 \times 10^3 < Re < 30,0 \times 10^3$	0,012	0,013	0,007	baixa
	$12,6 \times 10^3 < Re < 37,3 \times 10^3$	0,046	0,008	0,015	elevada
	$10,3 \times 10^3 < Re < 34,7 \times 10^3$	0,028	0,010	0,007	baixa
	O número de Strouhal sofre constantes alterações em toda a faixa analisada.	0,030	0,013	0,009	baixa
	$11,0 \times 10^3 < Re < 35,5 \times 10^3$	0,012	0,017	0,011	elevada

Portanto, as geometrias mais adequadas para o corpo gerador de vórtices a ser empregado nos medidores de vazão serão aquelas que apresentarem um melhor balanço entre as características anteriormente apresentadas.

Em todos os casos analisados pôde-se notar que para baixos números de Reynolds, a curva de $St \times Re$ obtido em dutos circulares apresentam um comportamento particular ou seja, à medida em que o número de Reynolds diminui, o número de Strouhal cresce acentuadamente, diferente dos dados obtidos no túnel hidrodinâmico.

Os resultados obtidos foram amplamente comparados com os de Kawakita (1992) e Gonçalves (2001), por apresentarem semelhança construtiva do dispositivo experimental ou seja, escoamento confinado em dutos circulares.

Os resultados mostram uma boa concordância com os de Kawakita (1992) e Gonçalves (2001) para a maioria das geometrias de *shedder* analisadas.

6.1 Recomendações para Futuros Trabalhos

No presente trabalho a preocupação primordial estava voltada na construção do módulo experimental, na confecção dos diferentes *shedders*, na validação da bancada de testes e na realização de ensaios com diferentes geometrias para o *shedder*, onde foi possível avaliar alguns parâmetros. Durante a realização dos ensaios experimentais e da análise e interpretação dos resultados obtidos, surgiram várias idéias para futuros trabalhos, que poderiam ser implementadas, como uma extensão do estudo aqui desenvolvido. As mais pertinentes são apresentadas a seguir:

- Analisar o nível de ruído e vibração na bancada experimental e verificar a sua influência na frequência de emissão dos vórtices;
- determinar a frequência de emissão de vórtices variando a razão de forma e de bloqueio para todas geometrias, o que permitiria identificar as razões de forma e bloqueio críticas, e analisar qual geometria estaria mais suscetível a essas variações;
- estudar a influência do ângulo de ataque para todos os cilindros, verificando a sua influência na frequência de emissão de vórtices;
- variar a intensidade turbulenta na seção de ensaios, sendo possível mediante a instalação de telas de diâmetros variáveis;

- aumentar o comprimento da tubulação, possibilitando refazer uma nova validação da bancada de teste;
- confecção de um anel piezométrico à montante e à jusante do corpo gerador de vórtice para realizar as medidas de perda de carga;
- testar as inúmeras geometrias para o corpo gerador de vórtice na presença do “gap”(abertura existente entre o corpo e a parede inferior da tubulação) e comparar os resultados de anemometria obtidos com o do presente trabalho.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, O., 2001, "Simulação Numérica do Escoamento ao Redor de Cilindros Retangulares", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira FEIS-Unesp, 200p.
- Aparecido, J. B. & Vieira, E. D. R., 1999, "Design and Construction of Small Axisymmetric Contractions", Anais da 5ª Reunión do Grupo de Trabajo Sobre Hidromecánica, pp. 103-116, Montevideu – Uruguai.
- Azevedo, L. F. A., Almeida, J. A., 2002, "Velocimetria por Imagens de Partículas", III Escola de Primavera em Transição e Turbulência, pp. 191-215, Florianópolis – SC.
- Balint, E., 1953, "Techniques of Flow Visualization", *Aircraft Engineering*, vol.25, pp.161-167.
- Basile, A.C.S., 1995, "Avanços Tecnológicos nos Medidores de Vazão Tipo Vortex", Anais do 2º Simpósio Brasileiro de Medição de Vazão, São Paulo, pp. 1-10.
- Bearman, P.W. & Trueman, D.M, 1972, "An Investigation of the Flow Around Rectangular Cylinders", *Aeronautical Quartely*, Vol. 23, pp.229-237.
- Bruun, H. H., 1995, "Hot-Wire Anemometry", Oxford: Oxford University Press.
- Bruun, H. H., Farrar, B. & Watson, I., 1989, "A Swinging Arm Calibration Method for Low Velocity Hot-wire Probe Calibration", *Experiments in Fluids*, vol.7, pp.400-404.
- Campos Silva, J.B., Vieira, E.D.R. & Moura, L.F.M., 1998, "Control Volume-Finite Element and Flow Visualization Methods Applied for Unsteady Viscous Flow Past a Circular Cylinder", Anais do V Congresso de Engenharia Mecânica Norte e Nordeste, Vol.2, pp.80-87, Fortaleza – CE.
- Clayton, B. R. & Massey, B. S., 1967, "Flow Visualization in Water: A Review of Techniques", *Journal of Science and Instrumentation*, Vol.44, pp. 2-11.
- Clutter, D.W. & Smith, A.M.O, 1961, "Flow Visualization by Electrolysis of Water", *Aerospace Engineering*, vol.20, pp.24-27.
- Cohen, M.J. & Ritchie, N.J.B., 1962, "Low-Speed Three-Dimensional Contraction Design", *Journal of the Royal Aeronautical Society*, Vol.66, pp.231-236.



- Criminale Jr. & W. O. Nowell, R. W., 1965, "An Extended Use of the Hydrogen Bubble Flow Visualization Method", *AIAA Journal*, Vol. 3, nº6, pp.1203.
- Dalton, C., Xu, Y. & Owen, J. C., 2001, "The Suppression of Lift on a Circular Cylinder Due to Vortex Shedding at Moderate Reynolds Numbers", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 15, pp.617-628.
- Doebelin, E.O., 1994, "Measurement Systems – Application and Design", 4th ed., McGraw-Hill Kogakusha Ltd.
- Dobrodzicki, G.A., 1982, "Flow Visualization Water Tunnel - Its Construction and Capabilities", *NAE - National Aeronautical Establishment, Aeronautical Report LR-610 NRC n.20235*.
- Dureli, A. J. & Norgard, J. S., 1972, "Experimental Analysis of Slow Viscous Flow Using Photoviscosity and Bubbles", *Experimental Mechanics*, vol. 12, nº4, pp.169-177.
- Eguti, C.C.A., Woiski, E. R. & Vieira, E. D. R., 2002, "A Laboratory Class for Introducing Hot-Wire Anemometry in Mechanical Engineering Course", *Anais do Encit 2002*, 10 pp., Caxambu – MG.
- Esfahani, A. S., 1998, "Numerical Study of Laminar, Transitional and Turbulent Flow Past Rectangular Cylinders", Ph. D. Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Suíça.
- Freymuth, P., 1993, "Flow Visualization in Fluid Mechanics", *Review of Scientific Instrumentation*, Vol.64, n.1, pp.1-18.
- Friedman, A.S., 1956, "Chemiluminescence as a Tool in the Study of Liquid Flow Boundaries", *Journal of Applied Physics*, Vol.27, n.4, p.417.
- Geller, E.W., 1955, "An Electrochemical Method of Visualizing the Boundary Layer", *Journal of Royal Aeronautical Sciences*, Vol. 22, pp. 860-870.
- Gersten, K., 1983, "Immersed Bodies, in: *Heat Exchanger Design Handbook*", Vol.2, pp.223.1-223.9, Hemisphere Publishing Co..
- Gonçalves, H. C., 2001, "Determinação Experimental da Frequência de Emissão de Vórtices ao Redor de Corpos Rombudos", *Dissertação de Mestrado, Unesp - Ilha Solteira*, 177p.
- Gonçalves, H.C. & Vieira, E.D.R., 1998, "Determinação Experimental do Comprimento da Bolha de Recirculação da Esteira de Cilindros Circulares", *Anais do V Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, (Paper Code: MFL10)*, 6pp, Vitória – ES.

- Gonçalves, H.C. & Vieira, E.D.R., 1999, "Strouhal Number Determination for Several Regular Polygon Cylinders for Reynolds up to 600", Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, (Paper Code: AACFFE), 10 pp., Águas de Lindóia – SP.
- Gonçalves, H.C. & Vieira, E.D.R., 2000, "Hydrodynamics Flow Visualization in Oil Trap Filters", Anais (em CD ROM) do VIII Brazilian Congress of Thermal Engineering Sciences (ENCIT 2000), Porto Alegre, Brasil, 9p. 2000.
- Gonçalves, H. C., 2001, "Determinação Experimental da Frequência de Emissão de Vórtices ao Redor de Corpos Rombudos", Dissertação de Mestrado, Unesp - Ilha Solteira, 177p.
- Goujon-Durand, S., 1995, "Linearity of the Vortex Meter as a Function of Fluid Viscosity", Flow Measurement and Instrumentation, vol.6 , nº3, pp. 235-238.
- Guellouz, M. S. & Tavoularis, S., 1995, "A simple Pendulum Technique for the Calibration of Hot-wire Anemometers over Low-velocity Ranges", Experiments in Fluids, Vol. 18, pp.199-203.
- Han, T. & Patel, V.C., 1979 "Flow Separation on a Spheroid at Incidence", *Journal of Fluid Mechanics*, vol.92, part 4, pp.643-657.
- Hans, V., Poppen, G., von Lavante, E. & Perpeet, E., 1998, "Vortex Shedding Flowmeters and Ultrasound Detection: Signal Processing and Influence of Bluff-Body Geometry", Flow Measurement and Instrumentation, vol. 9, pp.79-82.
- Hirai, A. H., Gasche, J. L., Vieira, E. D. R. & Mansur, S. S., 1999, "Visualização de Escoamentos através da Técnica de Geração de Bolhas de Hidrogênio", Revista de Iniciação Científica da Unesp, Vol. 1, nº1, pp.109-115.
- Hirai, A. H., Gasche, J. L., Vieira, E. D. R. & Mansur, S. S., 2000, "Visualização de Escoamentos através da Técnica de Geração de Bolhas de Hidrogênio", Anais do VII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte.
- Hirai, A. H., Vieira, E. D. R. & Campregher Jr., R., 2002, "Flow Around Prismatic Bluff-Bodies", Anais do II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, (Paper Code: CPB0314), 10 pp., João Pessoa – PB.
- Howland, B., Springer, G.S. & Hill, M.G., 1966, "Use of Electrochemiluminescence in Visualizing Separated Flows", *Journal Fluid Mechanics*, Vol.24, part 4, p.697-704.
- Igarashi, T., 2000, "Performance of New Type Vortex Shedder for Vortex Flow Meter".



- Igarashi, T., 1985, "Fluid Flow Around a Bluff Body Used for a Kármán Vortex Flow Meter", Proc. Int. Symp. Fluid Control and Measurement, Vol.2, 1017-1022.
- Kawakita, K., 1992, "Estudo de Corpos de Perfil Não-Aerodinâmico Visando a Aplicação em Medidores de Vazão do Tipo Vórtice", Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, São Paulo.
- Kawakita, K. & Silveiras, O.M., 1993, "Estudo de Corpos de Perfil Não-Aerodinâmico Visando a Aplicação em Medidores de Vazão do Tipo Vórtice", Anais do XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, pp.901-904.
- Kline, S.J. & McClintock, F.A., 1953, "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments", *Mechanical Engineering*.
- Lamb, H., 1945, "Hydrodynamics", Dover Publications, New York.
- Lee, T. & Budwig, R., 1991, "Two Improved Methods for Low-speed Hot-wire Calibration", Measurement Science & Technology, Vol.2, pp. 643-646.
- Lindquist, C., Vieira, E.D.R. & Mansur, S.S., 1999, "Flow Visualization of the von Kármán Vortex Street: a Tool for Fluid Mechanics Learning", International Conference on Engineering and Computer Education, Rio de Janeiro - RJ.
- Lindquist, C., Vieira, E.D.R. & Mansur, S.S., 1997, "Análise Experimental do Escoamento ao Redor de um Perfil de Base Quadrada em Dois Diferentes Ângulos de Ataque", in: *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, paper code 58, Bauru - SP..
- Lindquist, C., 2000, "Estudo Experimental do Escoamento ao Redor de Cilindros de Base Quadrada e Retangular", Dissertação de Mestrado, Unesp - Ilha Solteira, 189p.
- Longui, E. C., Mansur, S. S. & Vieira, E. D. R., 2000, "Projeto e Construção de uma Contração Axissimétrica, Anais do VII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte - MG.
- Matsui, T., Nagata, H. & Yasuda, H., 1979, "Some Remarks on Hydrogen Bubble Technique for Low Speed Water Flows", In Flow Visualization ed. By T. Asanuma, pp. 215-220, Hemisphere, Washington, DC.
- Menz, B., 1997, "Vortex Flowmeter with Enhanced Accuracy and Reliability by Means of Sensor Fusion and Self-Validation", Measurement, Vol. 22, Issues 3-4, pp.123-128.
- Merrett, J., 1995, "Volume or Mass?", Control and Instrumentation, Vol. 27, pp. 31 - 34.



- Merzkirch, W., 1987, "Flow Visualization", ed.2, Academic Press Inc..
- Miau, J. J., Hu, C. C. & Chou, J. H., 2000, "Response of a Vortex Flowmeter to Impulsive Vibrations", *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 11, Issue 1, pp 41-49.
- Milne-Thomson, L.M., 1938, "Theoretical Hydrodynamics", MacMillan and Co. Limited, London, pp.336-344.
- Modi, V.J. & Dikshit, A.K., 1975, "Near-Wakes of Elliptic Cylinders in Subcritical Flow", *AIAA Journal*, Vol.13, n^o4, pp. 490 – 497.
- Moffat, R.J., 1982, "Contributions to the Theory of Single-Sample Uncertainty Analysis", *Journal of Fluids Engineering*, vol.104, pp.250-260.
- Moffat, R.J., 1988, "Describing the uncertainties in experimental results", *Experimental Thermal and Fluid Science*, no.1, pp.3-17.
- Moffat, R.J., 1985, "Using Uncertainty Analysis in the Planning of an Experiment", *Journal of Fluids Engineering*, Vol.107, pp.173-178.
- Mordoff, K.F., 1986, "NASA Water Tunnel Aids Flow Dynamics Research", *Aviation Week & Space Technology*, vol.22, n.14, pp.130-131.
- Mueller, T. J., 1984, "Flow Visualization by Direct Injection", *Fluid Mechanics Measurements*, Goldstein, R. J. (ed.), Hemisphere Publishing Co., Washington.
- Obasaju, E.D., 1983, "An Investigation of the Effects of Incidence on the Flow Around a Square Section Cylinder", *Aeronautical Quarterly*, Vol.34, pp.243-259.
- Odell, G.M. & Kovasznay, L.S.G., 1971, "A New Type of Water Channel with Density Stratification", *Journal of Fluid Mechanics*, vol.50, part 3, pp.535-543.
- Okajima, A., 1982, "Strouhal Numbers of Rectangular Cylinders", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.123, pp.379–398.
- Ower, E. & Pankhurst, R.C., 1977, "The Measurement of Air Flow", Pergamon Press, Oxford.
- Pankanin, G.L. & Krystkowicz, G., 1995, "Influence Of Sensor Design On Vortex Meter Properties", *Proceedings of the 2nd Brazilian Symposium on Flow Measurement*, São Paulo, pp.19-26.



- Persen, L. N., Sætran, L. R., 1984, "Hot-film Measurements in a Water Tunnel", *Journal of Hydraulic Research*, Vol.21, no. 4, pp. 379-387.
- Pluister, J. W. & Nagib, H. M., 1975, "Evaluation of a Hot-film Calibration Tunnel for Low-velocity Water Flows", *DISA Information*, Vol.17, pp.29-33.
- Popovich, A.T. & Hummel, R.L., 1967, "A New Method for Non-Disturbing Turbulent Flow Measurements Very Close to a Wall", *Chemical Engineering Science*, Vol.22, n.1, pp.21-25.
- Roshko, A., 1955, "On the Wake and Drag of Bluff Bodies", *Journal of the Aeronautical Sciences*, Vol.22, pp.124-132.
- Samways, A. L., Ali, J., Al-Deen, M. F. N. & Bruun, H. H., 1994, "The Calibration of and Measurements with Cylindrical Hot-film Probes in Water Flows", *Measurements Science and Technology*, Vol. 5, pp.1551-1559.
- Sarpkaya, T. & Kline, H.K., 1982, "Impulsively-Started Flow About Four Types of Bluff Body" *Trans. of the ASME: Journal of Fluids Engineering*, Vol.104, pp.207 – 213.
- Sasaki, T., Asayama, Y., Motoyoshi, Y., Yamamoto, H. & Fukami, T., 1982, "A Kármán Vortex Air Flow Sensor", *SAE Paper 820322*.
- Schraub, F.A., Kline, S.J., Henry, J., Runstadler Jr., P.W. & Littell, A., 1965, "Use of Hydrogen Bubbles for Quantitative Determination of Time-Dependent Velocity Fields in Low-Speed Water Flows", *Journal of Basic Engineering*, vol.87, pp.429-444.
- Settles, G.S., 1986, "Modern Developments in Flow Visualization", *AIAA Journal*, vol.24, n°8, pp. 1313-1323.
- Sumer, B. M., Christiansen, N. & Fredsoe, J., 1997, "The Horseshoe Vortex and Vortex Shedding Around a Vertical Wall-Mounted Cylinder Exposed to Waves", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 332, pp. 41-70.
- Unal, M.F. & Rockwell, D., 1988, "On Vortex from a Cylinder Part 1: The Initial Instability", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.190, pp.491-512.
- Van Dyke, A., 1982, "An Album of Fluid Motion", The Parabolic Press, Stanford.
- Vickery, B.J., 1966, "Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.25, pp.481-494.

- Vieira, E.D.R., 1997, "Estudo Qualitativo e Quantitativo do Escoamento ao Redor de corpos Não-Aerodinâmicos Utilizando Técnicas de Visualização em Meio Hidrodinâmico", Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, São José dos Campos, Brasil, 200 p.
- Werlé, H., 1973, "Hydrodynamic Flow Visualization", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol.5, pp.361-382.
- White, F.M., 1999, "Fluid Mechanics", ed.4, McGraw-Hill, New York, 826 p.
- Wolochuk, M.C., Plesniak, M.W. & Braun, J.E., 1996, "The Effects of Turbulence and Unsteadiness on Vortex Shedding from Sharp-edged Bluff Bodies", Journal of Fluids Engineering, Vol.118, pp.18-25.
- Yokoi, Y & Kamemoto, K., 1994, "Vortex Shedding from a Oscillating Circular Cylinder in a Uniform Flow", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.8, pp.121-127.



VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS

A.1 Objetivos

A visualização de escoamentos visa a investigação de diferentes fenômenos encontrados em escoamentos, além de ser muito útil na apresentação educacional de fenômenos já conhecidos. Ela estimula e auxilia na busca de novos conceitos, teorias e metodologias de cálculo.

A visualização de escoamentos explora globalmente os campos físicos de escoamento, em contraste com as sondas locais (tubo de Pitot, anemômetro de fio quente, anemômetro laser) que embora sejam mais precisas, trazem informações pontuais. Uma outra forma de visualizar os escoamentos é através dos meios computacionais, que denominaremos aqui de visualização computacional. As visualizações física e computacional de escoamentos contribuem de maneira sinérgica para a ciência da mecânica dos fluidos. Um campo complexo de escoamento é melhor entendido quando a visualização de escoamentos, as medições locais e a visualização computacional 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 estas medidas.

Desde os primeiros experimentos de Reynolds em 1883, os avanços na mecânica dos fluidos envolveram o contínuo desenvolvimento de novas técnicas para a visualização de escoamentos. Os experimentalistas 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.

A.2 Classificação

Os principais métodos de visualização de escoamentos podem ser classificados em: traçadores no interior do escoamento ou na interface líquido-gás, traçadores na fronteira sólida (traçadores de superfície) e ópticos (intrínsecos).

Os métodos traçadores no interior do escoamento ou na interface líquido-gás podem ser subdivididos em:

- partículas individuais ou bolhas;
- fumaça, vapores, névoas e emanações gasosas em gases;
- corantes, bolhas de hidrogênio e liberações químicas em líquidos;
- outros (flocos, descargas elétricas, folha de luz).

Os métodos traçadores na fronteira sólida, por sua vez, podem ser subdivididos em:

- mecânicos (tufos de superfície, películas líquidas, gotas de óleo);
- físicos (sublimação, dissolução de películas, cristais líquidos);
- reações químicas.

Os métodos ópticos podem ser subdivididos em:

- índice de refração (*Schlieren*, *Shadowgraphics*, interferometria, holografia, interface líquido- gás);
- polarização (*streaming birefringence*);
- densidade (absorção de raio-X, ultravioleta, ultra-som, ressonância magnética nuclear);
- tomografia.

O processamento da imagem na visualização experimental de escoamentos pode ser classificado em: processamento manual, processamento automático (digital, óptico, híbrido), velocimetria de imagem (velocimetria por partículas - “*PIV*” e velocimetria por espalhamento - “*LSV*”), tomografia e reforço computacional da imagem.



A.3 Métodos Básicos de Visualização de Escoamentos

Basicamente, a visualização de escoamentos requer um dispositivo gerador do escoamento, alguma técnica para tornar o escoamento visível e um sistema de registro para a gravação permanente das imagens.

O gerador de escoamento e o equipamento de visualização muitas vezes formam um sistema integrado, enquanto o sistema de gravação é uma unidade separada, na maioria das vezes, uma câmera fotográfica ou câmera de vídeo.

Os geradores de escoamento mais frequentemente empregados constituem-se nos túneis de vento, túneis aerodinâmicos, túneis hidrodinâmicos, canais e tanques de água.

Como exemplo de um gerador de escoamento, a Figura A.1 mostra um desenho esquemático de um túnel aerodinâmico, utilizado pela Universidade do Colorado para a visualização do escoamento ao redor de modelos aerodinâmicos através da técnica de injeção de fumaça. Na entrada deste túnel foram instalados colmeias e telas para reduzir o nível de turbulência na seção de testes para 0,05 % dentro da faixa de velocidade de 0,5 a 20 m/s. Um modelo de asa delta é montado na seção de testes como um exemplo de alguns modelos que podem ser ensaiados para geração do escoamento desejado.

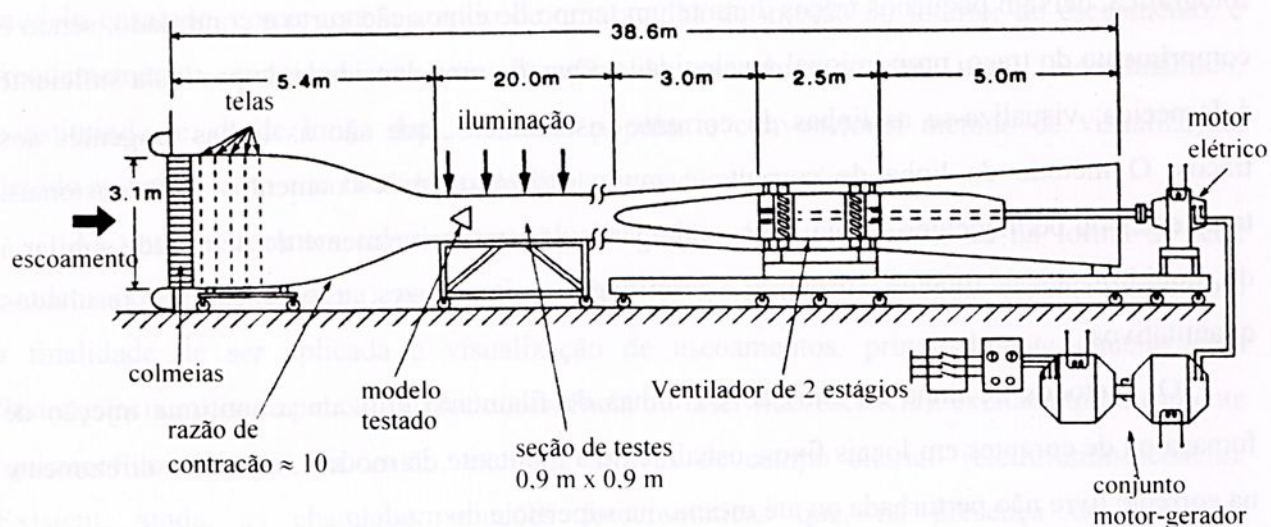


Figura A.1 - Exemplo de um túnel aerodinâmico de circuito aberto do tipo aspirado com um modelo aerodinâmico montado na seção de testes (Freymuth, 1993).

Os campos de escoamento de maior interesse são os de velocidade e vorticidade. Os campos de densidade e de outras variáveis termodinâmicas são de interesse adicional em escoamentos compressíveis ou escoamentos estratificados. Desde que os campos de velocidade e vorticidade são usualmente invisíveis, traçadores devem ser adicionados para marcar o escoamento. Em escoamentos de densidade e concentração variáveis, a mudança no índice de refração é mais freqüentemente usada para visualização através de métodos ópticos.

A técnica para tornar o escoamento visível depende fortemente do método de visualização. Uma ampla distinção é feita entre os métodos traçadores de visualização e os métodos ópticos. Os métodos traçadores utilizam traçadores físicos para a visualização dos campos de velocidade e vorticidade, principalmente em escoamentos homogêneos a baixa velocidade. Os métodos ópticos básicos utilizam a mudança de índices de refração que resulta em mudanças de densidade ou concentração em escoamentos com fortes gradientes de densidade, como nos escoamentos compressíveis, termicamente convectivos ou estratificados.

A.3.1 Métodos Traçadores

Os métodos traçadores básicos são subdivididos em métodos da linha de corrente e da linha de emissão. No método da linha de corrente, pequenas partículas, mas individualmente visíveis, são introduzidas no escoamento. Estas partículas, quando registradas em uma chapa fotográfica, deixam pequenos traços durante um tempo de exposição curto e controlado, sendo o comprimento do traço, proporcional à velocidade. Quando uma densidade de partícula suficiente é fornecida, visualiza-se as linhas de corrente instantâneas, que são as linhas tangentes aos traços. O método da linha de corrente é muito utilizado em escoamentos bidimensionais, transientes ou permanentes em líquidos, onde partículas (preferivelmente de densidade similar à do líquido) são facilmente suspensas, permitindo muitas vezes, a obtenção de resultados quantitativos.

Os métodos de linha de emissão ou linhas de filamento utilizam a contínua injeção de fumaça ou de corantes em locais fixos, usualmente à montante do modelo, injetados diretamente na corrente livre não perturbada ou até mesmo na superfície do modelo.

Um outro método traçador importante é baseado no uso de partículas anisotrópicas suspensas em líquidos, que encontra aplicações consideráveis em escoamentos de convecção livre e escoamentos em rotação.



Uma forma de classificação mais simples consiste em subdividir os métodos traçadores em traçadores sólidos (pequenas partículas sólidas), traçadores líquidos (tintas e corantes) e traçadores gasosos (bolhas de ar ou de hidrogênio).

Os traçadores sólidos utilizados para a visualização em meio líquido incluem pó de alumínio, pó de serra tratado, minério de ferro e baquelite. Alguns destes, como o pó de serra introduz um erro devido à grande diferença de densidade do traçador em relação a água, o que pode gerar significativos desvios da trajetória do traçador em relação à trajetória do escoamento. Esta diferença de densidade poderia ser parcialmente corrigida por um controle de temperatura ou pela adição de sal na água. A adição de sais na água de ensaio deve ser efetuada com cuidado, uma vez que uma mudança do *pH* da água pode provocar corrosão nas instalações ou então a liberação de íons que podem interferir na operação de sondas de anemometria de fio quente.

Alguns pesquisadores também usam partículas “perfeitamente esféricas” de poliestireno, mas com diâmetro relativamente grande (0,5 a 2,0 mm), tratados com acetona, para a redução da densidade ao valor “exatamente igual” ao da água. Adicionalmente, este tratamento produz uma mudança na coloração das partículas, tornando-as brancas e opacas, favorecendo sensivelmente a obtenção de imagens fotográficas. Outros autores utilizam pó cosmético e esferas de vidro, ambos com densidade relativa 2 e diâmetro de cerca de 30µm para observação de vórtices.

A técnica de injeção de traçadores líquidos, tanto com auxílio de orifícios na superfície do modelo ensaiado, como com o auxílio de uma agulha de injeção no interior do escoamento, é freqüentemente empregada na visualização de escoamentos em túnel hidrodinâmico, constituindo-se, desde longa data, no mais popular e convencional método de visualização, devido ao baixo custo e as facilidades de implementação desta técnica.

As tintas e corantes empregados são em geral o leite (*in natura* ou na forma de leite condensado diluído em água), os corantes alimentícios e as tintas fabricadas especialmente com a finalidade de ser aplicada à visualização de escoamentos, principalmente aquelas com fluorescência excitada pela luz (fotofluorescência ou laser fluorescência), excitada quimicamente (quimicofluorescência) ou, então, excitada através de campo elétrico (eletroluminescência). Existem, ainda, as chamadas soluções fotocromáticas que, na presença de radiações eletromagnéticas, alteram sua coloração.

A injeção do filete de tinta deve ocorrer de forma a introduzir a menor perturbação possível no escoamento. Assim, a velocidade e a pressão de injeção devem ser controladas e mantidas em valores próximos àqueles encontrados no escoamento, afim de que o filamento de tinta se mantenha estável.



Traçadores gasosos na forma de minúsculas bolhas podem ser usados em visualização em meio hidrodinâmico, sem provocar erros excessivos devido a diferença de densidade. Este tipo de traçador possui baixa reflexividade, dificultando sobremaneira a observação visual da imagem, exigindo cuidados adicionais na iluminação (posição, tipo e intensidade das fontes luminosas), visando aumentar o contraste das bolhas. Os traçadores gasosos mais freqüentemente utilizados em túneis de água são as bolhas de ar e as de hidrogênio. As bolhas de ar são muito menos utilizadas que as bolhas de hidrogênio.

A visualização de escoamentos através da técnica das bolhas de hidrogênio teve início durante a década de 50 e o provável autor desta técnica parece ter sido Geller (1955). Esta técnica envolve a introdução, no interior do fluxo, de um fino fio metálico de um circuito elétrico de corrente contínua. O ânodo (eletrodo positivo) deste circuito consiste simplesmente de um objeto metálico em contato com o escoamento nas proximidades do cátodo. Se a voltagem aplicada for suficiente, existe uma liberação de hidrogênio no cátodo, na forma de minúsculas bolhas, através da eletrólise da água do escoamento. Evidentemente, existe também liberação de oxigênio no ânodo, mas as bolhas são em menor número e maiores. Se o cátodo for um longo fio fino colocado ortogonalmente à direção do escoamento e se houver a geração de um pequeno pulso elétrico, colunas de bolhas de hidrogênio serão formadas ao longo do fio cátodo, sendo carregadas pelo escoamento e deformado de acordo com o perfil de velocidade local. Pulsando-se a voltagem com uma freqüência constante, obtém-se várias colunas sucessivas de bolhas.

Desde que as bolhas de hidrogênio são menores e em maior número que as bolhas de oxigênio, elas são preferidas para a visualização do escoamento. Para todos os efeitos, segundo Merzkirch (1987), recomenda-se que o tamanho das bolhas seja da ordem de grandeza do diâmetro do fio utilizado. É claro que o diâmetro das bolhas depende também da condutividade elétrica do fluido, da velocidade do escoamento (as forças cisalhantes colaboram no descolamento das bolhas do fio) e da voltagem e corrente empregada.

Todos os métodos de visualização descritos requerem uma iluminação própria, muitas vezes externas ao túnel através de uma janela transparente. Práticas comuns são o uso de holofotes (*flood lighting*), iluminação através de uma fenda, folhas de luz laser (*laser light sheets*), luz de flash fotográfico e iluminação estroboscópica em situações periódicas. Os detalhes de cada tipo de iluminação dependem da situação experimental particular e das preferências do experimentador.

O equipamento fotográfico, consistindo de uma câmera fotográfica simples, ou de uma câmera de cinema, ou uma câmera de vídeo é, usualmente, montado externamente ao túnel requerendo, portanto, uma janela para permitir o acesso óptico.

A.3.2 Métodos Ópticos

Separados dos métodos traçadores, estão os métodos ópticos, que são principalmente usados para a visualização do campo de densidade e de outros campos termodinâmicos. Estes campos são de interesse adicional aos campos de velocidade e vorticidade.

Os métodos ópticos de visualização de escoamentos são baseados, em geral, no efeito de que uma mudança na densidade provoque uma mudança no índice de refração da luz. Este método poderá ser aplicado somente quando a densidade do fluido não for constante.

Os métodos ópticos são subdivididos em *schlieren*, *shadowgraph*, métodos interferométricos (interferometria), holografia, birefringência, tomografia e termografia, sendo que o método *shadowgraph* exige menor complexidade experimental e os métodos interferométricos exigem maior complexidade experimental. O método *shadowgraph* visualiza o campo da segunda derivada espacial do índice de refração (em gases o índice de refração é uma função linear da densidade), enquanto que os métodos *schlieren* básicos mostram a primeira derivada e os métodos interferométricos básicos retratam o próprio campo de densidade.

Os sistemas *shadowgraph* e *schlieren* são os melhores para avaliação qualitativa de choques e outras interfaces de densidade ou de concentração, enquanto o método interferométrico permite a avaliação quantitativa dos campos bidimensionais de densidade.

Os métodos *shadowgraph* e *schlieren* são baseados no fenômeno físico no qual um raio de luz é desviado quando ele passa através de um meio com um gradiente de índice de refração perpendicular ao raio. O ângulo de deflexão resultante é proporcional ao gradiente do índice de refração e do caminho percorrido.

No método *shadowgraph*, as perspectivas futuras de sua utilização são promissoras do ponto de vista de obtenção de medidas quantitativas, sobretudo se associada ao processamento digital de imagens e reconstrução por tomografia.

As técnicas de visualização de escoamentos por tomografia de ultra-som, raio-x, raio gama, ultra violeta, radio frequência e ressonância magnética nuclear podem ser utilizadas em meio líquido (ou em escoamentos em múltiplas fases ou, então, em escoamentos estratificados) e constituem uma poderosa ferramenta, principalmente para os casos onde o fluido de trabalho não



é transparente ou, então, quando existe dificuldade de acesso à região ensaiada. Estas técnicas têm encontrado aplicações principalmente onde a geometria estudada impõe limitações para a observação do escoamento. Apesar da utilização desta técnica ainda ser pequena em mecânica dos fluidos, há uma grande expectativa para a sua utilização futura.

Em holografia, um feixe de luz coerente é dividido em dois, um dos quais passa pela seção de testes e o outro, chamado de feixe de referência, é desviado da seção de testes. Os dois feixes são recombinados em uma chapa fotográfica especial e o holograma resultante é uma grade de difusão formada pela emulsão na chapa fotográfica e os padrões de interferência podem ser interpretados de modo análogo ao interferômetro Mach-Zender. A principal vantagem da holografia é a possibilidade de congelar a cena de um escoamento holograficamente que, posteriormente, poderá ser reconstituída.

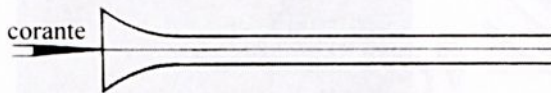
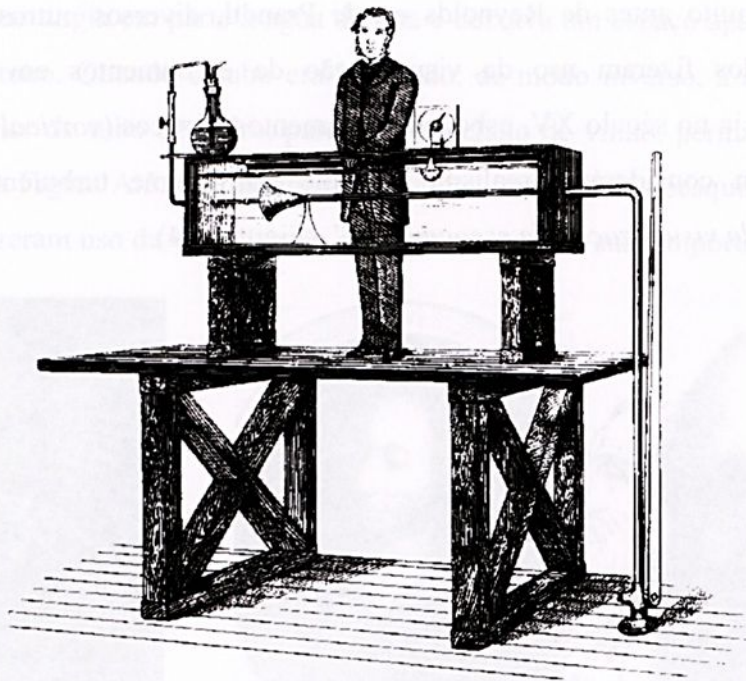
Alguns líquidos puros e algumas suspensões orgânicas apresentam o fenômeno de dupla refração da luz ou birefringência. O fenômeno que pode ser usado para visualização de escoamentos é descrito em detalhes por Balint (1953), Clayton & Massey (1967) e Goldstein (1976).

A termografia infravermelha é uma técnica moderna de engenharia que detecta as variações das radiações térmicas (aproximadamente de 3 a 5 μm). A técnica se mostra atraente porque uma única imagem apresenta todo o campo de temperaturas com excelente precisão. As aplicações desta técnica em túnel de água se restringe a observações da temperatura de superfícies externas produzidas pela influência do escoamento.

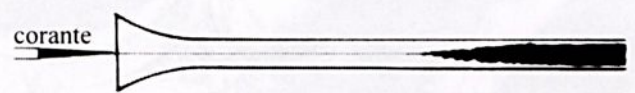
A.4 Aspectos Históricos da Visualização de Escoamentos

A visualização experimental em meio hidrodinâmico sempre constituiu uma ferramenta de fundamental importância para a compreensão dos complexos fenômenos associados à dinâmica dos fluidos. São inúmeros os exemplos de importantes descobertas realizadas por intermédio da visualização de escoamentos.

Pode-se citar a descoberta de Osborne Reynolds, em 1883, quando utilizando-se de um filete colorido com tinta de anilina, pôde observar a transição do escoamento laminar para o turbulento (Figura A.2) ou, ainda, a publicação de Ludwig Prandtl de 1904, onde o conceito de camada limite foi primordialmente estabelecido, utilizando pequenos flocos de mica em suspensão na superfície da água arrastados pelo escoamento, permitindo a sua visualização, Figura A.3.



Escoamento Laminar



Escoamento Turbulento

Figura A.2 - Através deste dispositivo Osborne Reynolds observou a transição do escoamento laminar para o turbulento (www.google.com).

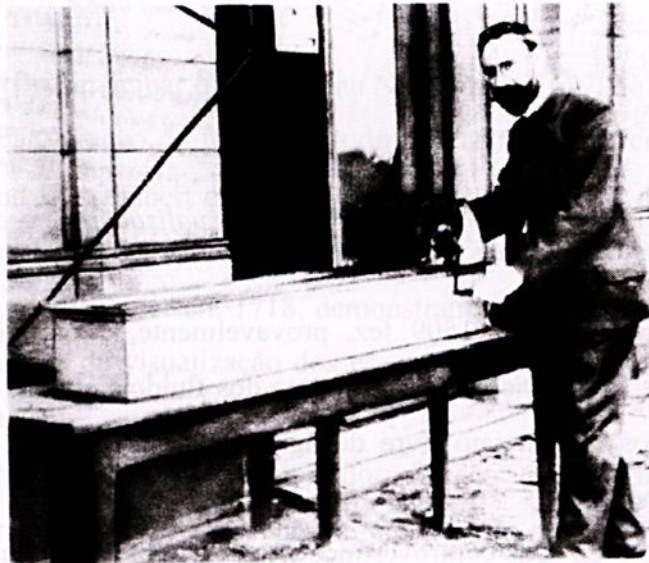


Figura A.3- Utilizando o dispositivo acima ilustrado Prandtl estabeleceu o conceito de camada limite (www.google.com).

No entanto, muito antes de Reynolds ou de Prandtl, diversos outros pesquisadores da mecânica dos fluidos fizeram uso da visualização de escoamentos em suas descobertas. Leonardo Da Vinci, já no século XV, esboçou escoamentos vórticos (*vortical flows*) ao redor de vários objetos, com considerável realismo, mesmo em regime turbulento e, por isso, é considerado o “pai da visualização de escoamentos” (Figura A.4).



Figura A.4 - Leonardo Da Vinci - o “pai da visualização de escoamentos”.

Galileu Galilei, por volta de 1590 fez, provavelmente, a primeira referência sobre a importância dos vórtices na descrição do movimento dos fluidos, quando descreveu a formação de bolhas e redemoinhos de um jato livre de água caindo dentro de um poço, a partir da observação visual do fenômeno.

Blaise Pascal descreveu seus controvertidos experimentos da coluna inclinada de água (a experiência do *Puy de Dôme*) aproximadamente em 1650. O interior de um longo tubo de vidro, vedado em sua parte superior e aberto na parte inferior, era repleto de vinho tinto e parcialmente mergulhado em posição vertical dentro de uma tina de água. Desta forma, era possível visualizar

a saída do vinho que tingia em parte a água da tina e deixava um espaço aparentemente vazio na parte superior do tubo. Quando o tubo era inclinado, de modo inverso, a água do reservatório penetrava no interior do tubo de vidro, parcialmente cheio de vinho, permitindo a visualização do escoamento. Na Figura A.5, encontram-se ilustrados imagens dos pesquisadores da mecânica dos fluidos, que fizeram uso da visualização de escoamentos em suas importantes descobertas.



Galileu Galilei



Blaise Pascal



Lorde Rayleigh

Figura A.5 - Pesquisadores da mecânica dos fluidos que fizeram uso da visualização de escoamentos em suas importantes descobertas.

Além destes, é difícil imaginar que Sir Isaac Newton em 1687, ao expressar a primeira lei do quadrado do seno para a ação de forças hidrodinâmicas na superfície de corpos sólidos, ou ainda que Jean Le Rond D'Alembert em 1777, em seus experimentos da medida da resistência de navios em canais, verificando a validade da lei do quadrado do seno para apenas altos ângulos de incidência, ou até Leonard Euler em 1718, demonstrando a inconsistência da mesma lei, não fizeram uso das facilidades da visualização dos escoamentos em meio hidrodinâmico em suas importantes descobertas.

As primeiras fotografias da mecânica dos fluidos com alguma relevância para a visualização de escoamentos, parecem ser as de um jato de água caindo em pequenas gotas (*decaying into droplets*), de autoria de Rayleigh em 1879. Embora estas fotografias não visualizassem o escoamento dentro das gotas, a formação das gotas certamente depende do escoamento e, por essa razão, é relevante à visualização de escoamentos.

A introdução da fotografia na visualização de escoamentos parece retornar a Mach & Salcher em 1887, que visualizaram ondas de choque e esteiras de um projétil veloz através do método *schlieren*, fotografado com um tempo de exposição de $0,8 \cdot 10^{-6}$ s, alcançado através da faísca elétrica. O método *schlieren* foi também usado pelo filho de Mach, L. Mach em 1897, para visualizar as ondas de compressão e rarefação num jato saindo de um bocal sônico, reproduzido no livro de Prandtl. De acordo com Settles (1986), o método *schlieren*, introduzido por Hook e por Huygens no século XVII, foi redescoberto 200 anos mais tarde por Foucault em 1859, e foi desenvolvido e popularizado para aplicações em fluidos e transferência de calor, por Toepler em 1867. L. Mach em 1896 usou interferometria para visualizar o escoamento ao redor de um projétil. O primeiro interferômetro (porém com pequena separação do raio de luz) parece ter sido desenvolvido por Jamin em 1856.

A visualização de linha de corrente, através da fotografia de pequenos traços produzidos por um grupo de partículas individualmente visíveis foi primeiramente tentado por Marey em 1893. Entretanto, foi Ahlborn em 1902 que aperfeiçoou este método.

As primeiras fotografias de linha de emissão parecem ter sido obtidas por L. Mach em 1896 em escoamento de ar perpendicular a uma placa plana. Suas linhas de emissão são difíceis de decifrar, porém foi um começo. Ele também experimentou fios de seda usados em tufos. Bem documentadas são as visualizações das linhas de emissão de escoamento permanente de água perpendicular a uma placa plana num canal estreito, de autoria de Hele- Shaw de (1901) em 1898. Excelentes fotografias de linhas de emissão em ar foram obtidas por Marey em 1901, num túnel de vento equipado com um injetor de fumaça, até mesmo em regime transiente.

As origens da técnica de marcação dos vórtices (*vortex tagging*), que visualizava diretamente os vórtices pela injeção de traçadores dentro da camada limite, são difíceis de descobrir. A marcação natural de vórtices (*natural vortex tagging*) ocorrem em tornados e trombas d'água (*waterspouts*). O sopro de anéis de fumaça é uma arte eterna. O anel de fumaça produzido por um tiro de canhão foi retratada no último século. Thoma envolveu um corpo com um mata-borrão, encharcou-o com ácido hidrocloreídrico e o expôs ao escoamento de uma mistura de ar com vapor de amônia. A reação química produzia uma névoa branca que marcava a camada limite ao redor do corpo e tornava os vórtices visíveis. O método do tetracloreto de titânio é o mais conveniente para a marcação de vórtices (*vortex tagging*) e, de acordo com Farren (1932), retorna a Simmons (1930). O tetracloreto de titânio líquido, que adere facilmente em superfícies sólidas, reage com a umidade do escoamento de ar, produzindo gases luminosos brancos de dióxido de titânio.

A visualização de escoamentos por linhas de correntes muito próximas as superfícies dos corpos começou com a observação do fenômeno “*tea cup*” na antiga Grécia. O artigo mais moderno relacionado ao assunto é de autoria de Riabouchinsky. Ele depositou pó de licopódio (*lycopodium powder*) na base de uma placa na qual um cilindro foi montado e exposto ao escoamento. Através de uma leve vibração na base da placa, os grãos aglomeravam de tal forma que as linhas de corrente sobre a superfície tornavam-se visíveis. Fales usou uma mistura de lâmpada preta e querosene numa superfície branca para propósitos similares. Tufos para a visualização de escoamentos na superfície são usados desde 1928.

O método de usar flocos suspensos em líquidos parece retornar a Prandtl, que usou minúsculos flocos de mica suspensos num túnel de água em 1904 para visualização de vórtices.

A partir de 1950, houve o desenvolvimento de outras técnicas de visualização de escoamentos. A seguir, são tecidos alguns comentários sobre os principais acontecimentos ocorridos neste período.

A liberação de traçadores de um fino fio em água e ar foi introduzida nos anos 50 e tornou-se popular pela sua simplicidade. Em água, a liberação de traçadores é baseado em reações eletro-químicas. No método do telúrio, de autoria de Wortmann (1953), dois eletrodos são introduzidos dentro do fluido; o cátodo consiste num fio fino de telúrio posicionado no regime de escoamento em estudo. Com uma voltagem elétrica aplicada entre os eletrodos, íons de telúrio (com uma carga dupla negativa) são dispersos a partir da superfície do fio. Com o oxigênio presente no fluido, os íons de telúrio são levados ao estado de suspensão coloidal, aparecendo no fluido na forma de um corante escuro. A Figura A.6 mostra o perfil de velocidade na camada limite sobre uma placa plana, visualizada pelo método do telúrio. O fio de telúrio é visto no lado esquerdo da figura.

O método do telúrio parece ter inspirado a técnica de bolhas de hidrogênio, de autoria de Geller (1955), onde a eletrólise cria pequenas bolhas de hidrogênio, as quais são liberadas do fio.

A técnica das bolhas de hidrogênio permite a geração conveniente de linhas de tempo, “*timelines*” (através da pulsação da corrente elétrica), de linhas de emissão (através do isolamento parcial da superfície do fio elétrico) e de folhas traçadoras. O método pode também ser usado para a marcação direta de vórtices usando uma superfície geradora de vórtices como um eletrodo.

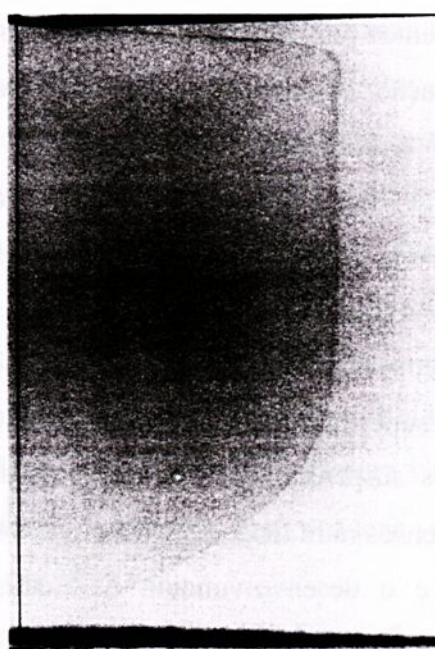


Figura A.6 - Visualização do perfil de velocidade sobre uma placa plana utilizando o método do telúrio (Wortmann, 1953).

A técnica do fio de fumaça (*smoke wire*) para geração de linhas de emissão finas e densamente espaçadas em ar foi introduzida por Raspert e Moore no início dos anos 50. Uma publicidade insuficiente conduziu a reinvenção deste método nos anos 70. Um fio fino é revestido com óleo e, durante o aquecimento elétrico, o fio emite finas linhas de fumaça. Linhas mais finas são geradas usando tetracloreto de titânio líquido, o que elimina a necessidade de aquecimento elétrico. Se o fio é liso e limpo, uma folha de fumaça homogênea deixa o fio.

Nos anos 50 também foi inaugurada a técnica da cortina de fumaça (*smoke screen*) em túneis de baixa velocidade e o método da cortina de vapor (*vapour screen*), muitas vezes usada em conjunção com a visualização de superfície, principalmente para velocidades supersônicas.

Recentemente, a iluminação por folhas de laser tornou-se popular. O uso de laser para iluminação de escoamentos parece ter sido iniciada com Vitale (1978) em água, o qual também parece ter sido o primeiro a usar um corante fluorescente, e por Mensing & Fedler (1980) em ar.

No método da linha de corrente tem se observado o uso de iluminação estroboscópica de pequeno pulso como um desenvolvimento recente. Nesta técnica, imagens de partículas aparecem como duplo ou múltiplos pontos numa fotografia, dependendo do número de exposições. O deslocamento do ponto pode ser mais corretamente avaliado do que o convencional comprimento do traço da partícula. Este método de iluminação de escoamentos parece ter se iniciado em 1967.

A maioria dos recentes avanços dos métodos ópticos são designados de interferometria laser, holografia e tomografia. Estes métodos melhoram a exatidão dos métodos ópticos.

Recentemente, Settles (1986) publicou uma revisão descrevendo as modernas técnicas de visualização experimental de escoamento. Neste artigo, as novas técnicas de visualização, como termografia infravermelho, tomografia, processamento óptico e digital, videografia de alta velocidade, entre outras, são descritas e avaliadas, principalmente quanto ao seu potencial futuro de desenvolvimento.

Combinações de várias técnicas de visualização tornam-se uma estratégia muito bem sucedida em visualização de escoamentos. Dureli & Norgard (1972) combinaram o método “*streaming birefringence*” com a técnica das bolhas de hidrogênio. A combinação da visualização de escoamentos com o anemômetro de fio quente também tem sido recentemente realizada.

A tradição de visualizar novos fenômenos de escoamento continua. Enquanto novos métodos estão sendo incluídos no campo da visualização de escoamentos, os métodos clássicos continuam contribuindo fortemente.

A.5 Principais Centros de Pesquisa em Visualização de Escoamento em Meio Hidrodinâmico

O nome mais conhecido da visualização experimental em túnel de água é do experimentalista francês Henry Werlé, que iniciou suas atividades neste campo no O.N.E.R.A (*Office National d'Études et de Recherche Aeronautique*), em 1948. Ele foi o responsável pelo projeto e construção dos três túneis hidrodinâmicos verticais do *Laboratoire de Visualisation Hydrodynamique*, específicos para a visualização de escoamentos tridimensionais ao redor de modelos. A Figura A.7 apresenta uma vista geral destes três túneis hidrodinâmicos existentes no O.N.E.R.A – Centro Châtillon.

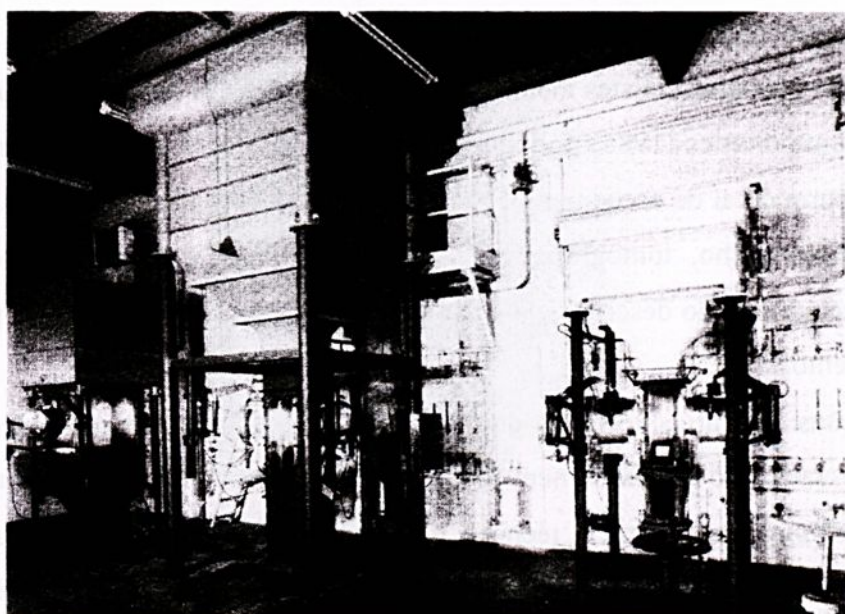


Figura A.7 - Vista geral dos três túneis hidrodinâmicos existentes no O.N.E.R.A. (www.onera.fr).

Fotos e filmes de seus estudos fundamentais foram publicados em muitos países, particularmente nas áreas de vorticidade, interação de jatos, separação da camada limite e do efeito solo em modelos de aeronaves e veículos terrestres. Ele também realizou estudos aplicados, tais como: esteiras de chaminés, turbomáquinas, trocadores de calor, reatores, veículos terrestres, entre outros.

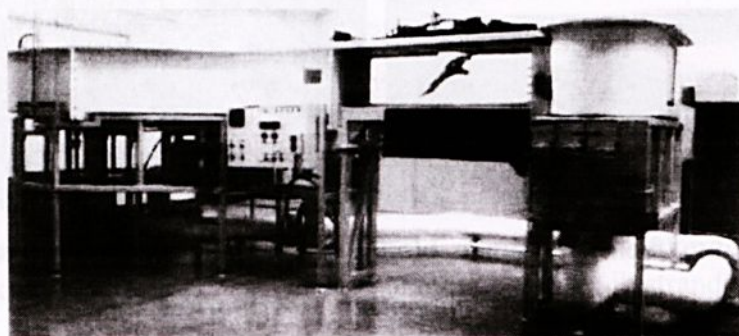
Segundo Settles, Henry Werlé é considerado “irrefutavelmente o mestre da visualização de escoamentos em meio líquido”. No entanto, seus trabalhos raramente descrevem os procedimentos experimentais adotados, omitindo, muitas vezes, informações das técnicas utilizadas e de suas particularidades, dificultando sobremaneira qualquer tentativa de reprodução de seus experimentos.

Outro pesquisador da atualidade, trabalhando na área de visualização de escoamentos em meio líquido aplicado à aerodinâmica, é o professor Mohamed Gad-El-Hak, da *University of Notre Dame* (Indiana). Este eminente pesquisador desenvolveu novas técnicas de medidas para escoamentos turbulentos e possui duas patentes: uma para redução de arrasto em aeroplanos e veículos subaquáticos e outra para controle de sustentação de asas em delta e redução de arrasto por superfícies de recobrimento elásticas. Todo o seu trabalho foi desenvolvido tendo como base a visualização experimental hidrodinâmica.

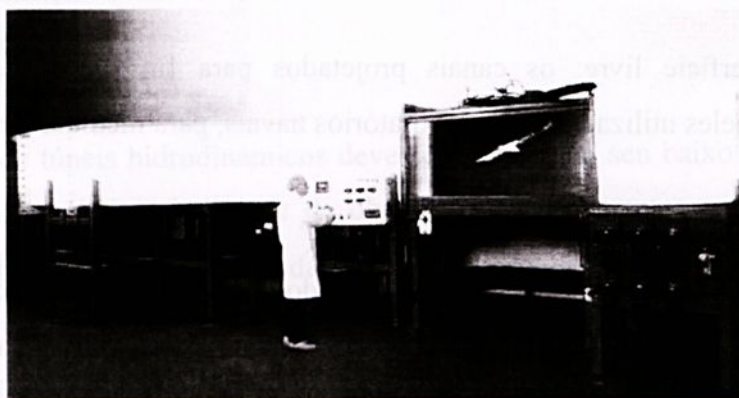
O professor Modi, da *University of British Columbia*, Vancouver, Canadá, também utiliza da visualização de escoamentos em túnel de água para estudos do controle da camada limite,

objetivando o aumento da sustentação e ou diminuição do arrasto, pelo uso de superfícies móveis. Seus trabalhos envolvem, ainda, importantes comparações entre dados obtidos em túneis aerodinâmicos e hidrodinâmicos.

O professor Terry Ng, da *University of Toledo*, Ohio, realizou visualização de escoamentos em túneis hidrodinâmicos, fabricados pela *Eidetics International Co. Visual Aerodynamics Division*, Califórnia, em dois modelos, o 1520 e o 2436, com seções de ensaios de 508x381x1524 mm e 910x610x1830 mm, respectivamente. A visualização foi realizada pela injeção de corantes líquidos, através de orifícios de 1mm de diâmetro, implantados na superfície do modelo, permitindo o estudo de vórtices em aeronaves. A Figura A.8, retirada de <http://www.eideticscorp.com>, apresenta os túneis hidrodinâmicos estudados.



(a) Modelo 1520.



(b) Modelo 2436.

Figura A.8 - Alguns dos túneis hidrodinâmicos fabricados pela *Eidetics Corporation*.

Para finalizar, deve-se mencionar o Dr. Gary E. Erickson, da *Northop Corp.*, de Hawthorne, Califórnia. A ênfase de seu trabalho concentra-se no estabelecimento de níveis de confiabilidade nas correlações de valores de números de Reynolds altos e baixos nos fenômenos

de escoamento com vorticidade. Os resultados de ensaios em túnel de água para baixos Reynolds são comparados com aqueles obtidos em túnel de vento, com Reynolds mais elevados.

A.6 Instalações Destinadas a Visualização Hidrodinâmica

Atualmente, existe uma grande variedade de instalações destinadas ao estudo de escoamentos subsônicos incompressíveis, utilizando o escoamento em meio líquido. Estas instalações se diferenciam principalmente pelas características da seção de testes e pelo princípio básico de funcionamento, podendo ser agrupadas da seguinte maneira:

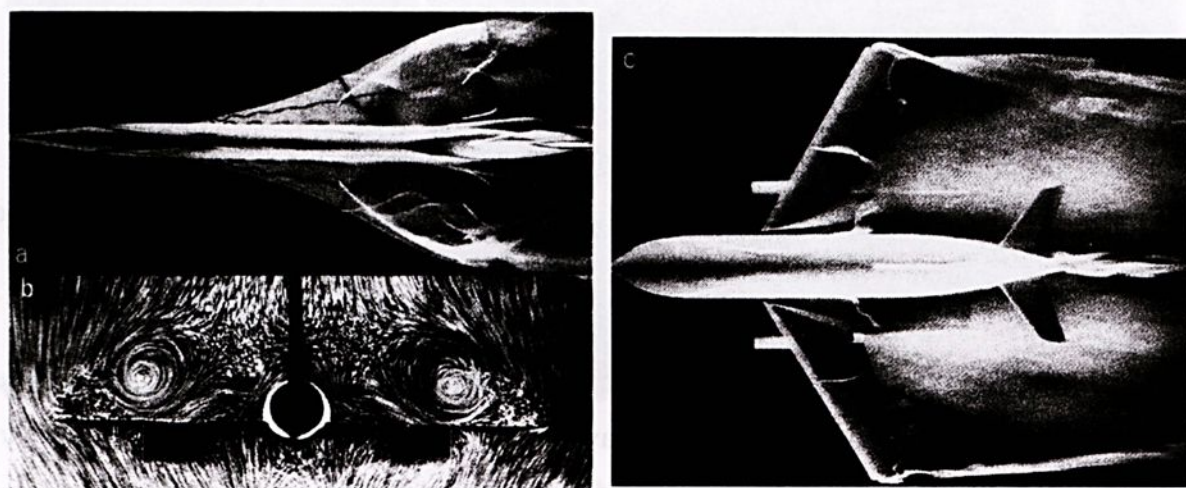
1. Túneis hidrodinâmicos com seção de testes vertical: operam, em geral, por ação da gravidade, de modo contínuo ou intermitente (*blow-down*), como as instalações existentes no ONERA (*Office National d'Etudes et Recherches Aéropatiales*).
2. Túneis hidrodinâmicos com seção de testes horizontal (fechadas ou de superfície livre): operam em circuito fechado, com o auxílio de bombas centrífugas ou axiais, como os existentes no Galcit (*Graduate Aeronautical Laboratories*) do Caltec e em vários outros lugares do mundo.
3. Canais de superfície livre: os canais projetados para fins de visualização são muito semelhantes àqueles utilizados pelos laboratórios navais, para medidas de arraste em veículos aquáticos.
4. Dispositivos especiais: são projetados ou adaptados para o estudo de problemas específicos, onde a seção de ensaios pode representar todo ou parte do modelo ensaiado. Incluem nesta categoria os dispositivos utilizados nos estudos de: câmaras de combustão de turbinas a gás, turbomáquinas axiais, vórtices no interior de dutos, trocadores de calor, tuberias de motor foguete e fornalhas.

Túneis Hidrodinâmicos

Além da simplicidade construtiva e operacional dos túneis hidrodinâmicos, a principal vantagem de se utilizar um líquido como fluido de trabalho consiste na maior facilidade de se



promover a visualização do escoamento. Vórtices, recirculações, jatos, esteiras e descolamentos podem se tornar visíveis, com grande nitidez e clareza, utilizando-se filetes de tinta injetados no escoamento ou pequenas bolhas gasosas em suspensão na corrente livre. A Figura A.9 apresenta exemplos de visualização de escoamentos em túneis hidrodinâmicos destinados a aplicações aeroespaciais.



(a) (b) Escoamento ao redor de um modelo do Concorde (escala 1/140).

(c) Escoamento ao redor de um modelo da aeronave *airbus*, ilustrando os vórtices de ponta de asa.

Figura A.9 - Visualização de escoamentos em túneis hidrodinâmicos destinados a aplicações aeroespaciais (Werlé, 1982).

A utilização de túneis hidrodinâmicos deve-se também, ao seu baixo custo de operação e manutenção, além da relativa facilidade de obtenção de escoamentos tridimensionais de boa qualidade (Mordoff, 1986). A possibilidade da aquisição de imagens de escoamentos com elevada definição torna este tipo de instalação uma excelente ferramenta de trabalho para o desenvolvimento de pesquisas e para aplicações didáticas.

Um túnel hidrodinâmico, cuja concepção assemelha-se a um túnel de vento subsônico de baixa velocidade, pode operar com seção de ensaios vertical ou horizontal, em circuito aberto ou fechado, conforme ilustra a Figura A.10. As partes constituintes de um túnel são: uma seção de tranquilização ou reservatório (R), uma contração (C), uma seção de testes (T), um difusor ou sistema de descarga (D) e um sistema de acionamento (A).

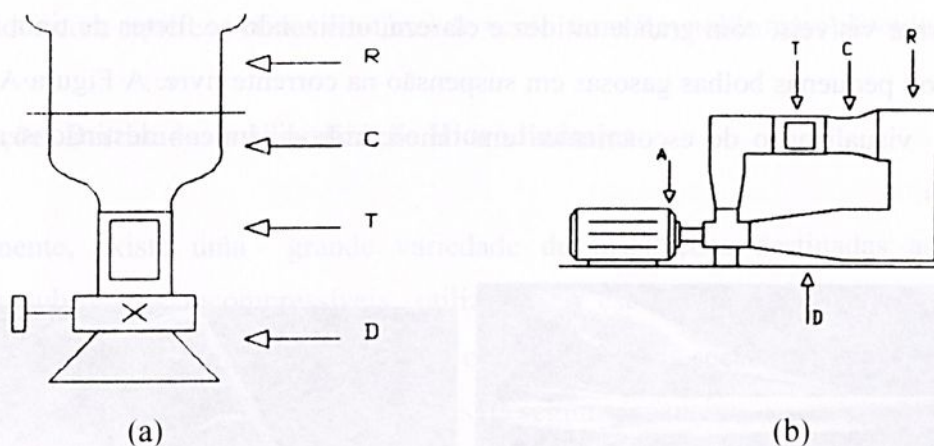


Figura A.10 - Partes constituintes de um túnel hidrodinâmico: (a) vertical por ação da gravidade e (b) horizontal de circuito fechado.

Como exemplo, a Figura A.11 apresenta imagens do escoamento produzidos por um túnel hidrodinâmico vertical operado pela ação da gravidade, existente na *Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS) –UNESP*. Neste caso, a técnica de visualização de escoamentos empregada é a injeção de corantes líquidos.

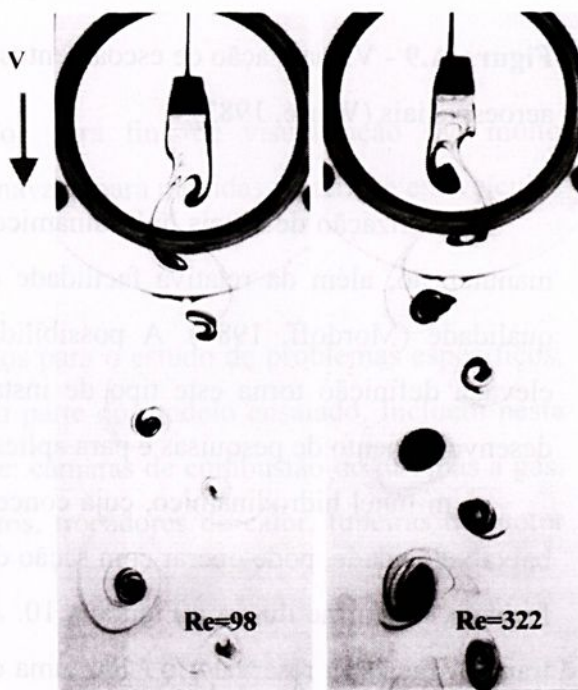
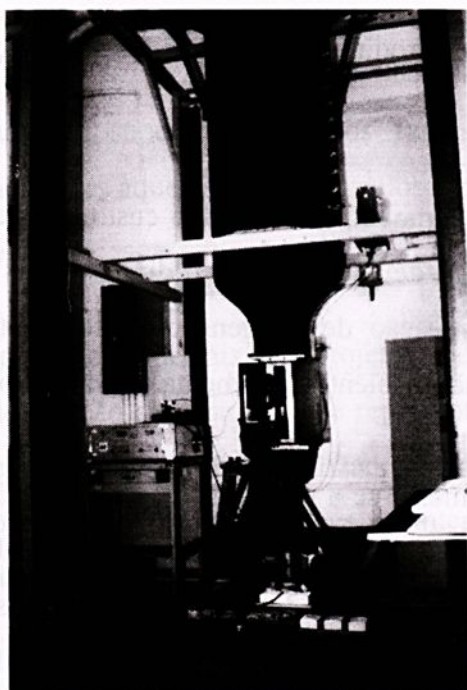


Figura A.11 - Túnel hidrodinâmico vertical da FEIS operado pela ação da gravidade e algumas imagens geradas.

Já a Figura A.12, apresenta imagens do escoamento produzidas por um túnel hidrodinâmico horizontal de circuito fechado, existente na Universidade da Carolina do Norte – Estados Unidos. A técnica de visualização empregada é o do laser induzido a fluorescência.

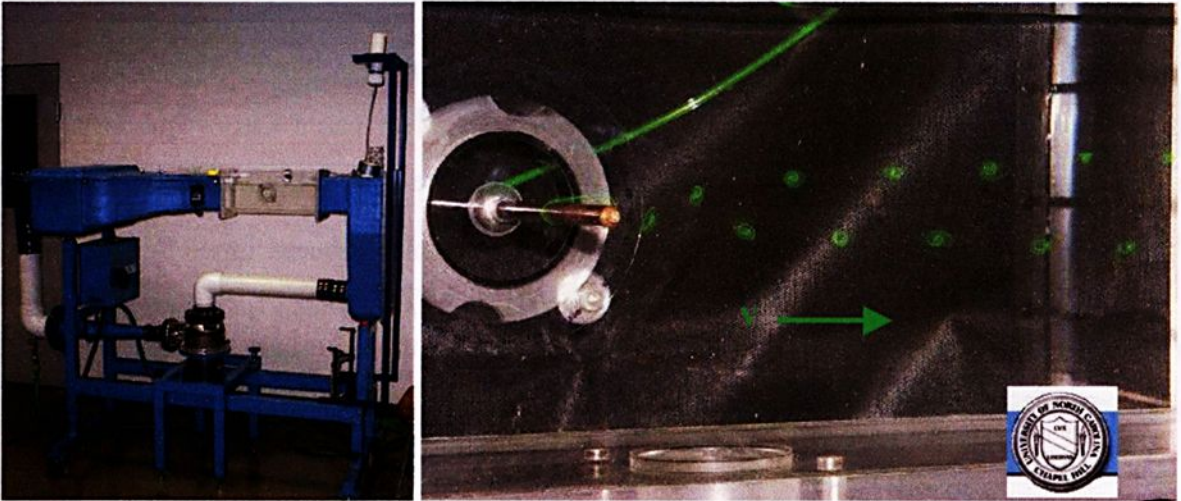


Figura A.12 - Túnel hidrodinâmico horizontal de circuito fechado da Universidade da Carolina do Norte e algumas imagens geradas (<http://www.amath.unc.edu>).

Os túneis hidrodinâmicos também são frequentemente empregados para a realização de ensaios de visualização, conduzidos exclusivamente para ilustrar ou tornar evidentes aspectos específicos de escoamentos estudados quantitativamente em túneis de vento ou simulados numericamente.

Algumas vantagens podem ser enumeradas na utilização de um túnel hidrodinâmico quando comparado a um túnel aerodinâmico. 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 pode ser determinante, permitindo a obtenção de imagens de excelente qualidade dos escoamentos observados. Ensaios desta natureza foram conduzidos por Han & Patel (1979).

Escoamentos com densidade estratificada são estudados, preferencialmente, em túneis hidrodinâmicos, em função da facilidade de estratificação em meio líquido. Num túnel aerodinâmico, a estratificação da densidade em uma seção do escoamento pode ser conseguida através do aquecimento de uma parede e do resfriamento da parede oposta. Entretanto, os gradientes assim obtidos não são elevados e a velocidade do escoamento deve ser reduzida a

valores quase que impraticáveis (Odell & Kovasznay, 1971). Em túneis hidrodinâmicos, ao contrário, níveis razoáveis de estratificação e de velocidade podem ser obtidos.

No entanto, em oposição aos túneis aerodinâmicos, os túneis hidrodinâmicos geralmente apresentam seções de testes bastante reduzidas, restringindo sobremaneira o tamanho do modelo a ser ensaiado. Esta característica, associada à baixa velocidade do escoamento na corrente livre, atua no sentido de limitar o número de Reynolds do escoamento a valores relativamente baixos. Felizmente, a viscosidade cinemática da água pode ser até 15 vezes menor que a do ar nas mesmas condições, compensando parcialmente este efeito, de forma a permitir a realização de ensaios envolvendo Reynolds mais elevados.

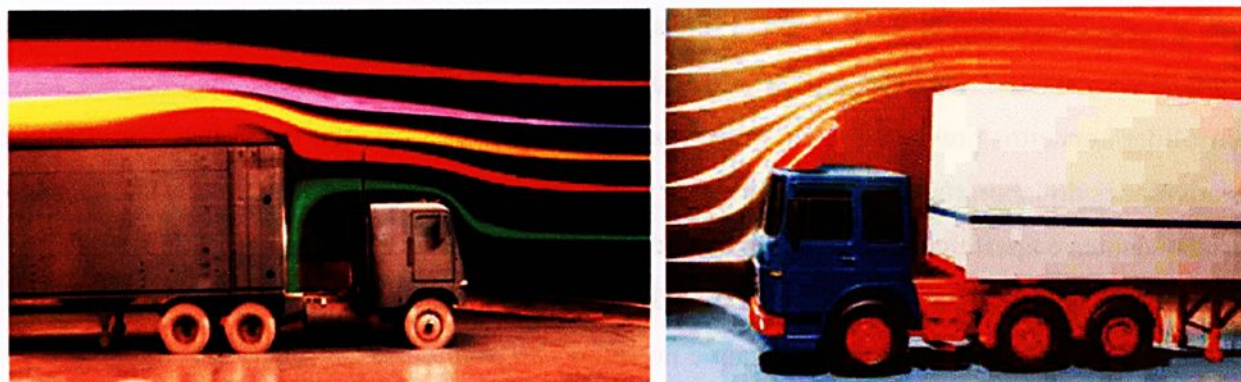
Em síntese, os túneis hidrodinâmicos apresentam-se como uma ferramenta importante para um laboratório de pesquisa experimental em mecânica dos fluidos, ao lado de outras instalações experimentais complementares, tais como os canais e os túneis aerodinâmicos.

A.7 Aplicações

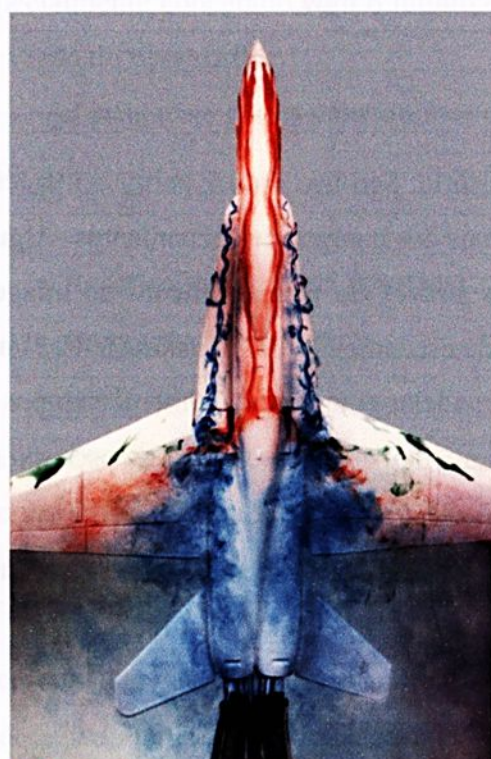
Através da visualização de escoamentos é possível obter informações para o desenvolvimento de veículos terrestres, aeronaves, naves espaciais e também para auxiliar no projeto de máquinas, tais como turbinas e motores de combustão, como mostra a Figura A.13.

No caso da visualização de escoamentos, também é possível obter informações necessárias para o desenvolvimento de projetos de navios, além de auxiliar nos projetos destinados a engenharia civil, tais como: projeto de portos, edifícios e proteção litorânea. Na engenharia química, o conhecimento do escoamento de fluidos em tanques de reatores é muito importante, enquanto que na medicina o escoamento em vasos sangüíneos é hoje em dia amplamente estudado. De forma generalizada, pode-se afirmar que todos os tipos de pesquisa envolvendo escoamentos de fluido, a visualização constitui-se numa importante ferramenta de trabalho.

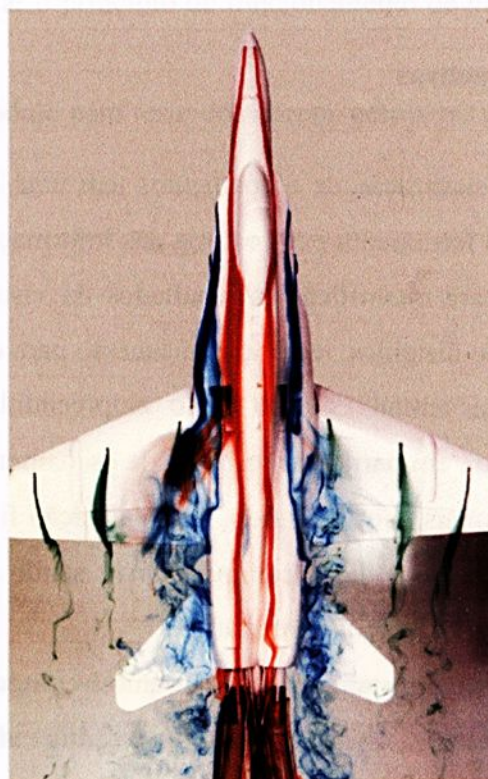
Por outro lado, alguns fenômenos físicos tratados durante o curso universitário de engenharia possuem natureza complexa, e exige grande esforço para garantir um aprendizado eficiente. Frequentemente, a compreensão destes fenômenos, requer uma capacidade de abstração não encontrada na maioria dos estudantes de engenharia. Este problema é verificado no ensino da mecânica dos fluidos, onde a visualização de escoamentos pode ser empregada para facilitar a compreensão dos complexos fenômenos associados ao movimento dos fluidos.



(a) Desenvolvimento aerodinâmico de caminhões em túnel de vento, utilizando a técnica de visualização de escoamento por injeção de fumaça (retirada de www.nrc.ca).



NASA Dryden Flight Research Center Photo Collection
<http://www.dfrc.nasa.gov/gallery/photoindex.html>
 NASA Photo: ECN-33298-03 Date: 1985
 1:48 scale model of an F-18 aircraft in Flow Visualization Facility (FVF)



Dryden Flight Research Center ECN 33298-036 Photographed 1985
 F-18 water tunnel tests in Flow Visualization Facility NASA/Dryden



(b) Visualização de escoamento ao redor de um modelo (escala 1:48) da aeronave F-18 através da técnica de injeção de corantes líquidos (retirada de www.dfrc.nasa.gov).

Figura A.13 - Aplicações práticas da visualização de escoamentos na engenharia.

O clássico uso de ferramentas visuais em disciplinas como mecânica dos fluidos é usualmente restrito à observação de filmes ilustrando padrões de escoamento, via de regra, para consolidar conceitos previamente estabelecidos em classe. Não obstante, um contato direto com as atividades do laboratório é uma experiência muito rica e fascinante, estimulando a criatividade dos estudantes e aperfeiçoando a sua capacidade de discernimento.

Nos dias atuais, apesar da nítida evolução de outros métodos de análise, a visualização de escoamentos ainda ocupa lugar de destaque no estudo de problemas associados ao transporte de massa, quantidade de movimento e energia. As técnicas de visualização existentes são, hoje, bastante numerosas, envolvendo diferentes níveis de sofisticação. Além disso, novos métodos são desenvolvidos a cada ano, e as técnicas tradicionais são constantemente aprimoradas. Como conseqüências, textos de revisão sobre o assunto são fartos na literatura.

A.8 Perspectivas

A visualização de escoamentos tem uma longa história. Seu uso cresce permanentemente como uma ferramenta exploratória das informações globais dos campos de escoamentos. Alguns esforços para quantificar os resultados da visualização através do processamento de imagens estão sendo dirigidos, com algum sucesso para campos de escoamento bidimensionais. Por outro lado, muitas tentativas estão sendo empreendidas para modelar computacionalmente campos de escoamento, em particular, campos de escoamentos distante de paredes e campos de escoamento bidimensionais. Neste sentido, a visualização física de escoamentos tem uma função de suporte na validação de códigos computacionais sendo a função principal da simulação computacional, fornecer os resultados quantitativos.

Dado o constante progresso rumo a computadores e códigos computacionais mais rápidos e mais eficientes, chegará o tempo em que simulações computacionais poderão superar as visualizações físicas. Entretanto, a função de apoio da visualização experimental de escoamento, seu uso como uma ferramenta rápida de exploração e sua influência na mecânica dos fluidos a nível conceitual e descritivo provavelmente continuará por algum tempo.



ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO MÓDULO EXPERIMENTAL

B.1 Introdução

Neste apêndice, são apresentados os detalhes construtivos do módulo experimental, especialmente concebido com o intuito de simular o princípio de funcionamento de um medidor de vazão do tipo vórtice.

As principais partes constituintes deste módulo para teste dos corpos geradores de vórtices são:

- Reservatório de nível constante
- Contração axissimétrica
- Seção de testes
- Corpos de prova - *shedders*
- Válvula controladora de vazão
- Tubulação de descarga

Nos itens seguintes, é feita uma descrição das principais partes que compõem o dispositivo, bem como são apresentados os detalhes construtivos.

B.2 Reservatório de Nível Constante

O reservatório de nível constante foi construído a partir de uma caixa d'água comercial de 1000 litros fabricada pela UNIPAC. Na parte interna desta caixa d'água fixou-se um tubo de PVC de 8", cuja função é permitir o escoamento do excesso de água do reservatório, deixando-o com um nível constante de água. Na parte externa, fixou-se um outro tubo de PVC de 8", cuja função é a alimentação da seção de testes, denominada aqui de túnel hidrodinâmico. Para a

fixação destes tubos de PVC de 8" foram utilizadas flanges, construídas a partir de chapas de alumínio de 5 mm de espessura. Estas chapas de alumínio foram usinadas até a obtenção de um anel circular, sendo que para a flange instalada na parte interna do reservatório foi usinada um anel com diâmetro interno de 3" e diâmetro externo de 11", enquanto que para a flange instalada na parte externa do reservatório foi usinada um anel com diâmetro interno de 8" e diâmetro externo de 11". Neste anel circular foi soldado um tubo de alumínio de 8", constituindo, assim, as flanges, como indica a Figura B.1.

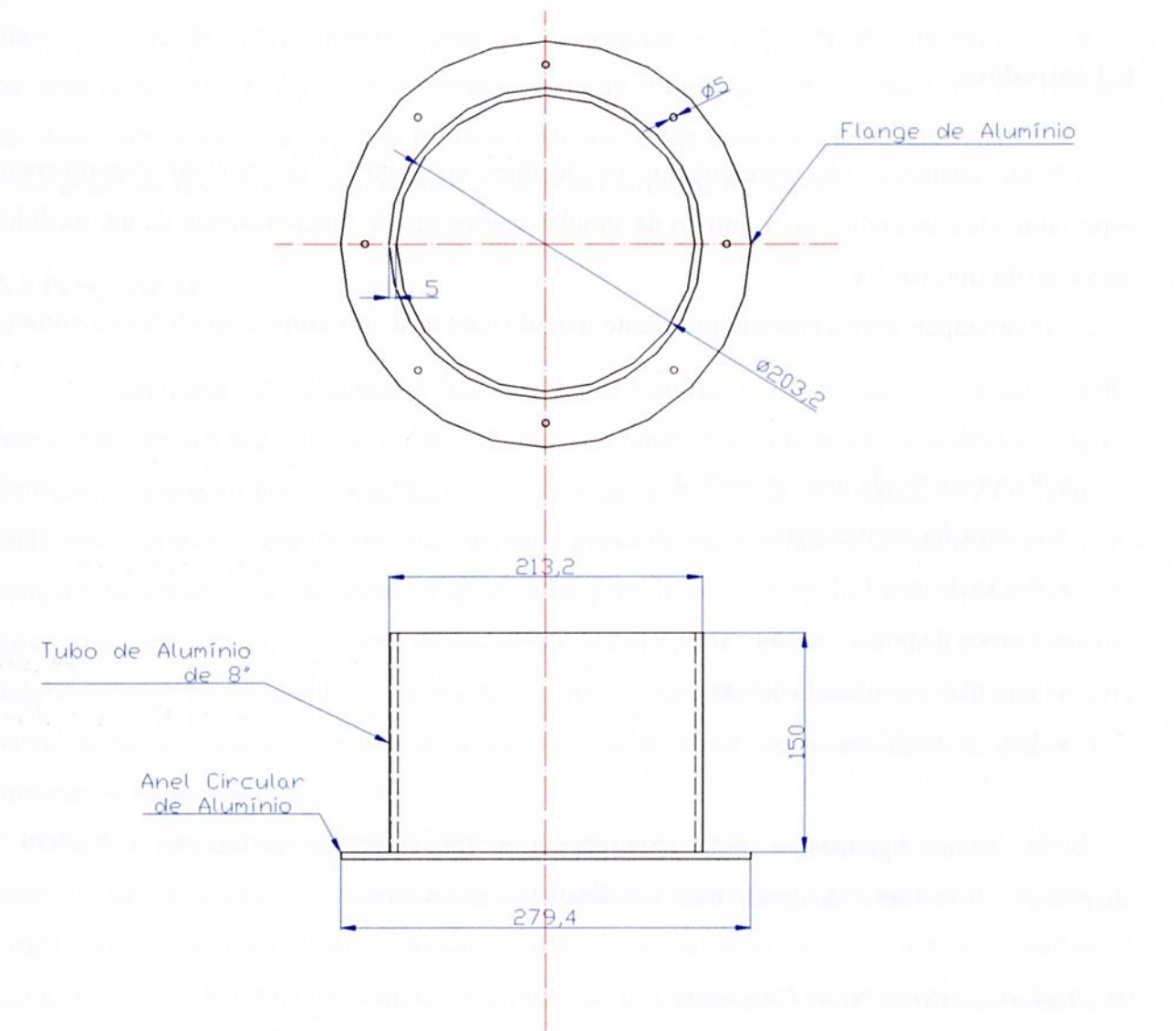


Figura B.1 - Flange de alumínio (dimensões em mm).

A Figura B.2 mostra a posição em que foram fixados os tubos de PVC de 8" citados anteriormente.

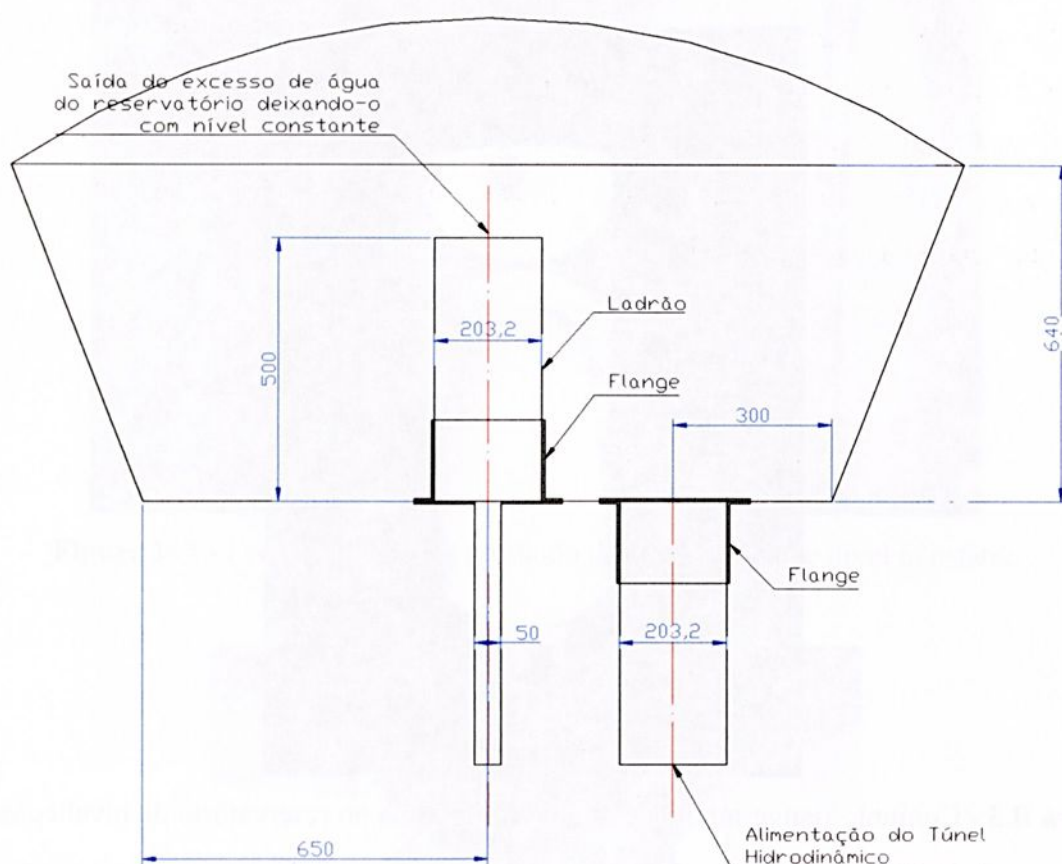


Figura B.2 - Fixação dos tubos de PVC de 8" na caixa d' água (dimensões em mm).

As Figuras B.3, B.4 e B.5 mostram fotografias da fixação dos tubos de PVC de 8" na caixa d' água, resultando, assim, no reservatório de nível constante. Já a Figura B.6 apresenta o aspecto final da montagem do reservatório de nível constante.

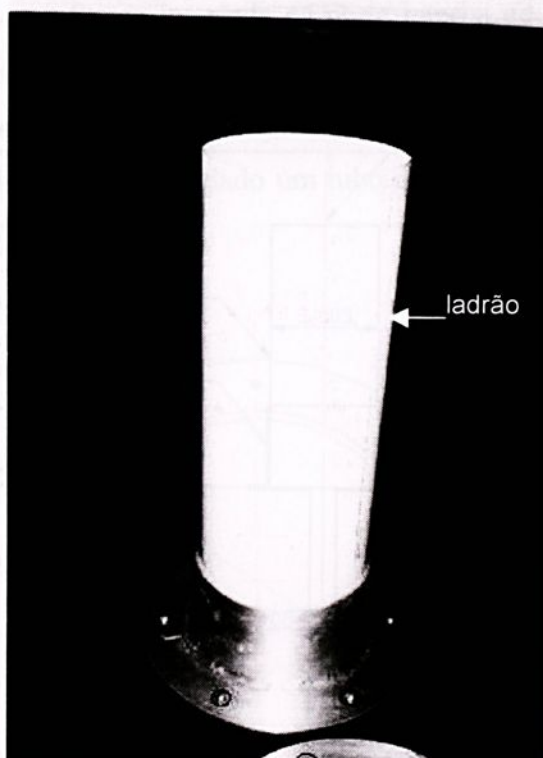


Figura B.3 - Conjunto flange-tubo PVC 8'' (ladrão) fixado no reservatório de nível constante.

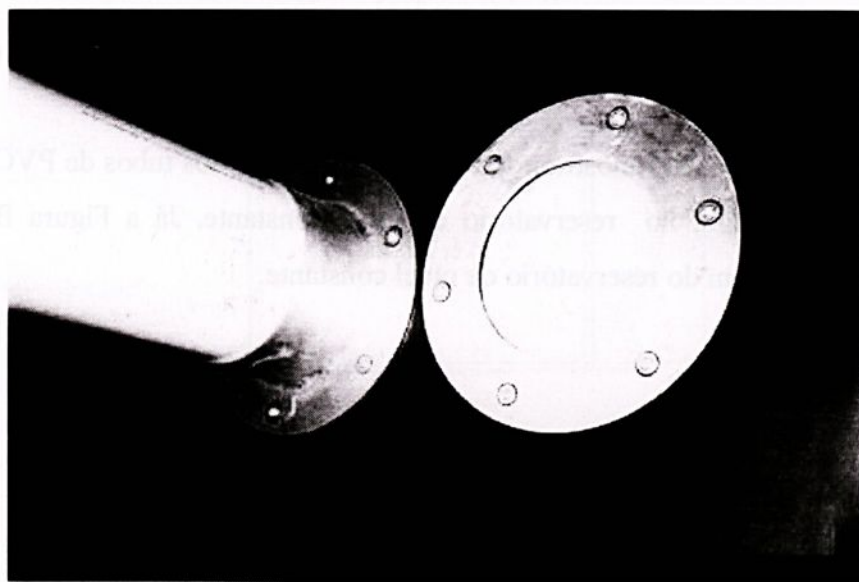


Figura B.4 - Ladrão e tubo de alimentação do túnel fixados no interior do reservatório de nível constante.

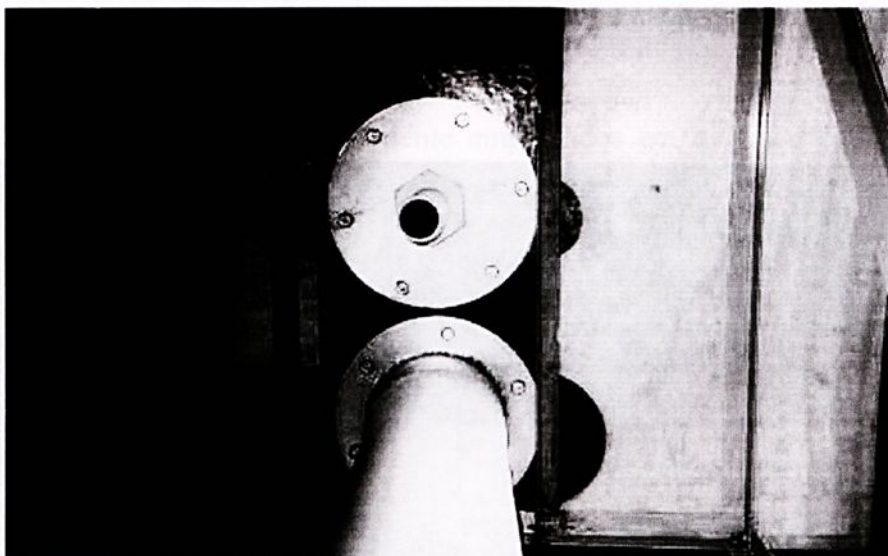


Figura B.5 - Fixação dos tubos no fundo do reservatório de nível constante

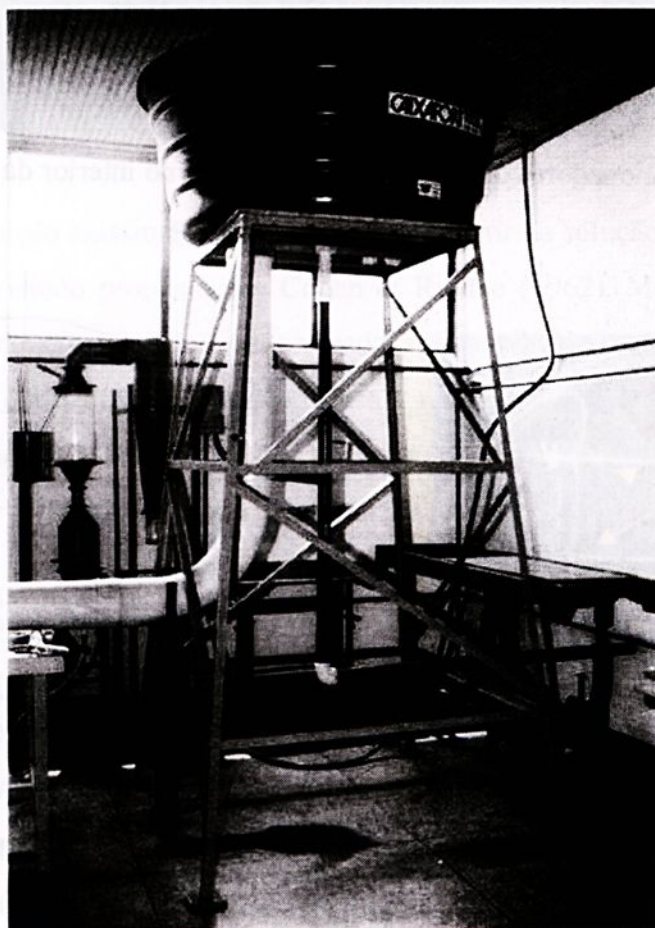


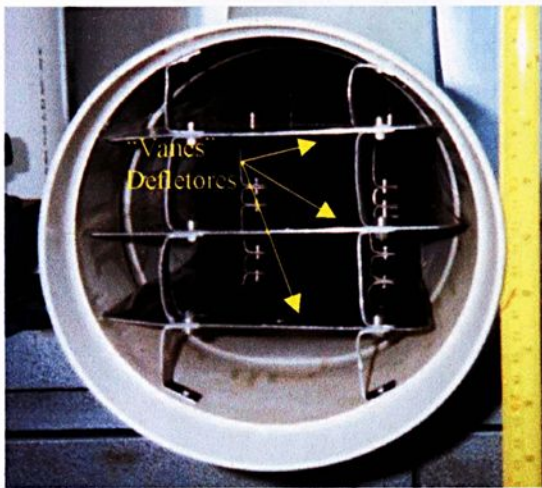
Figura B.6 - Reservatório de nível constante.

A fim de evitar rotações indesejáveis na seção de testes foram instalados direcionadores de escoamento no interior da curva longa de 8'', conforme mostra a Figura B.7.

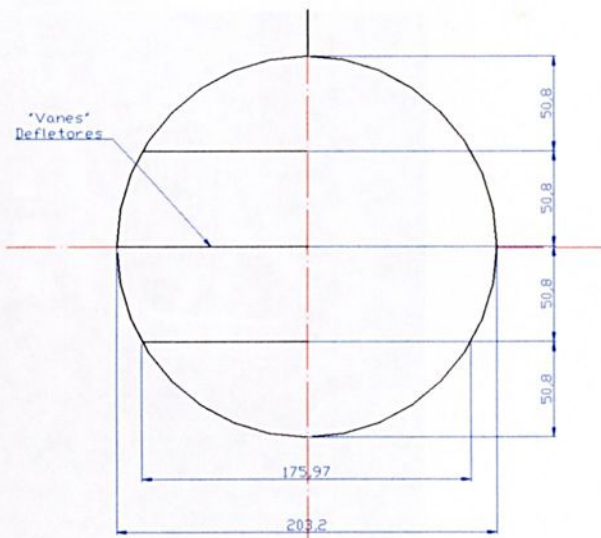
Estes direcionadores de escoamento são constituídos por 3 chapas de aço inoxidável de 1mm de espessura, posicionados na curva longa de 8", conforme mostram as Figuras B.8 (a) e (b).



Figura B.7 - Direcionadores de escoamento instalados no interior da curva longa de 8".



(a)



(b)

Figura B.8 - Posição em que foram instalados os direcionadores de escoamento e detalhes da instalação.

B.3 Contração

As contrações são elementos largamente empregados em diversos tipos de sistemas e equipamentos hidráulicos e aerodinâmicos de aplicação científica e industrial. Praticamente todas as instalações experimentais destinadas ao estudo do escoamento, tais como os túneis aerodinâmicos ou hidrodinâmicos, são equipados com uma contração, posicionada imediatamente à montante da seção de testes.

No interior desta geometria aparentemente simples, ocorrem uma série de fenômenos complexos, envolvendo acelerações, mudanças de direção, aparecimento de componentes transversais de velocidade e, em alguns casos, descolamento da camada limite e mudança de regime laminar para turbulento.

As contrações são elementos projetados com a finalidade de produzir uma aceleração controlada do escoamento e é introduzido no sistema a fim de reduzir o nível de turbulência e corrigir distorções no perfil de velocidade na entrada da seção de testes.

A seção de contração do túnel possui uma razão de contração de 4:1 e um comprimento de 0,54 m.

O perfil da contração axissimétrica foi projetada a partir da solução da equação de Stokes-Beltrami, segundo o método proposto por Cohen & Ritchie (1962). Maiores detalhes sobre o projeto da seção de contração, podem ser encontradas no trabalho de Longui *et al.* (2000).

A contração foi construída em fibra de vidro e resina poliéster isoftálica e, para isto, foi necessário a confecção de um molde de madeira no formato da contração, a partir de um palanque de itaúba de 200x200x600 mm. Este palanque foi dividido ao meio, em seu sentido longitudinal, gerando duas peças de iguais dimensões, ou seja, duas metades com seção transversal de 200 mm de largura por 100 mm de altura. Estas duas partes foram coladas com cola de madeira à base de PVA, da maneira como estavam antes de serem separadas. Entre elas, entretanto, colou-se uma folha de jornal, com a finalidade de facilitar a sua separação, após o processo de torneamento.

Antes da usinagem da peça, foi necessária a confecção de 2 suportes de madeira, uma para fixá-la à castanha do torno, e a outra para fixá-la ao contra ponto. Foi necessária, também, a confecção de um gabarito em alumínio, com a forma da curva da contração, para controlar as medidas desejadas.

A peça foi, então, usinada em degraus, deixando sua superfície próxima à curva desejada, como ilustrado na Figura B.9. Ainda no torno, através de uma operação artesanal, realizada com



o auxílio do gabarito, de uma lima e de diversas lixas, chegou-se à superfície desejada, como mostra a Figura B.10. Para corrigir eventuais imperfeições existentes na madeira, foi aplicada uma camada de massa plástica no local da falha.

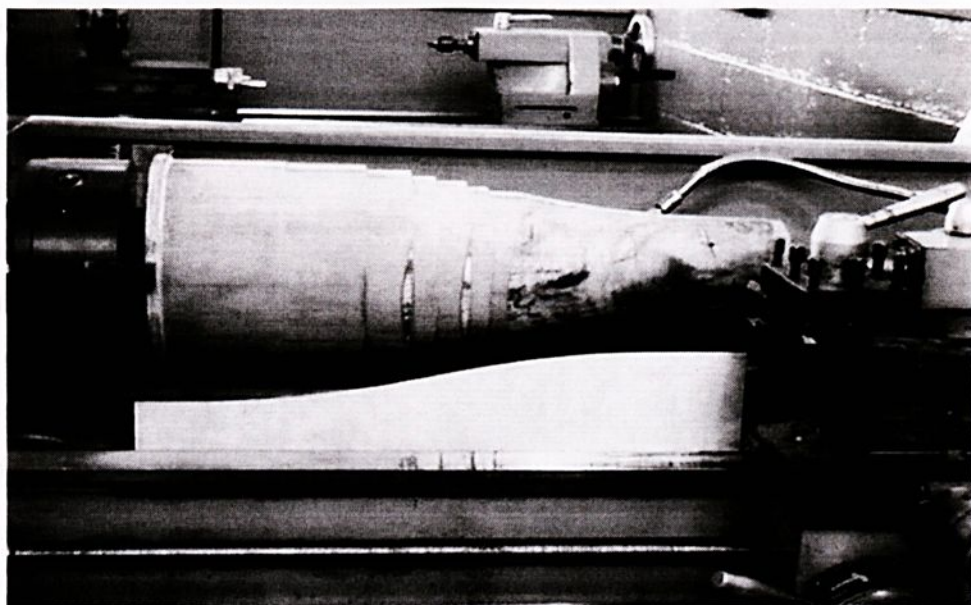


Figura B.9 - Usinagem em degrau.

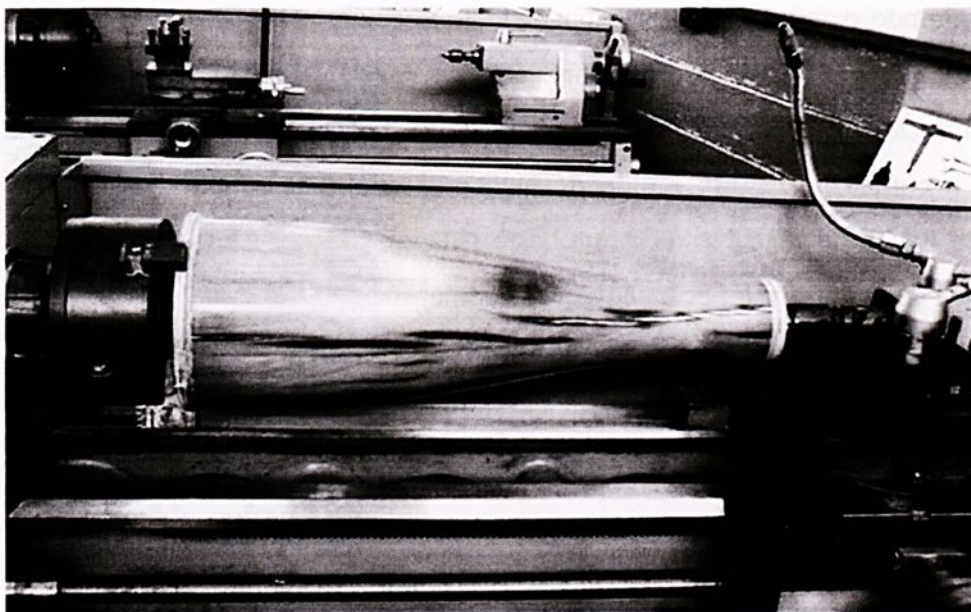


Figura B.10 - Aspecto do molde de madeira após a operação de usinagem e acabamento superficial.

O molde de madeira foi então retirado do torno e reaberto ao meio, gerando duas peças idênticas, as quais foram preparadas para a aplicação da resina poliéster isoftálica e da fibra de vidro.

Após a fabricação do molde, passou-se à confecção da contração em fibra de vidro, cujo procedimento seguiu as seguintes etapas:

- O molde foi encerado com o objetivo de se facilitar a desmoldagem da peça de fibra. A Figura B.11 apresenta o aspecto dos dois moldes das contrações após a aplicação de cera;
- em seguida, foi aplicada uma camada de gel branco com a finalidade de propiciar um melhor acabamento superficial da peça de fibra de vidro. A Figura B.12 apresenta os moldes após a aplicação da camada de gel;
- com a utilização de um pincel comum, efetuou-se a pintura do molde com uma fina camada de resina poliéster, na presença de catalisador;
- em seguida, efetuou-se a colocação de tiras e mantas de fibra de vidro em toda a superfície do molde;
- sobre esta camada de fibra, foi aplicada uma nova camada de resina e, sobre esta, uma nova camada de fibra, procurando-se fazer um entrelaçamento das mantas;

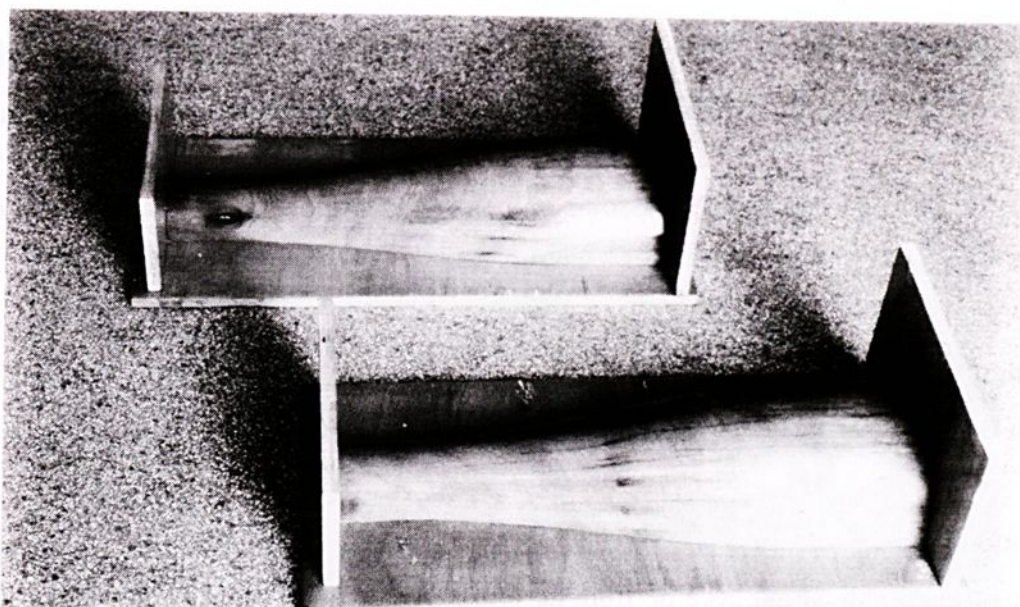


Figura B.11 - Aspecto dos moldes após a aplicação de cera.

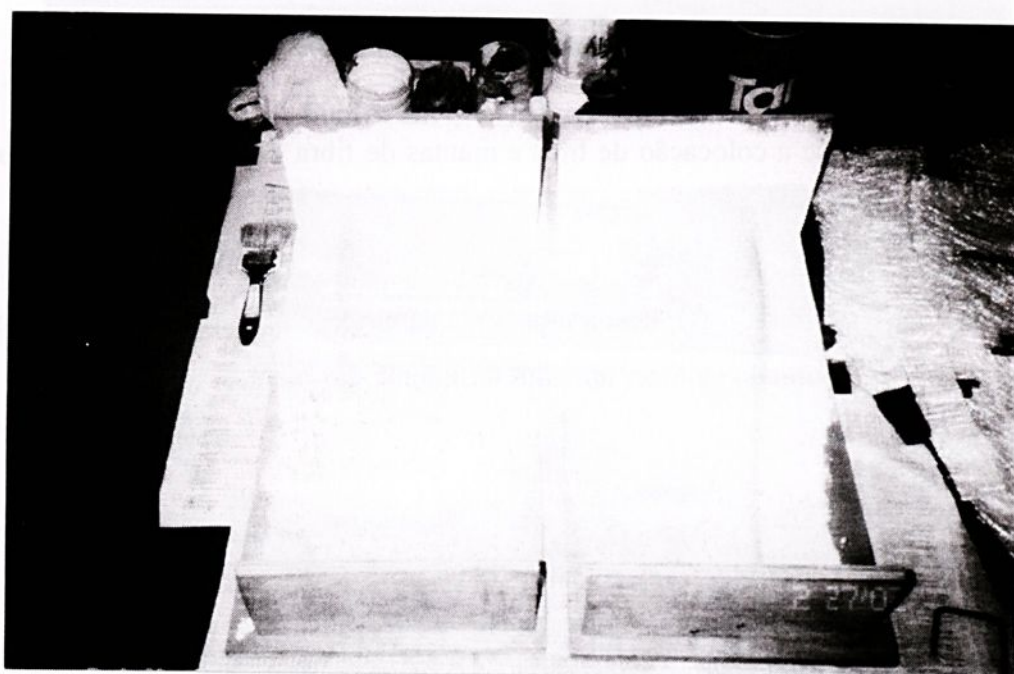


Figura B.12 - Moldes após a aplicação de gel branco.

- este procedimento foi repetido várias vezes, até que a espessura desejada para a peça fosse alcançada, como mostra a Figura B.13;

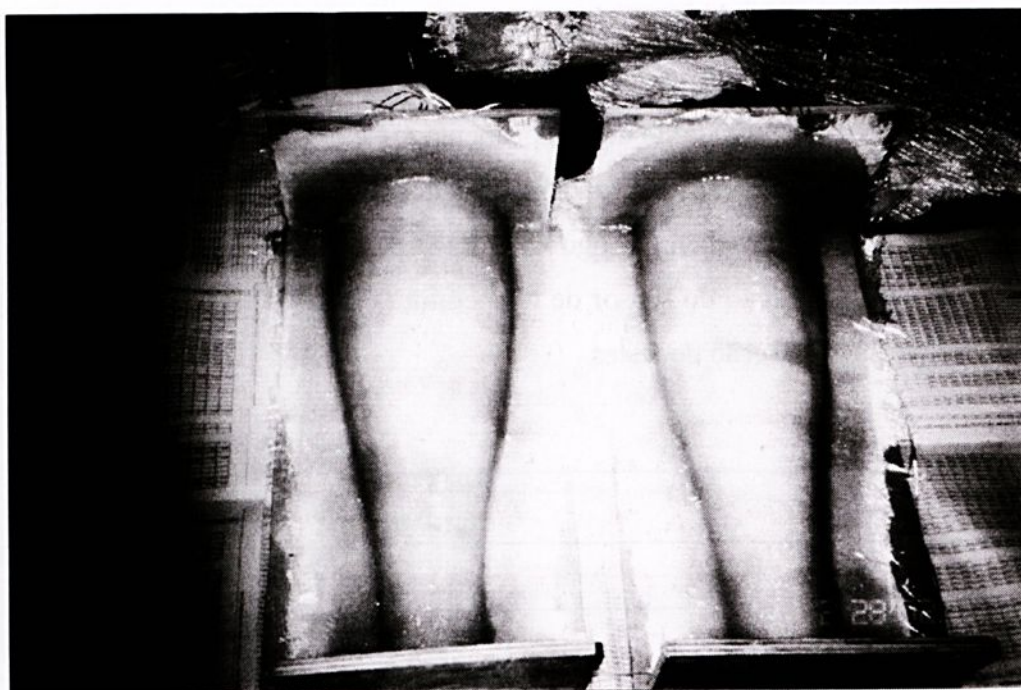


Figura B.13 - Confeção dos moldes em fibra de vidro.

Após a secagem, efetuou-se a desmoldagem da peça. A Figura B.14 mostra as duas partes do bocal unidas por meio de parafusos sextavado 3/16". Entre as duas peças, foram colocadas uma fina camada de massa plástica para evitar vazamentos durante os experimentos.

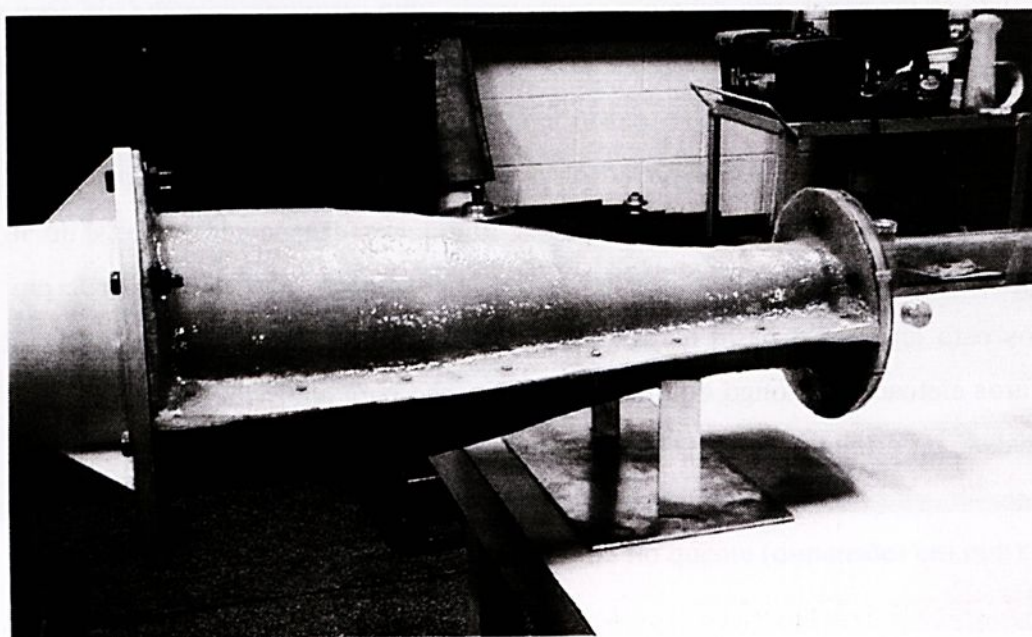


Figura B.14 - Aspecto final da contração construída em fibra de vidro

B.4 Seção de Testes

A seção de testes do túnel hidrodinâmico horizontal foi construída a partir de um tubo de acrílico de 4" (101,6 mm) e 2000 mm de comprimento.

Ao longo do comprimento deste tubo foram feitos pontos de inserção (furos de 12 mm de diâmetro) para a sonda de fio quente. Logo na entrada da seção de testes, encontra-se a posição em que foi efetuada a inserção do sensor de temperatura da sonda de fio quente. A Figura B.15 apresenta as dimensões da seção de testes.



Figura B.15 - Dimensões da seção de testes (em mm).

A Figura B.16 mostra o ponto onde foi inserido o sensor de temperatura da sonda de fio quente. A partir desta figura pode-se observar que foram coladas arruelas de acrílico na parede do tubo. Isto se faz necessário devido a espessura do tubo ser muito pequena, de apenas 3,6mm. Nestas arruelas foram feitas roscas M14 para fixar os bujões de alumínio, que terão a função de vedar a tubulação quando não estiver sendo feita medidas com a sonda no local.

Já a Figura B.17, mostra a região da seção de testes onde está posicionado o corpo de prova e os pontos de inserção para as sondas de fio quente (distanciados entre si de 50 mm). Os dois furos perpendiculares entre si, posicionados imediatamente após o corpo de prova, serão utilizados para levantar o perfil de velocidades na direção x (horizontal) e y (vertical). Já os outros furos efetuados ao longo do tubo de acrílico, são para aquisição dos sinais das flutuações de velocidade da esteira de vórtices e também para inserir o sensor de temperatura da sonda de fio quente.

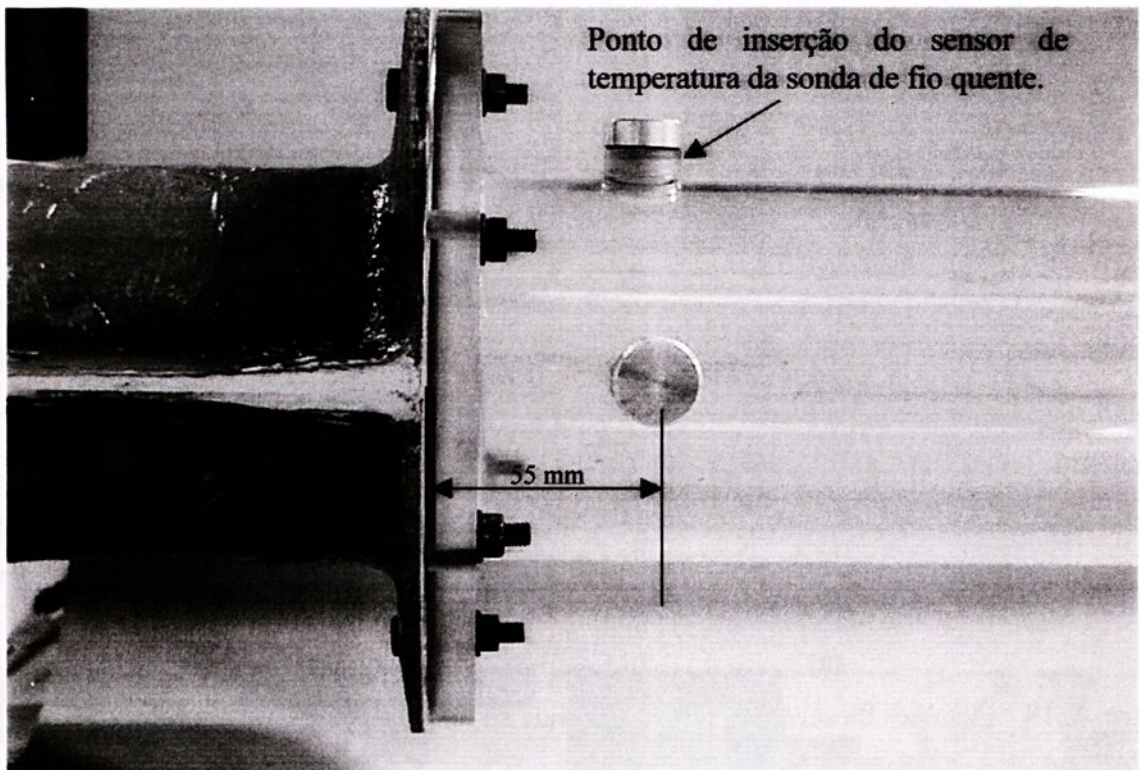


Figura B.16 -Região onde foi inserido o sensor de temperatura da sonda de fio quente.

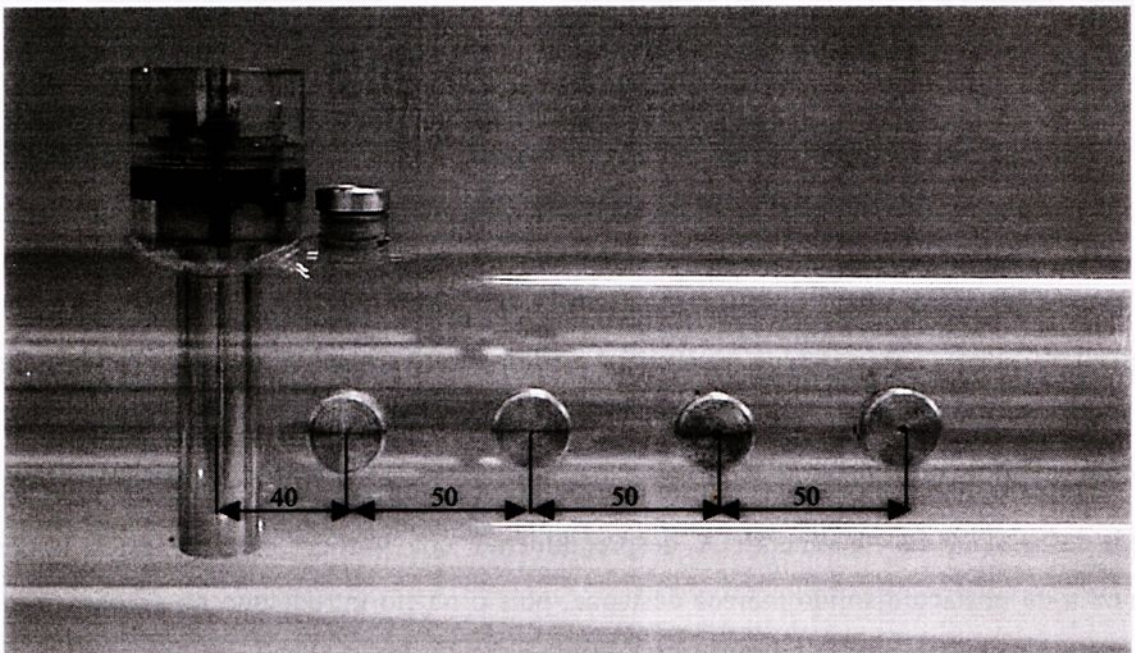


Figura B.17 - Pontos de inserção da sonda de fio quente (dimensões em mm).

A Figura B.18 ilustra com detalhes como foi feita a fixação do corpo de prova na seção de testes e o dispositivo utilizado.

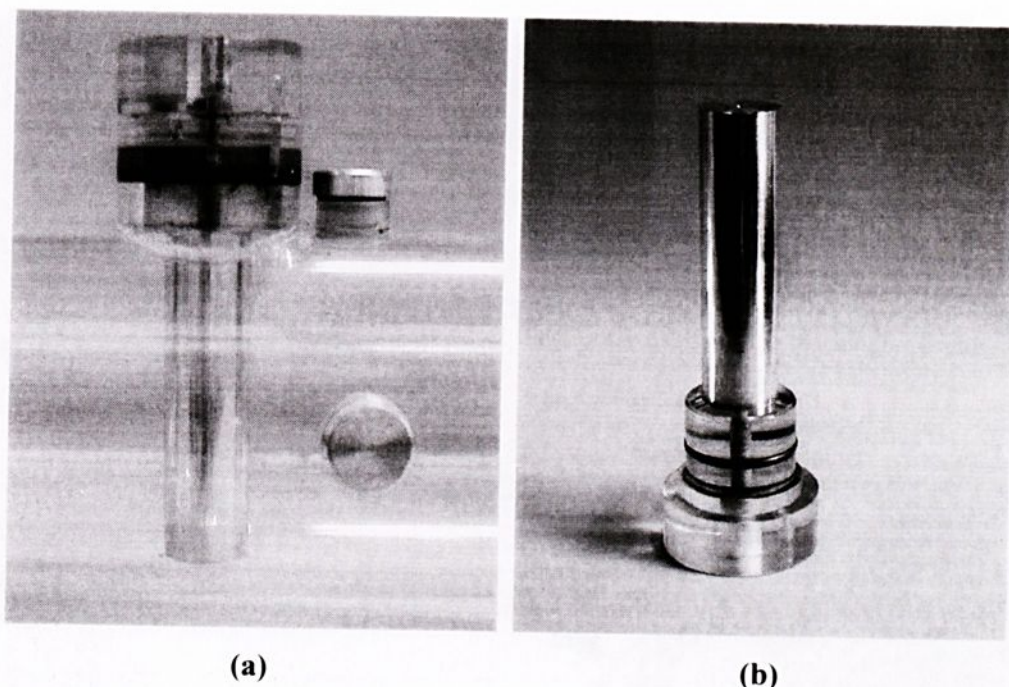


Figura B.18 - Detalhes da seção de testes: (a) onde se encontra posicionado o corpo de prova e (b) dispositivo de fixação do corpo de prova.

Este suporte, que tem como função fixar os modelos cilíndricos na seção de testes, foi também construído em acrílico, a partir de uma barra rígida de 50 mm de diâmetro, pelo processo de torneamento. Na Figura B.18 (b), pode-se observar a presença de um anel *o'ring* para efetuar a vedação. Nas extremidades deste suporte foram feitos dois furos M4 para a sua fixação na tubulação e também um furo passante para um parafuso M4 bem no centro deste suporte, para fixar os corpos de prova.

B.5 Corpos de Prova – *Shedders*

O projeto de um medidor de vazão do tipo vórtice é dificultado por inúmeros fatores que podem influenciar no fenômeno de desprendimento dos vórtices. Dentre estes fatores, a geometria do obstáculo sólido merece destaque, pois o objeto introduzido no escoamento deve ser capaz de manter boa regularidade na frequência de desprendimento dos vórtices e que sobretudo produza uma esteira composta por vórtices facilmente identificáveis e estáveis. Diferentes geometrias de corpos cilíndricos prismáticos posicionados transversalmente em relação ao fluxo principal são exaustivamente testadas pelos fabricantes de medidores de vazão do tipo vórtice em uma constante busca de emissores de vórtices com uma curva de desprendimento estável e constante em uma larga faixa de Reynolds.

Para efetuar os testes no dispositivo experimental construído, que tem por finalidade simular o funcionamento de um medidor de vazão do tipo vórtice, foram construídos 13 modelos cilíndricos (*shedder*), sendo 9 deles baseados em corpos originalmente empregados nos medidores de vazão.

Os modelos cilíndricos foram confeccionados em alumínio aeronáutico, partindo-se de uma barra de seção quadrada de 0,110 x 0,110 m. A partir desta barra foram cortados vários tarugos, com o auxílio de uma serra mecânica. Em seguida, utilizando um torno do tipo universal, foi feito o furo de centro e uma pequena parte deste tarugo foi torneada em uma de suas extremidades para uma melhor fixação no divisor da fresadora. Após este processo, os corpos foram usinados na fresa até a obtenção das dimensões desejadas. O processo de usinagem dos modelos cilíndricos está ilustrado na Figura B.19.

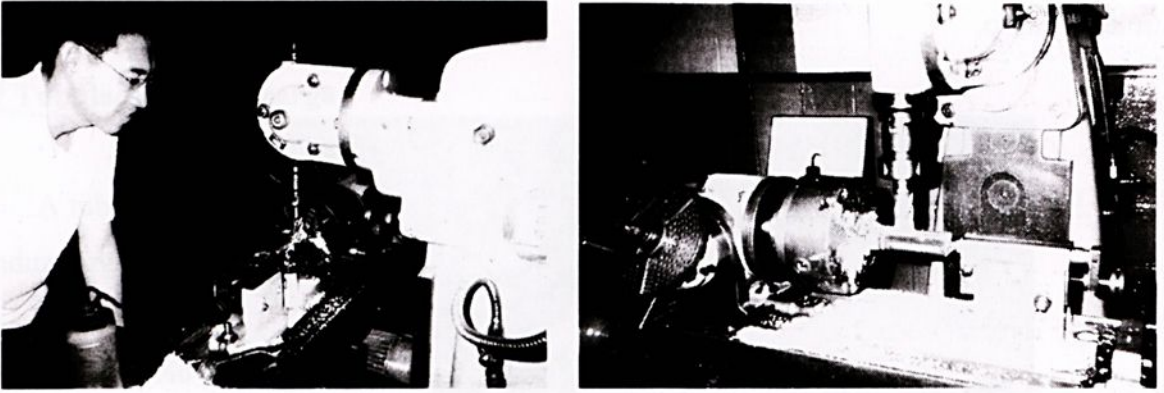


Figura B.19 - Processo de usinagem dos modelos cilíndricos.

Em seguida, realizou-se um segmento de rosca M4 no centro geométrico de apenas uma das extremidades de cada modelo, para permitir a sua fixação aparafusada na seção de testes. A fim de assegurar um bom acabamento superficial, os modelos cilíndricos assim obtidos foram lixados manualmente, utilizando-se lixas com granulação decrescente. Por fim, os modelos cilíndricos foram então polidos, resultando num acabamento superficial espelhado.

B.6 Válvula Controladora de Vazão

A válvula controladora de vazão instalada imediatamente após a seção de ensaios, deve produzir a menor perturbação possível sobre o fluxo.

Existe no mercado uma grande variedade de válvulas de controle de vazão para utilização em líquidos. As mais indicadas para instalação em um túnel hidrodinâmico são as do tipo esfera ou do tipo borboleta, que propiciam abertura completa em apenas um quarto de volta do dispositivo de acionamento.

A válvula controladora de vazão utilizada no presente trabalho consiste numa válvula do tipo esfera de 3" (76.2 mm) da marca ACOMEX, com acionamento manual, instalado imediatamente após a seção de ensaios – Figura B.20. Este tipo de válvula, quando totalmente aberto, provoca uma pequena perda de carga e não possui folgas, o que é essencial para o controle da vazão.

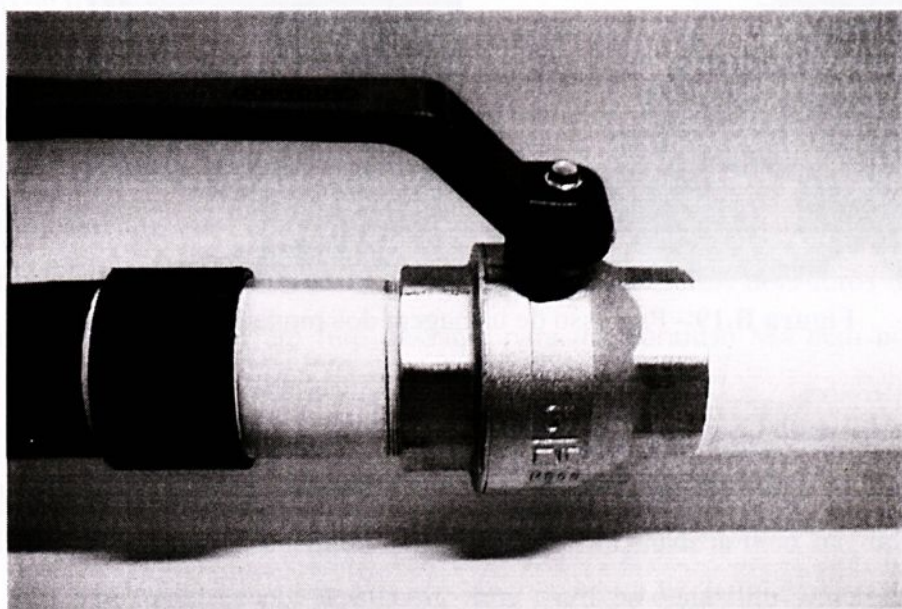


Figura B.20 - Válvula controladora de vazão.

Para realizar a conexão entre a seção de ensaios, constituída por uma tubulação de 4" e a tubulação de descarga de 3", foi construído um difusor cônico em PVC, ilustrado na Figura B.21. Este difusor cônico foi confeccionado a partir de um tarugo cilíndrico rígido de PVC de 125 mm de diâmetro, pelo processo de torneamento.

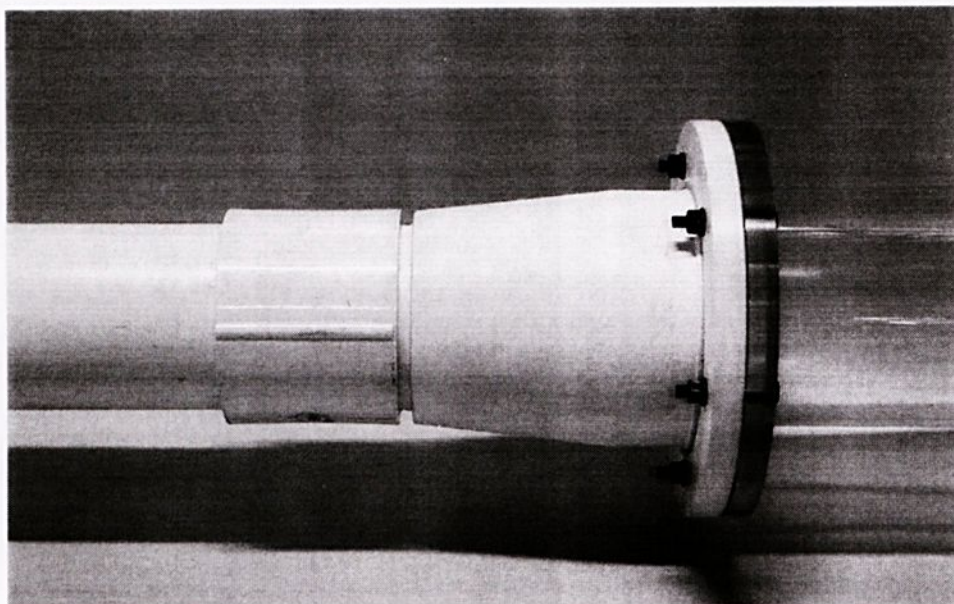


Figura B.21 - Difusor cônico confeccionado em PVC.

B.7 Tubulação de Descarga

A tubulação de descarga, composta de tubos e conexões de PVC roscável de 3" (76,2 mm) conduz a água utilizada nos ensaios para o reservatório inferior.

B.8 Reservatório Inferior

O reservatório inferior armazena o fluido que escoar da tubulação de descarga do túnel e supre o reservatório de nível constante com água da rede urbana. Construído em alvenaria abaixo do nível do piso, este reservatório possui um volume útil de aproximadamente 3 m^3 .

B.9 Sistema de Abastecimento

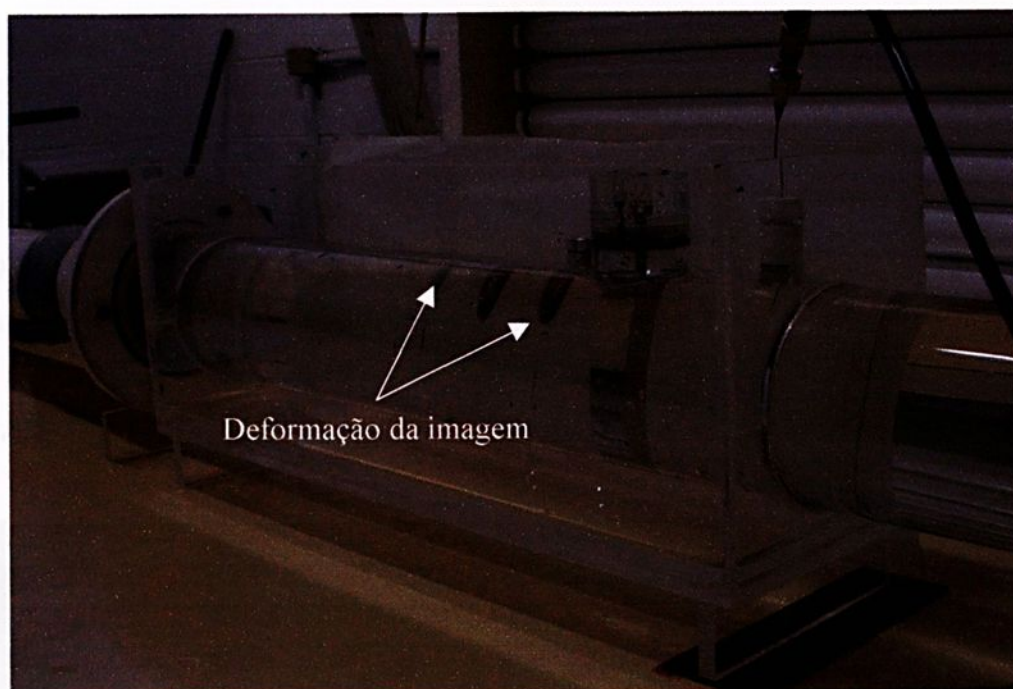
O sistema de abastecimento do reservatório de nível constante é constituído por uma bomba centrífuga da marca MARK e uma tubulação de PVC soldável (água fria) de 50 mm de diâmetro – Figura B.22.



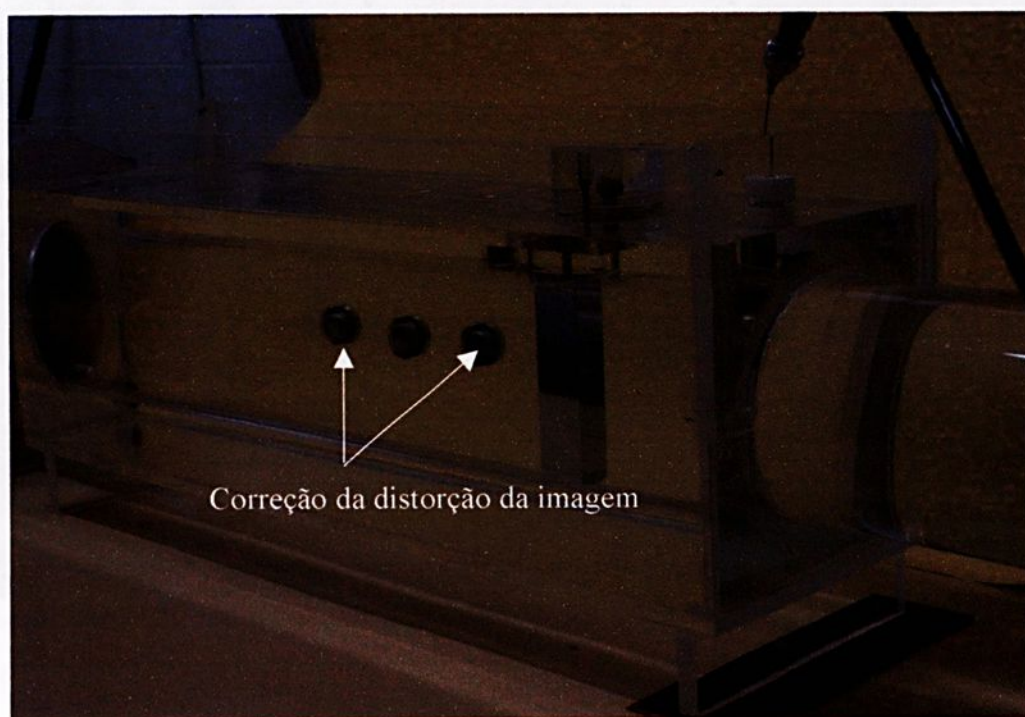
Figura B.22 - Sistema de abastecimento do túnel.

B.10 Caixa Acrílica

Para eliminar os efeitos de curvatura do tubo de acrílico no momento da aquisição das imagens do escoamento foi utilizado uma caixa de acrílico preenchida com água. Utilizando este aparato foi possível obter imagens do escoamento sem distorções. Esta caixa acrílica foi conectada à tubulação, como ilustrado na Figura B.23.



(a)



(b)

Figura B.23 - Caixa acrílica; (a) vazia, ilustrando a deformação da imagem provocada na seção de testes e (b) preenchida com água, para corrigir as distorções provocadas pelo efeito da curvatura do tubo.

B.11 Dispositivo de Injeção de Corantes Líquidos

O sistema de injeção de corante é constituído por uma longa agulha hipodérmica conectada ao reservatório pressurizado por intermédio de uma fina mangueira flexível. A presença de uma válvula de agulha posicionada entre o reservatório pressurizado e a agulha hipodérmica, permite o controle da velocidade de injeção do corante no escoamento. A Figura B.24 mostra o dispositivo de injeção de corantes líquidos empregado no presente trabalho.

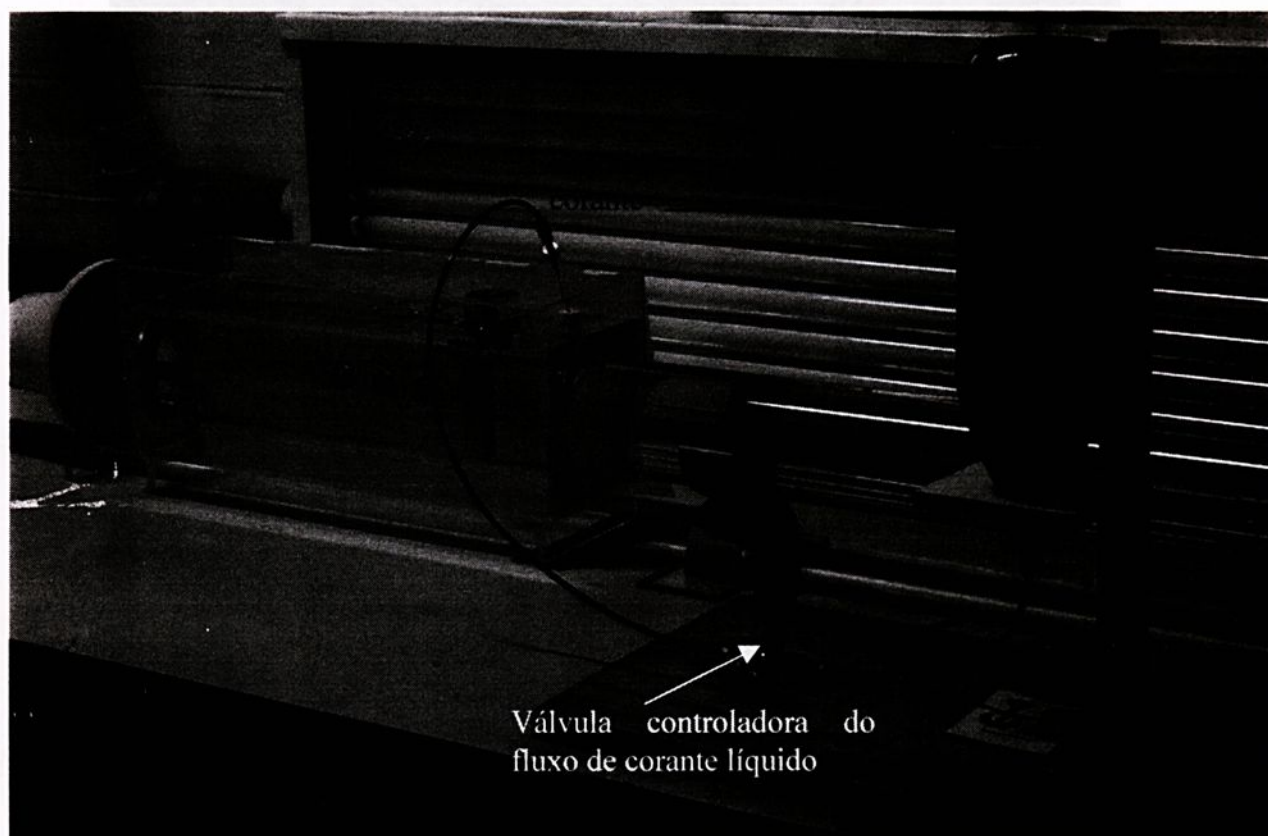


Figura B.24 - Dispositivo para injeção de corantes líquidos.

ANÁLISE DE INCERTEZAS

C.1 Introdução

No meio científico, não é aceitável apresentar resultados experimentais sem descrever as incertezas envolvidas. Além de prover uma estimativa da confiabilidade dos resultados obtidos, a definição dos limites do intervalo dentro do qual os resultados de um experimento devem recair é de grande valia, tanto para o experimentalista, quanto para o usuário final. Para o experimentalista, esta prática fornece um método racional para avaliar o significado da dispersão dos dados em repetidas medições, possibilitando a detecção de eventuais problemas em experimentos mal comportados. Para o usuário final, a incerteza deve ser considerada ao se decidir se os resultados apresentados concordam com resultados anteriormente publicados, ou se diferem destes.

A técnica de predizer o intervalo de incerteza associada a um resultado experimental, baseando-se em observações da dispersão dos dados utilizados no cálculo deste resultado, é chamada de Análise de Incerteza.

A análise das incertezas será dividida em duas partes, sendo que na primeira são analisados os resultados obtidos no túnel hidrodinâmico vertical e na segunda, os resultados obtidos no módulo experimental para teste dos corpos geradores de vórtices. Inicialmente será apresentado todo o fundamento matemático para a análise de incerteza por amostragem simples, como proposto por Moffat (1988).

C.2 Análise de Incerteza por Amostragem Simples

Experimentos de amostragem simples são aqueles em que cada ponto experimental é testado somente uma vez, ou no máximo algumas poucas vezes. Experimentos de pesquisa em mecânica dos fluidos e transferência de calor são geralmente experimentos de amostragem simples, caracterizados por dados distribuídos ao longo de uma ampla faixa do parâmetro em estudo (Moffat, 1988).



C.2.1 Fundamentos Matemáticos

Considere uma variável X_i que possui uma incerteza conhecida δX_i . A maneira de representar a variável e sua incerteza é

$$X_i = X_i(\text{medido}) \pm \delta X_i \quad (20:1) \quad (\text{C.1})$$

Esta definição deve ser interpretada no seguinte sentido:

- A melhor estimativa de X_i é $X_i(\text{medido})$
- Existe uma incerteza em X_i que pode ser tão grande quanto $\pm \delta X_i$
- As chances da incerteza de X_i ser menor do que $\pm \delta X_i$ são de 20 para 1 (95%)

O valor de $X_i(\text{medido})$ representa a leitura realizada, enquanto que δX_i representa 2σ , onde σ é o desvio padrão da população de possíveis medidas das quais a única amostra X_i foi tirada. A equação (C.1) segue da hipótese de que se um número infinito de observações fosse feito, a média seria o valor verdadeiro (assumindo que não existem erros sistemáticos ou fixos) e os erros aleatórios seriam normalmente distribuídos ao seu redor, com desvio padrão igual a σ . Uma vez que 95% de todos os elementos de uma população com distribuição normal situam-se dentro do intervalo $\pm 2\sigma$ em torno da média, podemos dizer com 95% de confiança que o valor médio deve estar contido no intervalo de $\pm 2\sigma$ do valor medido.

Para o caso de experimentos com amostragem simples, a determinação de σ exige a realização de um experimento auxiliar para estimar a componente aleatória da incerteza. Este experimento auxiliar geralmente consiste na obtenção de um conjunto de observações independentes do processo numa condição de ensaio representativa, geralmente um conjunto de 30 observações. O desvio padrão da população (σ) pode então ser calculado a partir do desvio padrão da amostra (S) obtido do experimento auxiliar, utilizando-se a distribuição de *Student*.

O resultado R do experimento, calculado a partir de um conjunto de medições, é representado por

$$R = R(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N) \quad (\text{C.2})$$

Kline & McClintock (1953) mostraram que a incerteza de um resultado calculado pode ser estimada com boa precisão utilizando uma combinação dos efeitos das incertezas individuais de

cada variável sobre o resultado. O efeito da incerteza de uma única variável sobre o resultado calculado, se somente esta variável possui uma incerteza associada, é dada por

$$\delta R_{X_i} = \frac{\partial R}{\partial X_i} \delta X_i \quad (\text{C.3})$$

A derivada parcial de R em relação a X_i é conhecida como o *coeficiente de sensibilidade* do resultado R em relação à variável X_i . Quando diversas variáveis independentes são utilizadas no cálculo do resultado, os termos individuais são combinados da seguinte forma:

$$\delta R = \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial R}{\partial X_i} \delta X_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{C.4})$$

Esta é a equação básica da análise de incertezas. Cada termo representa a contribuição feita pela incerteza de uma variável (δX_i) para a incerteza global do resultado (δR). Todos os termos possuem a mesma forma: a derivada parcial de R em relação a X_i , multiplicada pela incerteza desta variável. A Eq.(C.4) é válida quando as seguintes condições são observadas:

- Cada uma das medições é independente das demais;
- Se fossem realizadas repetidas medições de cada variável, sua dispersão apresentaria dispersão Gaussiana;
- A incerteza de cada variável é expressa com a mesma probabilidade.

Na maioria das situações, a incerteza global de um resultado é dominada por apenas alguns de seus termos. Os termos na equação(C.4) que são menores do que o maior termo por um fator de 3 ou mais, geralmente podem ser ignorados.

Em muitas aplicações, deseja-se que a incerteza de um resultado seja expressa como uma fração deste. Em particular, quando a expressão do resultado pode ser escrita na forma de um produto, tal como na Eq.(C.5), a incerteza relativa pode ser encontrada diretamente. Isto é, se:

$$R = X_1^a X_2^b X_3^c \dots X_N^m \quad (\text{C.5})$$

então

$$\frac{\delta R}{R} = \left[\left(a \frac{\delta X_1}{X_1} \right)^2 + \left(b \frac{\delta X_2}{X_2} \right)^2 + \dots + \left(m \frac{\delta X_N}{X_N} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{C.6})$$

Esta é uma forma natural e conveniente de calcular a incerteza relativa do resultado, quando se conhece a incerteza relativa das variáveis envolvidas. Neste caso, os expoentes de X_i são os coeficientes de sensibilidade dos termos da equação (C.6).

C.3 Análise de Incerteza das Variáveis de Interesse para o Túnel Hidrodinâmico Vertical

Comprimento

As dimensões características dos modelos cilíndricos foram medidas com o auxílio de um paquímetro digital *Mitutoyo Absolute Digimatic (modelo CD-6"CS)* 0.01-150 mm. A incerteza associada a estas medições foi determinada através de um experimento auxiliar, que consiste em realizar 30 medições independentes das dimensões de um modelo cilíndrico. Este experimento auxiliar foi realizado para diferentes corpos, e verificou-se que o desvio padrão da amostra não depende significativamente da dimensão do modelo utilizado. A partir do desvio padrão da amostra ($S = 4.5 \times 10^{-5}$ m), pode-se calcular a incerteza associada à medição das dimensões dos modelos cilíndricos, dada por

$$\delta B = \pm t_{95\%} \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (\text{C.7})$$

onde δB é a incerteza de medição de uma dada dimensão do cilindro, $t_{95\%}$ é o coeficiente de *Student* para uma confiança de 95%, S é o desvio padrão da amostra e N é o número de pontos da amostra. Assim, a incerteza das dimensões dos cilindros pode ser estimada como $\delta B = 1.7 \times 10^{-5}$ m.

Temperatura

A temperatura da água é um parâmetro que exerce uma grande influência sobre as suas propriedades, tais como a viscosidade e a densidade. Nos ensaios de visualização do escoamento, a temperatura da água foi medida com o auxílio de um termômetro, de coluna de mercúrio marca *TWG* modelo *Labortherm-N*, com escala de 15-30°C e incerteza de $\pm 0.05^\circ\text{C}$, devidamente aferido.



Viscosidade Cinemática

A viscosidade cinemática da água é uma propriedade física que possui forte dependência com a temperatura, e pode ser escrita como

$$\nu(T) = \frac{\mu(T)}{\rho(T)}$$
(C.8)

Existem na literatura diversas correlações bem estabelecidas para a viscosidade absoluta e a densidade da água em função da temperatura. Para o cálculo da viscosidade cinemática da água, foram utilizadas as correlações listadas na Tabela C.1.

Tabela C.1 – Correlações para o cálculo da viscosidade cinemática da água.

Propriedade	Correlação	Fonte	Incerteza
$\mu(T)$ $[\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}]$	$\ln\left(\frac{\mu}{\mu_o}\right) = -1,704 - 5,306Z + 7,003Z^2$ onde $Z = 273/T(K)$ e $\mu_o = 1,788 \times 10^{-3}$	White (1999)	$\pm 0,2\%$
$\rho(T)$ $[\text{kg.m}^{-3}]$	$\rho = 1000 - 0,0178 T(^{\circ}\text{C}) - 4 ^{1,7}$		

A incerteza associada ao cálculo da viscosidade cinemática pode ser então estimada como sendo

$$\delta \nu = \left[\left(\frac{\delta \mu}{\rho} \right)^2 + \left(-\frac{\mu}{\rho^2} \delta \rho \right)^2 \right]^{1/2}$$
(C.9)

ou, em termos relativos:

$$\frac{\delta \nu}{\nu} = \left[\left(\frac{\delta \mu}{\mu} \right)^2 + \left(-\frac{\delta \rho}{\rho} \right)^2 \right]^{1/2}$$
(C.10)

Para a temperatura média na qual foram realizados os ensaios ($T=28^{\circ}\text{C}$), a incerteza relativa da viscosidade cinemática da água é de $\pm 0,28\%$.

Frequência

A frequência de emissão dos vórtices, ou frequência de Strouhal, foi determinada através da análise das imagens geradas no túnel hidrodinâmico vertical com auxílio de um vídeo cassete profissional com placa *time code*, onde é possível contar o número de vórtices que são emitidos em um dos lados do corpo de prova, e o tempo que estes levam para se desprenderem, sendo a resolução máxima do aparelho de 30 fotogramas por segundo. A incerteza da determinação da frequência de Strouhal pode ser estimada da seguinte forma:

$$\delta f = \frac{1}{30} \text{ [Hz]} \tag{C.11}$$

Assim, a sua incerteza pode ser estimada como $\delta f = 0.03 \text{ Hz}$.

Vazão

A vazão do escoamento que flui através da seção de testes é medida com o auxílio de um medidor de vazão eletromagnético. De acordo com a especificação do fabricante, este instrumento possui uma precisão de $\pm 1\%$ do valor de leitura, para vazões maiores do que 50% do fundo de escala, enquanto que para vazões menores do que 50% do fundo de escala, sua incerteza é de $\pm 0,5\%$ do valor do fundo de escala. Por se tratar de um equipamento eletrônico, o fundo de escala pode ser ajustado de acordo com a faixa de valores da vazão dos ensaios programados. Ao longo do presente trabalho, o fundo de escala do medidor de vazão foi ajustado em 5 l/s, que corresponde à máxima vazão utilizada. Assim, a incerteza da vazão pode ser estimada como $\delta Q = 0,025 \text{ l/s}$, para vazões inferiores a 2,5 l/s, e $\delta Q = 0,01 Q \text{ [l/s]}$, para vazões superiores a 2,5 l/s.

Velocidade

A velocidade da corrente livre no interior da seção de testes é calculada com base na leitura de vazão do medidor de vazão eletromagnético, assumindo um perfil de velocidade uniforme. Assim:

$$V_x = \frac{Q}{A} \tag{C.12}$$

onde Q é a vazão volumétrica indicada pelo medidor de vazão e A é a área transversal da seção de testes na posição em que o cilindro encontra-se instalado. A incerteza associada ao cálculo da velocidade da corrente livre pode ser estimada por:

$$\delta V_x = \left[\left(\frac{\delta Q}{A} \right)^2 + \left(-\frac{Q}{A^2} \delta A \right)^2 \right]^{1/2} \tag{C.13}$$

A Tabela C.2 apresenta valores típicos da incerteza da velocidade da corrente livre, calculados para o caso de um cilindro triangular ($d=8\text{ mm}$) imerso num escoamento com temperatura ambiente.

Tabela C.2 – Valores típicos da incerteza da velocidade da corrente livre.

Re	Q (l/s)	V_x (m/s)	δV_x (m/s)	$\delta V_x / V_x$
100	0,194	0,011	0,0014	13%
500	0,949	0,051	0,0014	3%
900	1,746	0,095	0,0014	1%

Número de Reynolds

O número de Reynolds do escoamento ao redor de um corpo cilíndrico é definido pela seguinte expressão:

$$Re = \frac{V_x B}{\nu} \tag{C.14}$$

onde B é a dimensão da base da seção transversal retangular.

A incerteza do número de Reynolds pode ser calculada como

$$\delta Re = \left[\left(\frac{B}{\nu} \delta V_x \right)^2 + \left(\frac{V_x}{\nu} \delta B \right)^2 + \left(-\frac{V_x B}{\nu^2} \delta \nu \right)^2 \right]^{1/2} \tag{C.15}$$

Calculando a incerteza do número de Reynolds para o mesmo caso apresentado no cálculo da velocidade, obtém-se os resultados apresentados na Tabela C.3.

Tabela C.3 – Valores típicos da incerteza do número de Reynolds.

Re	δRe	δRe/Re	Re ± δRe
100	13	13%	100 ± 13
500	13	3%	500 ± 13
900	14	1%	900 ± 14

Comparando os termos da equação (C.15) entre si, observa-se que o primeiro termo, devido à incerteza da velocidade, é muito maior do que a soma dos demais.

Número de Strouhal

O número de Strouhal representa a frequência adimensional de emissão dos vórtices de um dos lados do corpo, e pode ser escrito como

$$St = \frac{f B}{V_{\infty}}$$

(C.16)

onde f é a frequência de emissão dos vórtices na esteira de von Kármán.

A incerteza associada ao cálculo do número de Strouhal pode ser estimada por

$$\delta St = \left[\left(\frac{B}{V_{\infty}} \delta f \right)^2 + \left(\frac{f}{V_{\infty}} \delta B \right)^2 + \left(- \frac{f B}{V_{\infty}^2} \delta V_{\infty} \right)^2 \right]^{1/2}$$

(C.17)

onde os valores típicos da incerteza do número de Strouhal são apresentados na Tabela C.4.

Tabela C.4 – Valores típicos da incerteza do número de Strouhal.

Re	f (Hz)	St	δSt	δSt/St	St ± δSt
100	0,23	0,176	0,003	1,7%	0,176 ± 0,003
500	1,45	0,227	0,005	2,2%	0,227 ± 0,005
900	2,58	0,220	0,004	1,8%	0,220 ± 0,004

C.4 Análise de Incerteza das Variáveis de Interesse para o Módulo para Teste dos *Shedders*

Diâmetro da Tubulação

Para o cálculo do número de Strouhal foi adotado como dimensão característica, o diâmetro da tubulação (D). A medida do diâmetro da tubulação foi realizada com o auxílio de um paquímetro digital *Mitutoyo Absolute Digimatic (modelo CD-6"CS)* 0.01-150 mm. A incerteza associada a esta medição foi determinada através de um experimento auxiliar, que consiste em realizar 30 medições independentes do diâmetro do tubo. A partir do desvio padrão da amostra ($S = 6,3 \times 10^{-5}$ m), pode-se calcular a incerteza associada à medição da dimensão do tubo, dada por:

$$\delta D = \pm t_{95\%} \frac{S}{\sqrt{N}}$$

(C.18)

onde δD é a incerteza de medição da dimensão do tubo, $t_{95\%}$ é o coeficiente de *Student* para uma confiança de 95%, S é o desvio padrão da amostra e N é o número de pontos da amostra. Assim, a incerteza do diâmetro do tubo pode ser estimada como $\delta D = 2,4 \times 10^{-5}$ m.

Temperatura

A temperatura é um parâmetro que exerce uma grande influência sobre as propriedades da água, tais como a viscosidade e a densidade. Nos ensaios de visualização das estruturas do escoamento formadas a partir do *shedder*, a temperatura da água foi medida com o auxílio de um termômetro de coluna de mercúrio marca *Incoterm*, com escala de 0-100°C e incerteza de $\pm 1^\circ\text{C}$.

Vazão Mássica

A vazão mássica do escoamento (m) foi obtida pelo método direto ou seja, através da medição da massa de água escoando num determinado intervalo de tempo.

A incerteza associada à medição da vazão mássica é dada por

$$\delta m = \pm t_{95\%} \frac{S}{\sqrt{N}} \tag{C.20}$$

onde $t_{95\%}$ é o coeficiente de *Student* para uma confiança de 95%, S é o desvio padrão da amostra e N é o número de pontos da amostra. A incerteza associada a medição da vazão mássica é apresentada na Tabela C.6.

Tabela C.6 – Valores típicos da incerteza da medição da vazão mássica.

Re	m (kg/s)	δm (kg/s)	$m \pm \delta m$ (kg/s)
5500	0,34	5.8×10^{-4}	$0,34 \pm 5.8 \times 10^{-4}$
20000	1,21	9.4×10^{-4}	$1,21 \pm 9.4 \times 10^{-4}$
36000	2,23	1.4×10^{-2}	$2,23 \pm 1.4 \times 10^{-2}$

Velocidade

A velocidade no interior da seção de testes (V_x) foi obtida a partir da medição da vazão mássica (m) do escoamento, efetuada pelo método direto, ou seja

$$V_x = \frac{m}{\rho A} \tag{C.21}$$

onde ρ é a densidade da água em kg/m^3 e A a área da seção transversal do tubo em m^2 .

A incerteza associada ao cálculo da velocidade da corrente livre pode ser estimada por

$$\delta V_{\infty} = \left[\left(\frac{1}{\rho A} \delta m \right)^2 + \left(-\frac{m}{A \rho^2} \delta \rho \right)^2 + \left(-\frac{m}{\rho A^2} \delta A \right)^2 \right]^{1/2}$$

C.22

A Tabela C.7 apresenta valores típicos da incerteza da velocidade da corrente livre, calculados para o caso de um cilindro quadrado (24x24 mm), imerso num escoamento com T=28°C.

Tabela C.7 – Valores típicos da incerteza da velocidade da corrente livre.

Re	V _∞ (m/s)	δV _∞ (m/s)	δV _∞ /V _∞	V _∞ ± δV _∞
5500	0,049	1,3x10 ⁻⁴	0,3%	0,049 ± 1,3x10 ⁻⁴
20000	0,175	3,9x10 ⁻⁴	0,2%	0,175 ± 3,9x10 ⁻⁴
36000	0,323	2,1x10 ⁻³	0,7%	0,323 ± 2,1x10 ⁻³

Número de Reynolds

O número de Reynolds do escoamento ao redor de um corpo cilíndrico é definido pela seguinte expressão

$$Re = \frac{V_{\infty} D}{\nu}$$

(C.23)

onde V_∞ é a velocidade da corrente livre no interior da seção de testes, ν a viscosidade cinemática da água e D o diâmetro interno do tubo de acrílico.

A incerteza do número de Reynolds pode ser calculada como

$$\delta Re = \left[\left(\frac{D}{\nu} \delta V_{\infty} \right)^2 + \left(\frac{V_{\infty}}{\nu} \delta D \right)^2 + \left(-\frac{V_{\infty} D}{\nu^2} \delta \nu \right)^2 \right]^{1/2}$$

(C.24)

Calculando a incerteza do número de Reynolds para o mesmo caso apresentado no cálculo da velocidade, obtém-se os resultados apresentados na Tabela C.8.

Tabela C.8 – Valores típicos da incerteza do número de Reynolds.

Re	δRe	$\delta Re/Re$	$Re \pm \delta Re$
5500	21	0,38%	5500 ± 21
20000	70	0,35%	20000 ± 70
36000	254	0,85%	36000 ± 254

Número de Strouhal

As incertezas associadas ao número de Strouhal foi calculada da mesma forma que para os ensaios realizados no túnel hidrodinâmico vertical.

Para o caso do cilindro quadrado (24x24 mm), são apresentados os valores típicos da incerteza do número de Strouhal, na Tabela C.9.

Tabela C.9 – Valores típicos da incerteza do número de Strouhal.

Re	St	δSt	$\delta St/St$	$St \pm \delta St$
5500	0,980	0,018	1,8%	$0,980 \pm 0,018$
20000	0,908	0,019	2,1%	$0,908 \pm 0,019$
36000	0,912	0,011	1,2%	$0,912 \pm 0,011$





UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dem.feis.unesp.br

