unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

MESTRADO

1210001407

ESTUDO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO AO REDOR DE CILINDROS DE BASE QUADRADA E RETANGULAR

Cláudio Lindquist

Ilha Solteira - SP

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO AO REDOR DE CILINDROS DE BASE QUADRADA E RETANGULAR

Cláudio Lindquist

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. Sérgio Said Mansur
Co-orientador: Prof. Dr. Edson Del Rio Vieira

Ilha Solteira, Março de 2000

BCpIS - FEIS - UNESP

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 unesp 12 13 14 15 16 17 18

Proc. 053/2003-UPD 142

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"
SERVIÇO TÉC. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO

DATA DE CHEC...	DATA DE TOMBO
01.09.03	30.09.03
REGISTRADO POR: Ailza	TOMBO: Te. 1407
AQUISIÇÃO: Doação autor R$10,00	CLASSIFICAÇÃO: L747e

1210001407

Co
Sys 199632
Sys 55484
30502004

620.106 4
L747e Lindquist. Cláudio

Estudo experimental do escoamento ao redor de cilindros de base quadrada e retangular / Cláudio Lindquist. -- Ilha Solteira. 2000
xxiii. 188p. : il. : 30cm

Dissertação(mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. 2000

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Said Mansur
Co-orientador: Prof. Dr. Edson Del Rio Vieira
Bibliografia: p.161-166

1.Escoamento externo-Cilindros quadrados e retangulares 2.Dinâmica dos fluidos-Esteira de von Kármán 3.Dinâmica dos fluidos-Frequência de Strouhal 4.Visualização de escoamentos 5.Anemometria de fio quente 6.Túnel hidrodinâmico

"*Estudo Experimental do Escoamento ao Redor de Cilindros de Base Quadrada e Retangular*"

Cláudio Lindquist

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. André Luiz Seixlack - Coordenador

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Sérgio Said Mansur - Orientador

Prof. Dr. Milton Biage

Prof. Dr. João Batista Aparecido

Ilha Solteira – SP, março de 2000

BCpIS - FEIS - UNESP

a Deus
à minha família
aos meus professores
aos meus amigos

BCpIS - FEIS - UNESP

Agradecimentos

O presente trabalho insere-se no contexto de um Projeto de Auxílio à Pesquisa apoiado pela FAPESP (Proc. 97/12249-9), tendo sido inteiramente desenvolvido nas dependências do Laboratório de Visualização de Escoamentos, vinculado ao Departamento de Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP. Durante sua realização, pude contar com a colaboração de várias pessoas e instituições, às quais gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos. Mesmo correndo o risco da omissão, desejo agradecer nominalmente:

- *Aos Profs. Sérgio Mansur e Edson Del Rio, pela orientação e amizade, das quais desfrutei ao longo dos últimos anos;*
- *Ao corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica, que me proporcionou uma sólida formação profissional, e em especial, ao Prof. João Batista Aparecido pelo apoio e colaboração, e ao Prof. Luís Gashe pelas valiosas discussões e sugestões;*
- *Aos professores Milton Biage e João Batista Aparecido, membros da banca examinadora, que aceitaram a incumbência de julgar esta dissertação;*
- *Aos técnicos Reginaldo, Ronaldo, Marino, Edivaldo, Carlos e Darci, do Departamento de Engenharia Mecânica, pelo auxílio na confecção de peças e na montagem da instalação experimental. Aos técnicos Everaldo, Adilson e Valdemir, do Departamento de Engenharia Elétrica, e aos técnicos Cavassano e Gilberto, do Departamento de Engenharia Civil, pela boa vontade em colaborar na solução dos mais variados problemas de ordem técnica com os quais me defrontei;*
- *Ao técnico de informática Elias, pelo diligente esforço de manter a rede de computadores do Departamento de Engenharia Mecânica em operação;*
- *Às Secretárias Rose, Cida, Iza, Vânia e Sandra, pela dedicação e apoio;*
- *Aos colegas da pós-graduação, pelo companheirismo, e em especial aos amigos Tito e Odenir, pela amizade e co-autoria de trabalhos científicos;*
- *À FAPESP, pelo suporte financeiro que viabilizou a realização deste trabalho, concedido na forma de uma bolsa de mestrado (Proc. 97/12818-3). À PROPP, pelo auxílio à minha participação em eventos científicos, assim como à FUNDUNESP, pelos recursos aplicados no Laboratório de Visualização de Escoamentos.*

BCpIS - FEIS - UNESP

Sumário

Lista de Tabelas xiii

Lista de Ilustrações xiv

Lista de Símbolos xix

Resumo xxi

Abstract xxiii

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 1

1.1 Vórtices na Esteira de Cilindros 1

1.2 Escopo e Estrutura do Trabalho 5

CAPÍTULO 2 - TÚNEL HIDRODINÂMICO VERTICAL 9

2.1 Introdução 9

2.2 Descrição da Instalação Experimental 11

2.2.1 Reservatório Superior 12
2.2.2 Contração 13
2.2.3 Seção de Ensaios 13
2.2.4 Corpos de Prova 15
2.2.5 Medidor de Vazão Magnético 18
2.2.6 Válvulas Controladoras de Vazão 18
2.2.7 Tubulação de Descarga 19
2.2.8 Reservatório Inferior 19
2.2.9 Sistema de Abastecimento 19

2.3 Operação do Túnel 20

2.4 Características Hidrodinâmicas do Túnel 20

2.4.1 Perfis de Velocidade 20
2.4.2 Intensidade Turbulenta Residual 24

unesp

CAPÍTULO 3 - ANEMOMETRIA DE FIO QUENTE 26

3.1 Introdução 26

3.2 Princípio Básico de Funcionamento 27

3.3 Calibração de Sondas 29
3.3.1 Métodos de Calibração 29
3.3.2 Dispositivo e Metodologia de Calibração 30
3.3.3 Resultados Típicos 35

3.4 Aquisição e Tratamento do Sinal 37

CAPÍTULO 4 - VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS 43

4.1 Introdução 43

4.2 Visualização de Escoamentos em Meio Líquido 44
4.2.1 Injeção de corantes líquidos 44
4.2.2 Bolhas de Hidrogênio 48
4.2.3 Partículas Sólidas 51

CAPÍTULO 5 - RAZÃO DE FORMA 55

5.1 Introdução 55

5.2 Revisão Bibliográfica 57

5.3 Metodologia Experimental 62
5.3.1 Anemometria de Filme Quente 62
5.3.2 Visualização do Escoamento 64

5.4 Resultados e Discussão 65
5.4.1 Cilindro Quadrado (ϕ = 1) 65
5.4.2 Cilindro Retangular com ϕ = 2 68
5.4.3 Cilindro Retangular com ϕ = 3 73
5.4.4 Cilindro Retangular com ϕ = 4 76
5.4.5 Cilindro Retangular com ϕ = 6 78
5.4.6 Cilindro Retangular com ϕ = 8 81
5.4.7 Cilindro Retangular com ϕ = 12 83
5.4.8 Cilindro Retangular com ϕ = 16 85
5.4.9 Comparação dos Resultados 86

5.5 Conclusões 91

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 unesp 12 13 14 15 16 17 18

CAPÍTULO 6 - ÂNGULO DE INCIDÊNCIA 93

6.1 Introdução 93

6.2 Revisão Bibliográfica 94

6.3 Metodologia Experimental 97
6.3.1 Anemometria de Filme Quente 97
6.3.2 Visualização do Escoamento 99

6.4 Resultados e Discussão 100

6.5 Conclusões 107

CAPÍTULO 7 - RAZÃO DE BLOQUEIO 109

7.1 Introdução 109

7.2 Revisão Bibliográfica 111

7.3 Metodologia Experimental 114

7.4 Resultados e Discussão 116

7.5 Conclusões 123

CAPÍTULO 8 - RAZÃO DE ASPECTO 125

8.1 Introdução 125

8.2 Revisão Bibliográfica 127

8.3 Metodologia Experimental 129
8.3.1 Anemometria de Filme Quente 129
8.3.2 Visualização do Escoamento 130

8.4 Resultados e Discussão 131

8.5 Conclusões 140

CAPÍTULO 9 - TRIDIMENSIONALIZAÇÃO DA ESTEIRA 141
9.1 Introdução 141
9.2 Revisão Bibliográfica 143
9.3 Metodologia Experimental 151
9.4 Resultados e Discussão 152
9.5 Conclusões 154

CAPÍTULO 10 - CONCLUSÃO 157
10.1 Recomendações para Futuros Trabalhos 158

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 161

APÊNDICE A - MODELOS CILÍNDRICOS 167
A.1 Processo de Fabricação 167
A.2 Aferição Metrológica 168

APÊNDICE B - LEI DE KING 171

APÊNDICE C - ANÁLISE DE INCERTEZAS 175
C.1 Introdução 175
C.2 Análise de Incerteza para Amostragem Simples 177
C.2.1 Fundamentos Matemáticos 178
C.3 Análise de Incerteza das Variáveis de Interesse 180

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Dimensões nominais dos modelos cilíndricos da Série "A". 16
Tabela 2.2 – Dimensões nominais dos modelos cilíndricos da Série "B". 16
Tabela 2.3 – Dimensões nominais dos modelos cilíndricos da Série "C". 17
Tabela 2.4 – Posição y (mm) dos perfis de velocidade experimentais. 22
Tabela 5.1 – Características geométricas dos corpos cilíndricos da Série "A". 63
Tabela 7.1 – Principais características dos corpos cilíndricos utilizados. 114
Tabela A.1 – Dimensões médias dos modelos cilíndricos da Série "A". 168
Tabela A.2 – Dimensões médias dos modelos cilíndricos da Série "B". 169
Tabela A.3 – Dimensões médias dos modelos cilíndricos da Série "C". 169
Tabela C.1 – Correlações para o cálculo da viscosidade cinemática da água. 181
Tabela C.2 – Valores típicos da incerteza da velocidade da corrente livre. 184
Tabela C.3 – Valores típicos da incerteza do número de Reynolds. 185
Tabela C.4 – Valores típicos da incerteza do número de Strouhal. 186
Tabela C.5 – Valores da incerteza do cálculo da razão de aspecto. 186

unesp

Lista de Ilustrações

Figura 1.1 – Regimes de escoamento ao redor de um cilindro circular (Gersten, 1983). 2
Figura 1.2 – Medidor de vazão a efeito vórtice comercial (*Yokogawa Eletric Co.*). 3
Figura 1.3 – Trocador de calor compacto de placas paralelas com aletas retangulares interrompidas dispostas em quincôncio. 4
Figura 1.4 – Escoamento ao redor de um edifício com seção transversal quadrada. 5
Figura 2.1 – Ilustração esquemática do túnel hidrodinâmico vertical. 11
Figura 2.2 – Diferentes configurações de janelas utilizadas na seção de testes do túnel. 14
Figura 2.3 – Modelos cilíndricos agrupados em três séries distintas. 15
Figura 2.4 – Esquema representativo dos modelos cilíndricos da Série "A". 16
Figura 2.5 – Esquema representativo dos modelos cilíndricos da Série "B". 16
Figura 2.6 – Dispositivo posicionador da sonda de filme quente. 21
Figura 2.7 – Montagem experimental utilizada na determinação dos perfis de velocidade. 22
Figura 2.8 – Perfis de velocidade ao longo da seção de testes do túnel hidrodinâmico. 23
Figura 2.9 – Intensidade turbulenta residual na linha de centro da seção de testes. 25
Figura 3.1 – Diferentes tipos de sondas anemométricas de fio e de filme quente. 28
Figura 3.2 – Elementos básicos de um anemômetro de temperatura constante. 29
Figura 3.3 – Anemômetro de temperatura constante *Dantec StreamLine 90N10*. 30
Figura 3.4 – Dispositivo para a calibração de sondas de filme quente. 32
Figura 3.5 – Perfil de velocidade do jato medido a um diâmetro do bocal. 34
Figura 3.6 – Curva de calibração típica de uma sonda de filme quente *Dantec 55R11*. 36
Figura 3.7 – Interface gráfica da ferramenta de calibração de sondas do programa *StreamWare*. 37
Figura 3.8 – Perda da calibração com o decorrer do ensaio. 38
Figura 3.9 – Sinal tipicamente obtido durante a determinação dos perfis de velocidade média da corrente livre. 39
Figura 3.10 – Sinal tipicamente obtido durante a determinação da intensidade turbulenta residual da corrente livre. 40
Figura 3.11 – Amostra de um sinal tipicamente obtido durante a determinação da freqüência de Strouhal, com sua respectiva distribuição de potência espectral. 41

unesp

Figura 4.1 – Dispositivo de injeção de corantes líquidos. 45
Figura 4.2 – Ilustração esquemática do arranjo experimental para a determinação da influência da agulha de injeção de corantes sobre a corrente livre no interior da seção de testes. 46
Figura 4.3 – Perfis experimentais de velocidade a jusante de uma agulha de injeção 47
Figura 4.4 – Visualização das camadas cisalhantes do escoamento ao redor de um cilindro circular, pela técnica de injeção de corantes. 48
Figura 4.5 – Visualização de escoamentos por bolhas de hidrogênio 49
Figura 4.6 – Montagem experimental para a realização de ensaios de visualização de escoamentos por bolhas de hidrogênio. 50
Figura 4.7 – Exemplos de visualização de escoamentos com bolhas de hidrogênio. 52
Figura 4.8 – Visualização de um jato livre utilizando partículas sólidas. 53
Figura 5.1 – Cilindro retangular imerso perpendicularmente no escoamento. 55
Figura 5.2 – Montagem dos modelos cilíndricos no interior da seção de testes (fora de escala). 63
Figura 5.3 – Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro quadrado e respectivos espectros de freqüência (escalas lineares arbitrárias). 65
Figura 5.4 – Curva de Strouhal de um cilindro quadrado ($\phi = 1$). 66
Figura 5.5 – Regimes do escoamento até o início da emissão de vórtices. 67
Figura 5.6 – Regimes da esteira de von Kármán de um cilindro quadrado. 68
Figura 5.7 – Curva de Strouhal de um cilindro retangular com $\phi = 2$ 69
Figura 5.8 – Comparação entre os resultados obtidos com a anemometria de fio quente, com o túnel operando em modo contínuo ou *blow-down*. 70
Figura 5.9 – Espectros de freqüência na faixa de descontinuidade, obtidos em modo *blow-down*. 71
Figura 5.10 – Visualização da esteira de vórtices a jusante de um cilindro retangular com $\phi = 2$. 71
Figura 5.11 – Descolamento da camada limite sobre um cilindro retangular com $\phi = 2$. 72
Figura 5.12 – Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro com $\phi = 3$ e respectivos espectros de freqüência (escalas lineares arbitrárias). 73
Figura 5.13 – Curva de Strouhal de um cilindro retangular com $\phi = 3$ 74
Figura 5.14 – Esteira de vórtices de um cilindro retangular com $\phi = 3$. 75

BCpIS - FEIS - UNESP

Figura 5.15 – Diferentes padrões das camadas cisalhantes sobre as superfícies laterais de um cilindro retangular com $\phi = 3$.....76
Figura 5.16 – Curva de Strouhal de um cilindro retangular com $\phi = 4$. 77
Figura 5.17 – Regimes da esteira de um cilindro retangular com $\phi = 4$. 77
Figura 5.18 – Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro com $\phi = 6$ e respectivos espectros de freqüência (escalas lineares arbitrárias).....78
Figura 5.19 – Espectro de freqüência do sinal adquirido na esteira de um cilindro retangular com $\phi = 6$, para $Re = 900$. 79
Figura 5.20 – Curva de Strouhal de um cilindro retangular com $\phi = 6$. 80
Figura 5.21 – Regimes da esteira de um cilindro retangular com $\phi = 6$. 81
Figura 5.22 – Curva de Strouhal de um cilindro retangular com $\phi = 8$. 82
Figura 5.23 – Configurações da esteira de um cilindro retangular com $\phi = 8$. 83
Figura 5.24 – Curva de Strouhal de um cilindro retangular com $\phi = 12$. 84
Figura 5.25 – Regimes da esteira a jusante de um cilindro retangular com $\phi = 12$. 84
Figura 5.26 – Curva de Strouhal de um cilindro retangular com $\phi = 16$. 85
Figura 5.27 – Configurações da esteira a jusante de um cilindro retangular com $\phi = 16$. 86
Figura 5.28 – Número de Strouhal de cilindros retangulares com $\phi = 1 - 16$ ($Re = 200$). 87
Figura 5.29 – Número de Strouhal de cilindros retangulares com $\phi = 1 - 16$ ($Re = 250$). 88
Figura 5.30 – Número de Strouhal de cilindros retangulares com $\phi = 1 - 16$ ($Re = 300$). 88
Figura 5.31 – Padrões do escoamento sobre as superfícies laterais de cilindros retangulares com $3 \leq \phi \leq 16$ para $Re = 200$ e 400. 90
Figura 5.32 – Número de Strouhal de cilindros retangulares com $\phi = 1 - 16$ ($Re = 400$). 91
Figura 6.1 – Cilindro quadrado imerso perpendicularmente na corrente livre uniforme, com um ângulo de incidência θ. 94
Figura 6.2 – Montagem experimental para os ensaios de anemometria. 98
Figura 6.3 – Curvas de Strouhal *versus* ângulo de ataque, para números de Reynolds entre 10^2 e 10^3. 101
Figura 6.4 – Comparação entre as curvas de Strouhal de um cilindro quadrado com ângulo de ataque entre 0° e 45°, para números de Reynolds entre 100 e 1000. 102
Figura 6.5 – Comparação com resultados da literatura. 103

Figura 6.6 – Ângulo de incidência correspondente ao valor máximo local na curva de Strouhal. 103
Figura 6.7 – Descolamento e recolamento da camada cisalhante sobre as superfícies de um cilindro quadrado com $0° \leq \theta \leq 45°$ e $Re = 500$. 104
Figura 6.8 – Identificação das arestas de um cilindro quadrado..... 105
Figura 6.9 – Curvas de Strouhal de um cilindro quadrado com ângulo de ataque entre 0° e 45°..... 106
Figura 6.10 – Comparação entre as curvas de Strouhal de um cilindro quadrado com ângulo de ataque entre 0° e 45°. 107
Figura 7.1 – Cilindro quadrado imerso perpendicularmente num escoamento confinado..... 109
Figura 7.2 – Montagem dos cilindros quadrados no interior da seção de testes..... 115
Figura 7.3 – Curvas de Strouhal *versus* Reynolds para cilindros quadrados com $2,5\% \leq \beta \leq 30\%$. 116
Figura 7.4 – Comparação entre as curvas de Strouhal de um cilindro quadrado com razão de bloqueio entre 2,5 e 30%..... 117
Figura 7.5 – Influência da razão de bloqueio sobre o número de Strouhal de cilindros quadrados, calculado com base na velocidade de aproximação V_∞. 118
Figura 7.6 – Influência da razão de bloqueio sobre o número de Strouhal de cilindros quadrados, calculado com base na velocidade média da seção bloqueada V_b. 118
Figura 7.7 – Comparação dos resultados obtidos com dados de outros autores..... 119
Figura 7.8 – Regimes do escoamento ao redor de um cilindro quadrado com $\beta = 2,5\%$..... 120
Figura 7.9 – Regimes do escoamento ao redor de um cilindro quadrado com $\beta = 10\%$..... 121
Figura 7.10 – Regimes do escoamento ao redor de um cilindro quadrado com $\beta = 15\%$..... 122
Figura 7.11 – Regimes do escoamento ao redor de um cilindro quadrado com $\beta = 20\%$..... 122
Figura 7.12 – Regimes do escoamento ao redor de um cilindro quadrado com $\beta = 25\%$..... 123
Figura 8.1 – Cilindro quadrado imerso perpendicularmente num escoamento uniforme. 125
Figura 8.2 – Cilindro quadrado imerso perpendicularmente no escoamento, com duas placas móveis próximas às extremidades (fora de escala)..... 126
Figura 8.3 – Curvas Strouhal *versus* Reynolds de cilindros quadrados com diferentes razões de aspecto. 131
Figura 8.4 – Comparação entre as curvas Strouhal *versus* Reynolds de cilindros quadrados com diferentes razões de aspecto. 132

Figura 8.5 – Influência da razão de aspecto sobre o número de Strouhal, para diferentes números de Reynolds. 133
Figura 8.6 – Esteira de vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 40$. 134
Figura 8.7 – Esteira de vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 30$. 134
Figura 8.8 – Padrão de emissão dos vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 30$. 135
Figura 8.9 – Padrão de emissão dos vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 20$. 136
Figura 8.10 – Esteira de vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 20$. 136
Figura 8.11 – Esteira de vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 15$. 137
Figura 8.12 – Esteira de vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 10$. 137
Figura 8.13 – Esteira de vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 5$. 138
Figura 8.14 – Padrão de emissão dos vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 15$. 138
Figura 8.15 – Padrão de emissão dos vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 10$. 139
Figura 8.16 – Padrão de emissão dos vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 5$. 139
Figura 9.1 – Cilindro quadrado imerso perpendicularmente num escoamento uniforme. 141
Figura 9.2 – Corpo cilíndrico de base quadrada com *end plates* (fora de escala) 151
Figura 9.3 – Padrões tridimensionais de emissão de vórtices de um cilindro quadrado ($Re = 100$, $\alpha = 20$ e $D_{ep}/B = 13$). 153
Figura B.1 – Transferência de calor em uma seção elementar de fio quente. 172

Lista de Símbolos

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]
C	comprimento ou envergadura do cilindro [m]
d	dimensão característica do cilindro [m]
D	dimensão transversal projetada do cilindro [m]
D_{cp}	diâmetro do *end plate* [m]
f	freqüência de emissão dos vórtices de um lado do cilindro [s^{-1}]
F	freqüência de aquisição ou taxa de amostragem dos dados [s^{-1}]
I_t	intensidade turbulenta
L	comprimento útil do cilindro (distância entre os *end plates*) [m]
$\dot{m}$	vazão mássica do escoamento [$kg.s^{-1}$]
M	massa de água coletada [kg]
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	tempo de coleta de água [s]
T	temperatura do fluido [°C]
V_∞	velocidade da corrente livre [$m.s^{-1}$]
X_i	variável genérica, medida pelo sistema de medição
δ	incerteza associada à medição de uma variável
μ	viscosidade dinâmica ou absoluta do fluido [$kg.m^{-1}.s^{-1}$]
μ_o	viscosidade da água a 273 K [$kg.m^{-1}.s^{-1}$]
ν	viscosidade cinemática do fluido [$m^2.s^{-1}$]
θ	ângulo de ataque ou de incidência do escoamento sobre o cilindro [°]
ρ	densidade ou massa específica do fluido [$kg.m^{-3}$]
σ	desvio padrão da população

unesp

Números Adimensionais

Re	número de Reynolds
St	número de Strouhal
α	razão de aspecto do cilindro
β	razão de bloqueio sólido ou geométrico do escoamento
ϕ	razão de forma do cilindro

Índices

A	relativo à dimensão A da altura da seção transversal retangular do cilindro
b	relativo à velocidade da seção bloqueada do escoamento
D	relativo à dimensão projetada da seção transversal retangular do cilindro
$'$	relativo à velocidade turbulenta
$//$	relativo à emissão paralela de vórtices
θ	relativo à emissão oblíqua de vórtices

Operadores Matemáticos

∂	derivada parcial
$\bar{}$	média temporal

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 unesp 12 13 14 15 16 17 18

Resumo

O presente trabalho propõe 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. Os ensaios foram conduzidos num túnel hidrodinâmico vertical, operado pela ação da gravidade. A freqüência de emissão dos vórtices, necessária ao cálculo do número de Strouhal, foi determinada a partir da obtenção do sinal de velocidades, adquirido por anemometria de filme quente, num ponto previamente estabelecido da esteira turbilhonária. Técnicas de visualização de escoamentos, também, foram empregadas em diferentes circunstâncias, com três objetivos fundamentais: como ferramenta de análise qualitativa, na identificação de padrões de escoamento; como mecanismo de apoio à realização de medidas experimentais, para auxiliar no correto posicionamento de sondas anemométricas; e, finalmente, como instrumento complementar de análise, para facilitar a interpretação de resultados quantitativos. Diversos parâmetros que interferem sobre a dinâmica do escoamento foram analisados, quais sejam: a razão de forma dos cilindros, o ângulo de incidência, a razão de bloqueio e a razão de aspecto. Em todos estes casos, o escoamento foi tratado como se fosse estritamente bidimensional. Ensaios de visualização, entretanto, mostraram que os rolos de vórtices podem sofrer rápida tridimensionalização na esteira turbilhonária, gerando padrões distintos de emissão, passíveis inclusive de serem controlados.

unesp

Abstract

This work presents an experimental investigation of the vortex shedding phenomenon from cylinders with square and rectangular cross section, placed normally to the free stream, for Reynolds numbers up to 10^3. The tests have been carried out in a vertical water tunnel, driven by gravity. The vortex shedding frequency, necessary to the Strouhal number calculation, has been found from velocity measurements in the wake, obtained with hot film anemometry. Flow visualization techniques have also been employed in different ways with three main objectives: as a tool for qualitative analysis of different flow patterns; as an assistance to the hot film probe positioning, and finally, as a complement to the quantitative analysis, helping with the hot film anemometry data interpretation. Several parameters that can affect the wake dynamics have been studied, namely: the rectangular cylinder side ratio, the incidence angle, the blockage ratio and the aspect ratio. In this cases, the flow has been considered strictly two-dimensional. However, flow visualization tests have shown the wake may present different three-dimensional patterns, that can be controlled.

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 unesp 12 13 14 15 16 17 18

Capítulo 1

Introdução

1.1 Vórtices na Esteira de Cilindros

Pela sua ampla aplicação em diversos campos da engenharia, o escoamento ao redor de cilindros tem sido objeto de inúmeras investigações de natureza numérica e experimental, constituindo um tema de pesquisa dos mais relevantes e atuais. Um grande número de artigos sobre o assunto tem sido publicado, desde o trabalho pioneiro de Strouhal, em 1878, como mostra a revisão apresentada por Williamson (1996b). Não obstante, vários aspectos relativos ao fenômeno de geração e desprendimento de vórtices na esteira de cilindros 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. Em escoamentos deste tipo, 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 a 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 se enrolar em torno de si mesmas, formando vórtices discretos, cujo comportamento dinâmico dá origem a diferentes padrões de escoamento.

A Figura 1.1 apresenta os principais regimes de escoamento que podem ser encontrados a jusante de um cilindro com seção transversal circular, em função do número de Reynolds,

unesp

parâmetro adimensional que governa este fenômeno, definido como a relação entre as forças de inércia e de viscosidade presentes no fluido. Para números de Reynolds inferiores à unidade, verifica-se que o escoamento contorna perfeitamente o corpo sólido, sem descolamento apreciável da camada limite, produzindo uma esteira simétrica e independente do tempo, tal como ilustra a Figura 1.1(a). À medida em que o número de Reynolds aumenta, o escoamento se separa do cilindro no chamado ponto de descolamento, formando um par de vórtices simétricos, conhecidos como bolhas de recirculação, que permanecem estacionários e em movimento rotativo atrás do corpo sólido, como mostra a Figura 1.1(b). 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 1.1(c). Estas instabilidades são amplificadas com o aumento do número de Reynolds, resultando na formação da chamada esteira de von Kárman, caracterizada pela emissão de vórtices alternados, que se desprendem de ambos os lados do corpo, como sugere a Figura 1.1(d). Para números de Reynolds ainda maiores, outras instabilidades começam a surgir, e os efeitos turbulentos e de tridimensionalização da esteira tornam-se cada vez mais pronunciados.

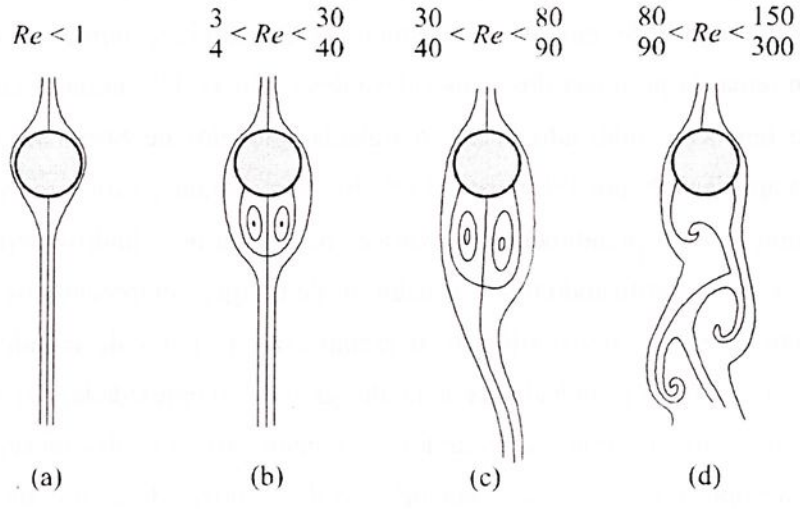


Figura 1.1 – Regimes de escoamento ao redor de um cilindro circular (Gersten, 1983).

Embora estes resultados retratem o escoamento em torno de cilindros de base 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 diferentes finalidades.

No regime de emissão alternada de vórtices (Figura 1.1d), a freqüência de desprendimento dos turbilhões f relaciona-se com a velocidade média da corrente livre V_∞ e com a dimensão característica d do corpo sólido através do número de Strouhal, definido pela relação

$$St = \frac{f\,d}{V_\infty} \tag{1.1}$$

Para alguns tipos de obstáculos sólidos, este parâmetro adimensional apresenta-se bastante estável, dentro de uma larga faixa de operação, podendo ser considerado praticamente constante na maioria das aplicações práticas. Sobre este padrão de comportamento, apoia-se o princípio de operação dos medidores de vazão a efeito vórtice (*vortex meters*). Neste caso, o cilindro é instrumentado com transdutores capazes de captar a freqüência das oscilações de pequena amplitude a que se encontra submetido, decorrentes da natureza cíclica das forças aerodinâmicas que atuam sobre o obstáculo. Assim, uma vez conhecido o número de Strouhal característico do escoamento em torno de uma dada geometria e a freqüência de emissão dos vórtices, a velocidade média do fluxo livre pode ser facilmente determinada, com o auxílio da Eq.(1.1). Um equipamento deste tipo é ilustrado na Figura 1.2.

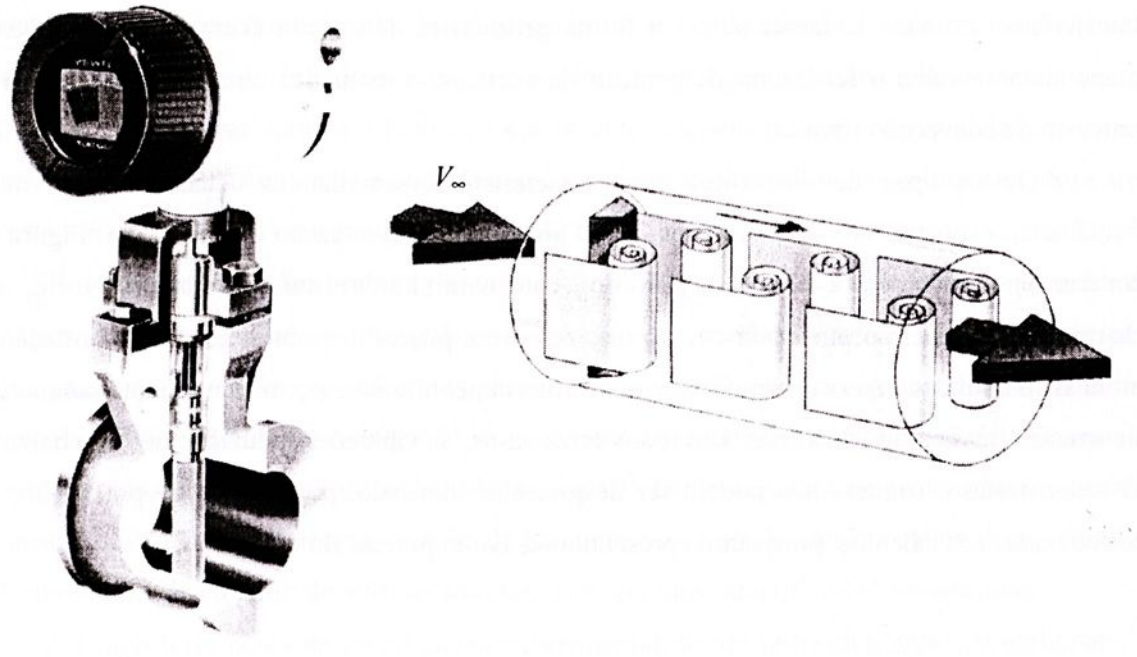
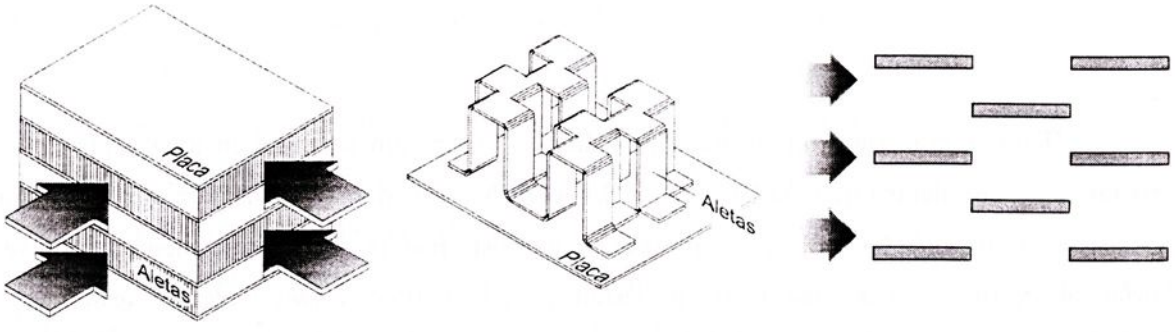


Figura 1.2 – Medidor de vazão a efeito vórtice comercial (*Yokogawa Eletric Co.*).

A Figura 1.3 apresenta um outro exemplo de particular interesse em aplicações industriais, onde o escoamento pode ser considerado, pelo menos como primeira aproximação, como ocorrendo no meio de um feixe de cilindros. Trata-se de um trocador de calor compacto com aletas retangulares interrompidas e dispostas em quincôncio.



(a) vista de conjunto (b) detalhe das aletas (c) corte horizontal

Figura 1.3 – Trocador de calor compacto de placas paralelas com aletas retangulares interrompidas dispostas em quincôncio.

As aletas deste trocador de calor, além de atuarem mecanicamente como elementos de sustentação das placas, se bem dimensionadas, podem favorecer sobremaneira o processo de transferência térmica. Evidentemente, a forma geométrica destes obstáculos exerce influência preponderante sobre o fenômeno de geração de vórtices, responsável direto pela eficiência do processo de convecção térmica.

Outros tipos de obstáculos com características semelhantes acham-se, com muita freqüência, expostos aos escoamentos ditos ambientais. A situação ilustrada na Figura 1.4 poderia representar, por exemplo, o ação do vento natural sobre um edifício, uma torre, uma chaminé ou, até mesmo, um obelisco. Do mesmo modo, pilares de pontes, grades de proteção de turbinas hidráulicas, *risers* e plataformas petrolíferas encontram-se permanentemente submetidas a correntes fluviais ou marítimas. Em todos estes casos, as vibrações induzidas pelo escoamento ao redor destas estruturas não podem ser desprezadas, devendo, por medida de precaução, ser consideradas nos cálculos, porquanto apresentam-se como potencialmente danosas.

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 unesp 12 13 14 15 16 17 18

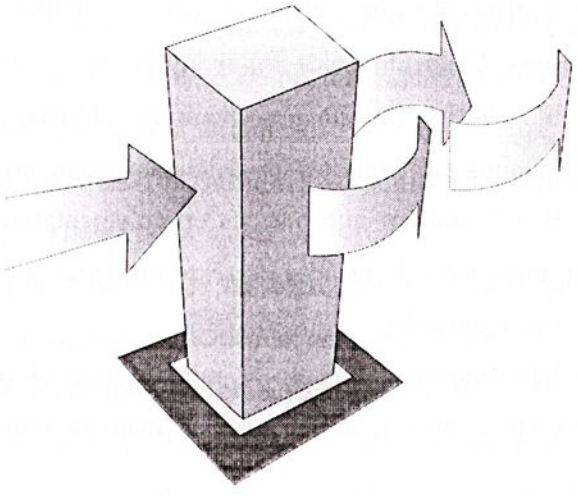


Figura 1.4 – Escoamento ao redor de um edifício com seção transversal quadrada.

1.2 Escopo e Estrutura do Trabalho

A literatura referente ao escoamento em torno de corpos cilíndricos é extremamente rica, em número e conteúdo. A grande maioria das investigações conduzidas nesta área, entretanto, se concentra no estudo do escoamento ao redor de cilindros com seção transversal circular, enquanto que cilindros com outras formas de geratriz são relativamente pouco estudados. Além disso, dada à dificuldade em se obter escoamentos de boa qualidade a baixos números de Reynolds em túneis aerodinâmicos, a maioria dos trabalhos experimentais nesta área investigam escoamentos com Reynolds acima de 10^3.

O presente trabalho procura dar uma contribuição ao estudo do escoamento ao redor de cilindros de base quadrada e retangular posicionados perpendicularmente ao fluxo principal, investigando a influência que diferentes parâmetros exercem sobre o comportamento da curva Strouhal *vs* Reynolds. Esta investigação se concentra, basicamente, nos regimes de escoamento com moderados números de Reynolds, inferiores a 10^3. Estão incluídas nesta abordagem a razão de forma, o ângulo de incidência, a razão de bloqueio e a razão de aspecto. Além disso, padrões tridimensionais de emissão de vórtices são, também, gerados, identificados e analisados.

Como ferramenta de investigação experimental, foram utilizadas, fundamentalmente, a anemometria de filme quente, associada à visualização de escoamentos que, em diversas oportunidades, auxiliou sobremaneira na interpretação de resultados quantitativos.

O conjunto de informações que constitui o corpo principal deste trabalho encontra-se organizado em 10 capítulos. Cada um deles foi redigido de maneira a formar uma unidade completa – contendo introdução, revisão da literatura, desenvolvimento e conclusão –, abordando os assuntos tratados com relativa profundidade, sem no entanto exauri-los. Além disso, os Apêndices A, B e C contêm informações complementares, diretamente relacionadas com o tema da pesquisa, que foram destacadas do texto principal com o único objetivo evitar a interrupção desnecessária da exposição.

Neste capítulo introdutório, o assunto, a motivação e os objetivos que nortearam a condução deste trabalho são expostos, assim como a maneira com que este documento foi estruturado.

O Capítulo 2 descreve o túnel hidrodinâmico vertical onde foram conduzidas as diversas campanhas de ensaios experimentais. Além se seus aspectos construtivos e operacionais, são abordados, também, aspectos relativos às características hidrodinâmicas do equipamento.

Os Capítulos 3 e 4, por sua vez, tratam das metodologias experimentais empregadas durante a realização deste trabalho. O Capítulo 3 aborda, especificamente, a anemometria de fio quente, técnica experimental utilizada na determinação da freqüência de emissão de vórtices característica de cada modelo 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 no âmbito deste trabalho, com o emprego desta técnica.

O Capítulo 4 é consagrado à visualização de escoamentos, que teve um importante papel na identificação de padrões de escoamento e na interpretação de dados anemométricos. Após uma breve introdução sobre as vantagens da visualização em meio líquido, são descritas a três técnicas de visualização utilizadas no âmbito do presente trabalho, a saber: injeção de corantes líquidos, bolhas de hidrogênio e partículas sólidas.

Os Capítulos 5 a 9 formam o núcleo central desta dissertação, contendo a totalidade dos resultados experimentais, relativos ao escoamento ao redor dos modelos estudados. O Capítulo 5 trata da influência da forma geométrica de cilindros retangulares sobre o fenômeno de emissão de vórtices. São descritos de maneira detalhada os procedimentos experimentais específicos empregados durante a condução dos ensaios de anemometria de filme quente e de visualização de escoamentos. Os resultados obtidos são, então, apresentados, discutidos e comparados com dados de outros autores. Na presente investigação, variou-se o número de Reynolds entre 50 e

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 unesp 12 13 14 15 16 17 18

10^3, para razões de forma compreendidas entre 1 e 16. Medições da velocidade na esteira dos cilindros, com o auxílio da anemometria de fio quente, permitiram a determinação da freqüência de emissão dos vórtices. Utilizando-se a visualização de escoamentos, foram obtidas imagens da esteira de vórtices a jusante dos cilindros, bem como das camadas cisalhantes que se desenvolvem sobre suas superfícies.

O Capítulo 6 expõe a influência do ângulo de incidência da corrente livre sobre um corpo cilíndrico de base quadrada, posicionado perpendicularmente ao escoamento principal. Variando-se o ângulo de incidência do escoamento entre 0° e 45°, pôde-se observar uma significativa variação da freqüência de emissão dos vórtices, que pode ser explicada com base nos padrões de descolamento e recolamento da camada limite sobre o cilindro, observados com o auxílio da visualização de escoamentos.

No Capítulo 7 analisa-se o escoamento ao redor de modelos cilíndricos de base quadrada, em situações onde a presença das paredes da seção de testes não pode ser negligenciada. Para isto, corpos sólidos com diferentes dimensões foram utilizados, permitindo variar a razão de bloqueio entre 2,5% e 30%. Neste caso, além das curvas de Strouhal, são apresentadas, também, imagens do escoamento para diferentes razões de bloqueio e diversos regimes de escoamento.

O Capítulo 8 trata da influência do comprimento relativo do corpo cilíndrico sobre o escoamento ao redor de cilindros de base quadrada. O comprimento útil do modelo utilizado foi variado com o uso de duas placas móveis, instaladas ao longo de sua envergadura. As curvas de Strouhal obtidas revelam uma forte influência deste fator sobre a emissão de vórtices, o que foi confirmado pelas imagens da esteira turbilhonar produzida.

O Capítulo 9 trata da tridimensionalização da esteira de um cilindro de base quadrada. Para as mesmas condições de ensaio, observou-se a formação de diferentes padrões de emissão tridimensional de vórtices na esteira do cilindro. Estes padrões tridimensionais, observados com o auxílio da técnica de visualização de escoamentos por bolhas de hidrogênio, podem influenciar na dinâmica de emissão de vórtices e, consequentemente, na freqüência de Strouhal.

Finalmente, o Capítulo 10 condensa as principais conclusões e observações expressas nos capítulos precedentes, e apresenta, ainda, algumas sugestões e recomendações para futuros trabalhos.

Em seguida às 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. O Apêndice A contém a descrição do processo de

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 12 13 14 15 16 17 18

confecção dos modelos cilíndricos utilizados, bem como sua aferição metrológica. O Apêndice B apresenta a dedução da Lei de King, utilizada para correlacionar os dados obtidos nos ensaios de calibração da sonda de filme quente empregada. 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.

unesp

Capítulo 2

Túnel Hidrodinâmico Vertical

2.1 Introdução

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 partículas sólidas dispersas, filetes de tinta injetados no escoamento ou pequenas bolhas gasosas em suspensão na corrente livre.

A utilização de túneis hidrodinâmicos deve-se, também, 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 (Lindquist *et al.*, 1999).

Os túneis hidrodinâmicos também são freqüentemente empregados para a realização de ensaios de visualização, conduzidos exclusivamente para ilustrar ou tornar evidentes aspectos específicos de escoamentos estudados quantitativamente em túneis aerodinâmicos ou simulados numericamente. Elle & Jones (1961) e Carcaillet *et al.* (1986) realizaram estudos numéricos e experimentais do escoamento do redor de asas em delta. Ambos os trabalhos apresentam visualizações obtidas em túnel hidrodinâmico, com o objetivo de ilustrar o escoamento em

unesp

estudo. O mesmo expediente foi utilizado por Laurien & Kleiser (1989), que investigaram numericamente a transição de uma camada limite.

Escoamentos uniformes com baixa intensidade turbulenta e pequenos números de Reynolds não podem ser facilmente obtidos na maioria dos túneis aerodinâmicos. Nesses casos, também, 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).

Outros tipos de escoamento também são estudados preferencialmente em túneis hidrodinâmicos, como é o caso de escoamentos com densidade estratificada, 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 impraticáveis (Odell & Kovasznay, 1971). Em túneis hidrodinâmicos, ao contrário, níveis razoáveis de estratificação e de velocidade podem ser obtidos, com baixa difusibilidade entre as camadas estratificadas.

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

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.

No presente trabalho, um túnel hidrodinâmico vertical foi utilizado para investigar experimentalmente o escoamento ao redor de cilindros de base quadrada e retangular. Os ensaios conduzidos nesta instalação, empregando técnicas de visualização de escoamentos e de anemometria de fio quente, permitiram a obtenção dos resultados qualitativos e quantitativos apresentados no presente trabalho.

unesp

2.2 Descrição da Instalação Experimental

O projeto do túnel hidrodinâmico utilizado no presente trabalho baseou-se numa instalação similar da *USAF/WAL* (*United States Air Force / Wright Aeronautical Laboratories*) pertencente à *Wright-Patterson Air Force Base* em Ohio, Estados Unidos. Este túnel, por sua vez, foi concebido segundo às instalações do TH1 existente no *Laboratoire de Visualisation Hydrodinamique* do *ONERA* (*Office National d'Etudes et Recherches Aéroespatiales*), localizado em Chantillon, França. O esquema da instalação pode ser visto na Figura 2.1.

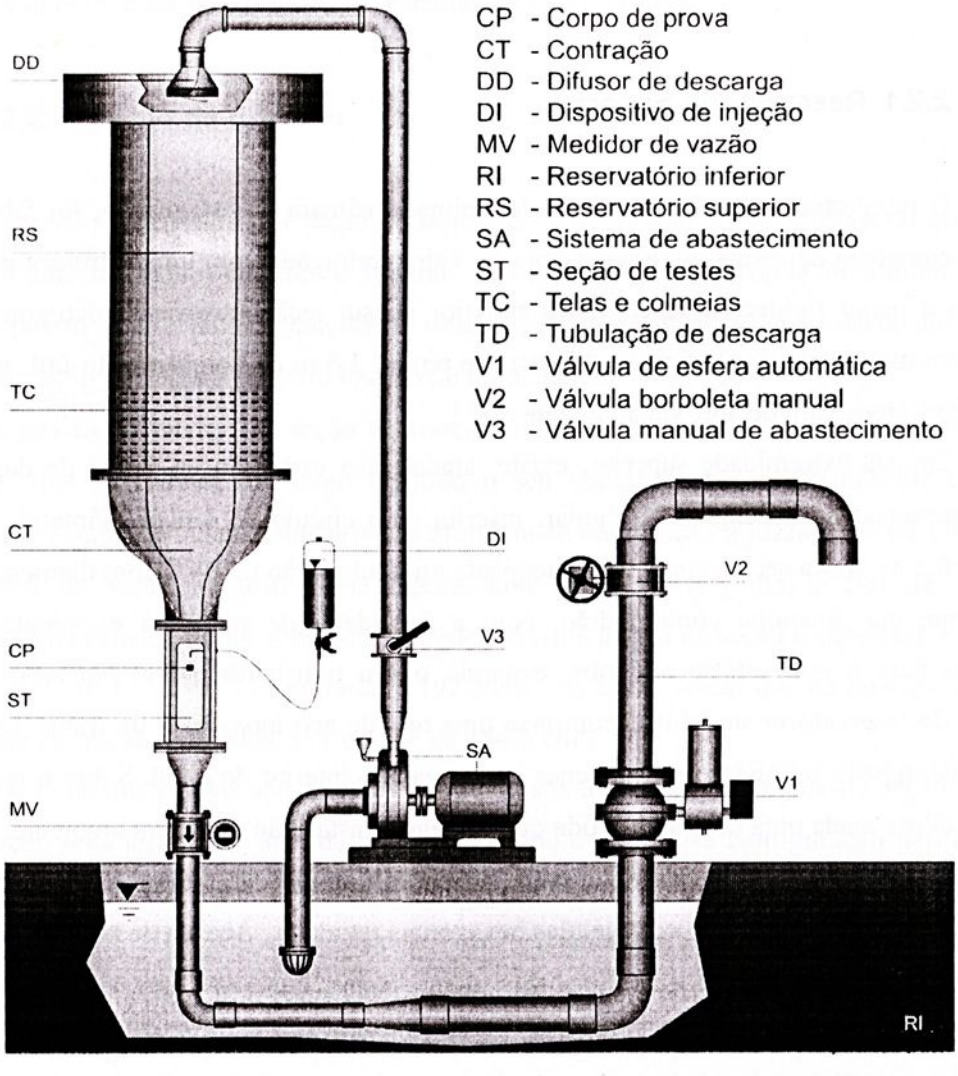


Figura 2.1 – Ilustração esquemática do túnel hidrodinâmico vertical.

Em linhas gerais, o túnel é composto de um reservatório superior (RS) munido de telas e colmeias (TC), uma contração (CT) e uma seção de testes (ST), dispostos em série. Logo após, uma válvula controladora de vazão do tipo esfera (V1) e uma válvula do tipo borboleta (V2) permitem o controle da vazão do escoamento no interior da seção de testes. A tubulação de descarga (TD) conduz a água utilizada nos ensaios novamente para o reservatório inferior (RI). Completando a instalação, o sistema de abastecimento (SA) é composto por uma bomba centrífuga, com uma válvula de retenção instalada na sucção, uma válvula do tipo borboleta (V3) e a tubulação, que em sua extremidade superior, dispõe de um difusor de descarga (DD).

A seguir, são apresentados detalhadamente os principais componentes do túnel hidrodinâmico vertical.

2.2.1 Reservatório Superior

O reservatório superior, também denominado câmara de estagnação, foi fabricado em material composto de resina poliéster e fibra de vidro, reforçado com uma estrutura de aço, que lhe confere maior rigidez. O reservatório superior possui seção transversal octogonal regular, inscrita em um círculo de 0,65 m de diâmetro, e possui 1,5 m de comprimento útil, perfazendo um volume interno útil de aproximadamente 500 l.

Em sua extremidade superior, existe, ainda, uma expansão na forma de degrau, com seção transversal hexadecagonal irregular, inscrita num círculo de 1m de diâmetro, com uma altura de 0,2 m. Nesta seção, encontra-se acoplada uma tubulação de PVC com diâmetro nominal de 100 mm que funciona como ladrão, com a finalidade de escoar o excedente de água bombeada para o reservatório superior, evitando o seu transbordamento. No topo do corpo principal do reservatório superior encontra-se uma tela de aço inoxidável de trama fina, com o objetivo de impedir o ingresso de pequenas impurezas no interior do túnel. Sobre o reservatório superior, existe ainda uma tampa bipartida que protege a instalação da poeira ambiente.

No interior do reservatório superior, próximo à entrada da contração, localiza-se uma camada de colmeia de alumínio com células hexagonais regulares. Abaixo da colmeia existe uma tela de aço inoxidável, com fios dispostos numa trama quadrada regular. Este conjunto, envolvido por uma cinta de aço inoxidável, contribui para diminuir o nível de turbulência e uniformizar o perfil de velocidade na entrada da contração, além de impedir o movimento espiral do fluido.

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 unesp 12 13 14 15 16 17 18

2.2.2 Contração

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

O perfil da contração foi projetado a partir da solução da equação de Stokes-Beltrami, segundo o método proposto por Cohen & Ritchie (1962). Mais detalhes sobre o projeto da seção de contração podem ser encontrados no trabalho de Vieira (1997).

2.2.3 Seção de 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.

Cada canto interno da seção de testes é ocupado por um prisma de seção transversal triangular, que se estende ao longo de todo o seu comprimento, conferindo-lhe o formato quadrado de cantos cortados. Estes prismas afunilam-se em direção à jusante, de tal forma que o volume útil da seção de testes seja ligeiramente cônico divergente, a fim de atenuar o crescimento da camada limite sobre suas paredes. Assim, a área da seção transversal da seção de testes varia entre 177,2 cm^2, na entrada, e 192,5 cm^2, na saída, sendo que na posição em que os modelos de ensaio são afixados, seu valor é de 184,6 cm^2.

Suas quatro janelas são fixadas por parafusos à estrutura metálica da seção de testes, com vedação feita através de anel de borracha do tipo *o-ring*. Esta configuração permite a fácil substituição das janelas, por outras com características mais adequadas à realização de um determinado ensaio. Em geral, as janelas são confeccionadas em acrílico transparente, de forma a permitir a visualização do escoamento no interior da seção de testes. Através de orifícios existentes em algumas janelas, pode-se introduzir agulhas para a injeção de corantes no escoamento, assim como fios metálicos para a geração de bolhas de hidrogênio, sondas de fio quente, e outros dispositivos de medição.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 12 13 14 15 16 17 18

No presente trabalho foram utilizados cinco diferentes tipos de janelas, especialmente confeccionadas para a realização dos ensaios propostos. Todas as janelas foram fabricadas em chapa de acrílico transparente com 12 mm de espessura. A janela anterior possui a configuração mais simples, consistindo numa janela lisa, como ilustrado na Figura 2.2(a).

As janelas laterais podem apresentar duas diferentes configurações. Para os ensaios de anemometria de filme quente, foi utilizada uma janela lateral com 8 orifícios eqüidistantes, cada qual situado numa estação identificada por números de 1 a 8, conforme ilustrado na Figura 2.2(b).

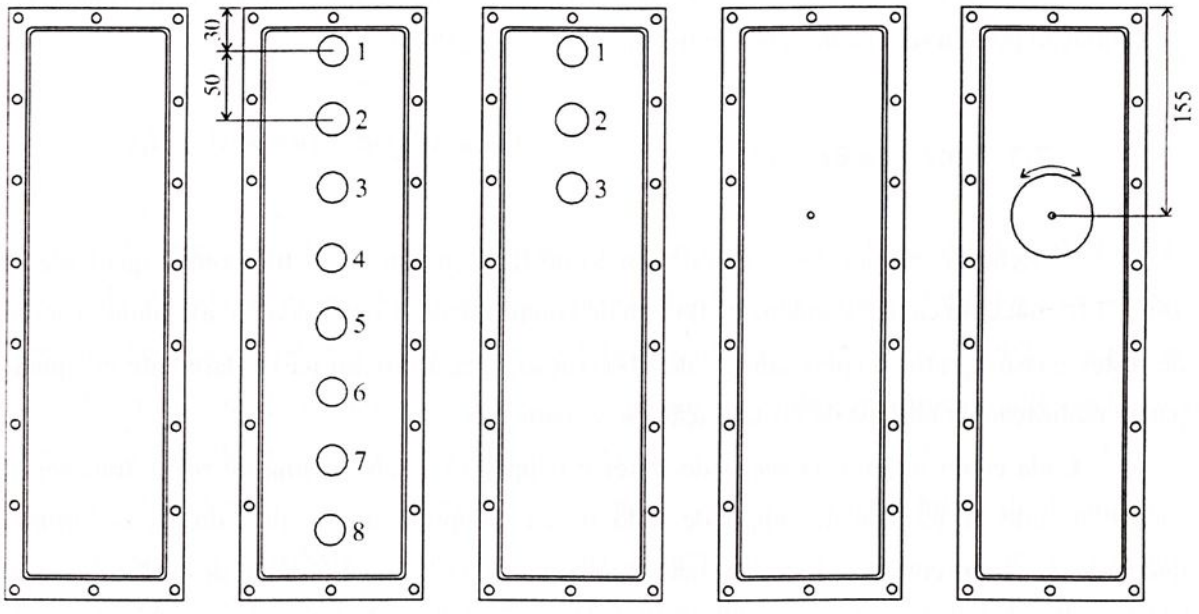


Figura 2.2 – Diferentes configurações de janelas utilizadas na seção de testes do túnel.

Para os ensaios de visualização por bolhas de hidrogênio, foram empregadas duas janelas laterais com 3 orifícios cada, localizados nas estações identificadas por números de 1 a 3, conforme ilustra a Figura 2.2(c). Estes orifícios são vedados por bujões metálicos, que podem ser cegos (apenas para vedação), com um furo passante (para a fixação de um corpo cilíndrico) ou com um retentor de borracha (para a introdução de fios ou sondas no interior da seção de testes).

A janela posterior possui dois modelos diferentes. O modelo mais simples possui apenas um furo com 3 mm de diâmetro, conforme ilustrado na Figura 2.2(d). Esta janela posterior foi utilizada em quase todos os ensaios realizados no âmbito do presente trabalho, exceto durante a investigação dos efeitos do ângulo de ataque sobre o escoamento ao redor de um corpo cilíndrico

de base quadrada. Neste caso, a janela utilizada possui uma escotilha giratória (Figura 2.2e), que permite a rotação do modelo cilíndrico em torno do seu eixo de simetria longitudinal.

2.2.4 Corpos de Prova

Para a realização dos ensaios, foram construídos 21 modelos cilíndricos, agrupados em três séries, identificadas pelas letras "A", "B" e "C", como mostra a Figura 2.3. Todos os modelos foram confeccionados com acabamento superficial polido, arestas vivas, e desvio dimensional e de forma controlados. Detalhes adicionais sobre os processos empregados na confecção dos modelos e na sua aferição metrológica encontram-se no Apêndice A.

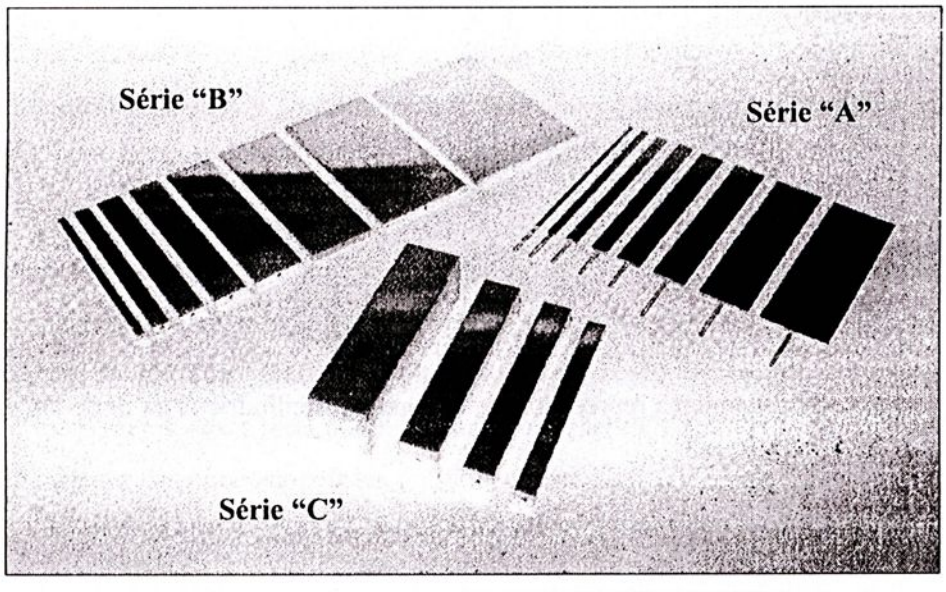


Figura 2.3 – Modelos cilíndricos agrupados em três séries distintas.

Os modelos das Séries "A" e "B" foram fabricados com 8 diferentes razões de forma $\phi = A/B$, onde A é a altura e B a base da seção transversal retangular do modelo. Basicamente, estas duas séries diferem entre si pelas dimensões da seção transversal dos modelos, indicadas nas Tabelas 2.1 e 2.2, e pela forma de fixação à seção de testes, conforme observa-se nas Figuras 2.4 e 2.5. Todos os modelos possuem o mesmo comprimento (ou envergadura) nominal $C = 146{,}5$ mm, que corresponde à distância entre duas paredes opostas da seção de testes do túnel.

Tabela 2.1 – Dimensões nominais dos modelos cilíndricos da Série "A".

Modelo	A (mm)	B (mm)	$\phi = A/B$
A1	3	3	1
A2	6	3	2
A3	9	3	3
A4	12	3	4
A5	18	3	6
A6	24	3	8
A7	36	3	12
A8	48	3	16

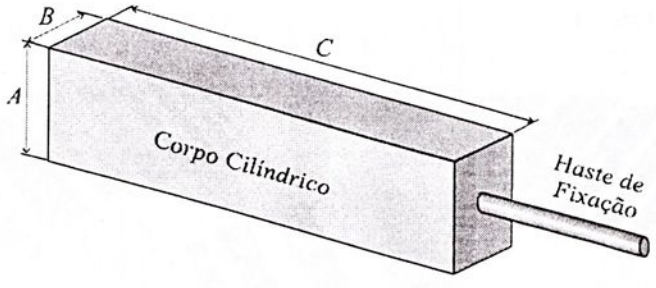


Figura 2.4 – Esquema representativo dos modelos cilíndricos da Série "A".

Tabela 2.2 – Dimensões nominais dos modelos cilíndricos da Série "B".

Modelo	A (mm)	B (mm)	$\phi = A/B$
B1	6	6	1
B2	12	6	2
B3	18	6	3
B4	24	6	4
B5	36	6	6
B6	48	6	8
B7	72	6	12
B8	96	6	16

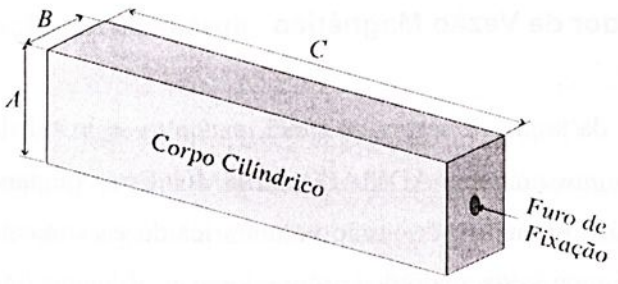


Figura 2.5 – Esquema representativo dos modelos cilíndricos da Série "B".

Os modelos da Série "B", cujas dimensões da seção transversal são maiores do que as dos corpos da Série "A", possuem menor razão de aspecto e maior razão de bloqueio, ainda que esta seja relativamente pequena e não exija a utilização de procedimentos de correção dos resultados obtidos. Estas características dimensionais tornam os modelos da Série "B" bastante apropriados para a realização de ensaios de visualização de fenômenos que ocorrem próximos ao modelo, como, por exemplo, o surgimento e a evolução da bolha de recirculação à jusante do corpo sólido, bem como o descolamento e o recolamento da camada limite sobre suas paredes laterais.

Além dos modelos de ensaio das Séries "A" e "B", utilizados como referência, foram, ainda, confeccionados cinco modelos especiais, que integram a chamada Série "C", caracterizada pela introdução de elevadas razões de bloqueio β na seção de testes. Do ponto de vista construtivo, os modelos desta série assemelham-se àqueles da Série "B" (ver Figura 2.5). Suas principais características dimensionais encontram-se resumidas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Dimensões nominais dos modelos cilíndricos da Série "C".

Modelo	$A = B$ (mm)	$\phi = A/B$	β (%)
C1	12	1	10
C2	19	1	15
C3	25	1	20
C4	32	1	25
C5	38	1	30

2.2.5 Medidor de Vazão Magnético

Logo abaixo da seção de testes do túnel, encontra-se instalado um medidor de vazão magnético marca *Yokogawa* modelo ADMAG AE208MG. Este equipamento, além de permitir a monitorização do valor instantâneo da vazão volumétrica do escoamento que flui no interior da seção de testes, possui uma saída analógica proporcional ao valor medido da vazão, que pode ser utilizado para o controle automático da vazão do túnel.

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

$$V_{\infty} = \frac{Q}{A_{st}} \tag{2.1}$$

onde Q é a vazão volumétrica do escoamento no interior da seção de testes (medida com o auxílio do medidor de vazão eletromagnético), e A_{st} é a área transversal da seção de testes, imediatamente a montante da posição em que o cilindro encontra-se instalado.

2.2.6 Válvulas Controladoras de Vazão

O túnel possui duas válvulas controladoras de vazão instaladas numa posição intermediária da tubulação de descarga, ambas da marca Neles e com diâmetro nominal de 100 mm. A primeira válvula (V1) consiste numa válvula do tipo esfera com acionamento eletropneumático, enquanto que a segunda (V2) é do tipo borboleta com acionamento manual.

O acionamento manual da válvula V2 é realizado através de um volante, que por intermédio de uma redução de 40:1, atua sobre o elemento restritivo da válvula. Esta característica possibilita um ajuste fino da vazão do túnel, indispensável para a realização de determinados tipos de ensaio.

A válvula V1 possui acionamento eletro-pneumático e, em conjunto com um controlador digital, possibilitará o ajuste automático da vazão do túnel, quando este é operado em modo *blow-down*. Neste caso, a válvula V2 pode ser ajustada para permitir a utilização de toda a faixa de operação da válvula V1. No presente trabalho, a válvula V1 foi sempre mantida totalmente aberta.

unesp

2.2.7 Tubulação de Descarga

A tubulação de descarga, composta de tubos e conexões de PVC roscável com 75 mm e 100 mm de diâmetro nominal, conduz a água utilizada nos ensaios para o reservatório inferior. No início da tubulação de descarga, com diâmetro nominal de 75 mm, encontra-se o medidor de vazão magnético. Mais à jusante, há uma expansão de 75 mm para 100 mm, que precede as duas válvulas controladoras de vazão. Em seguida, a tubulação de descarga é prolongada de forma reconduzir a água para o reservatório inferior.

A configuração da tubulação de descarga, na forma de um sifão, foi adotada para permitir a calibração do medidor de vazão eletromagnético. Assim, a água que flui da tubulação de descarga pode ser coletada num recipiente durante um certo período de tempo, fornecendo a vazão mássica do escoamento. Uma vez determinadas a vazão mássica, a densidade da água à temperatura de ensaio e a área transversal da seção de testes, tem-se a velocidade média da corrente livre que incide sobre o corpo ensaiado.

2.2.8 Reservatório Inferior

O reservatório inferior armazena o fluido que escoa da tubulação de descarga do túnel e supre o sistema de abastecimento com água da rede urbana. Construído em alvenaria abaixo do nível do piso, este reservatório possui um volume útil de aproximadamente 3 m^3.

2.2.9 Sistema de Abastecimento

O sistema de abastecimento do túnel é constituído por uma bomba centrífuga (BC), uma válvula controladora de vazão (V3), a tubulação e um difusor de descarga. A bomba centrífuga, marca KSB modelo 80-20, encontra-se apoiada sobre um bloco maciço de concreto assentado sobre uma camada de areia, a fim de atenuar a vibração transmitida para o piso. A tubulação de recalque, confeccionada em tubos de aço com 75mm de diâmetro nominal, abriga a válvula V3 e o difusor de descarga (DD). A válvula controladora de vazão (V3) é do tipo borboleta, com acionamento manual por uma alavanca, permitindo o ajuste da vazão de abastecimento do túnel.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 12 13 14 15 16 17 18

2.3 Operação do Túnel

O túnel pode funcionar segundo dois modos de operação: o modo contínuo e o modo *blow-down*. No modo contínuo, o reservatório superior do túnel é continuamente abastecido durante a condução dos ensaios, com as válvulas V3 e V2 ajustadas de forma a manter o nível de água constante. Já no modo *blow-down*, após o enchimento do reservatório superior, o sistema de abastecimento é desligado e aguarda-se até que a água armazenada se estagne. Após este período de repouso, dá-se início ao ensaio, que transcorre a medida em que o reservatório superior é esvaziado.

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

2.4 Características Hidrodinâmicas do Túnel

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 testes realizados no túnel hidrodinâmico vertical, sem a presença de modelos na sua seção de testes, objetivando a determinação de algumas de suas características importantes.

2.4.1 Perfis de Velocidade

O principal objetivo que norteia o projeto da contração de um túnel – aerodinâmico ou hidrodinâmico – é a obtenção de um perfil de velocidade uniforme no interior da seção de testes.

unesp

O conhecimento dos perfis de velocidade no interior da seção de testes é de fundamental importância para a interpretação dos resultados obtidos em uma instalação experimental.

Os perfis de velocidade no interior da seção de testes do túnel 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 3.3. Em cada ensaio de calibração, os pontos experimentais foram colhidos dentro uma faixa de ± 15% em torno da velocidade nominal da corrente livre.

A sonda foi posicionada no interior da seção de testes com o auxílio de um dispositivo posicionador, mostrado na Figura 2.6. O deslocamento da sonda ao longo do eixo transversal da seção de testes foi determinado com o auxílio de um paquímetro acoplado ao dispositivo posicionador. Este dispositivo foi alinhado em relação à seção de testes, com o auxílio de um nível de bolha e um esquadro. A referência da posição inicial da sonda foi obtida encostando-se o suporte da sonda na face interior da janela lateral direita da seção de testes (x = 73 mm). A incerteza da posição da sonda foi estimada em 0,5 mm.

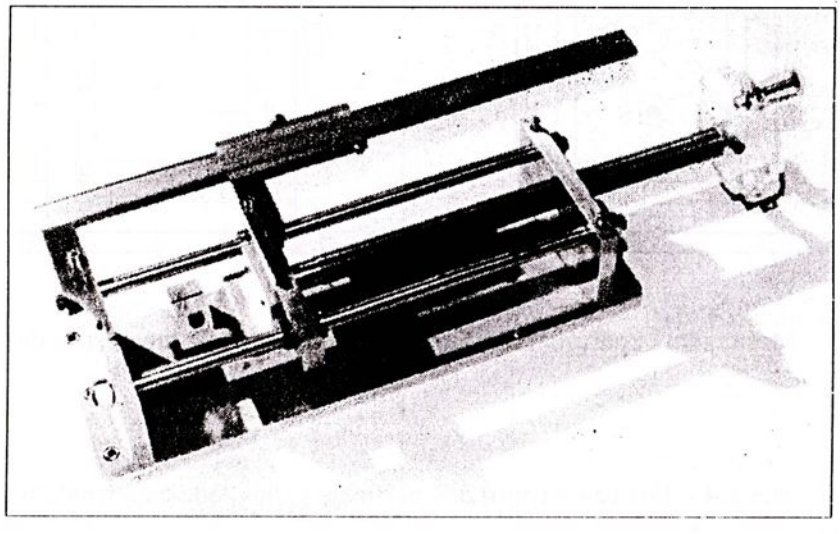


Figura 2.6 – Dispositivo posicionador da sonda de filme quente.

Ao todo foram investigadas quatro estações ao longo do comprimento da seção de testes, identificadas pelos números 1, 3, 5 e 7. Em cada estação, a sonda foi posicionada em sete pontos distribuídos ao longo da largura da seção de testes, e foram conduzidos ensaios para três diferentes velocidades. A sonda de temperatura do anemômetro, necessária para permitir a correção da velocidade devido a variações na temperatura do escoamento, foi introduzida na

estação 8 a fim de não interferir no escoamento da corrente livre. A montagem experimental utilizada na determinação dos perfis de velocidade é ilustrada na Figura 2.7. A Tabela 2.4 apresenta a posição y (mm) em que foram determinados os perfis de velocidade experimentais, medida a partir da entrada da seção de testes.

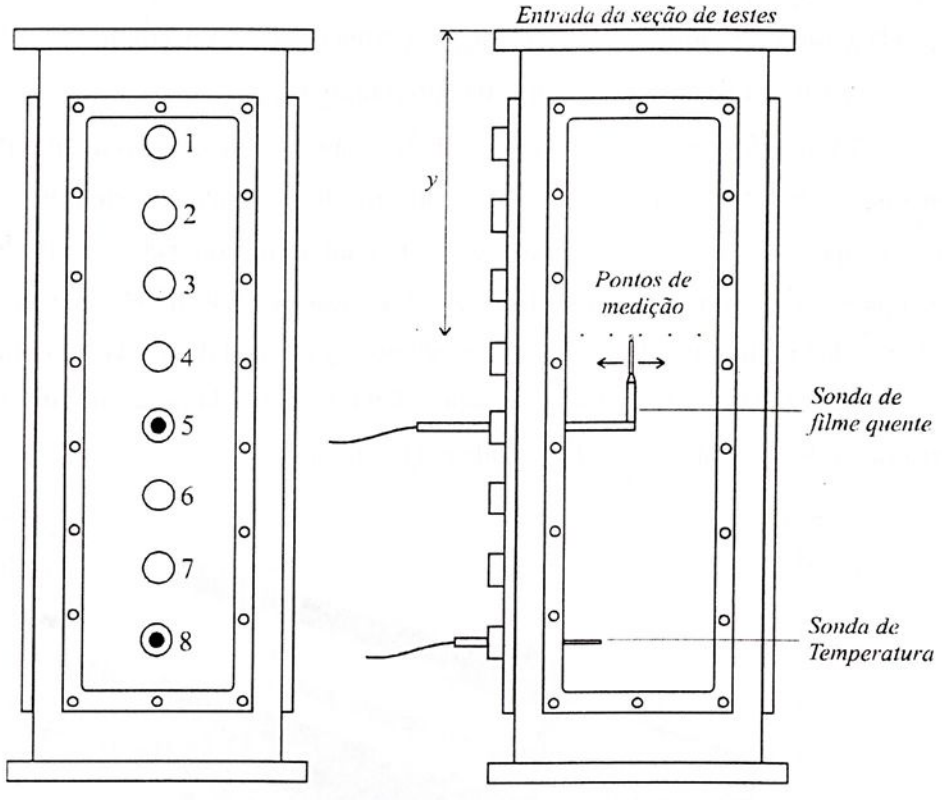


Figura 2.7 – Montagem experimental utilizada na determinação dos perfis de velocidade.

Tabela 2.4 – Posição y (mm) dos perfis de velocidade experimentais.

Estação Investigada	Posição y (mm)
1	5
3	105
5	205
7	305

O túnel hidrodinâmico foi operado em modo contínuo e com o nível d'água máximo, ou seja, com água escoando pelo ladrão. Após o enchimento do túnel, deixou-se a água armazenada no reservatório superior repousar por aproximadamente 5 minutos. Então, com a bomba acionada, as válvulas (V2) e (V3) foram reguladas de forma a se obter a vazão desejada, com o excesso escoando pelo ladrão. Dessa forma, a vazão lida pelo medidor de vazão permaneceu constante, com uma pequena oscilação no último dígito do mostrador (terceira casa decimal). A duração dos ensaios em cada estação foi, em média, de 2 minutos, de forma que os efeitos do aumento da temperatura da água e da contaminação da sonda pudessem ser amenizados.

Os resultados assim obtidos podem ser observados na Figura 2.8. A velocidade apresentada nestes gráficos representa o valor médio da série temporal adquirida durante 5 s. 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 (± 73 mm).

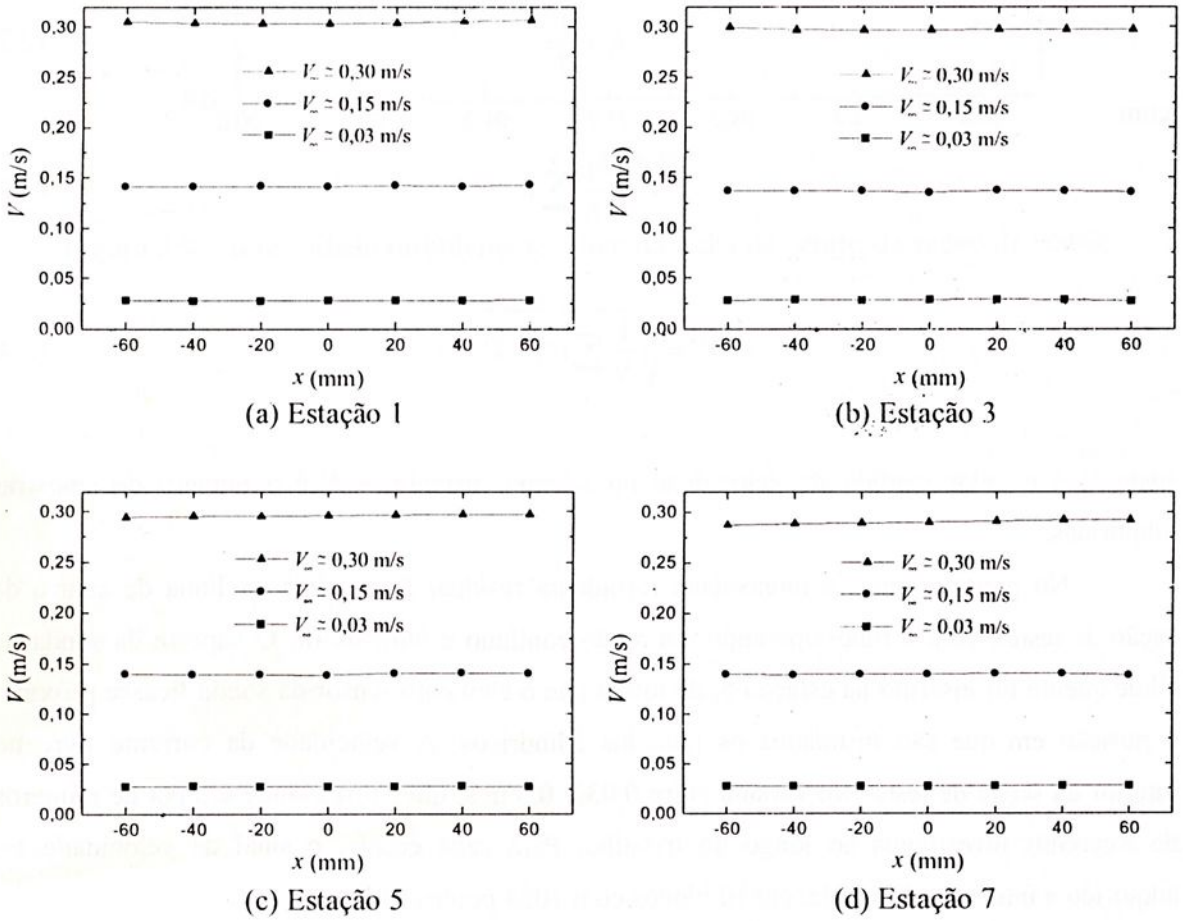


Figura 2.8 – Perfis de velocidade ao longo da seção de testes do túnel hidrodinâmico.

É fácil observar que os perfis de velocidade apresentam ótima uniformidade, para todas as estações e velocidades médias investigadas. Com base nestes resultados, pode-se concluir, também, que a camada limite que se desenvolve sobre as paredes da seção de testes possui uma espessura inferior a 13 mm, ao longo de todo o comprimento investigado da seção de testes.

2.4.2 Intensidade Turbulenta Residual

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

$$I_t = \frac{V'}{\overline{V}} \tag{2.2}$$

com

$$\overline{V} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} V_i \tag{2.3}$$

e

$$V' = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(V_i - \overline{V})^2} \tag{2.4}$$

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 residual foi medida na linha de centro da seção de testes, com o túnel operando em modo contínuo e *blow-down*. O suporte da sonda de filme quente foi inserido na estação 5, de forma que o elemento sensor da sonda ficasse próximo à posição em que são instalados os modelos cilíndricos. A velocidade da corrente livre no interior da seção de testes foi variada entre 0,03 e 0,3 m/s, que corresponde à faixa de números de Reynolds investigada ao longo do trabalho. Para cada ensaio, o sinal da velocidade foi adquirido a uma taxa de 1 kHz, em 10 blocos com 1024 pontos cada.

unesp

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 2.9. Como pode-se observar, a intensidade turbulenta residual da corrente livre, com o túnel operando em modo *blow-down*, é da ordem da metade do valor encontrado quando o túnel é operado em modo contínuo, para um mesmo nível de velocidade.

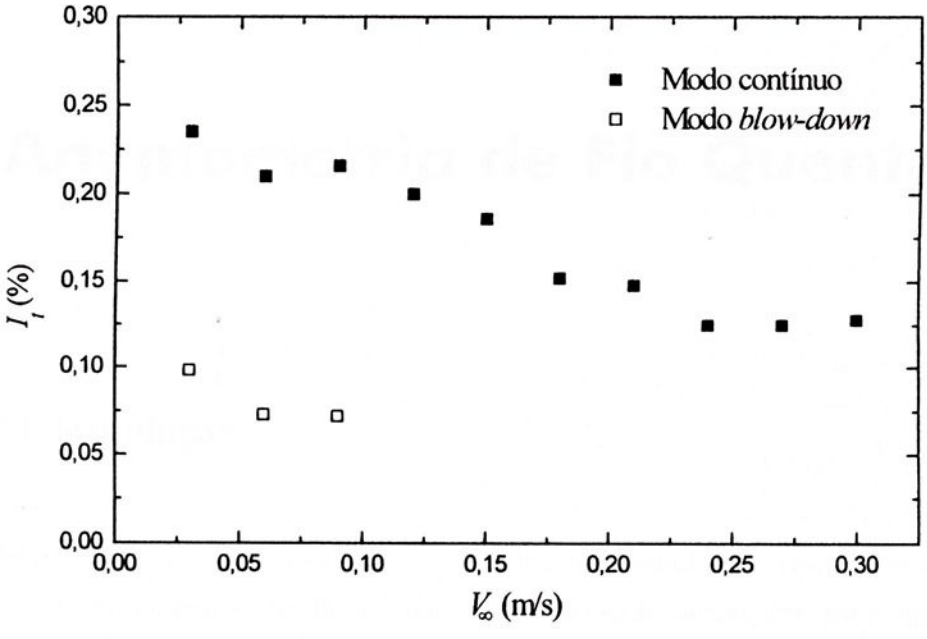


Figura 2.9 – Intensidade turbulenta residual na linha de centro da seção de testes.

Capítulo 3

Anemometria de Fio Quente

3.1 Introdução

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

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

No presente trabalho, a anemometria de fio quente[1] foi utilizada como principal ferramenta de análise quantitativa de propriedades do escoamento. Na qualificação do túnel

[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.

unesp

hidrodinâmico, esta técnica foi empregada na determinação dos perfis de velocidade e níveis de turbulência encontrados no interior da seção de testes. No estudo do escoamento ao redor dos cilindros de base quadrada e retangular, a técnica foi utilizada na obtenção da freqüência de Strouhal, que caracteriza o fenômeno de emissão alternada de vórtices. Na discussão que se segue, são apresentados alguns detalhes do equipamento utilizado e abordados aspectos básicos relativos à aplicação da técnica.

3.2 Princípio Básico de Funcionamento

De maneira geral, todos 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 – em geral um fio ou filme de tungstênio, níquel ou platina, com cerca de 1 mm de comprimento e alguns poucos microns de diâmetro ou espessura –, montado sobre uma haste de dimensões reduzidas, confeccionada em resina epoxi ou material cerâmico, como mostrado na Figura 3.1. A escolha entre os vários tipos de sonda existentes depende fortemente da aplicação à que se destinam.

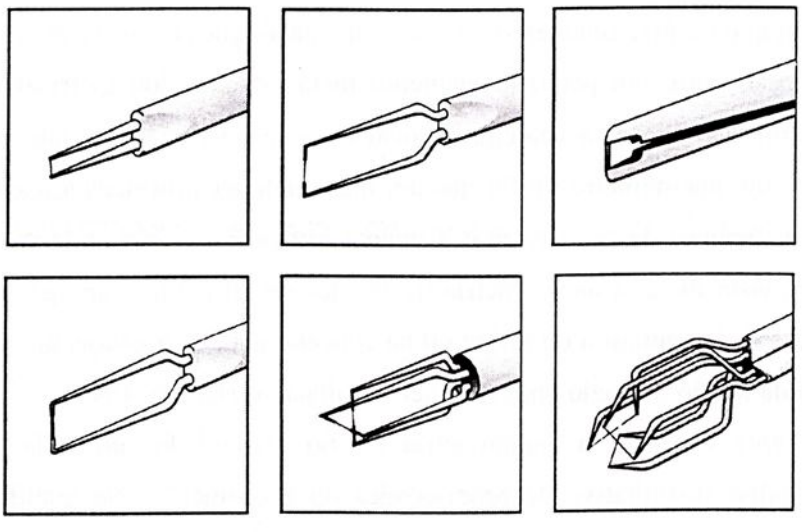


Figura 3.1 – Diferentes tipos de sondas anemométricas de fio e de filme quente.

Em sua versão mais usual, conhecida como Anemômetro de Temperatura Constante, 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, consequentemente, 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

$$E^2 = A + BU^n \tag{3.1}$$

cuja dedução encontra-se no Apêndice B. Nesta expressão, E representa a tensão elétrica, 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.

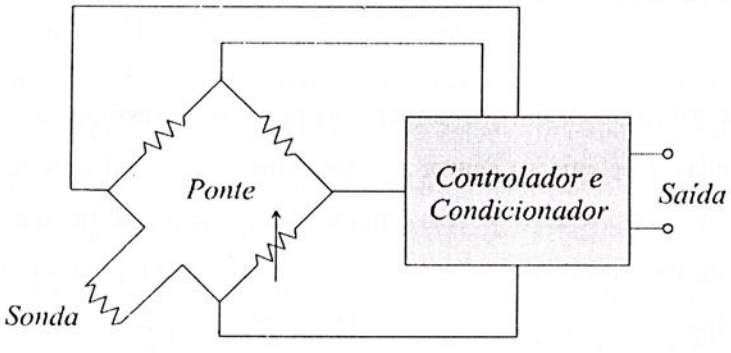


Figura 3.2 – Elementos básicos de um anemômetro de temperatura constante.

A Figura 3.3 mostra, especificamente, o anemômetro utilizado no presente trabalho, que se baseia na plataforma *StreamLine 90N10*, produzida pela *Dantec Measurement Technology*. Este anemômetro possui três módulos *CTA 90C10*, que permitem a medição simultânea de até três componentes da velocidade local e instantânea. Na imagem apresentada, retirada do catálogo do fabricante, observa-se também um calibrador de sondas de fio quente, através de um jato livre gasoso.

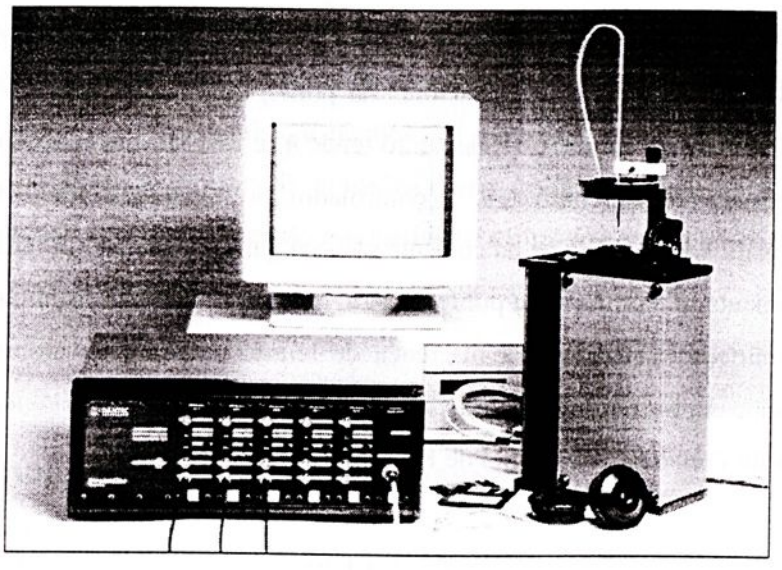


Figura 3.3 – Anemômetro de temperatura constante *Dantec StreamLine 90N10*.

3.3 Calibração de Sondas

A correta utilização de um anemômetro de fio quente pressupõe a calibração freqüente e individual das sondas. O elemento sensor é extremamente sensível e delicado, podendo sofrer modificações em suas propriedades físicas durante o funcionamento do aparelho, o que interfere diretamente no valor da leitura. Além disso, a operação em meio líquido favorece a ocorrência de incrustação, alterando sobremaneira as taxas de transferência de calor por convecção.

3.3.1 Métodos de Calibração

Existem várias metodologias que podem ser empregadas para a calibração de sondas de fio ou de filme quente. Embora apresentem diferenças significativas entre si, estas técnicas utilizam, invariavelmente, um dispositivo que estabelece uma velocidade relativa bem conhecida entre a sonda e o fluido de trabalho. Em sua grande maioria, a velocidade de referência é obtida de um escoamento simples e com características bem conhecidas, tanto analítica quanto experimentalmente.

unesp

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. 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.

Persen & Saetran (1983) descrevem um procedimento alternativo de calibração, em que a sonda, montada em um pequeno carro, é imersa em um tanque com água e trasladada com velocidade constante. A velocidade é determinada conhecendo-se o tempo que o carro leva para passar entre duas fotocélulas e a distância existente entre elas. Segundo os autores, além de relativamente barato, o método propicia medições em ambiente praticamente isento de turbulência na corrente livre.

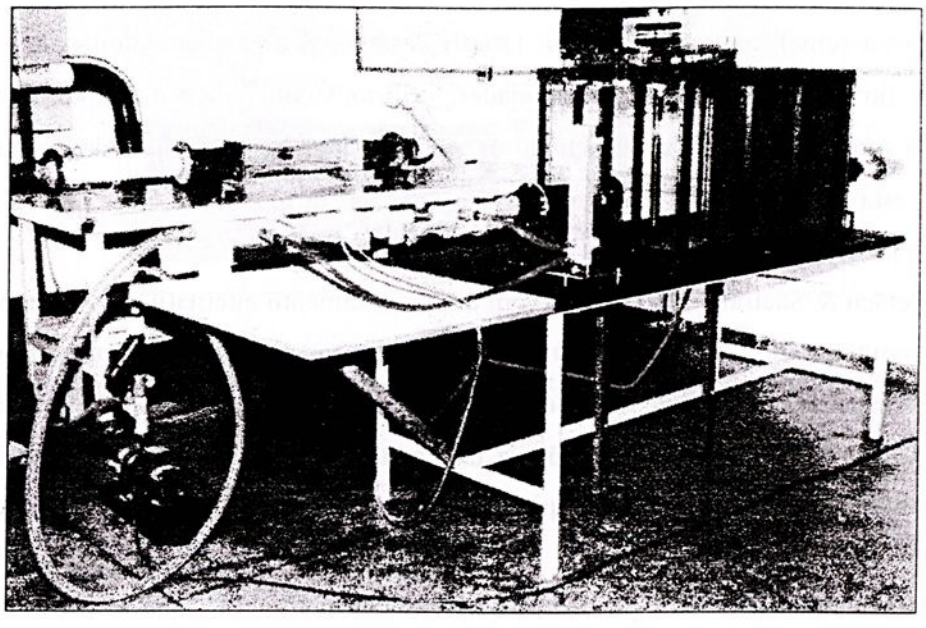
Lee & Budwig (1991), por sua vez, apresentam um método que se baseia no fenômeno de emissão de vórtices de um cilindro circular, posicionado à montante da sonda de fio quente. Neste método, a freqüência de emissão de vórtices na esteira do cilindro é medida com a própria sonda e a velocidade da corrente livre é, então, obtida por intermédio de uma correlação empírica envolvendo os números de Strouhal e de Reynolds. Este método possibilita a calibração da sonda *in situ*, e dispensa o uso de um instrumento auxiliar para a determinação da velocidade de referência. Infelizmente, o fenômeno de emissão de vórtices sofre forte influência das condições de extremidade do cilindro, além de outros fatores, o que pode contaminar significativamente os resultados.

3.3.2 Dispositivo e Metodologia de Calibração

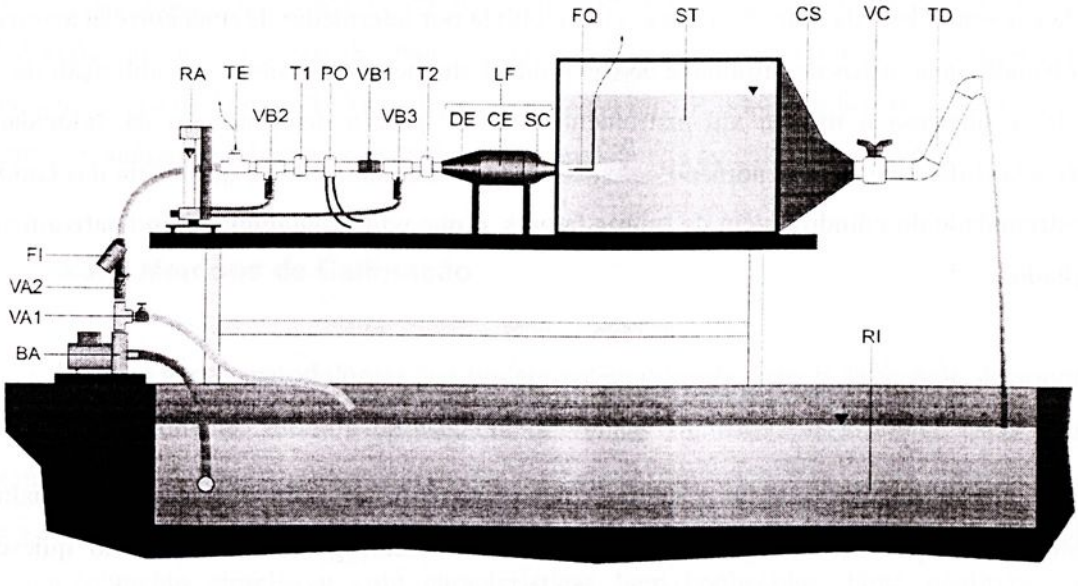
Neste trabalho, a calibração das sondas foi realizada num dispositivo especialmente projetado para produzir um jato livre axissimétrico descarregando em um meio quiescente. Trata-se, na verdade, de um método clásssico e consagrado de calibração de sondas anemométricas, empregado tanto para gases quanto para líquidos e descrito por vários autores na literatura, dentre os quais incluem-se Lee & Budwig (1991). Esta metodologia é utilizada, ainda,

unesp

em calibradores comerciais desenvolvidos por fabricantes de equipamentos de anemometria, tais como a *Dantec* e a *TSI* para aplicações em laboratório de pesquisa, e a *Kurz* para aplicações industriais. A Figura 3.4(a) apresenta uma fotografia do dispositivo utilizado no trabalho, o qual, para maior facilidade de compreensão, aparece ilustrado, também, no esquema da Figura 3.4(b).



(a) instalação experimental



(b) ilustração esquemática

Figura 3.4 – 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 eventuais 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 3.5. 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 num reservatório de nível constante.

unesp

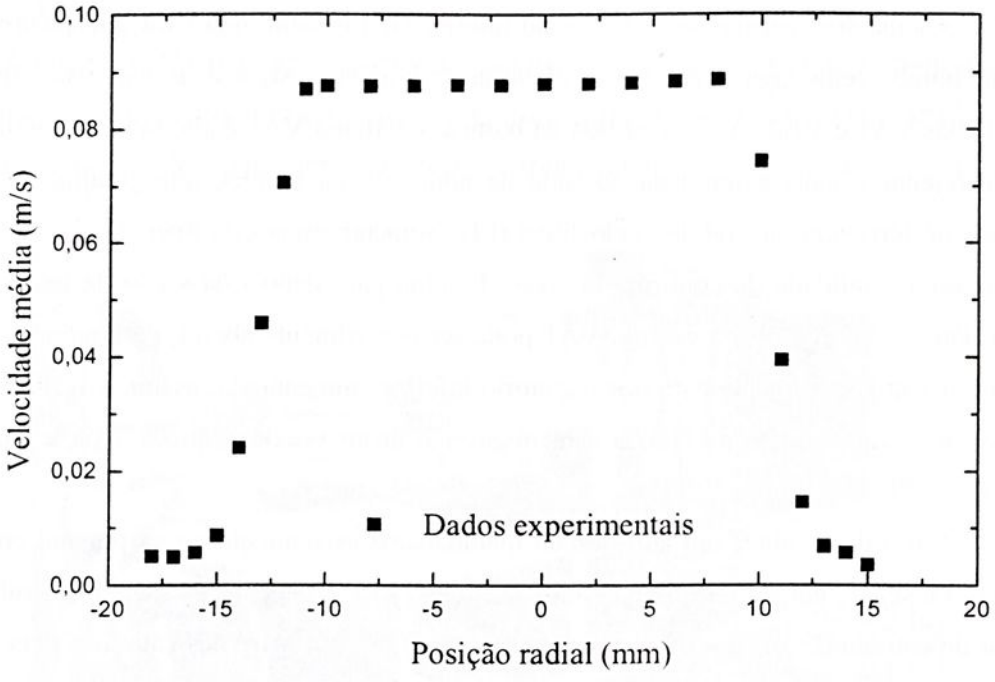


Figura 3.5 – Perfil de velocidade do jato medido a um diâmetro do bocal.

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 o 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 (superior a 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 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 na perda da calibração da

sonda, ainda durante o processo de calibração. Em vista disto, optou-se, no âmbito deste trabalho, pela utilização dos dois primeiros métodos de medida de vazão, através do rotâmetro ou da placa de orifício, que foram previamente aferidos pelo método direto.

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 regulando-se a válvula VA2, e aguarda-se que o escoamento entre em regime permanente;
- no caso de utilizar-se o rotâmetro, abrem-se as válvulas VB2 e VB3 e fecha-se a VB1;
- 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;
- o 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 suas propriedades térmicas durante o próprio processo de calibração.

unesp

3.3.3 Resultados Típicos

A Figura 3.6 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 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.

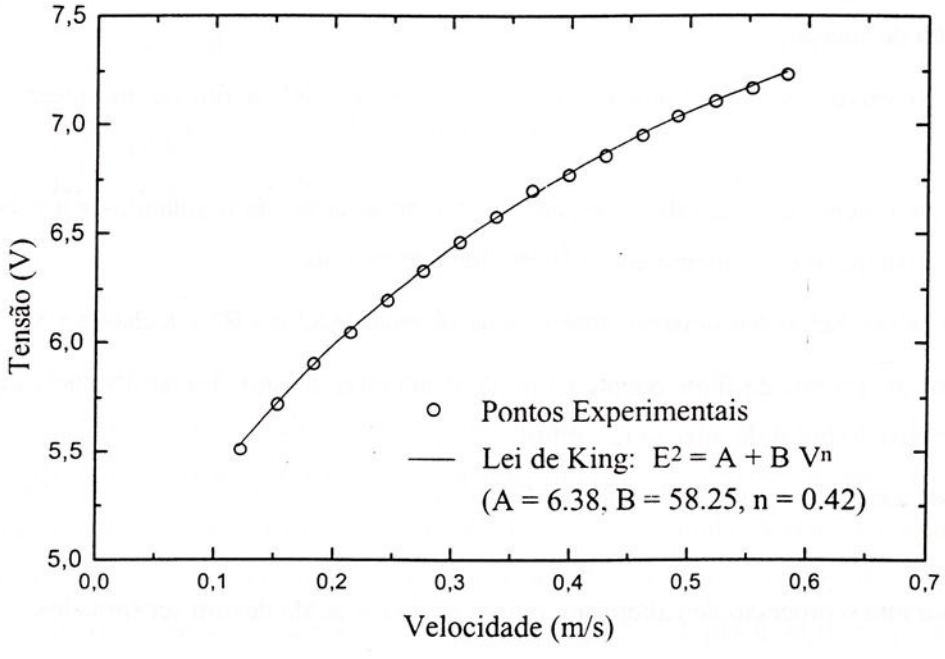


Figura 3.6 – Curva de calibração típica de uma sonda de filme quente *Dantec 55R11*.

O processo de calibração das sondas é sobremaneira facilitado pelo uso das ferramentas específicas disponíveis no software *StreamWare*, que controla o anemômetro empregado. A Figura 3.7 ilustra uma das janelas deste programa, onde se observa a curva de calibração mostrada na Figura 3.6. Como pode-se observar, a lei de King mostra-se, neste caso, absolutamente adequada para correlacionar os dados experimentais obtidos, com um desvio máximo da ordem de 2,6%.

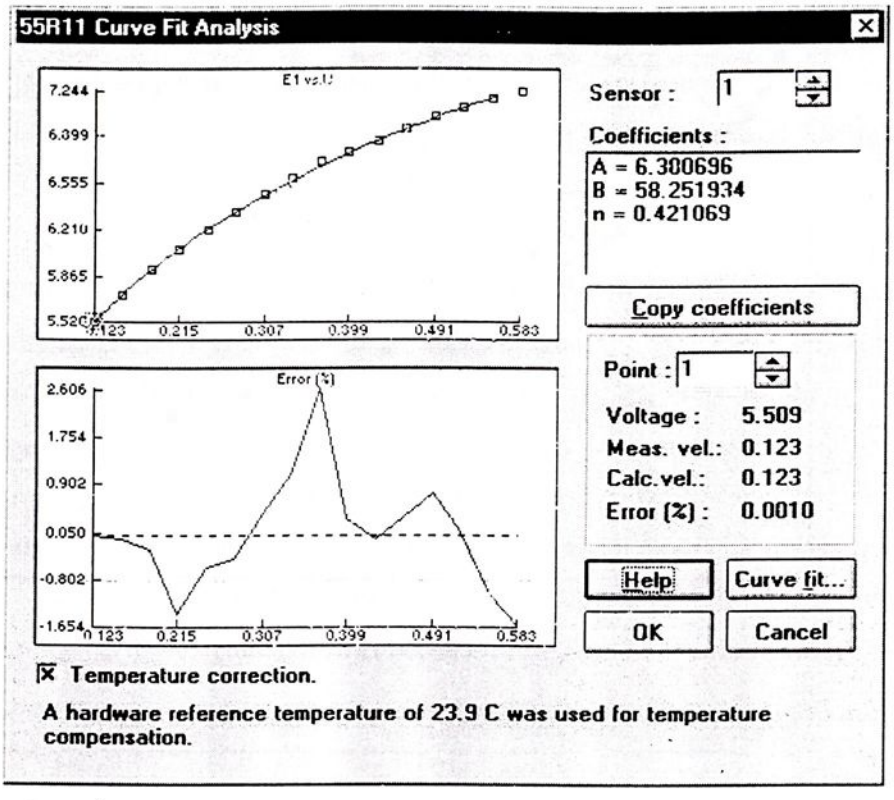


Figura 3.7 – Interface gráfica da ferramenta de calibração de sondas do programa *StreamWare*.

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 valida 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. A fim de quantificar a influência da contaminação da sonda sobre a velocidade medida do escoamento, uma sonda limpa foi calibrada e posicionada no centro do jato produzido pelo dispositivo de calibração. A vazão volumétrica deste jato foi ajustada em 100 l/h, que corresponde a uma velocidade média da ordem de 6 cm/s. O sistema de anemometria de filme quente foi acionado, e foram realizadas medidas da velocidade do jato para diversos instantes de tempo ao longo de uma hora, como mostra a Figura 3.8

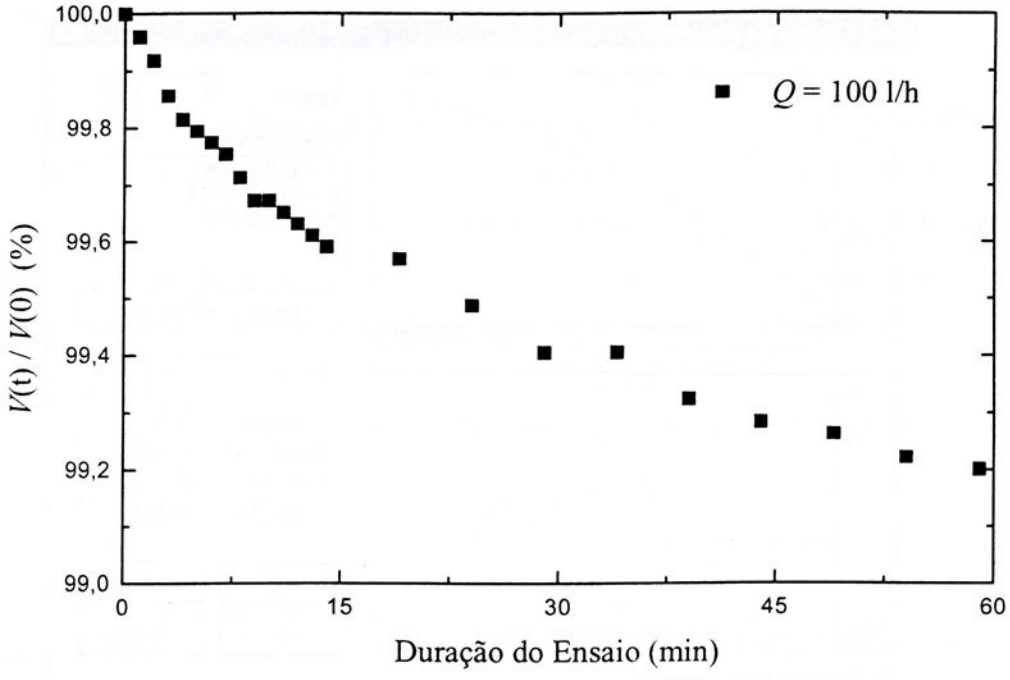


Figura 3.8 – Perda da calibração com o decorrer do ensaio.

Como pode ser verificado, a velocidade média $V(t)$ medida ao longo do tempo diminui com o decorrer do ensaio, em função da contaminação da sonda. Após uma hora de funcionamento contínuo, o valor da velocidade medido com a sonda suja é 0,8% menor do que o valor inicial $V(0)$, medido com a sonda limpa. Observa-se também que a influência da contaminação da sonda sobre o valor obtido da velocidade diminui com o passar do tempo de utilização - este comportamento é conhecido como "envelhecimento" da sonda.

3.4 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. No presente trabalho, o registro do sinal de saída do anemômetro foi realizado com o auxílio de um sistema de aquisição digital *National AT-MIO-16E-1*, baseado num computador *Pentium II*.

unesp

Dependendo da natureza dos resultados que se deseja obter com a anemometria de fio quente, a aquisição e o tratamento do sinal podem apresentar características diferentes. Três tipos de ensaios de anemometria foram realizados no contexto deste trabalho, quais sejam: medições de velocidade média e de intensidade turbulenta da corrente livre, e medições da freqüência 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. A Figura 3.9 apresenta um sinal tipicamente obtido durante a determinação dos perfis de velocidade média da corrente livre no interior da seção de testes.

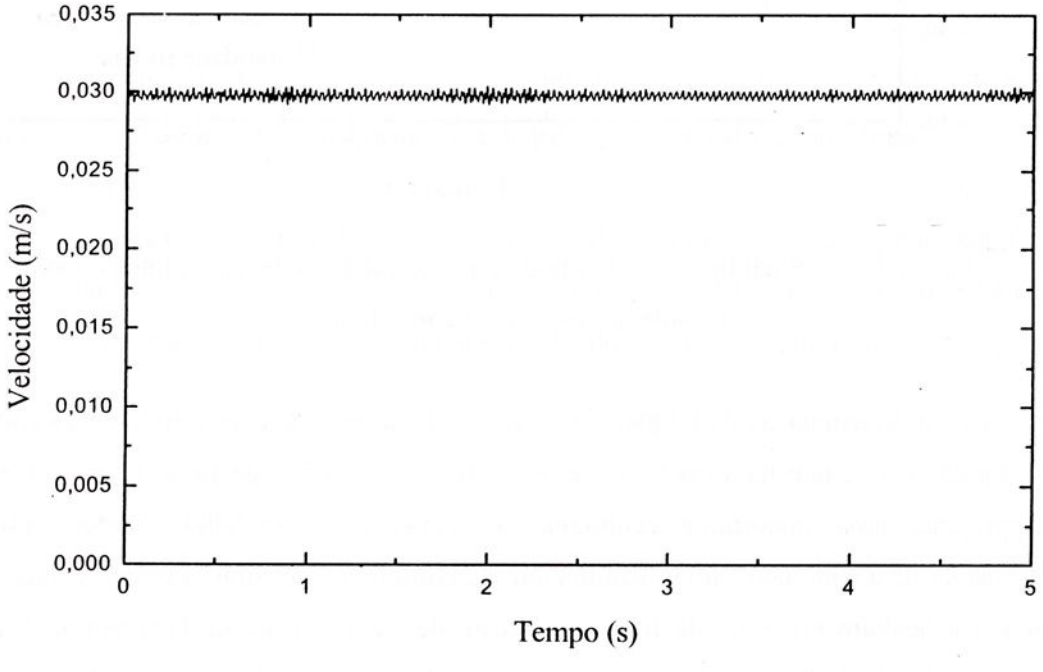


Figura 3.9 – Sinal tipicamente obtido durante a determinação dos perfis de velocidade média da corrente livre.

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 3.10 ilustra um sinal tipicamente obtido durante a determinação da intensidade turbulenta da corrente livre.

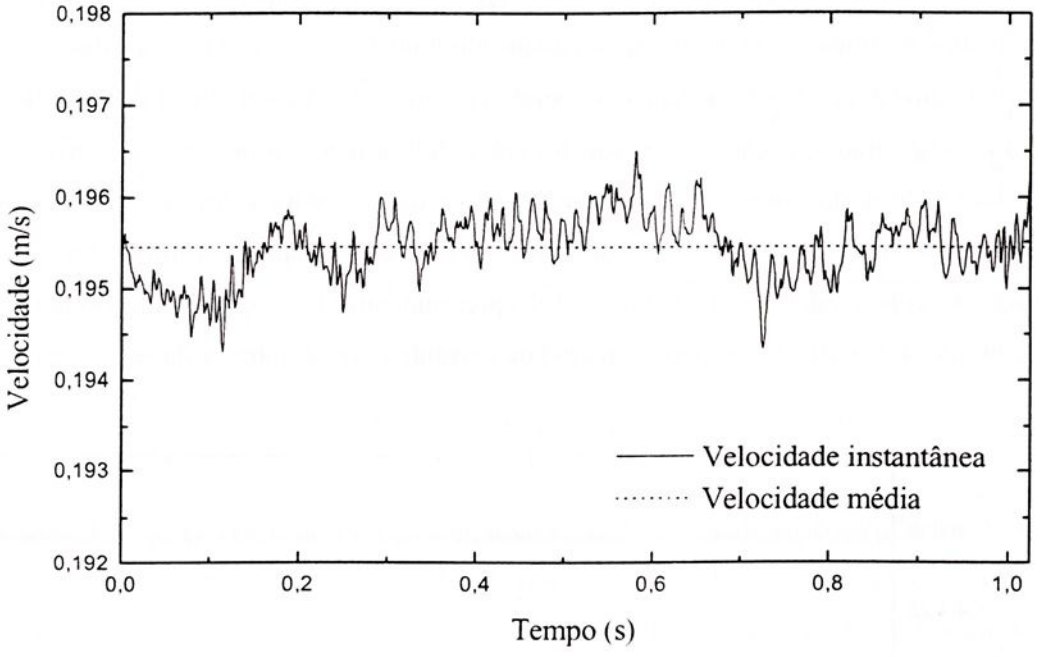


Figura 3.10 – Sinal tipicamente obtido durante a determinação da intensidade turbulenta residual da corrente livre.

Para a determinação da freqüência de Strouhal – a freqüência 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 freqüência de emissão dos vórtices foi determinada através da aplicação da transformada discreta de Fourier (FFT) ao sinal digital adquirido. A partir da média das cinco

distribuições de potência espectral calculadas, a freqüência de Strouhal (*f*) é determinada com base no centro geométrico do pico dominante verificado. A título de ilustração, a Figura 3.11 apresenta um sinal temporal obtido para um cilindro quadrado, com seu respectivo espectro de freqüência.

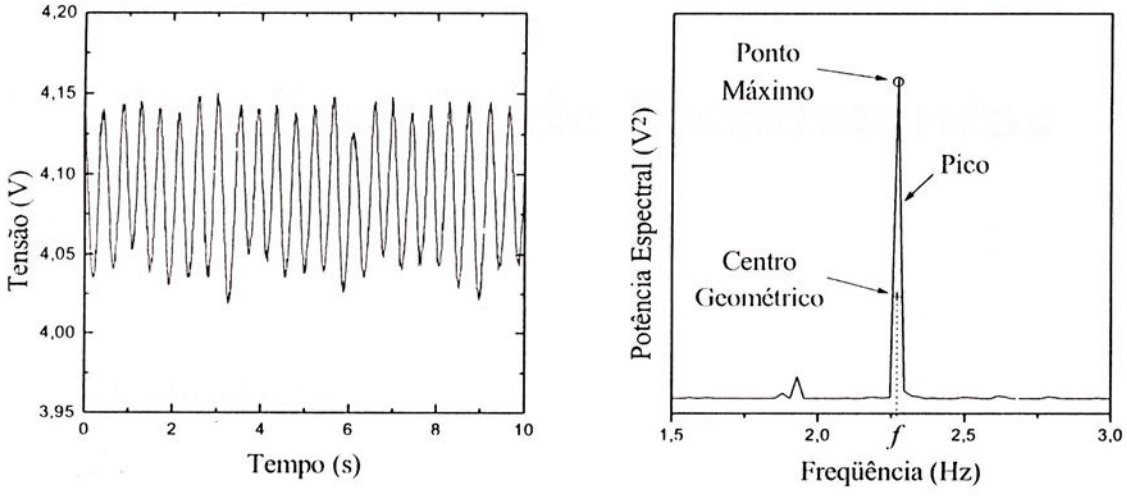


Figura 3.11 – Amostra de um sinal tipicamente obtido durante a determinação da freqüência de Strouhal, com sua respectiva distribuição de potência espectral.

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 pacote *MatLab*. A freqüência de Strouhal foi então calculada pela média dos valores encontrados.

Capítulo 4

Visualização de Escoamentos

4.1 Introdução

Capaz de processar um enorme conjunto de informações num pequeno intervalo de tempo, o sentido da visão constitui uma ferramenta extremamente eficiente e rápida de comunicação e análise. Uma única imagem pode condensar uma grande quantidade de dados, facilitando sobremaneira a análise e a compreensão de fenômenos físicos. O conjunto de técnicas utilizado cientificamente para gerar imagens, tratá-las e interpretá-las é conhecido como visualização.

No caso específico da mecânica dos fluidos, a visualização foi, durante longo tempo, a única ferramenta disponível para o estudo e a descrição de 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.

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

unesp

conseqüência, textos de revisão sobre o assunto são fartos na literatura. Merzkirch (1987), Prandtl & Tietjens (1957), Balint (1953), Clayton & Massey (1967), Werlé (1973), Settles (1986), Gad-el-Hak (1988) e Freymuth (1993) são alguns poucos exemplos de publicações desta natureza.

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 de escoamento; como mecanismo de apoio à realização de medidas experimentais, para auxiliar no correto posicionamento de sondas anemométricas; e, finalmente, como instrumento complementar de análise, para facilitar a interpretação de resultados quantitativos obtidos por anemometria de fio quente.

4.2 Visualização de Escoamentos em Meio Líquido

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, sólidos ou gasosos no seio do fluido. As três técnicas abordadas a seguir foram empregadas no âmbito do presente trabalho.

4.2.1 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 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 controladas e mantidas em valores próximos àqueles encontrados no escoamento, a fim de que o filamento de tinta se mantenha nítido e estável.

unesp

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 sua coloração na presença de radiações eletromagnéticas (Popovich & Hummel, 1967).

Segundo Werlé (1973), outras substâncias são utilizadas com relativa freqüência, tais como o 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. No presente trabalho, utilizou-se como traçador uma 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.

O dispositivo de injeção, ilustrado na Figura 4.1, é constituído por um reservatório pressurizado, ligado, por intermédio de uma mangueira flexível, a uma agulha dobrada em forma de cotovelo. Uma válvula do tipo agulha, operada manualmente, faz o controle da vazão de corante para dentro do escoamento principal. A agulha de injeção é introduzida no interior da seção de testes através de uma de suas janelas, com sua extremidade posicionada à montante do modelo ensaiado.

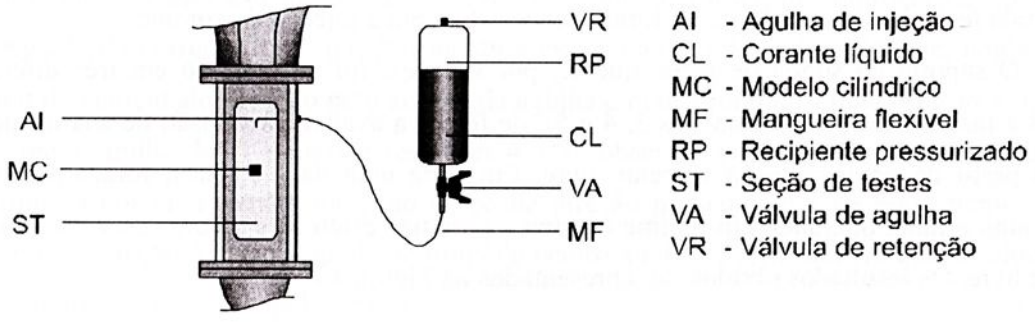


Figura 4.1 – Dispositivo de injeção de corantes líquidos.

O diâmetro da agulha de injeção é um fator importante a ser considerado, pois a esteira que se forma à jusante da própria agulha pode introduzir perturbações indesejáveis sobre o escoamento investigado. A fim de quantificar esta perturbação, foram realizadas medidas anemométricas para determinar o perfil de velocidade à jusante de uma agulha com 0,7 mm de diâmetro externo, conforme ilustra a Figura 4.2.

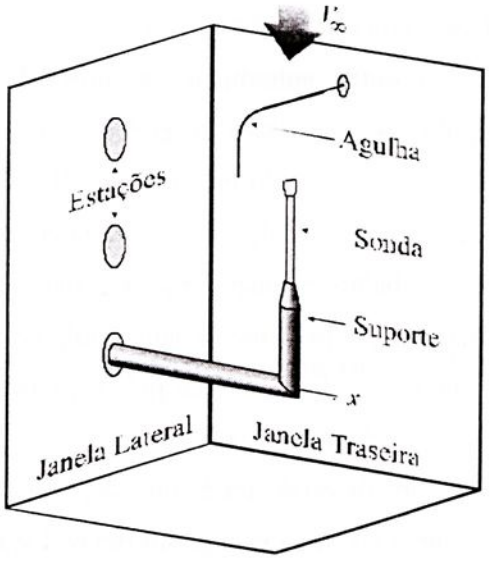


Figura 4.2 – Ilustração esquemática do arranjo experimental para a determinação da influência da agulha de injeção de corantes sobre a corrente livre no interior da seção de testes.

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

O suporte da sonda de filme quente, por sua vez, foi introduzido em três diferentes estações a jusante da agulha (estações 3, 4 e 5), de forma a avaliar a extensão de sua influência sobre o perfil de velocidade da corrente livre. Em cada uma das estações, foram realizados ensaios com o túnel operando em regime contínuo, para três diferentes valores da velocidade da corrente livre. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.3.

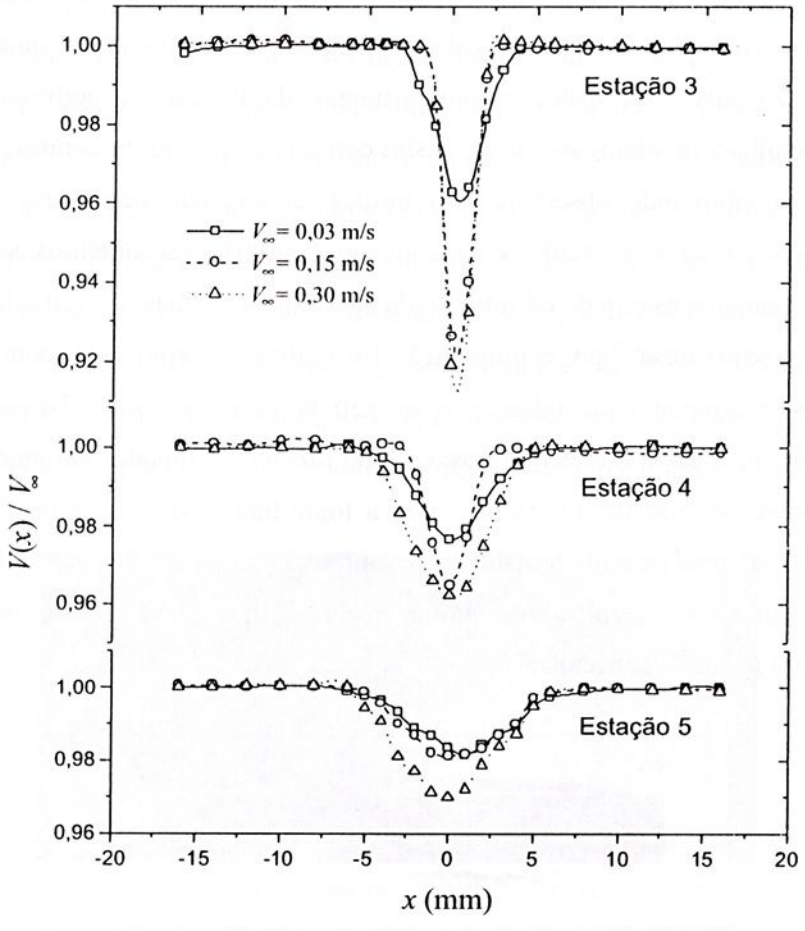


Figura 4.3 – Perfis experimentais de velocidade a jusante de uma agulha de injeção.

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

Como forma de eliminar este problema, nas visualizações efetuadas ao longo deste trabalho utilizou-se uma agulha retrátil, que permitisse injetar corante sobre o modelo de testes e, logo em seguida, pudesse ser recolhida para junto da parede da seção de testes. Nestas condições, o corante, injetado em abundância sobre a superfície do corpo sólido, permanece

retido apenas na camada limite do modelo, nas regiões de descolamento e recirculação, e na sua esteira, sendo lavado rapidamente nas demais regiões do escoamento, onde a velocidade se mostra mais elevada. Decorridos alguns instantes da injeção, a perturbação causada pela presença da agulha à montante do corpo, assim como pela injeção do corante, é convectada pelo escoamento, possibilitando observar, com nitidez, alguns fenômenos que ocorrem junto ao modelo e na sua esteira. Esta técnica é indicada, também, para escoamentos com baixos números de Reynolds, quando a esteira do cilindro ainda apresenta as bolhas de recirculação simétricas.

Nos ensaios deste tipo, a iluminação foi realizada a contraluz, com o auxílio de dois conjuntos com 5 lâmpadas incandescentes de 150 W cada, que aliam baixo custo a uma boa temperatura de cor. Outras fontes luminosas, como *flashes* e lâmpadas halogênicas montadas em refletores, são eventualmente utilizadas. Entre a fonte luminosa e a janela traseira da seção de testes, foi utilizada uma película translúcida, com o objetivo de produzir uma iluminação difusa e eficiente. A Figura 4.4 a seguir apresenta um resultado típico, obtido no âmbito deste trabalho, com o uso desta técnica de visualização.

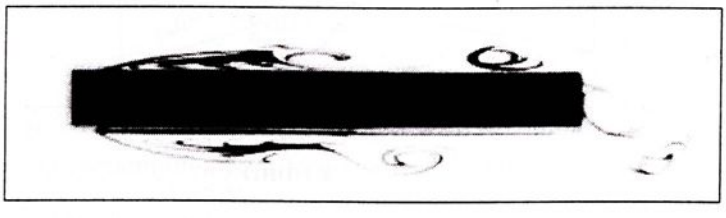


Figura 4.4 – Visualização das camadas cisalhantes do escoamento ao redor de um cilindro de base retangular, pela técnica de injeção de corantes.

4.2.2 Bolhas de Hidrogênio

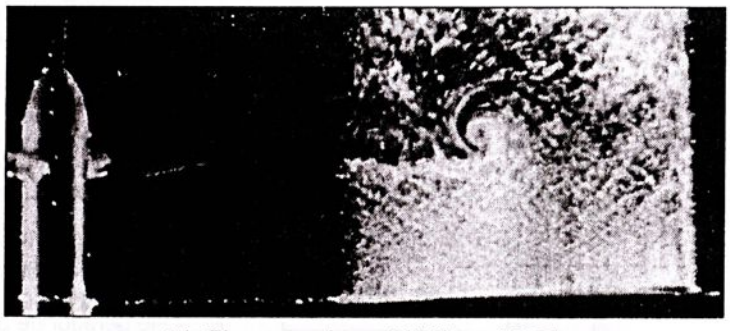
Traçadores gasosos são freqüentemente utilizados em ensaios de visualização em meio hidrodinâmico, sendo as bolhas de hidrogênio as mais usuais. A técnica teve início durante a década de 50 e foi empregada ou aprimorada por diversos autores, dentre os quais destacam-se Clutter & Smith (1961), Criminale Jr & Nowell (1965), Schraub *et al* (1965), Davis & Fox (1967) e Merzkirch (1987).

Em linhas gerais, bolhas de hidrogênio podem ser geradas introduzindo-se, no interior do escoamento, um fio metálico ligado a um circuito elétrico de corrente contínua, de maneira a exercer o papel de cátodo (eletrodo negativo). O ânodo (eletrodo positivo) pode ser facilmente obtido, posicionado-se um objeto metálico dentro do escoamento, nas proximidades do cátodo.

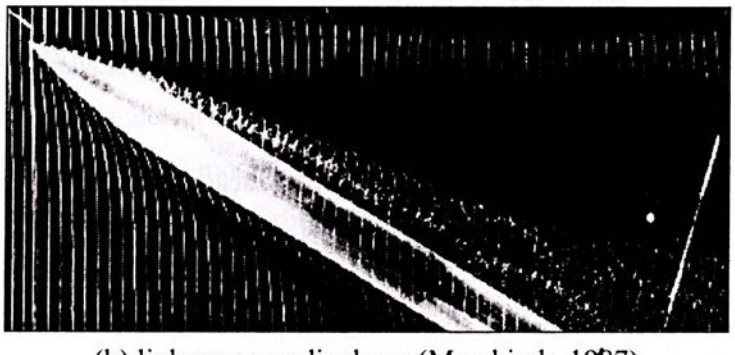
cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 12 13 14 15 16 17 18

Se a tensão elétrica aplicada entre estes dois eletrodos for suficiente, ocorrerá a hidrólise da água, com a formação de bolhas de hidrogênio no cátodo e de oxigênio no ânodo.

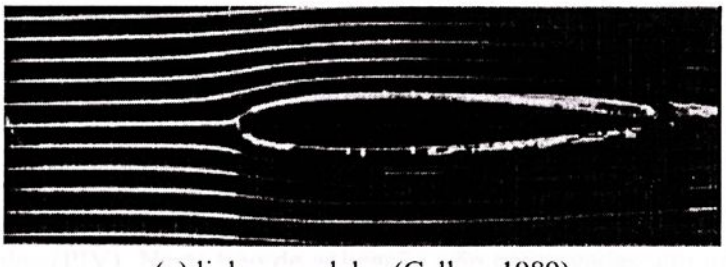
A Figura 4.5 mostra algumas imagens retiradas da literatura, obtidas com o auxílio desta técnica. Mantendo-se a tensão elétrica constante entre os eletrodos, observa-se a formação de uma folha contínua de bolhas de hidrogênio - Figura 4.5(a). Variando-se a tensão elétrica entre os eletrodos na forma de pulsos de onda quadrada, por exemplo, as bolhas de hidrogênio serão liberadas na forma de linhas discretas, orientadas perpendicularmente ao escoamento, como mostra a Figura 4.5(b). Por outro lado, linhas paralelas ao fluxo, como ilustradas na Figura 4.5(c), podem ser obtidas recobrindo-se, com material isolante, regiões alternadas do fio do cátodo. Um efeito semelhante pode ser obtido utilizando-se um cátodo em forma de espiral.



(a) filme contínuo (Gallon, 1989)



(b) linhas perpendiculares (Merzkirch, 1987)



(c) linhas paralelas (Gallon, 1989)

Figura 4.5 – Visualização de escoamentos por bolhas de hidrogênio.

unesp

Segundo Merzkirch (1987), o tamanho das bolhas pode ser considerado da ordem de grandeza do diâmetro do fio empregado, embora a condutividade elétrica do fluido, a velocidade do escoamento e intensidade da corrente elétrica empregada também interfiram sobre este parâmetro. Evidentemente, os efeitos de flutuação fazem com que as bolhas tendam a subir, e a velocidade de ascensão de uma bolha é proporcional ao seu diâmetro. Assim, as bolhas produzidas devem ser suficientemente pequenas, a fim de restringir a distorção das linhas de emissão a níveis aceitáveis. Para isto, o fio metálico que serve de cátodo deve ser bastante fino, de forma produzir bolhas com pequeno diâmetro e não introduzir perturbações no escoamento, como a emissão de vórtices alternados. Todavia, por questões de ordem prática, o diâmetro utilizado dificilmente será inferior à 0,05 mm.

No presente trabalho, os ensaios de visualização por geração de bolhas de hidrogênio foram realizados utilizando-se a montagem experimental ilustrada na Figura 4.6.

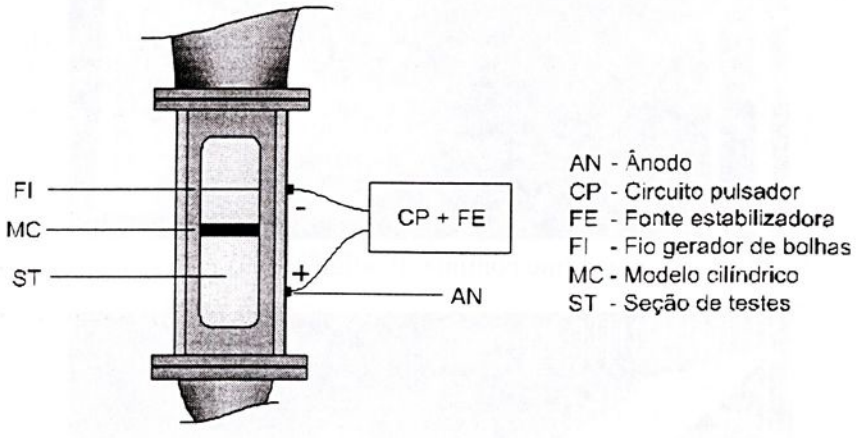


Figura 4.6 – Montagem experimental para a realização de ensaios de visualização de escoamentos por bolhas de hidrogênio.

O cátodo (FI), neste caso um fio de tungstênio com 0,075 mm de diâmetro é esticado ao longo da seção de testes por meio de orifícios providos de bujões especiais, localizados nas duas janelas laterais da seção de testes. Este fio é conectado a um circuito pulsador (CP) especialmente desenvolvido para esta finalidade, concebido para controlar, de forma independente, o período e a duração dos pulsos de onda quadrada. A tensão elétrica é fornecida pela fonte estabilizadora (FE), que permite regular a tensão ou a corrente elétrica que percorre o fio. O pólo positivo do circuito é conectado ao ânodo (AN), que consiste de um simples bujão metálico fixado na parede lateral da seção de testes, fechando, assim, o contato elétrico através da água que escoa pela seção de testes.

Este tipo de traçador possui uma reflexividade relativamente baixa, exigindo cuidados especiais para a obtenção de imagens de boa qualidade, como a utilização obrigatória de um fundo contrastante e um sistema de iluminação criteriosamente selecionado. Neste trabalho, utilizou-se um sistema de iluminação constituído por dois *flashes* eletrônicos posicionados junto às janelas laterais da seção de testes, formando com elas um ângulo de aproximadamente 30°. Após várias tentativas, este arranjo revelou-se bastante adequado, resultando num bom contraste das bolhas sobre o fundo negro utilizado junto à parede posterior da seção de testes. Neste caso, utiliza-se um quebra-luz, que tem a função de impedir que a luz proveniente dos *flashes* incida diretamente sobre a câmara fotográfica, o que provocaria reflexos e brilhos indesejáveis na objetiva e na janela frontal da seção de testes.

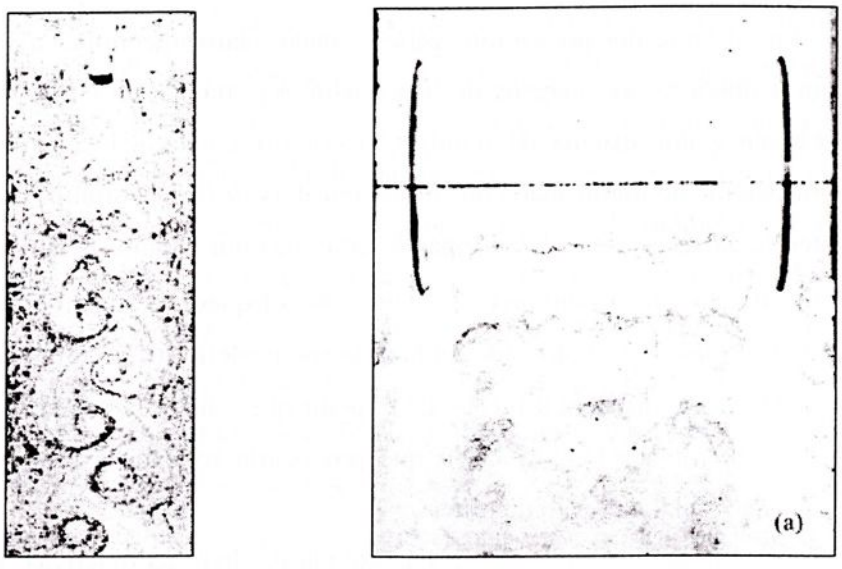
A câmara fotográfica, uma Nikon F4 provida de diversas objetivas, é posicionada em frente à janela frontal da seção de testes. O ajuste da exposição é feito manualmente, com o auxílio de um fotômetro *Minolta AutoMeter IV F* que possui a função de *flash meter*. Nestas condições, mesmo com os *flashes* ajustados em sua carga mínima, pode-se utilizar filmes de baixa sensibilidade (ISO 100) e, ainda, ajustar a câmara para operar com pequenas aberturas (f16) e elevada velocidade de obturação (1/250 s).

O modelo cilíndrico pode ser instalado no interior da seção de testes, com duas orientações diferentes. Na primeira, a mais utilizada, o modelo é instalado na janela posterior, perpendicularmente ao fio do cátodo - nesta configuração, o plano de bolhas emitidas permite observar um corte transversal da esteira de vórtices, conforme observa-se na Figura 4.7(a). O modelo de testes também pode ser instalado numa janela lateral, orientado paralelamente ao fio do cátodo - nesta configuração, o modelo é visto transversalmente, e as bolhas emitidas revelam a estrutura tridimensional da esteira turbilhonária, como se vê na Figura 4.7(b). As imagens obtidas foram tratadas eletronicamente e são apresentadas em negativo, a fim de aumentar o contraste e facilitar a sua reprodução.

4.2.3 Partículas Sólidas

A partir dos anos 80, houve grande avanço na utilização de traçadores sólidos para a visualização de escoamentos, principalmente devido ao advento das técnicas de Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV). Neste tipo de aplicação, são empregadas, em geral, partículas com dimensão inferior à 50 μm (Vieira, 1997).

unesp



(a) fio perpendicular ao modelo (b) fio paralelo ao modelo

Figura 4.7 – Exemplos de visualização de escoamentos com bolhas de hidrogênio.

Segundo Winter & Deterding (1956), entre os traçadores sólidos mais utilizados para visualização em meio líquido incluem-se pó de alumínio, pó de serra tratado, minério de ferro e baquelite. Alguns destes traçadores, como o pó de serra, por exemplo, introduzem erros experimentais graves, por apresentarem densidade muito diferente da maioria dos meios fluidos onde são inseridos. Por outro lado, alguns polímeros de hidrocarbonetos, como o polietileno, o poliestireno e o polisobutileno são considerados bons traçadores sólidos, quando se apresentam na forma de pequenas partículas esféricas. Atualmente, partículas especialmente desenvolvidas para o uso em visualização de escoamentos, com boas características óticas e acurado controle de densidade e granulometria, encontram-se disponíveis no mercado, facilitando sobremaneira o trabalho dos pesquisadores que atuam na área.

Esta técnica de visualização de escoamentos foi empregada no presente trabalho para verificar a qualidade de um jato livre, utilizado na calibração das sondas de filme quente. Antes da realização dos ensaios, foram testados dois tipos de partículas especiais. As primeiras, conhecidas comercialmente como *Optimage NB seeding powder*, apresentam diâmetro de aproximadamente 30 μm e densidade específica igual a 1,0 ± 0,02 e foram desenvolvidas para aplicação em ensaios de velocimetria por imagem de partículas e anemometria laser Doppler. As segundas, conhecidas como *Pliolite* – nome comercial do poliviniltolueno butadieno – são fabricadas pela *Goodyear*. Estas partículas possuem densidade igual a 1,026 $g.cm^{-3}$, apresentam boa reflexividade e dimensão característica da ordem de 100 μm. Embora também apresentem maior

dispersão granulométrica, estas partículas foram escolhidas para a realização destes ensaios de visualização por apresentarem custo significativamente menor e mostrarem-se absolutamente adequadas para este tipo de aplicação.

A Figura 4.8 apresenta uma imagem da visualização do jato livre, obtida durante os ensaios realizados, para um número de Reynolds, baseado no diâmetro do bocal, igual a 1920.

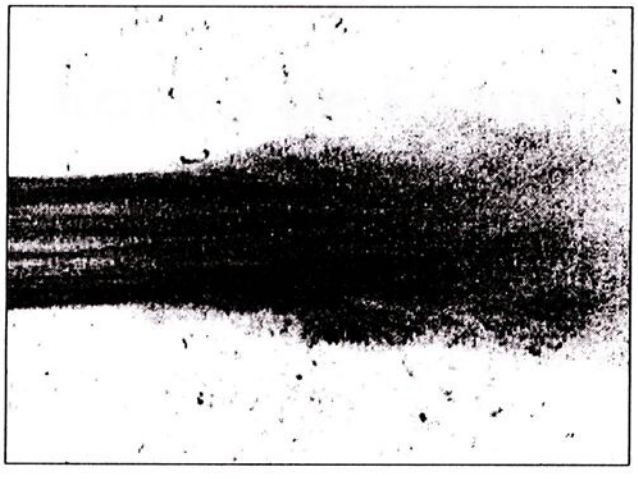


Figura 4.8 – Visualização de um jato livre utilizando partículas sólidas.

BCpIS - FEIS - UNESP

Capítulo 5

Razão de Forma

5.1 Introdução

A forma geométrica da seção transversal de um cilindro retangular pode influenciar fortemente o padrão de geração e emissão de vórtices na sua esteira, alterando sobremaneira as características do escoamento ao seu redor. No caso do trocador de calor compacto da Figura 1.3, por exemplo, as proporções da seção retangular mantêm estrita relação com desempenho térmico e hidráulico do equipamento.

Seja um corpo cilíndrico com seção transversal retangular, imerso perpendicularmente num escoamento com velocidade constante e uniforme, conforme ilustra a Figura 5.1.

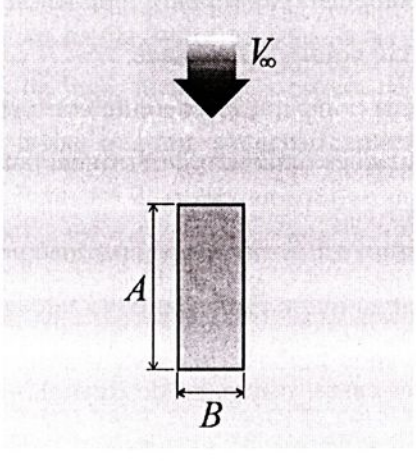


Figura 5.1 – Cilindro retangular imerso perpendicularmente no escoamento.

unesp

O escoamento ao redor de um cilindro retangular é caracterizado pela sua razão de forma, definida como

$$\phi = \frac{A}{B} \tag{5.1}$$

onde A é a dimensão da altura e B é a dimensão da base da seção transversal retangular do cilindro. Neste trabalho, foram estudados apenas casos em que $A \geq B$, ou seja, $\phi \geq 1$.

O número de Reynolds do escoamento pode ser definido como

$$Re = \frac{V_\infty B}{\nu} \tag{5.2}$$

onde V_∞ é velocidade da corrente livre não perturbada e ν é a viscosidade cinemática do fluido.

Para números de Reynolds acima de um determinado valor crítico, vórtices são emitidos alternadamente de ambos os lados do corpo, e são convectados ao longo da esteira que se forma a jusante do cilindro. A freqüência de emissão dos vórtices f é dada, na forma adimensional, pelo número de Strouhal, definido por

$$St = \frac{f B}{V_\infty} \tag{5.3}$$

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, mas tente 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 - neste caso, a dimensão B da base do perfil retangular. No entanto, a dimensão A da altura da seção retangular também é utilizada freqüentemente com esta finalidade.

Assim, para permitir uma comparação coerente entre resultados obtidos para diferentes razões de forma, em algumas situações o número de Strouhal também será calculado com base na dimensão A, segundo a expressão

$$St_A = \frac{f A}{V_\infty} \tag{5.4}$$

Vale ressaltar que, mesmo nestes casos, o número de Reynolds será sempre calculado com base na dimensão B.

unesp

5.2 Revisão Bibliográfica

Okajima (1982) empreendeu uma investigação experimental e numérica sobre o escoamento ao redor de cilindros com seção transversal retangular. Seu objetivo era determinar o comportamento do número de Strouhal para diversos cilindros retangulares, em função do número de Reynolds, bem como examinar a distribuição de velocidade e a estrutura do escoamento ao redor destes cilindros.

Parte de seus experimentos foram conduzidos num pequeno túnel aerodinâmico e num canal de água, de forma a abranger uma faixa do número de Reynolds relativamente ampla, de 70 a 2×10^4. Durante os ensaios, foram utilizados diversos modelos cilíndricos retangulares, com razão de forma variando entre 1 e 4. A freqüência de emissão dos vórtices foi determinada através de uma sonda de fio quente posicionada na esteira turbilhonar, cujo sinal foi processado por um analisador de freqüências. Os ensaios com números de Reynolds abaixo de 300 foram conduzidos num canal de água, no qual, além da anemometria, foram realizados ensaios de visualização, utilizando-se partículas de alumínio e precipitação eletrolítica. Algumas simulações numéricas para baixos números de Reynolds também foram realizadas, para $\phi = 1$ e 2.

Os resultados apresentados mostram que existe uma faixa crítica do número de Reynolds para cilindros com $\phi = 2$ e 3, em que o padrão do escoamento se altera abruptamente, causando uma repentina descontinuidade no relacionamento entre o números de Strouhal e de Reynolds. Estas mudanças puderam ser confirmadas através de medições de velocidade na esteira, e de visualizações do escoamento próximo ao cilindro. Segundo o autor, quando o número de Reynolds é inferior a esta faixa crítica, observa-se que o escoamento se descola nas arestas de ataque do cilindro, em seguida se recola sobre as suas faces laterais, para então se descolar definitivamente sobre as arestas de fuga, formando a esteira de von Kármán. Para números de Reynolds situados além desta faixa, o autor observou fenômenos distintos, que dependem fortemente da razão de forma. Para $\phi = 2$, o escoamento se descola completamente do corpo sobre suas arestas de ataque, enquanto que para $\phi = 3$, as camadas cisalhantes, descoladas nas arestas de ataque tendem a se recolar alternadamente sobre as faces laterais do cilindro, durante cada período de emissão dos vórtices. Para os cilindros com $\phi = 1$ e 4, a curva de Strouhal mostrou-se contínua, tendendo a um valor praticamente constante para números de Reynolds mais elevados.

unesp

Davis *et al.* (1984) realizaram um estudo numérico e experimental do escoamento confinado ao redor de cilindros retangulares para números de Reynolds inferiores a 3×10^3. Em particular, os autores investigaram os efeitos da variação do perfil de velocidade da corrente livre, da razão de bloqueio e da razão de forma dos cilindros retangulares.

A análise numérica do problema foi conduzida de maneira semelhante àquela de Davis & Moore (1982), com alguns aperfeiçoamentos no código computacional utilizado. A parte experimental da investigação, por sua vez, foi realizada num túnel aerodinâmico de baixa velocidade, utilizando-se apenas um cilindro com seção transversal quadrada. O número de Strouhal foi determinado por meio de uma sonda de fio quente, enquanto que imagens da esteira de vórtices formada à jusante do cilindro foram obtidas com o auxílio da visualização do escoamento, por injeção de fumaça. Neste trabalho, os autores não realizaram um estudo abrangente da influência da razão de forma sobre os parâmetros do escoamento em estudo, tal como o número de Strouhal.

Numa investigação mais recente, Okajima (1990) realizou um estudo numérico deste problema, utilizando os métodos das diferenças finitas e dos vórtices discretos, para simular o escoamento ao redor de cilindros retangulares com razão de forma variando entre 0,6 e 8, para números de Reynolds situados na faixa de 150 a 800. Os resultados obtidos pelo método das diferenças finitas indicaram a existência de uma faixa crítica de números de Reynolds em que a curva de Strouhal apresenta uma descontinuidade, acompanhada de uma nítida mudança no padrão do escoamento. Para números de Reynolds mais elevados, o autor utilizou o método dos vórtices para simular o escoamento ao redor de cilindros de base retangular com diferentes razões de forma entre 0,6 e 8, verificando que o valor do número de Strouhal varia subitamente quando a razão de aspecto do modelo atinge valores iguais a 2,8 ou 6. Os resultados obtidos das simulações numéricas, tais como o padrão do escoamento, a força de arrasto e o número de Strouhal, apresentaram uma concordância razoável com os resultados experimentais.

Nakamura *et al.* (1991) investigaram experimentalmente o fenômeno de emissão de vórtices de cilindros retangulares com razão de forma entre 3 e 16, para números de Reynolds situados na faixa de $(1–3)\times10^3$. Os ensaios, conduzidos em túneis aerodinâmicos, consistiram na medição da freqüência de emissão dos vórtices, através da anemometria de fio quente, e na visualização do escoamento, utilizando fumaça como traçador.

Seus resultados indicam que o fenômeno de emissão de vórtices de cilindros com base retangular é caracterizado pela instabilidade da camada cisalhante impingente, quando uma única

unesp

camada cisalhante descolada torna-se instável na presença de uma quina viva na aresta de fuga do cilindro. Segundo os autores, esta instabilidade tem início com uma razão de forma da ordem de 3, quando o comprimento de onda da emissão de vórtices é aproximadamente igual à corda (A) do cilindro. À medida em que a razão de forma aumenta, o comprimento de onda permanece igual à corda do cilindro, até que um certo limite seja atingido. Neste ponto, ocorre uma transição para um outro modo de emissão de vórtices, em que o comprimento de onda adquire o valor de um submúltiplo do original (1/2, 1/3, 1/4, etc., nesta ordem), e assim por diante. A curva do número de Strouhal (baseado na corda A do modelo) em função da razão de forma adquire então o aspecto de uma escada, com degraus aproximadamente constantes e iguais a múltiplos inteiros de 0,6.

A partir do espectro de freqüências, obtido do sinal de velocidade adquirido na esteira dos cilindros, os autores observaram que, à medida em que o número de Reynolds aumenta, o pico dominante torna-se cada vez menos agudo. Para cilindros com $\phi > 12$ e $Re > 2\times10^3$, o espectro das flutuações da velocidade possui banda larga, sem um pico dominante. Segundo os autores, isto não quer dizer que a instabilidade da camada cisalhante impingente desaparece para elevados números de Reynolds, mas que ela é mascarada pelas flutuações turbulentas inerentes ao escoamento.

Ohya *et al.* (1992) realizaram um estudo numérico do escoamento ao redor de cilindros retangulares com razão de forma entre 3 e 9, para número de Reynolds igual a 10^3. As equações de Navier-Stokes bidimensionais e transientes foram resolvidas em coordenadas generalizadas, pelo método das diferenças finitas, utilizando um método *upwind* de terceira ordem para os termos convectivos.

Os resultados mostraram que o escoamento ao redor de cilindros retangulares é caracterizado pelo descolamento e recolamento da camada cisalhante sobre suas superfícies laterais. As camadas cisalhantes se descolam nas arestas de ataque do cilindro e recolam sobre suas superfícies laterais, formando uma bolha de separação de cada lado do cilindro. Esta bolha oscila em comprimento, com uma freqüência regular e igual àquela observada na emissão dos vórtices. Quando o seu comprimento atinge uma dada dimensão, a bolha se divide em duas: o segmento anterior começa a crescer novamente, enquanto que o posterior é convectado ao longo da superfície lateral do cilindro retangular, na forma de um vórtice discreto.

Interessantemente, somente um vórtice (a bolha de separação) é formado sobre a superfície lateral do cilindro com $\phi = 3$, ou seja, o espaçamento entre os vórtices sobre a

superfície lateral é igual ao comprimento A. De forma semelhante, dois vórtices são formados sobre a superfície lateral do cilindro com $\phi = 6$, e três vórtices para cilindros com $\phi = 9$. A curva de Strouhal, baseada no comprimento A da seção retangular, possui a forma de uma escada, com degraus aproximadamente constantes, em concordância com resultados experimentais obtidos anteriormente (Nakamura *et al.*, 1991).

Norberg (1993) realizou uma investigação experimental sobre o escoamento ao redor de cilindros retangulares com razão de forma entre 1 e 5, para números de Reynolds entre 400 e 3×10^4 e ângulos de incidência entre 0° e 90°. Os ensaios foram conduzidos num túnel aerodinâmico em circuito fechado. A intensidade turbulenta da corrente livre foi verificada ser inferior a 0,06%, o bloqueio do escoamento inferior a 5% e a razão de aspecto dos cilindros superior a 50. A freqüência de emissão dos vórtices foi determinada com o auxílio de uma sonda de fio quente posicionada na esteira turbilhonar do cilindro. Dentro de certas faixas do número de Reynolds, para pequenos ângulos de incidência, foram detectadas múltiplas freqüências na esteira turbilhonar, para $\phi = 2$ e 3.

Os resultados apresentados para ângulo de incidência nulo apresentam uma boa concordância com os resultados de Okajima (1982), embora em algumas faixas do número de Reynolds, o número de Strouhal se mostre um tanto quanto diferente. Segundo o autor, a razão para isso pode ser atribuída a diferenças no arranjo experimental.

Nakamura *et al.* (1996) conduziram uma investigação experimental e numérica sobre a emissão de vórtices de corpos cilíndricos com seção transversal retangular, para números de Reynolds situados entre 200 e 10^3, complementando o trabalho anterior (Nakamura *et al.*, 1991). Os experimentos foram conduzidos num túnel aerodinâmico de baixa velocidade, e a análise numérica baseou-se no método das diferenças finitas, para resolver as equações de Navier-Stokes bidimensionais. A razão de forma foi variada entre 3 e 16 na análise experimental, e entre 3 e 10 na simulação numérica. Os resultados das duas abordagens, relativos ao número de Strouhal, apresentaram uma boa concordância entre si.

Uma sonda de fio quente colocada na esteira do cilindro possibilitou a medição das flutuações da velocidade. Os autores observaram que, para números de Reynolds da ordem de 200, o escoamento se descola nas arestas de ataque do cilindro e se recola novamente sobre suas faces laterais. Neste caso, a emissão dos vórtices se caracteriza pela esteira de von Kármán formada pelas duas camadas cisalhantes que se descolam novamente, desta vez das bordas de fuga do cilindro. Por outro lado, a emissão de vórtices para números de Reynolds mais elevados

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 12 13 14 15 16 17 18

caracteriza-se pela instabilidade da camada cisalhante impingente. O número de Reynolds em que ocorre a transição de um tipo de emissão de vórtices para outro foi determinado em aproximadamente 250 na análise experimental, e 350 na numérica.

Sohankar *et al.* (1997) investigaram numericamente o escoamento ao redor de cilindros retangulares com $\phi = 1$ a 4, para números de Reynolds inferiores a 200. Diversos parâmetros do escoamento foram calculados, tais como o número de Strouhal e os coeficientes de arrasto, de sustentação e de momento. São apresentadas, também, seqüências temporais de imagens do escoamento calculado, permitindo a visualização de um ciclo completo da emissão de vórtices.

Seus resultados, referentes à influência da razão de forma, indicam que, para $Re = 100$, o número de Strouhal diminui suavemente com o aumento da razão de forma, enquanto que, para $Re = 200$, o número de Strouhal aumenta de forma considerável para $A/B \cong 1{,}5$. Este fenômeno é explicado com base na visualização do escoamento ao redor dos cilindros retangulares, evidenciando as mudanças nos padrões de descolamento nas arestas dos cilindros, e o eventual recolamento sobre as suas superfícies laterais.

Lindquist *et al.* (1998b) apresentaram um estudo experimental sobre o fenômeno de emissão de vórtices ao redor de um cilindro com $\phi = 2$, posicionado transversalmente à corrente livre, com ângulo de ataque nulo e números de Reynolds inferiores a 10^3. Os ensaios foram conduzidos num túnel hidrodinâmico vertical, operado em modo *blow-down* pela ação da gravidade. Utilizando apenas a visualização de escoamentos em meio líquido como instrumento de análise, foi possível identificar, através de imagens captadas em película fotográfica, diferentes configurações do escoamento, em função do número de Reynolds. A determinação da freqüência de emissão dos vórtices foi obtida a partir da análise de imagens registradas em vídeo, por contagem de fotogramas. Os resultados qualitativos e quantitativos assim obtidos mostraram a ocorrência de uma alteração significativa no padrão do escoamento para números de Reynolds compreendidos entre 450 e 550, acompanhado de uma descontinuidade na curva Strouhal *versus* Reynolds.

Como pode-se constatar, a maioria dos trabalhos experimentais encontrados na literatura aberta apresentam resultados para números de Reynolds superiores a 10^3, devido à dificuldade de se obter um escoamento de boa qualidade num túnel aerodinâmico operando em baixas velocidades. Em geral, apenas as investigações numéricas apresentam resultados para números de Reynolds inferiores a 10^3, em função dos custos computacionais envolvidos na simulação de escoamentos complexos a números de Reynolds mais elevados. Entre as exceções, destaca-se o

unesp

trabalho de Nakamura *et al.* (1996), que apresenta resultados numéricos e experimentais para uma ampla gama da razão de forma e números de Reynolds inferiores a 10^3.

Uma outra deficiência encontrada nos trabalhos analisados refere-se à escassez de imagens obtidas através da visualização do escoamento ao redor de cilindros retangulares. A fim de contribuir para uma melhor compreensão do fenômeno de emissão de vórtices na esteira de cilindros retangulares, o presente trabalho associou a utilização de técnicas de anemometria de filme quente com a visualização do escoamento, para números de Reynolds inferiores a 10^3.

5.3 Metodologia Experimental

Os ensaios foram conduzidos no túnel hidrodinâmico vertical, operado em modo contínuo. A velocidade da corrente livre foi determinada com base na leitura da vazão, fornecida pelo medidor eletromagnético. A velocidade V_∞ foi calculada assumindo-se um perfil de velocidade uniforme no interior da seção de testes, ou seja,

$$V_\infty = \frac{Q}{A_{st}} \tag{5.5}$$

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

Na presente campanha experimental, foram utilizadas duas metodologias diferentes, objetivando a obtenção de informações quantitativas e qualitativas sobre o fenômeno de emissão dos vórtices na esteira de cilindros retangulares. Para a determinação da freqüência de emissão dos vórtices, utilizou-se a técnica de anemometria de filme quente, enquanto que para a obtenção de imagens do escoamento investigado, foram utilizadas técnicas de visualização de escoamentos. A seguir são descritos os procedimentos utilizados em cada uma destas metodologias de ensaio.

5.3.1 Anemometria de Filme Quente

Nestes ensaios, foram empregados 8 modelos cilíndricos, com razão de forma variando entre 1 e 16. Os modelos utilizados durante a condução dos ensaios de anemometria pertencem à Série "A", cujas principais características podem ser encontradas na Tabela 5.1. Estes modelos

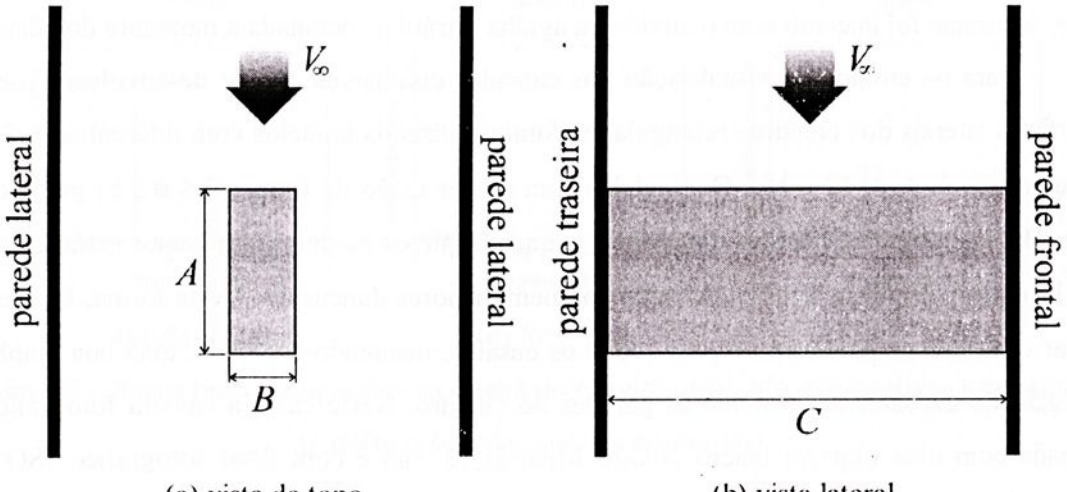
unesp

possuem mesma dimensão da base B e mesmo comprimento C, de maneira que a razão de aspecto dos cilindros e a razão de bloqueio do escoamento permaneceram constantes e iguais a 48 e 2,5%, respectivamente.

Tabela 5.1 – Características geométricas dos corpos cilíndricos da Série "A".

Modelo	A (mm)	B (mm)	$\phi = A/B$	ϕ nominal
A1	3,16	3,03	1,04	1
A2	5,99	3,01	1,99	2
A3	8,95	3,02	2,97	3
A4	12,14	3,01	4,03	4
A5	18,18	3,04	5,99	6
A6	24,26	3,02	8,04	8
A7	36,29	3,01	12,06	12
A8	48,36	3,00	16,10	16

Os modelos foram firmemente engastados na janela posterior da seção de testes, com ângulo de incidência nulo ajustado com o auxílio de um esquadro. A Figura 5.2 ilustra a montagem experimental utilizada.



(a) vista de topo (b) vista lateral

Figura 5.2 – Montagem dos modelos cilíndricos no interior da seção de testes (fora de escala).

A sonda de filme quente foi instalada num suporte em forma de cotovelo introduzido na seção de testes através da estação 6 da janela lateral. A sonda de temperatura do anemômetro foi introduzida na seção de testes através da estação 8. A sonda de filme quente foi deslocada na direção transversal da seção de testes com o auxílio de um dispositivo posicionador, e foi localizada na esteira do cilindro. A distância entre o elemento sensor da sonda e a linha de centro da seção de testes foi escolhida após uma etapa de coleta preliminar de dados, de maneira a garantir um sinal com amplitude e forma adequados.

O sinal temporal da velocidade na esteira de vórtices, fornecido pelo anemômetro, foi adquirido a uma taxa de 100 Hz e registrado em cinco blocos com 4096 pontos cada. A freqüência de emissão dos vórtices foi determinada com base na análise espectral dos sinais adquiridos, de acordo com os procedimentos descritos na seção 3.4.

5.3.2 Visualização do Escoamento

A fim de tornar o escoamento visível, foi utilizada a técnica de injeção de corantes líquidos, na modalidade *dye wash*. As imagens do escoamento foram registradas com uma câmara fotográfica Nikon F4. Nos ensaios de visualização da esteira de vórtices, a câmara fotográfica foi equipada com uma objetiva Nikkor Micro 60mm e com filme fotográfico ISO 100. Estes ensaios foram realizados paralelamente aos ensaios de anemometria, após a aquisição do sinal de velocidade na esteira. Para isso, a sonda de filme quente foi recolhida junto à janela lateral e, então, o corante foi injetado com o auxílio da agulha retrátil posicionada a montante do cilindro.

Para os ensaios de visualização das camadas cisalhantes que se desenvolvem sobre as superfícies laterais dos cilindros retangulares, foram utilizados modelos com diferentes razões de forma ($\phi = 2$, 3, 4, 8, 12 e 16). Os modelos com menor razão de forma ($2 \leq \phi \leq 8$) pertencem à Série "B", que possuem maiores dimensões, enquanto que os modelos com maior razão de forma ($\phi = 12$ e 16) pertencem à Série "A", que possuem menores dimensões. Desta forma, foi possível utilizar o mesmo enquadramento para todos os ensaios, mantendo-se, ainda, uma boa ampliação da região do escoamento próximo às paredes do cilindro. Neste caso, a câmara fotográfica foi equipada com uma objetiva macro Nikkor Medical 120mm e com filme fotográfico ISO 400. Estes ensaios foram realizados separadamente dos ensaios de visualização da esteira, em função da utilização de um outro arranjo do equipamento fotográfico, necessário para a obtenção de uma imagem ampliada da região próxima ao cilindro.

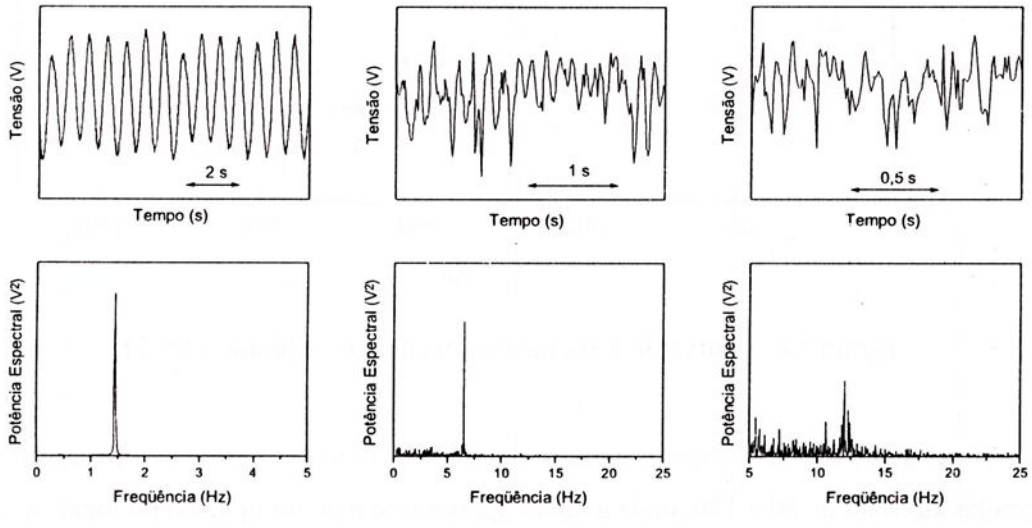
unesp

5.4 Resultados e Discussão

A seguir são apresentados os resultados obtidos nesta etapa do trabalho. Para cada caso investigado é apresentada uma amostra dos sinais de velocidade, com seus respectivos espectros de freqüência, a curva de Strouhal *versus* Reynolds, além de imagens da esteira formada a jusante dos cilindros. Em seguida à exposição dos resultados relativos a cada cilindro retangular investigado, os resultados são comparados entre si, evidenciando a influência da razão de forma sobre o escoamento ao redor de cilindros retangulares.

5.4.1 Cilindro Quadrado (ϕ = 1)

A Figura 5.3 apresenta exemplos típicos do sinal adquirido na esteira do cilindro quadrado, bem como suas respectivas distribuições de potência espectral, para diferentes números de Reynolds.



(a) Re = 100 (b) Re = 500 (c) Re = 1000

Figura 5.3 – Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro quadrado e respectivos espectros de freqüência (escalas lineares arbitrárias).

Como pode ser observado, o sinal apresenta um comportamento senoidal para números de Reynolds mais baixos, resultando num pico agudo na distribuição de potência espectral

calculada. Para números de Reynolds mais elevados, o sinal da velocidade começa a apresentar irregularidades e o pico observado no espectro de freqüências apresenta uma banda um pouco mais larga. Não obstante, a freqüência de emissão dos vórtices pode ser determinada para toda a faixa de números de Reynolds investigada.

A Figura 5.4 apresenta o comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds, para um cilindro de base quadrada. Nesta figura e nas subseqüentes, a linha contínua (uma *β-spline*) que percorre os pontos experimentais obtidos foi acrescentada apenas para realçar a tendência observada.

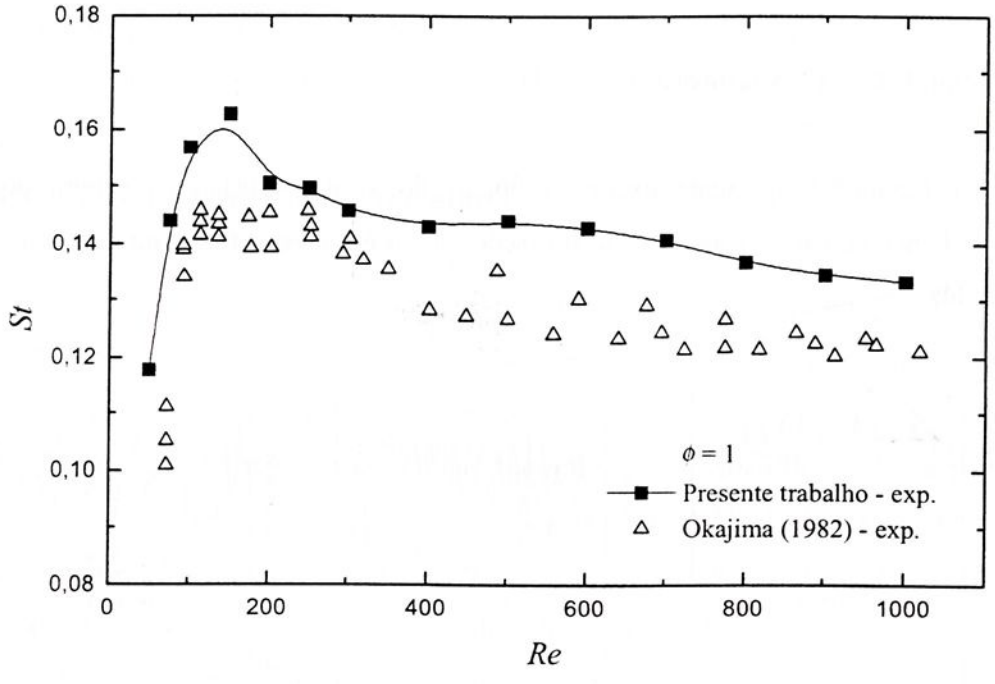


Figura 5.4 – Curva de Strouhal de um cilindro quadrado ($\phi = 1$).

Neste caso, verifica-se que o número de Strouhal cresce rapidamente quando o número de Reynolds aumenta de 50 a 150, onde a curva apresenta um ponto de máximo local. A partir de então, o número de Strouhal diminui de forma suave à medida em que o número de Reynolds aumenta até 1000. Comparando-se os resultados obtidos com os de Okajima (1982), nota-se que estes últimos apresentam valores do número de Strouhal sistematicamente mais baixos, mesmo considerando as incertezas experimentais inerentes aos resultados. Entre os fatores que podem ter levado a esta diferença, encontram-se as peculiaridades de cada uma das montagens experimentais

utilizadas, que envolvem razões de bloqueio e de aspecto distintas, assim como diferentes níveis de intensidade turbulenta residual das instalações utilizadas.

A Figura 5.5 apresenta algumas imagens da esteira formada a jusante do cilindro quadrado, para números de Reynolds relativamente baixos. Para $Re = 40$, verifica-se a formação de duas bolhas de recirculação simétricas junto à base do cilindro, seguidas de uma esteira estável e linear a jusante. Aumentando-se gradualmente o número de Reynolds, observa-se o surgimento das primeiras instabilidades para $Re = 42$, na forma de pequenas oscilações sinusoidais na esteira do cilindro. À medida em que o número de Reynolds aumenta, as bolhas de recirculação tornam-se assimétricas e instáveis, e as oscilações observadas na esteira são amplificadas. Quando o número de Reynolds atinge valores próximos a 50, pode-se observar o início da formação de vórtices alternados que já se desprendem de ambos os lados do cilindro, ainda que de forma incipiente. Este resultado concorda com os resultados de Sohankar *et al.* (1997), segundo os quais, o início do processo de formação de vórtices na esteira de um cilindro quadrado ocorre para $Re = 47 \pm 2$.

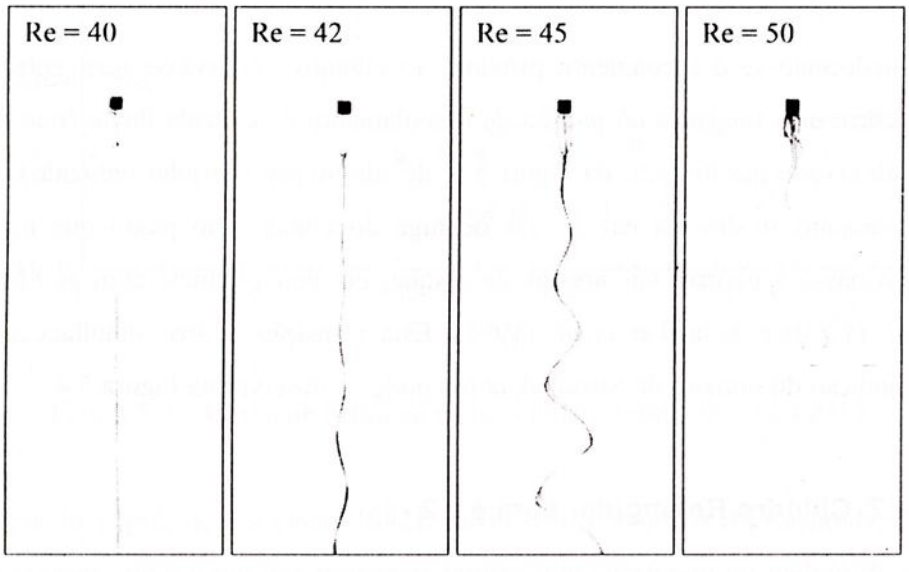


Figura 5.5 – Regimes do escoamento até o início da emissão de vórtices.

A Figura 5.6 apresenta imagens da esteira de vórtices formada a jusante do cilindro quadrado, para números de Reynolds um pouco mais elevados. Neste caso, observa-se que a esteira de von Kármán encontra-se completamente estabelecida para $Re = 100$, apresentando vórtices alternados regularmente espaçados. À medida em que aumenta o número de Reynolds,

verifica-se o surgimento de irregularidades no espaçamento dos vórtices na esteira, como é evidente nas imagens da Figura 5.6 para $Re = 300$ e 400.

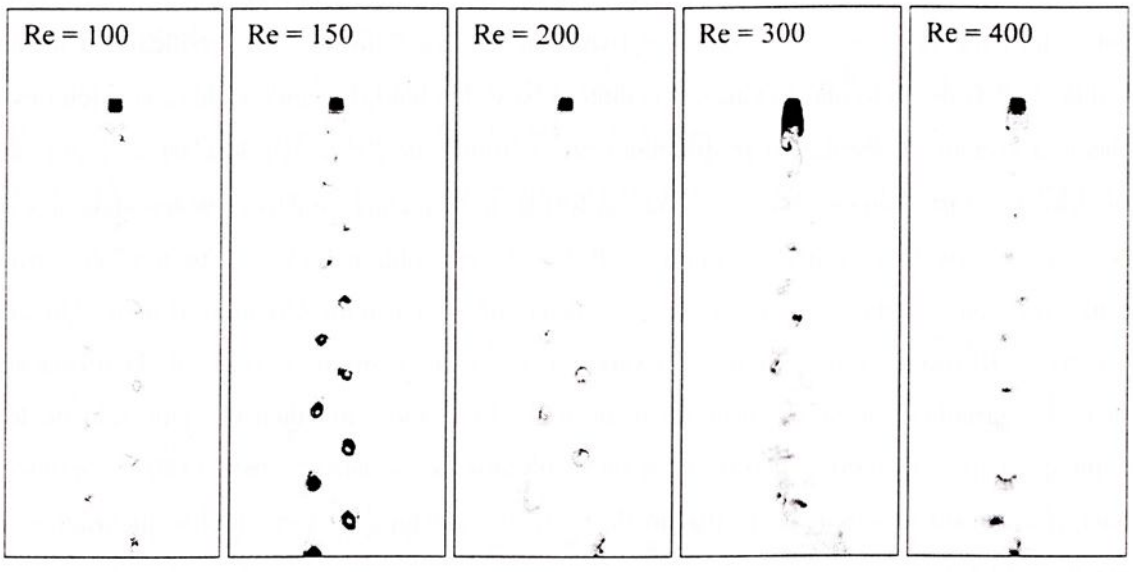


Figura 5.6 – Regimes da esteira de von Kármán de um cilindro quadrado.

Visualizando-se o escoamento próximo ao cilindro, observa-se que, entre $Re = 150$ e $Re = 200$, ocorre uma mudança no padrão de descolamento da camada limite (que não pode ser claramente observado nas imagens da Figura 5.6, devido ao seu tamanho reduzido). No primeiro caso, o escoamento se descola nas arestas de fuga do cilindro, ao passo que no segundo, o descolamento passa a ocorrer nas arestas de ataque, em concordância com as observações de Franke *et al.* (1990) e Sohankar *et al.* (1997). Esta transição ocorre simultaneamente a uma sensível diminuição do número de Strouhal, como pode-se observar na Figura 5.4.

5.4.2 Cilindro Retangular com $\phi = 2$

Os sinais adquiridos na esteira do cilindro retangular com $\phi = 2$, bem como suas respectivas distribuições de potência espectral, são semelhantes àqueles apresentados para o cilindro quadrado, exceto para uma determinada faixa do número de Reynolds, que será vista em mais detalhes ainda nesta seção.

A Figura 5.7 apresenta o comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds, para um cilindro retangular com $\phi = 2$. Neste caso, observa-se que a curva de Strouhal exibe uma descontinuidade, quando o número de Reynolds atinge valores próximos a 400. Comparando-se os dados obtidos no presente trabalho com os de Okajima (1982), observa-se que existe uma diferença quanto à faixa de números de Reynolds em que esta descontinuidade ocorre. Uma possível explicação para este fato está nas diferenças da montagem experimental (razão de bloqueio, razão de aspecto e condições de extremidade), e o nível de turbulência da corrente livre.

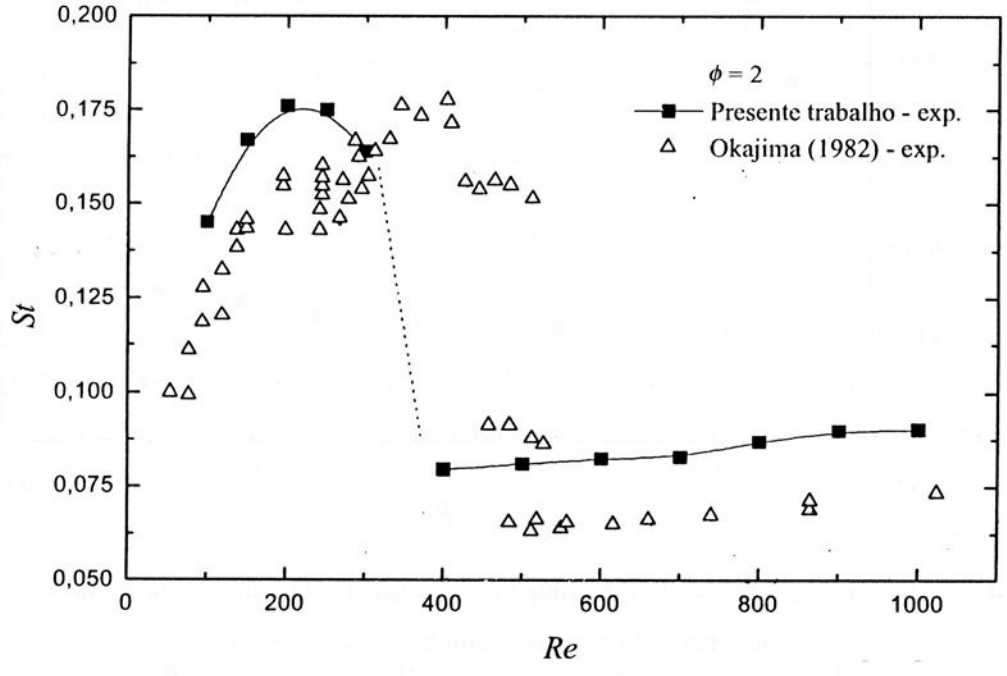


Figura 5.7 – Curva de Strouhal de um cilindro retangular com $\phi = 2$.

Segundo o próprio Okajima (1982), assim com o número de Reynolds, a turbulência residual da corrente livre é um dos principais fatores que interferem no padrão do escoamento, exercendo uma forte influência sobre o descolamento e o recolamento da camada limite sobre o cilindro. A fim de corroborar a hipótese de que a intensidade turbulenta é um dos principais fatores que provocaram a antecipação da descontinuidade na curva de Strouhal, parte dos ensaios de anemometria foi refeita com o túnel operando em modo *blow-down*.

A Figura 5.8 possibilita a comparação entre os resultados obtidos com os dois modos de operação do túnel, que introduzem diferentes níveis de turbulência na corrente livre. Como pode-se constatar, a descontinuidade na curva de Strouhal é retardada quando o túnel é operado em modo *blow-down* (com menores níveis de intensidade turbulenta), em relação à descontinuidade verificada quando o túnel é operado em regime contínuo (com maiores níveis de intensidade turbulenta).

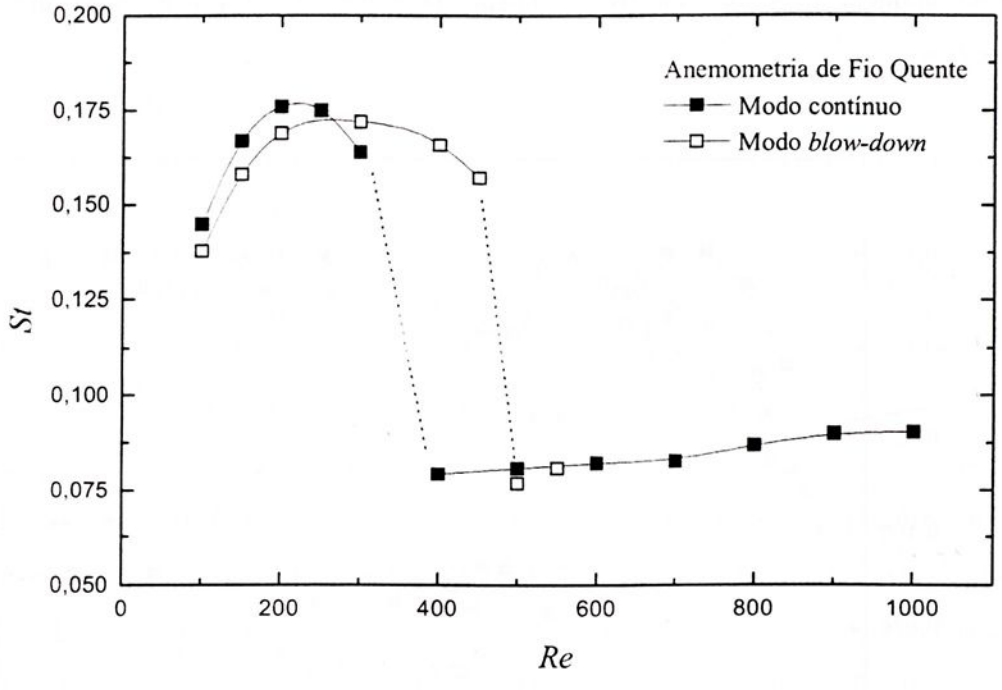


Figura 5.8 – Comparação entre os resultados obtidos com a anemometria de fio quente, com o túnel operando em modo contínuo ou *blow-down*.

Para explicar o mecanismo envolvido nesta descontinuidade, os espectros de freqüência da velocidade são apresentados na Figura 5.9, para números de Reynolds entre 300 e 600, com o túnel operando em modo *blow-down*. Para $Re = 300$, observa-se um único pico na distribuição de potência espectral calculada a partir do sinal de velocidade adquirido no interior da esteira de vórtices. Já para $Re = 400$, identifica-se o surgimento de um pequeno pico secundário, com aproximadamente a metade da freqüência do pico principal. Aumentando-se o número de Reynolds, este pico, que representa um novo modo de emissão dos vórtices, ganha energia, até se tornar mais importante do que o próprio pico original. A partir de então, com aumentos subsequentes do número de Reynolds, o pico original tende a desaparecer de forma gradual.

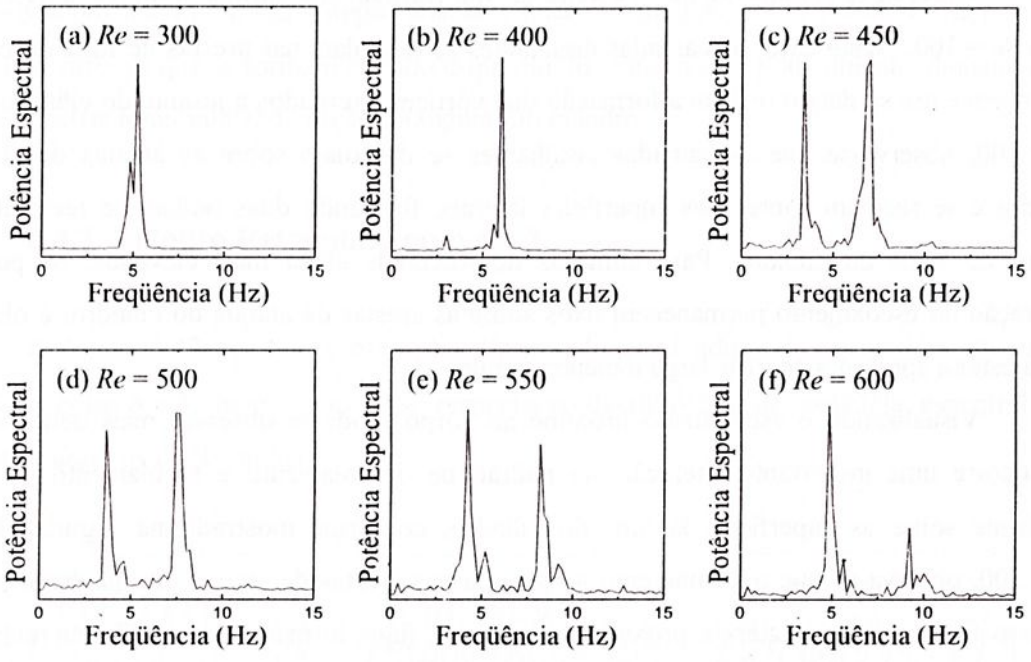


Figura 5.9 – Espectros de freqüência na faixa de descontinuidade, obtidos em modo *blow-down*.

A visualização de escoamentos apresenta-se, neste contexto, como uma ferramenta adicional para auxiliar na compreensão deste fenômeno. A Figura 5.10 apresenta imagens da esteira de vórtices formada a jusante do cilindro com $\phi = 2$, obtidas com o túnel operando em regime contínuo.

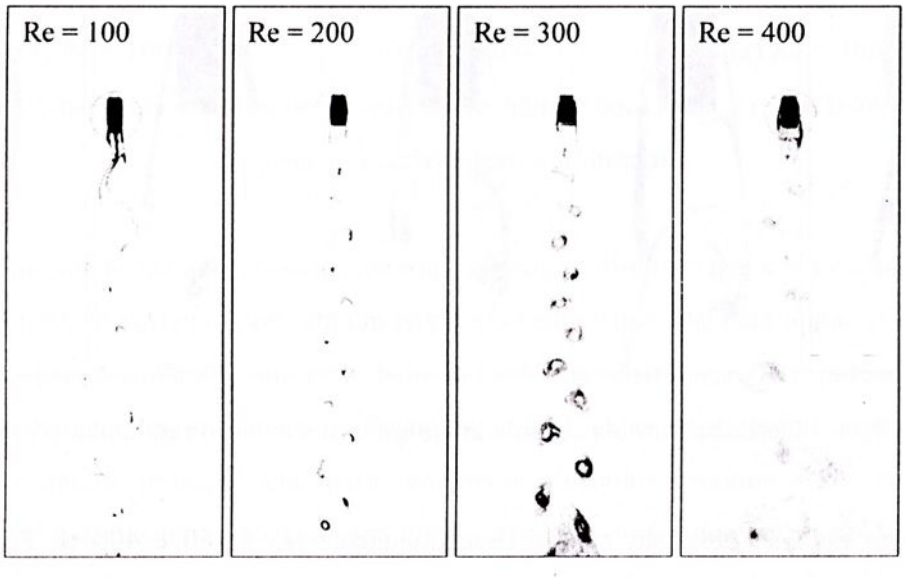


Figura 5.10 – Visualização da esteira de vórtices a jusante de um cilindro retangular com $\phi = 2$.

Observa-se claramente que a esteira de von Kármán encontra-se totalmente desenvolvida para $Re = 100$. Neste caso, as camadas cisalhantes se descolam nas arestas de fuga do cilindro e interagem entre si, dando origem à formação dos vórtices alternados a jusante do cilindro. Já para $Re = 200$, observa-se que as camadas cisalhantes se descolam sobre as arestas de ataque do cilindro e se recolam sobre suas superfícies laterais, formando duas bolhas de recirculação de ambos os lados do cilindro. Para números de Reynolds ainda mais elevados, os pontos de separação do escoamento permanecem fixos sobre as arestas de ataque do cilindro, e observa-se que a esteira apresenta-se mais larga e menos regular.

Visualizando o escoamento próximo ao corpo, pode-se observar mais detalhadamente que ocorre uma importante alteração no padrão de descolamento e recolamento da camada cisalhante sobre as superfícies laterais do cilindro, conforme mostrado na Figura 5.11. Para $Re = 200$, observa-se que o escoamento se descola nas arestas de ataque do cilindro e se recola sobre as suas superfícies laterais, próximo às arestas de fuga, formando uma bolha de recirculação de cada lado do cilindro. Aumentando-se o número de Reynolds para 250, o recolamento sobre as superfícies laterais não é mais possível, e o escoamento se descola definitivamente do corpo em suas bordas de ataque. A partir de então, à medida em que o número de Reynolds aumenta, a esteira que se forma a jusante do cilindro torna-se cada vez mais larga, com vórtices maiores e menos regulares.

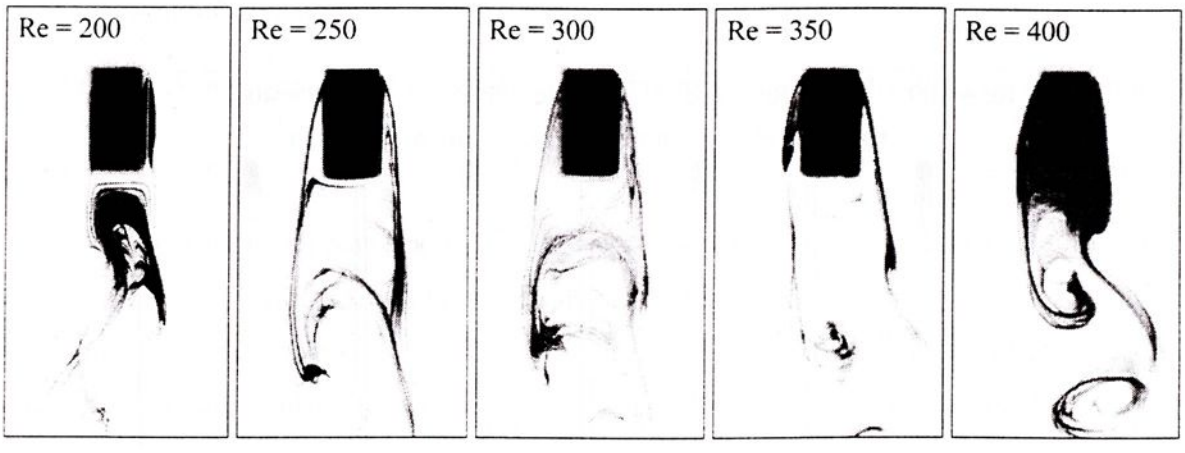


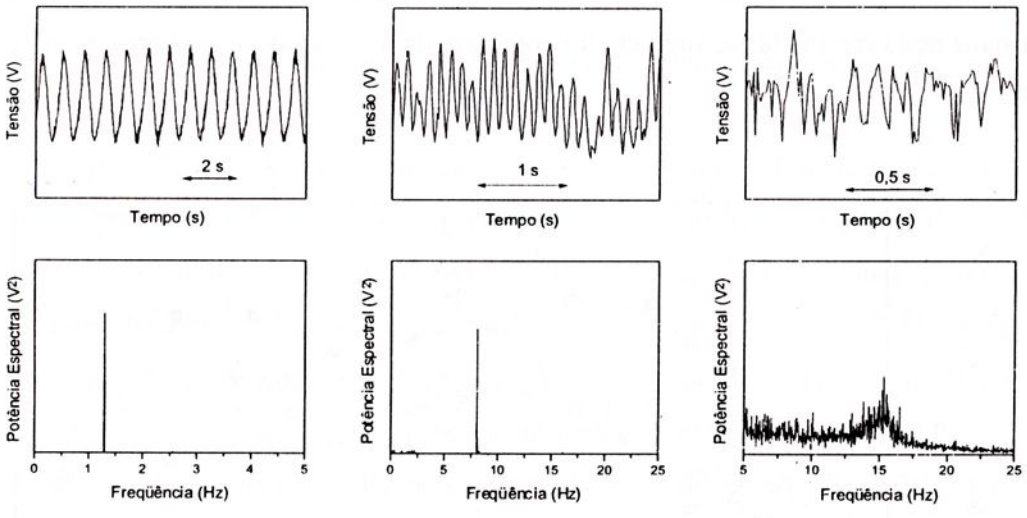
Figura 5.11 – Descolamento da camada limite sobre um cilindro retangular com $\phi = 2$.

Como pode-se observar, após a descontinuidade ($Re = 350$ e 400 na Figura 5.11) a esteira mostra-se nitidamente mais larga, e com a formação de vórtices maiores. Outra

característica distintiva é o seu comportamento oscilante - para $Re = 350$ e 400, verifica-se que o centro dos vórtices que se formam no lado esquerdo do cilindro está praticamente alinhado com o eixo de simetria longitudinal da seção retangular do cilindro.

5.4.3 Cilindro Retangular com $\phi = 3$

A Figura 5.12 apresenta exemplos típicos do sinal adquirido na esteira do cilindro retangular com $\phi = 3$, bem como suas respectivas distribuições de potência espectral, para diferentes números de Reynolds.



(a) $Re = 100$ (b) $Re = 500$ (c) $Re = 1000$

Figura 5.12 – Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro com $\phi = 3$ e respectivos espectros de freqüência (escalas lineares arbitrárias).

Da mesma forma que nos casos anteriores, pode-se observar que a velocidade medida no interior da esteira de vórtices apresenta um comportamento sinusoidal para números de Reynolds mais baixos, proporcionando um pico bem definido na distribuição de potência espectral calculada. Aumentando-se o número de Reynolds, o sinal adquirido apresenta modulações cada vez mais importantes, principalmente para números de Reynolds próximos a 10^3. Neste caso, o espectro de freqüências apresenta um pico menos agudo e com banda bem mais larga. Mesmo assim, a freqüência de emissão dos vórtices pôde ser determinada para toda a faixa de números de Reynolds investigada.

A Figura 5.13 apresenta o comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds, para um cilindro retangular com $\phi = 3$. Comparando-se os resultados, nota-se que os dados experimentais de Nakamura *et al.* (1996) apresentam boa concordância com os pontos obtidos no presente trabalho, enquanto que seus resultados numéricos aproximam-se melhor dos resultados experimentais de Okajima (1982).

Segundo Okajima, a curva de Strouhal de um cilindro retangular com $\phi = 3$ também possui uma descontinuidade, mais complexa do que a de um cilindro com $\phi = 2$, que tem início com números de Reynolds próximos a 10^3. Uma vez que este é o limite superior da faixa de números de Reynolds considerados no presente trabalho, esta descontinuidade não pôde ser verificada experimentalmente. Entretanto, o espectro de banda larga dos sinais obtidos para números de Reynolds mais elevados ($Re \geq 800$), assim como a elevada dispersão dos resultados de Okajima nesta mesma faixa, sugerem a ocorrência de um fenômeno de transição na esteira de von Kármán.

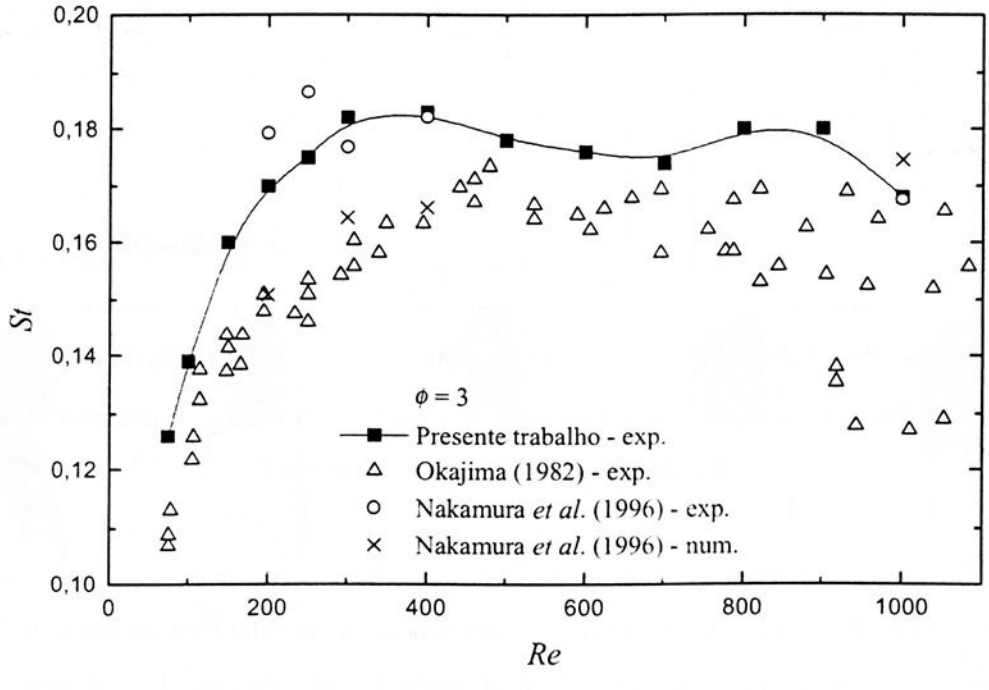


Figura 5.13 – Curva de Strouhal de um cilindro retangular com $\phi = 3$.

A Figura 5.14 apresenta imagens da esteira de vórtices formada a jusante do cilindro retangular com $\phi = 3$, obtidas com o auxílio da técnica de injeção de corantes líquidos.

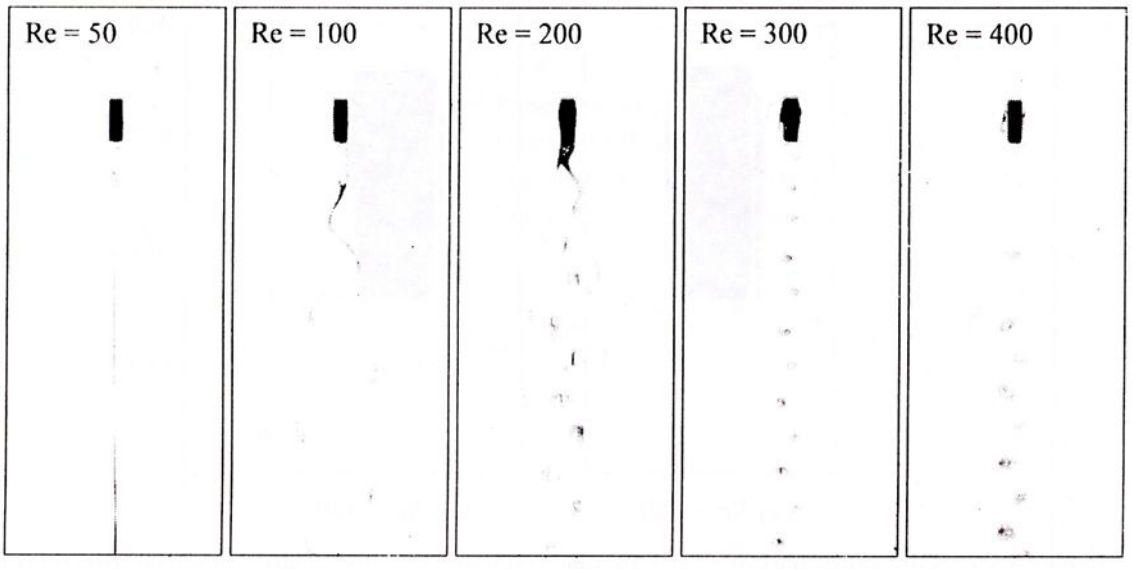


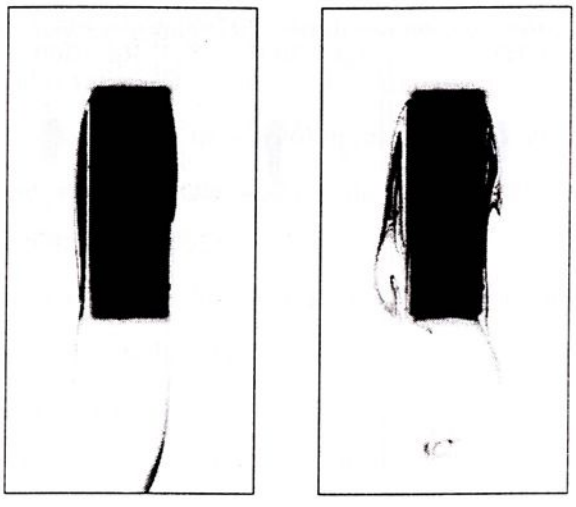
Figura 5.14 – Esteira de vórtices de um cilindro retangular com $\phi = 3$.

Para $Re = 50$, observa-se, novamente, que o escoamento se descola nas arestas de fuga do cilindro, ocorre a formação de duas bolhas de recirculação simétricas, seguidas de uma esteira simétrica e estável. Aumentando-se o número de Reynolds para 100, as bolhas de recirculação tornam-se assimétricas e oscilantes, e a esteira que se forma a jusante do corpo apresenta fortes oscilações, com a formação de vórtices emitidos alternadamente de ambos os lados do corpo. Para $Re = 200$, a esteira de von Kármán já se encontra plenamente estabelecida.

Numa faixa de números de Reynolds com valores situados entre 200 e 300, ocorre uma mudança significativa no padrão de formação de vórtices na esteira. Para $Re = 200$, a camada cisalhante se descola nas bordas de ataque e se recola sobre as superfícies laterais do cilindro, formando uma bolha de recirculação de cada lado do corpo. Em seguida, o escoamento se descola nas bordas de fuga, para só então iniciar o processo de formação de vórtices na esteira de von Kármán, a jusante do cilindro, conforme visto na Figura 5.15(a).

Para números de Reynolds mais elevados ($Re = 300$ e 400), também observa-se que, após o descolamento da camada cisalhante nas arestas de ataque, forma-se uma bolha de recirculação em cada uma de suas superfícies laterais. No entanto, estas bolhas não são estáveis, mas oscilam alternadamente e se fragmentam, formando vórtices discretos que são convectados ao longo da superfície lateral do cilindro e, por fim, são emitidos numa esteira de vórtices. A cada instante do ciclo de emissão dos vórtices, apenas um vórtice é formado sobre a superfície lateral do cilindro, conforme observa-se na Figura 5.15(b).

unesp



(a) $Re = 200$ (b) $Re = 400$

Figura 5.15 – Diferentes padrões das camadas cisalhantes sobre as superfícies laterais de um cilindro retangular com $\phi = 3$.

5.4.4 Cilindro Retangular com $\phi = 4$

Os sinais adquiridos na esteira do cilindro retangular com $\phi = 4$, bem como suas respectivas distribuições de potência espectral, são semelhantes àqueles já apresentados para o cilindro quadrado.

A Figura 5.16 apresenta o comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds, para um cilindro retangular com $\phi = 4$. É fácil observar que os resultados do presente trabalho concordam melhor com os de Nakamura *et al.* (1996) do que com os de Okajima (1982), que apresentam valores relativamente mais baixos. Para $Re = 250$, a curva de Strouhal obtida apresenta uma pequena descontinuidade, como também sugerem os dados de Nakamura *et al.* (1996). Este fenômeno parece estar relacionado a uma transição no modo de emissão dos vórtices para números de Reynolds em torno de 250, que ocorre para cilindros retangulares com $\phi \geq 3$. Esta mudança significativa no padrão do escoamento será analisada a seguir, quando os resultados obtidos para os diversos cilindros retangulares ensaiados forem comparados entre si.

unesp

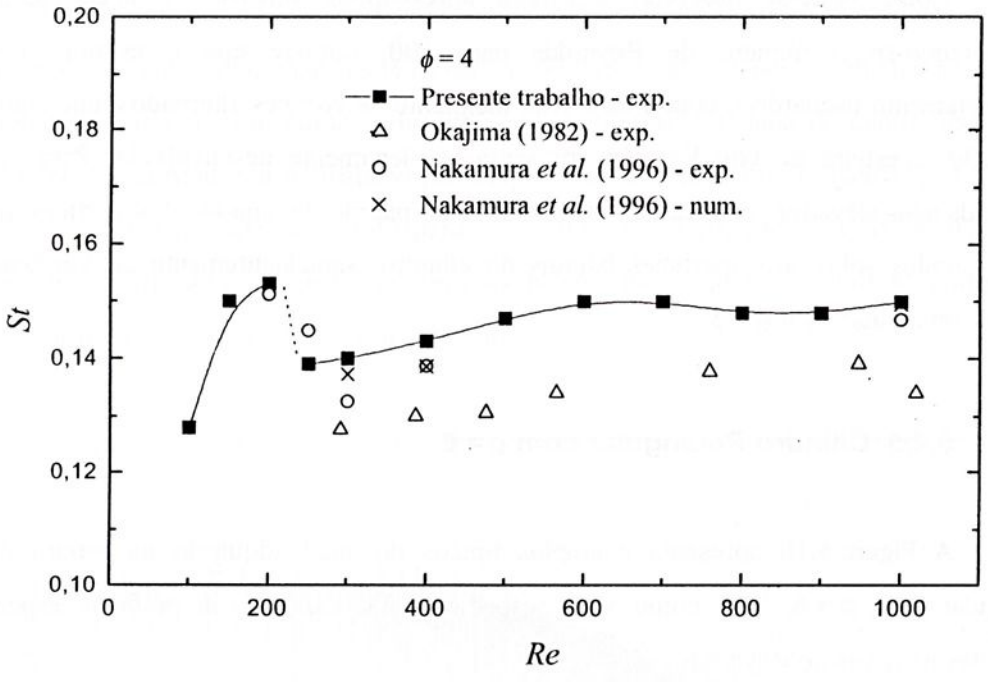


Figura 5.16 – Curva de Strouhal de um cilindro retangular com $\phi = 4$.

A Figura 5.17 apresenta imagens da esteira formada a jusante de um cilindro com $\phi = 4$.

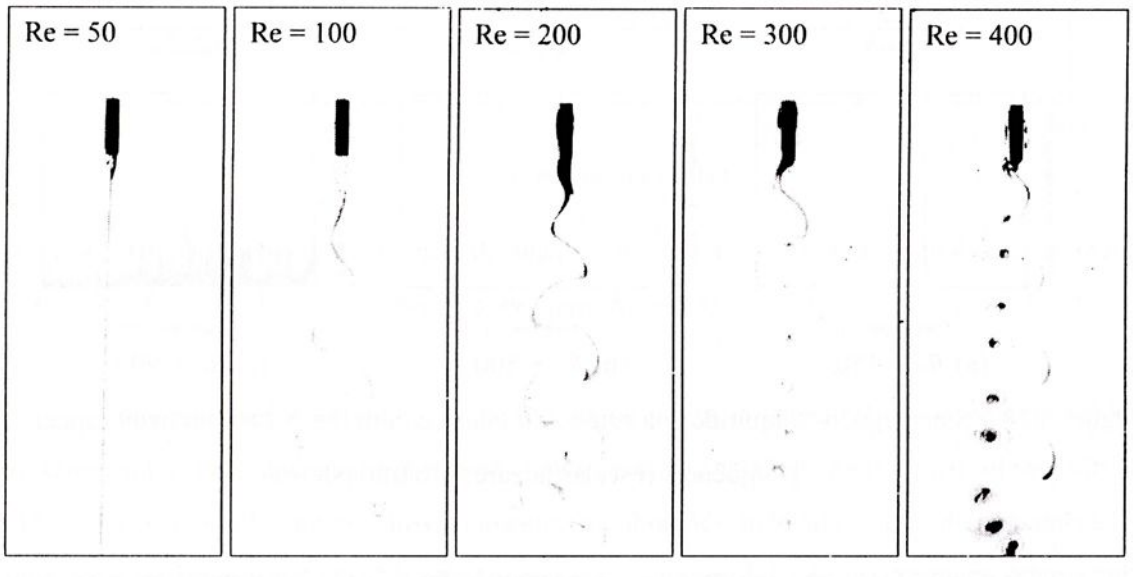
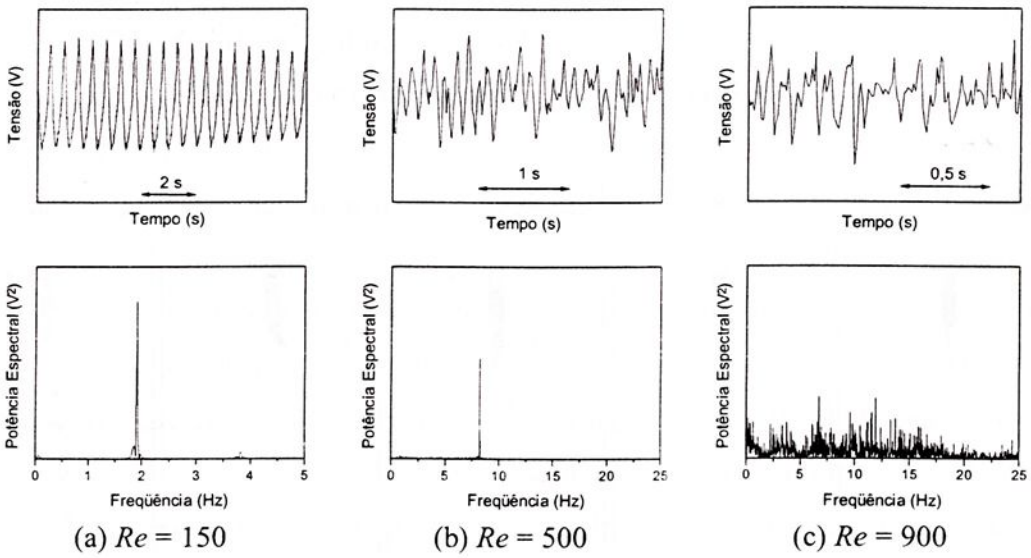


Figura 5.17 – Regimes da esteira de um cilindro retangular com $\phi = 4$.

Como pode-se observar, a esteira apresenta-se simétrica e linear para $Re = 50$. Aumentando-se o número de Reynolds para 100, nota-se que a esteira já exibe um comportamento oscilatório, com a formação incipiente de vórtices alternados, enquanto que para $Re = 200$, a esteira de von Kármán apresenta-se plenamente desenvolvida. Para números de Reynolds mais elevados, verifica-se uma mudança no padrão de emissão dos vórtices, que passam a ser gerados sobre as superfícies laterais do cilindro, semelhantemente ao verificado para o cilindro retangular com $\phi = 3$.

5.4.5 Cilindro Retangular com $\phi = 6$

A Figura 5.18 apresenta exemplos típicos do sinal adquirido na esteira do cilindro retangular com $\phi = 6$, bem como suas respectivas distribuições de potência espectral, para diferentes números de Reynolds.



(a) $Re = 150$ (b) $Re = 500$ (c) $Re = 900$

Figura 5.18 – Sinais típicos adquiridos na esteira do cilindro com $\phi = 6$ e respectivos espectros de freqüência (escalas lineares arbitrárias).

Da Figura 5.18, observa-se que o espectro de freqüências apresenta um pico agudo e bem definido para números de Reynolds baixos e moderados. Já para $Re \geq 900$, entretanto, o espectro calculado não apresenta um pico dominante, mas apenas uma larga banda de freqüências.

Após a verificação deste fenômeno, os ensaios para $Re \geq 900$ foram repetidos algumas vezes, a fim de se tentar identificar a sua causa. A distância entre a base do cilindro e a sonda de filme quente foi variada, bem como a distância entre a sonda e a linha de centro da seção de testes, mas nenhuma mudança na distribuição de potência espectral foi verificada. A Figura 5.19 apresenta o espectro do sinal adquirido para $Re = 900$, com a mesma posição relativa entre a sonda e o cilindro utilizada para os demais ensaios. Neste caso, o sinal foi adquirido a uma taxa de 1 kHz, e foi armazenado num bloco com 2^{15} pontos.

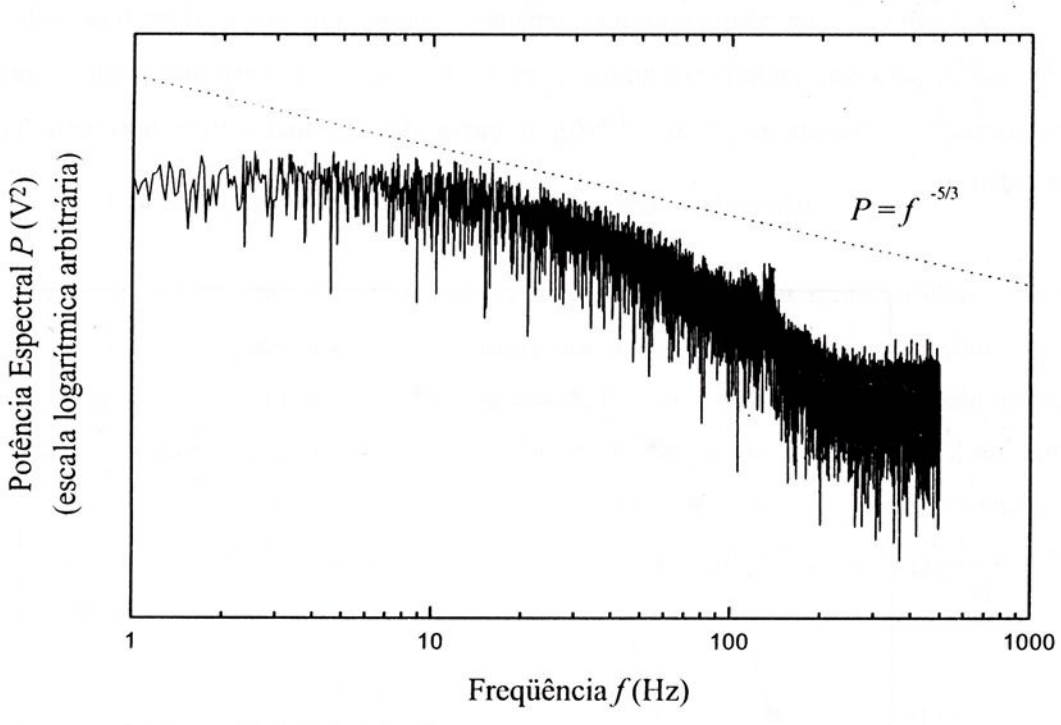


Figura 5.19 – Espectro de freqüência do sinal adquirido na esteira de um cilindro retangular com $\phi = 6$, para $Re = 900$.

Como pode ser observado, a distribuição de potência espectral não apresenta nenhum pico dominante, mas apenas uma rampa suave e sinuosa. O pequeno pico observado em $f \cong 120$ Hz corresponde, muito provavelmente, a vibrações induzidas pelo funcionamento da bomba que abastece o túnel. Para fins de comparação, a Figura 5.19 apresenta também uma curva (com aspecto linear devido à escala logarítmica) com a inclinação da zona inercial do espectro de energia cinética turbulenta de um escoamento a elevados números de Reynolds.

Embora existam indícios de que a esteira de vórtices já comece a se degenerar em turbulência tridimensional desenvolvida para $Re \geq 900$, esta hipótese ainda carece de comprovação. Devido ao número de Reynolds ser relativamente elevado, a visualização do escoamento não pôde auxiliar no esclarecimento desta questão. É interessante ressaltar que Nakamura *et al.* (1996) reportaram que um aumento no número de Reynolds de 300 para 10^3 resultou em crescentes modulações nos sinais obtidos com uma sonda de fio quente, particularmente para cilindros com maior razão de forma, embora o espectro calculado ainda apresentasse picos detectáveis.

A Figura 5.20 apresenta o comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds, para um cilindro retangular com $\phi = 6$. Quando comparados com os resultados experimentais de Nakamura *et al.* (1996), a curva de Strouhal obtida apresenta uma boa concordância.

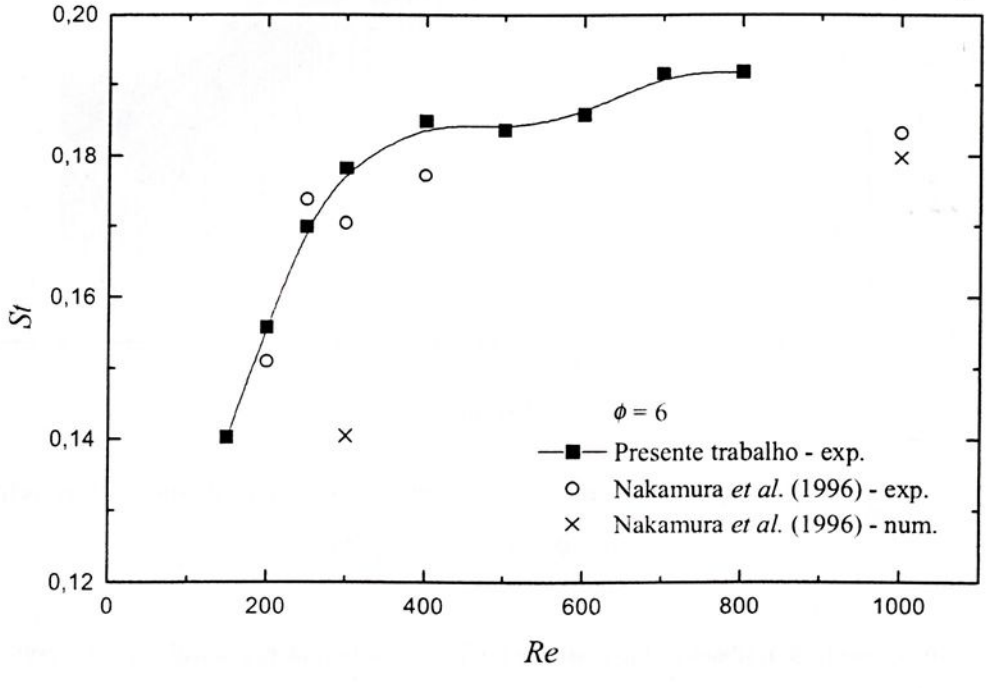


Figura 5.20 – Curva de Strouhal de um cilindro retangular com $\phi = 6$.

A Figura 5.21 apresenta imagens da esteira formada a jusante de um cilindro retangular com $\phi = 6$, para diferentes regimes do escoamento.

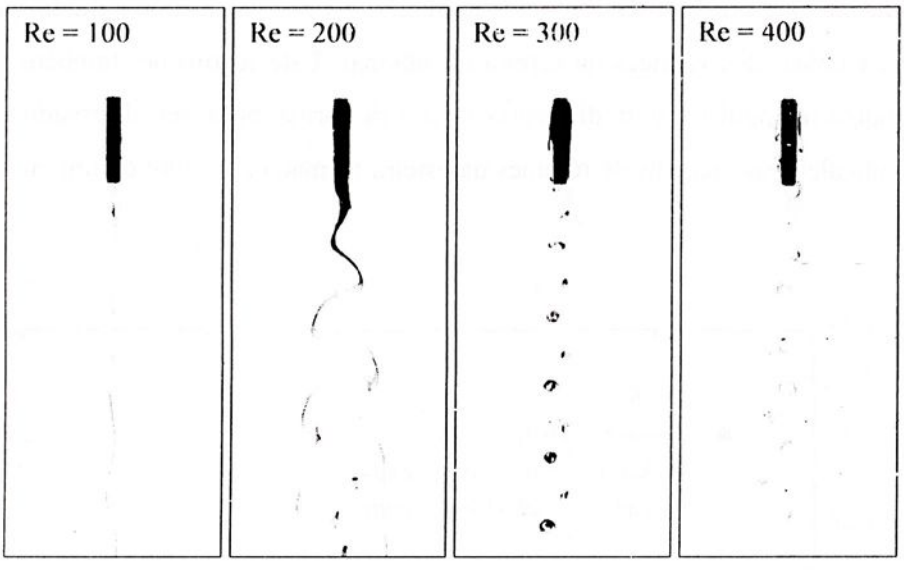


Figura 5.21 – Regimes da esteira de um cilindro retangular com $\phi = 6$.

Para $Re = 100$, observa-se a formação de duas bolhas de recirculação quase simétricas junto à base do cilindro, seguidas de uma esteira que apresenta pequenas ondulações senoidais. Com um aumento do número de Reynolds para 200, as bolhas de recirculação tornam-se assimétricas e oscilantes, enquanto que as ondulações da esteira são amplificadas, a tal ponto de gerar vórtices discretos e alternados. Para números de Reynolds mais elevados, observa-se uma mudança significativa no processo de formação dos vórtices, que passam a ter origem sobre as superfícies laterais do cilindro.

5.4.6 Cilindro Retangular com $\phi = 8$

Os sinais adquiridos na esteira do cilindro retangular com $\phi = 8$, bem como suas respectivas distribuições de potência espectral, são semelhantes àqueles apresentados para o cilindro retangular com $\phi = 6$. Neste caso, o espectro de potência não apresenta nenhum pico dominante para $Re \geq 800$.

A Figura 5.22 apresenta o comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds, para um cilindro retangular com $\phi = 8$. Comparando os resultados obtidos com os de Nakamura *et al.* (1996), nota-se uma boa concordância, especialmente com seus resultados experimentais. Observa-se, também, que a curva de Strouhal apresenta uma pequena

descontinuidade para números de Reynolds entre 250 e 300, relacionada à mudança no padrão de formação e emissão dos vórtices na esteira turbilhonar. Este fenômeno, também verificado para outros cilindros retangulares com diferentes razões de forma, pode ser observado na Figura 5.23, que apresenta algumas imagens de regimes da esteira formada a jusante de um cilindro retangular com $\phi = 8$.

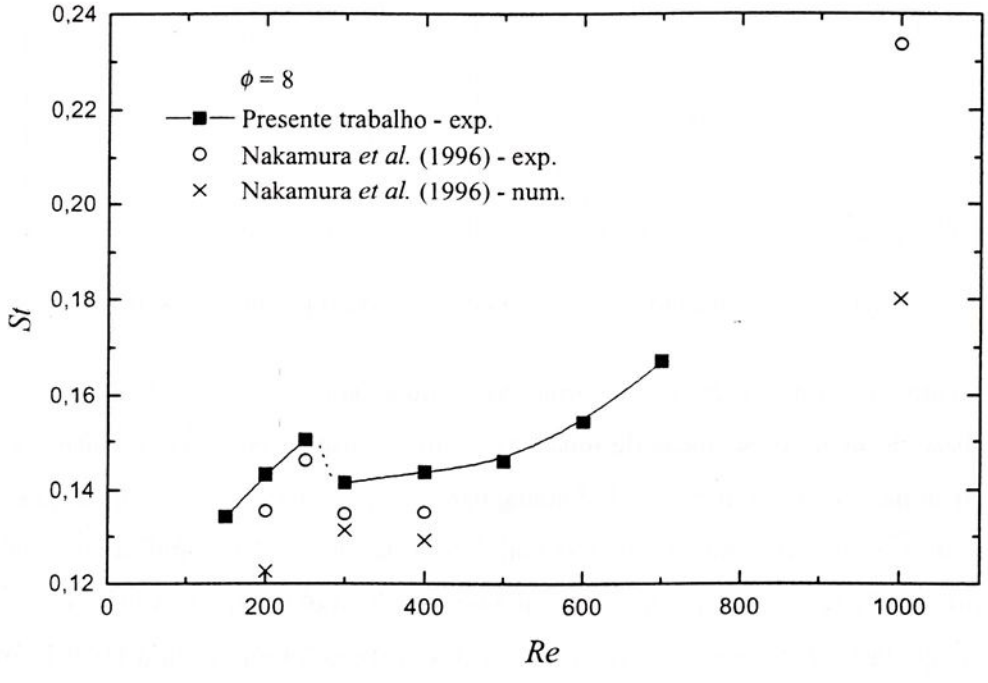


Figura 5.22 – Curva de Strouhal de um cilindro retangular com $\phi = 8$.

Para $Re = 100$, nota-se a formação de duas bolhas de recirculação simétricas junto à base do cilindro, seguidas de uma esteira simétrica e estável. Aumentando-se o número de Reynolds para 200, surgem as primeiras oscilações na esteira, que são amplificadas e dão origem aos vórtices alternados, formando a esteira de von Kármán. Para números de Reynolds mais elevados, ocorre uma mudança no padrão de formação e emissão dos vórtices na esteira - neste caso, os vórtices são formados sobre as superfícies laterais do cilindro, como pode ser verificado na Figura 5.23 ($Re = 300$ e 400).

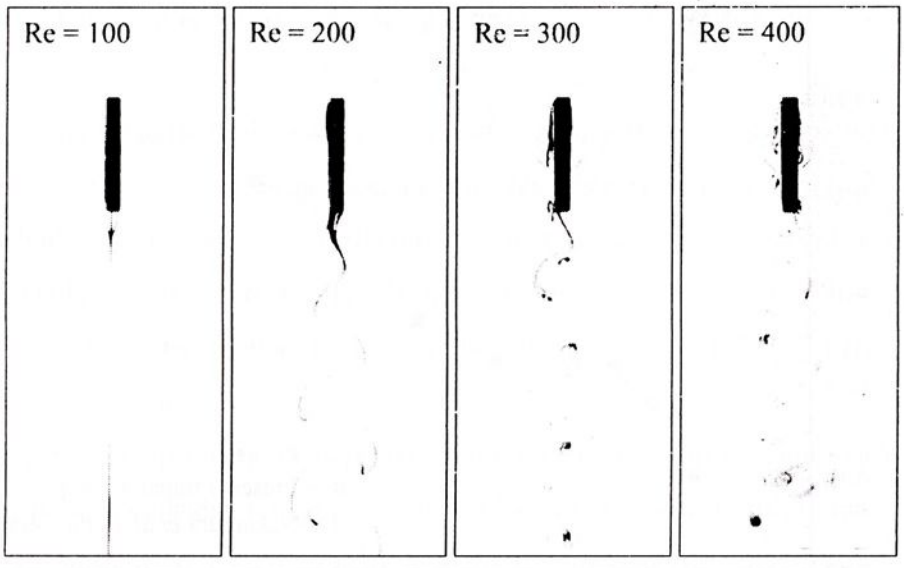


Figura 5.23 – Configurações da esteira de um cilindro retangular com $\phi = 8$.

5.4.7 Cilindro Retangular com $\phi = 12$

Assim como no caso anterior, os sinais adquiridos na esteira do cilindro retangular com $\phi = 8$, bem como suas respectivas distribuições de potência espectral, são semelhantes aos apresentados para o cilindro retangular com $\phi = 6$. Neste caso, o espectro de potência também não apresenta nenhum pico dominante para $Re \geq 800$.

A Figura 5.24 apresenta o comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds, para um cilindro retangular com $\phi = 12$. Pode-se notar que a curva de Strouhal obtida apresenta boa concordância com os resultados de Nakamura *et al.* (1996), especialmente para números de Reynolds inferiores a 400.

A Figura 5.25 apresenta imagens de alguns regimes da esteira formada a jusante do cilindro com $\phi = 12$. Semelhantemente ao observado nos casos anteriores, para $Re = 100$, verifica-se a presença de duas bolhas de recirculação junto à base do cilindro, seguidas de uma esteira linear e estável. Aumentando-se o número de Reynolds, surgem as primeiras instabilidades na esteira, que se manifestam na forma de oscilações, se amplificam e em seguida dão origem aos vórtices alternados. Quando o número de Reynolds atinge valores próximos a 250, verifica-se uma mudança no padrão de emissão dos vórtices, que são formados, a partir de então, sobre as superfícies laterais do cilindro.

unesp

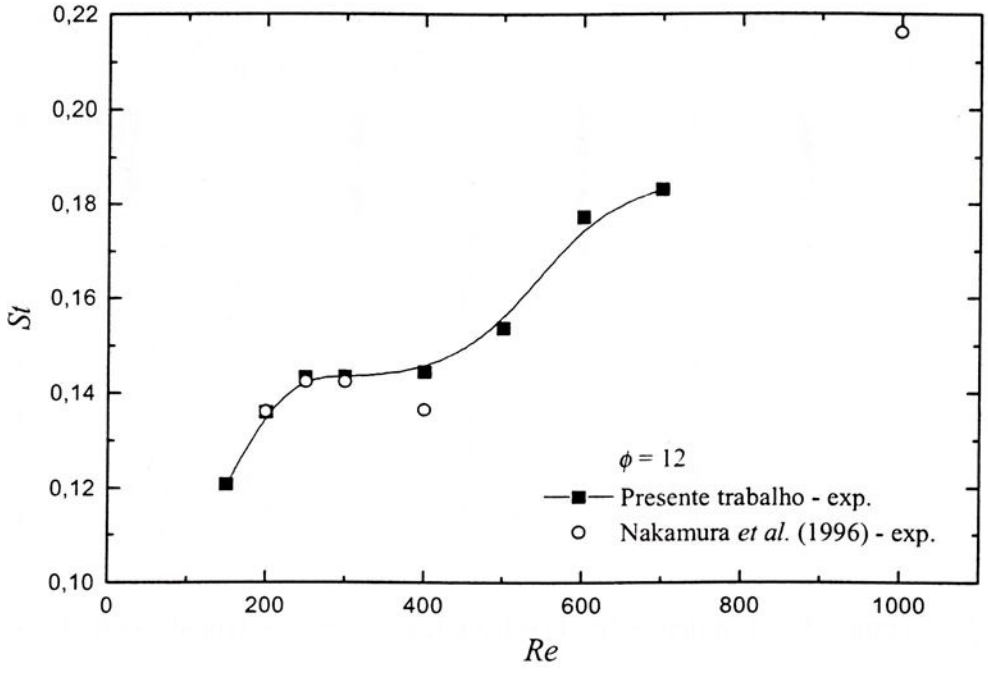


Figura 5.24 – Curva de Strouhal de um cilindro retangular com $\phi = 12$.

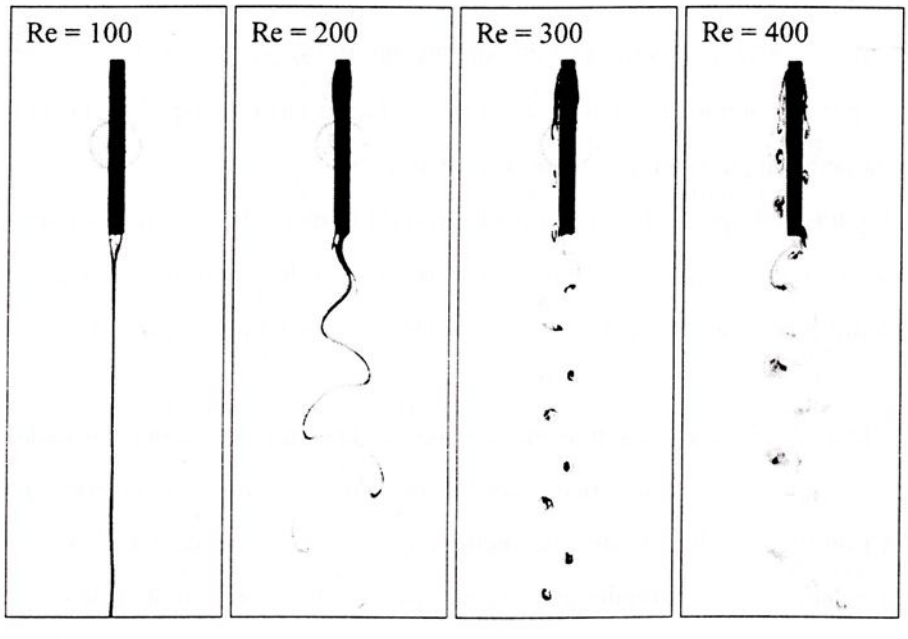


Figura 5.25 – Regimes da esteira a jusante de um cilindro retangular com $\phi = 12$.

5.4.8 Cilindro Retangular com $\phi = 16$

Os sinais adquiridos na esteira do cilindro retangular com $\phi = 16$, bem como suas respectivas distribuições de potência espectral, são semelhantes àqueles já apresentados para o cilindro quadrado. Neste caso, não verificou-se a ocorrência do fenômeno observado para os cilindros retangulares com $\phi = 6$, 8 e 12, em que a esteira de vórtices parece degenerar-se num escoamento que não possui uma freqüência característica bem definida, para números de Reynolds superiores a 800.

A Figura 5.26 apresenta o comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds, para um cilindro retangular com $\phi = 16$. Observa-se claramente que o número de Strouhal cresce suavemente com o número de Reynolds, ao longo de toda a faixa investigada, e que os resultados obtidos apresentam boa concordância com os dados de Nakamura *et al.* (1996).

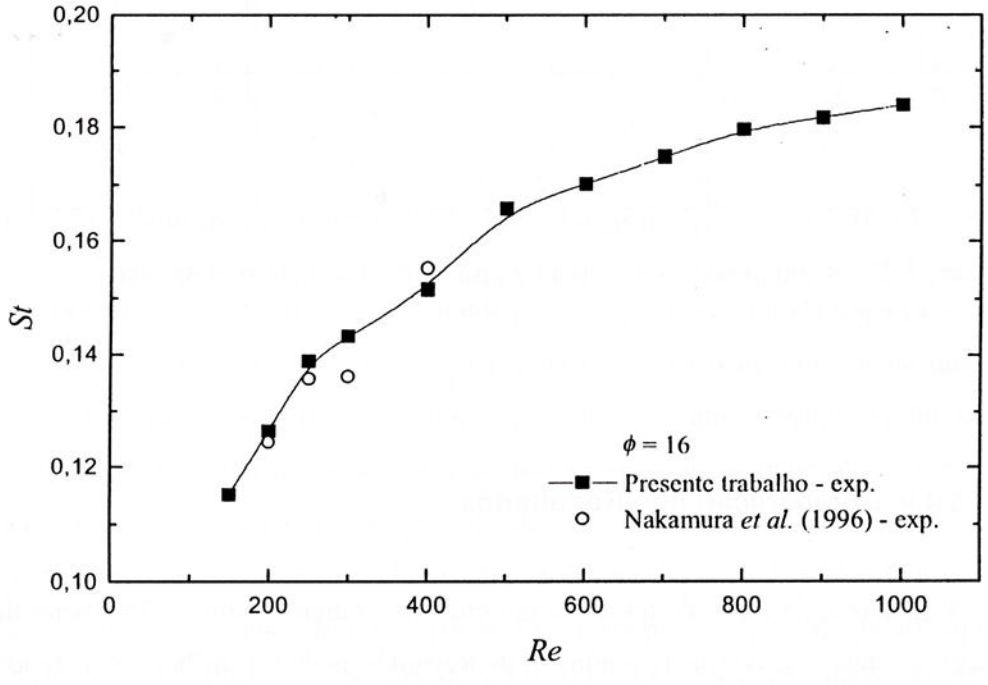


Figura 5.26 – Curva de Strouhal de um cilindro retangular com $\phi = 16$.

A Figura 5.27 apresenta imagens de diferentes regimes da esteira formada a jusante de um cilindro retangular com $\phi = 16$. Para $Re = 100$, nota-se a formação de duas bolhas de recirculação simétricas junto à base do cilindro, seguidas de uma esteira estacionária, com aspecto

linear. Aumentando gradualmente o número de Reynolds para 200, começam a surgir as primeiras instabilidades na esteira, evidenciadas por oscilações que se amplificam e dão origem à esteira de von Kármán. Quando o número de Reynolds atinge valores próximos a 250, verifica-se uma transição no modo de emissão dos vórtices: a partir de então, os vórtices não se formam a jusante do cilindro, mas sobre as suas superfícies laterais.

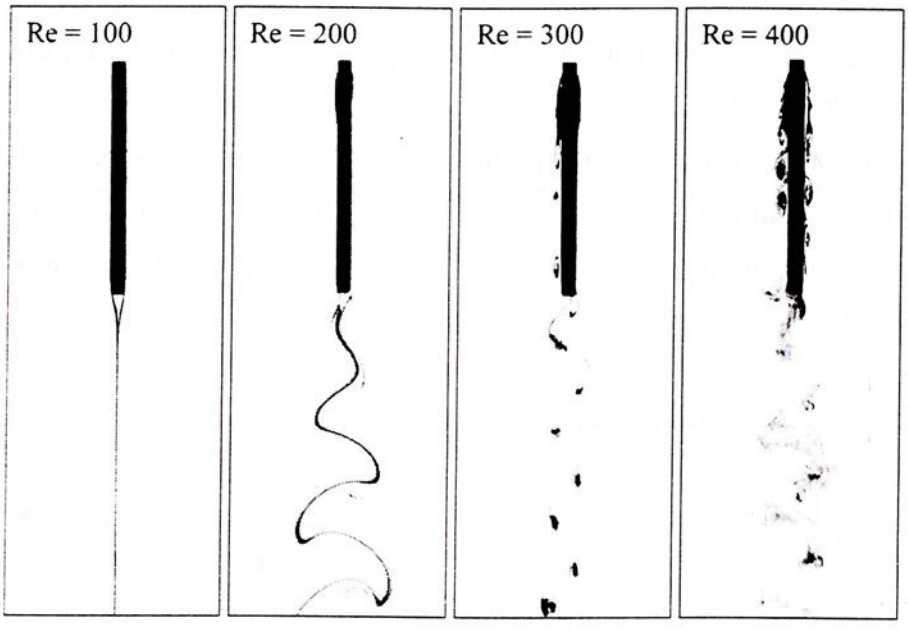


Figura 5.27 – Configurações da esteira a jusante de um cilindro retangular com $\phi = 16$.

5.4.9 Comparação dos Resultados

A influência da razão de forma de um cilindro retangular sobre o fenômeno de emissão de vórtices, mantendo-se constante o número de Reynolds, pode ser melhor compreendida com o auxílio das Figuras 5.28 a 5.30. Nestes gráficos, as linhas pontilhadas foram acrescentadas apenas para realçar a tendência observada. Deve-se notar que, neste caso, o número de Strouhal foi calculado com base na dimensão A, enquanto que o número de Reynolds baseia-se na dimensão B da seção transversal dos cilindros retangulares.

A Figura 5.28 apresenta a relação entre o número de Strouhal e a razão de forma de cilindros retangulares, para número de Reynolds igual a 200. Como pode-se observar, o número de Strouhal cresce de forma quase linear, para uma variação da razão de forma entre 1 e 16.

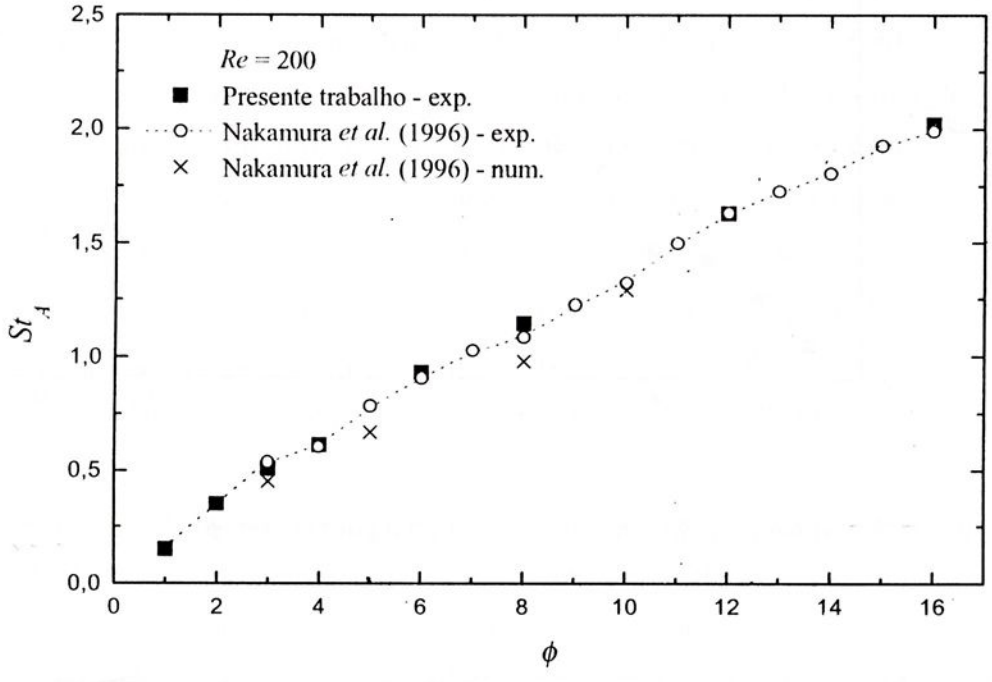


Figura 5.28 – Número de Strouhal de cilindros retangulares com $\phi = 1 - 16$ ($Re = 200$).

Aumentando-se o número de Reynolds para 250, a curva obtida começa a apresentar descontinuidades, assumindo a forma de uma escada com quatro degraus, ainda que suaves e abaulados, como pode-se observar na Figura 5.29. Um aumento subsequente do número de Reynolds para 300 faz com que estes degraus tornem-se mais pronunciados, com patamares praticamente planos, conforme observa-se na Figura 5.30.

Este fenômeno encontra-se relatado na literatura por Nakamura *et al.* (1996), e deve-se a uma transição no modo de emissão dos vórtices. Para números de Reynolds da ordem de 200, a emissão dos vórtices na esteira de um cilindro retangular ocorre segundo um modo chamado de "von Kármán". Este modo de emissão é bem característico de cilindros com seção transversal circular e quadrada. Neste caso, as duas camadas cisalhantes separadas interagem entre si, a jusante do corpo cilíndrico, dando origem à formação de vórtices alternados, conhecida como esteira de von Kármán.

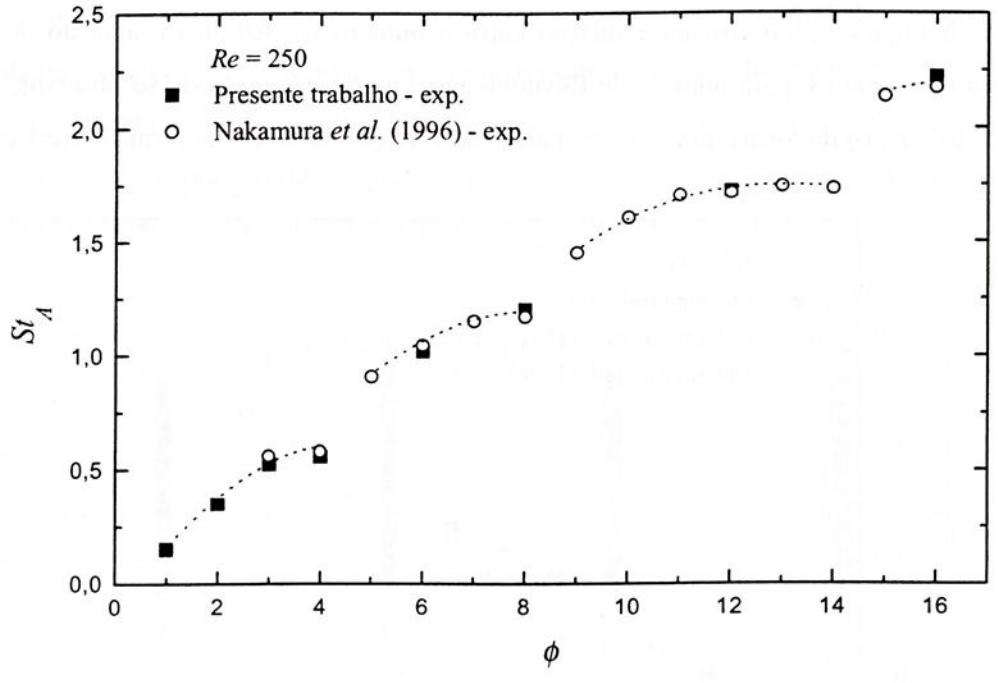


Figura 5.29 – Número de Strouhal de cilindros retangulares com $\phi = 1 - 16$ ($Re = 250$).

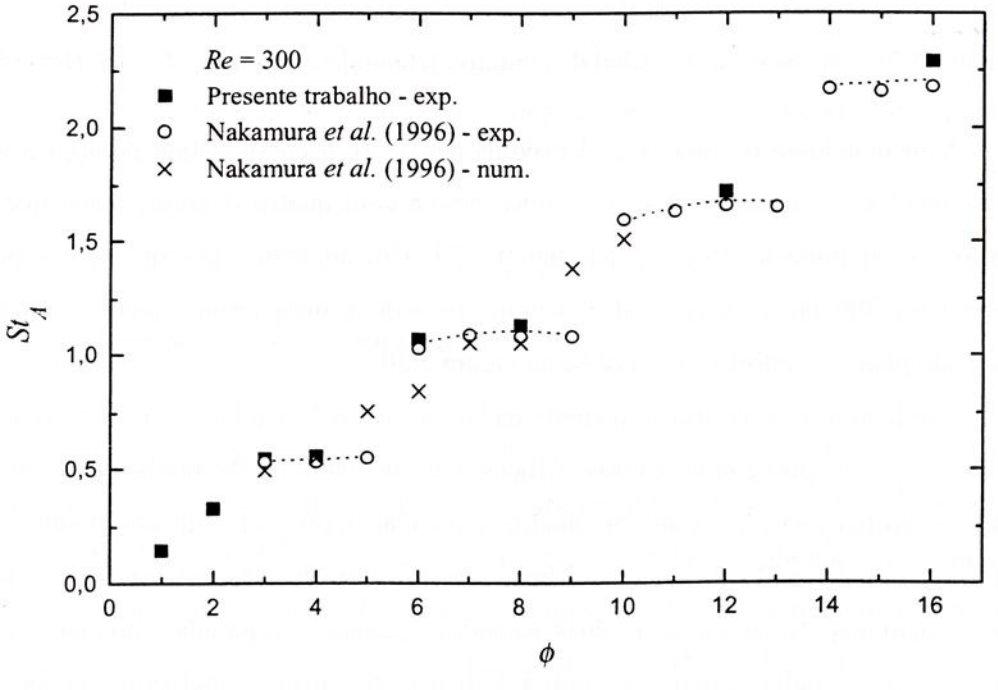


Figura 5.30 – Número de Strouhal de cilindros retangulares com $\phi = 1 - 16$ ($Re = 300$).

Para números de Reynolds superiores a aproximadamente 250, os vórtices emitidos por cilindros retangulares com seção transversal alongada são caracterizados por um outro tipo de instabilidade do escoamento, conhecida como a instabilidade da camada cisalhante impingente. Neste caso, uma única camada cisalhante separada pode tornar-se instável na presença de um canto vivo na borda de fuga do corpo cilíndrico (Ohya *et al.*, 1992).

Esta mudança no relacionamento entre o número de Strouhal e a razão de forma de cilindros retangulares possui uma relação estreita com uma alteração verificada no padrão do escoamento. Com o auxílio da visualização, pôde-se observar que, para $Re = 200$, o escoamento se descola sobre as bordas de ataque do cilindro e, em seguida, se recola sobre as suas superfícies laterais, dando origem a uma bolha de recirculação de cada lado do corpo (ver Figura 5.31a). Em seguida, as camadas cisalhantes que se desenvolvem sobre as superfícies laterais do cilindro se descolam nas suas arestas de fuga para, então, interagirem entre si e formarem a esteira de von Kárman a jusante do cilindro.

Para números de Reynolds mais elevados, observa-se uma significativa mudança no padrão de emissão dos vórtices, conforme vê-se na Figura 5.31(b) para $Re = 400$. Neste caso, as bolhas de recirculação que se formam sobre as superfícies laterais do cilindro não são mais estáveis. Como pode ser observado, estas bolhas são oscilantes e emitem vórtices alternados, que são convectados ao longo das superfícies laterais do cilindro retangular, para, então, serem lançados, já completamente formados, na esteira que se forma a jusante.

Um fato interessante, que pode ser observado nas imagens apresentadas na Figura 5.31(b), correlaciona o número de vórtices formados sobre as superfícies laterais e o "degrau" no qual um determinado cilindro retangular está situado na Figura 5.32. Neste caso, o número de Strouhal pode ser aproximado por

$$St_A \cong 0{,}6\, n \tag{5.6}$$

onde n é um número inteiro ($n = 1, 2, 3, 4$).

Comparando-se as Figuras 5.31(b) e 5.32, é fácil concluir que n é igual ao número de vórtices formados sobre uma das superfícies laterais do cilindro retangular. De fato, $n = 1$ para cilindros com $\phi = 3$ e 4, em que se verifica a formação de apenas um vórtice sobre a superfície lateral do cilindro; $n = 2$ para cilindros com $\phi = 6$ e 8; $n = 3$ para o cilindro com $\phi = 12$ e $n = 4$ para o cilindro com $\phi = 16$.

unesp

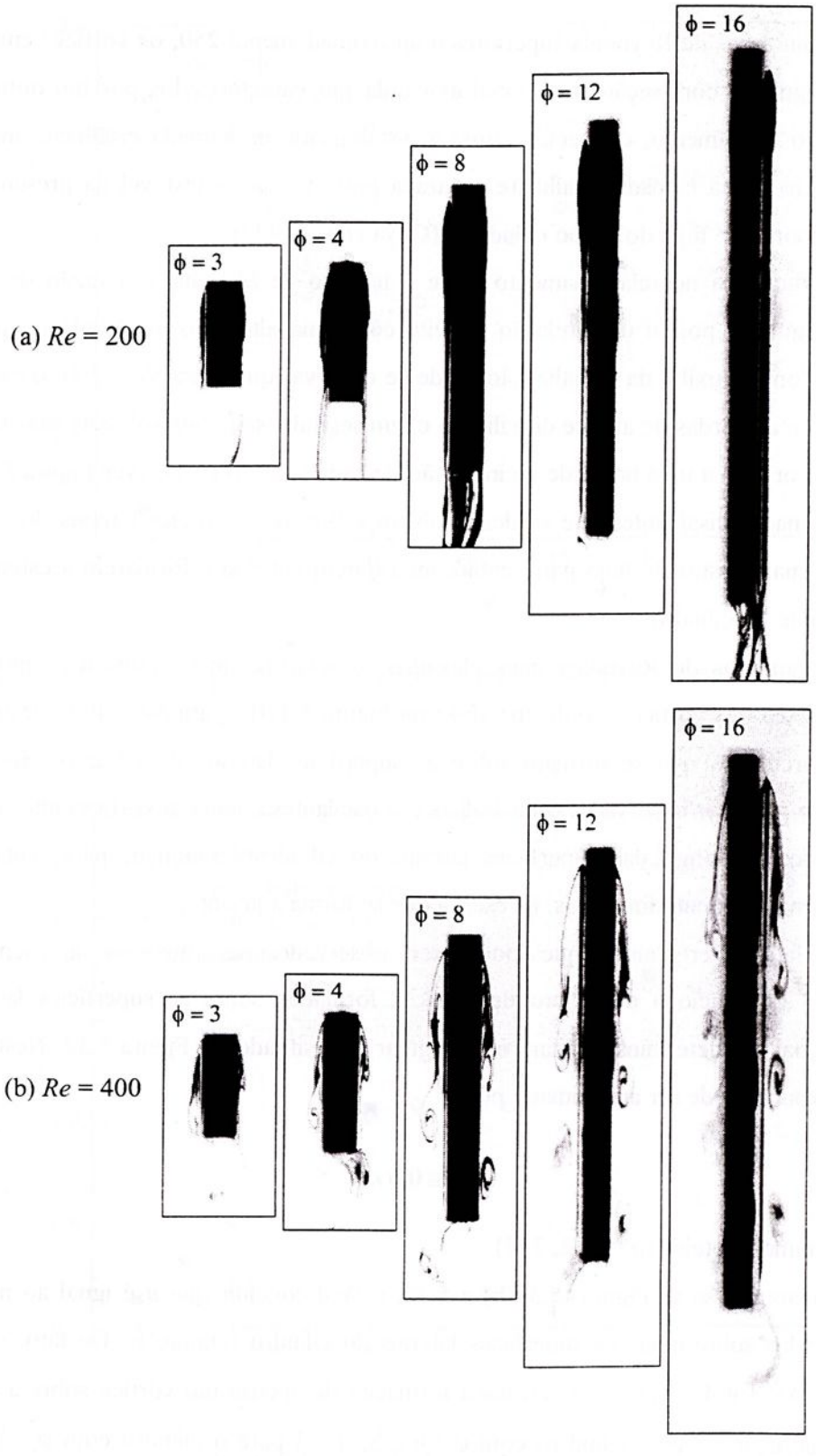


Figura 5.31 – Padrões do escoamento sobre as superficies laterais de cilindros retangulares com $3 \leq \phi \leq 16$ para $Re = 200$ e 400.

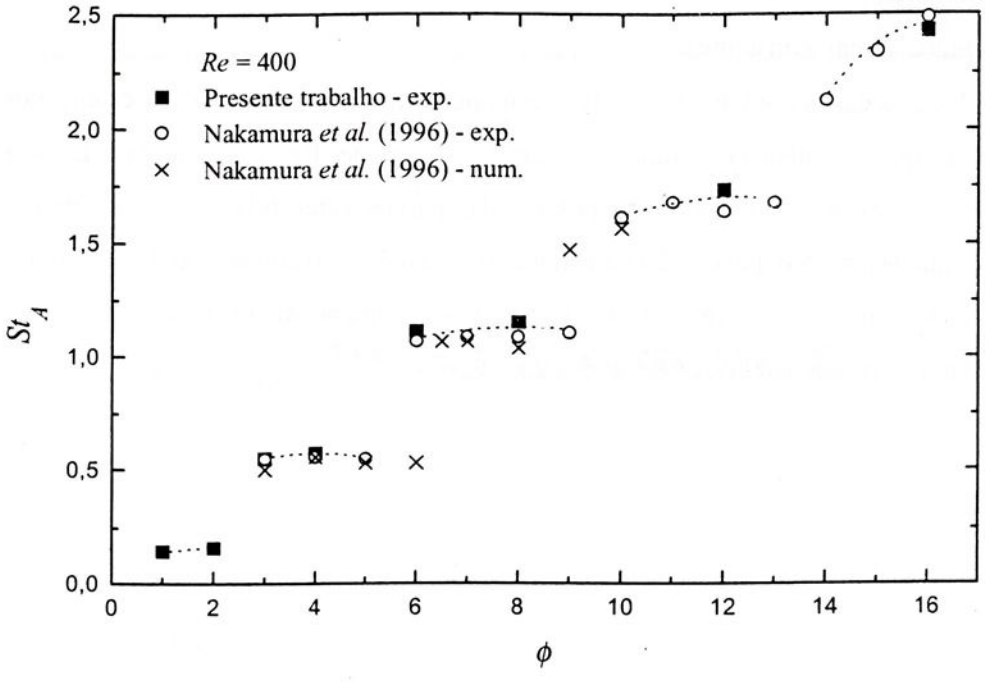


Figura 5.32 – Número de Strouhal de cilindros retangulares com $\phi = 1 - 16$ ($Re = 400$).

5.5 Conclusões

Neste capítulo, foi apresentado um estudo experimental do escoamento ao redor de oito cilindros retangulares com razão de forma variando entre 1 e 16, para números de Reynolds inferiores a 10^3. Para cada cilindro investigado, a curva Strouhal *versus* Reynolds foi determinada com o auxílio da anemometria de filme quente. Através da visualização do escoamento, foram adquiridas imagens da esteira que se forma a jusante do cilindro, bem como das camadas cisalhantes que se desenvolvem sobre suas superfícies laterais.

Os resultados obtidos - quantitativos e qualitativos - evidenciam a forte influência que a razão de forma de um cilindro retangular exerce sobre o escoamento ao seu redor. Para os casos com $\phi \geq 3$, verifica-se a ocorrência de um fenômeno de transição no mecanismo de geração e emissão dos vórtices, para números de Reynolds em torno de 250. A partir deste regime, os vórtices não mais se formam junto à base do cilindro, mas passam a ser gerados sobre as suas

superfícies laterais. Neste caso, a curva de Strouhal apresenta o aspecto de uma escada, com degraus praticamente constantes.

Para os casos com $\phi = 6$, 8 e 12, verificou-se que o escoamento na esteira dos cilindros não possui uma freqüência dominante, para números de Reynolds superiores a 800. Este fenômeno, não relatado na literatura pesquisada, parece estar relacionado a um processo de transição, que levaria à degeneração da esteira em turbulência tridimensional homogênea. Embora hajam indícios que justifiquem esta conclusão, este fenômeno ainda merece estudos adicionais, que possam comprovar definitivamente esta hipótese.

unesp

Capítulo 6

Ângulo de Incidência

6.1 Introdução

O ângulo com o qual o escoamento incide sobre um corpo cilíndrico com seção transversal quadrada, diferentemente do que ocorre com os cilindros circulares, também exerce uma forte influência sobre o fenômeno de emissão de vórtices em sua esteira. Esta situação é freqüentemente encontrada em escoamentos ambientais, como por exemplo, em edifícios, pilares, monumentos, e outras estruturas expostas à ação do vento natural.

Seja um corpo cilíndrico com seção transversal quadrada, imerso perpendicularmente num escoamento com velocidade uniforme e constante V_∞. O escoamento incide sobre o cilindro com um ângulo de ataque* θ, formado entre a direção da corrente livre e a normal à face anterior do cilindro, conforme ilustrado na Figura 6.1.

Nesta situação, os números de Reynolds e de Strouhal são definidos, respectivamente, como

$$Re = \frac{V_\infty B}{\nu} \tag{6.1}$$

$$St = \frac{f B}{V_\infty} \tag{6.2}$$

* Os termos "ângulo de ataque" e "ângulo de incidência" são sinônimos, e portanto serão utilizados indistintamente ao longo do texto.

unesp

onde B é a dimensão característica do cilindro, ν é a viscosidade cinemática do fluido, e f é a freqüência de desprendimento dos vórtices emitidos de um mesmo lado do corpo.

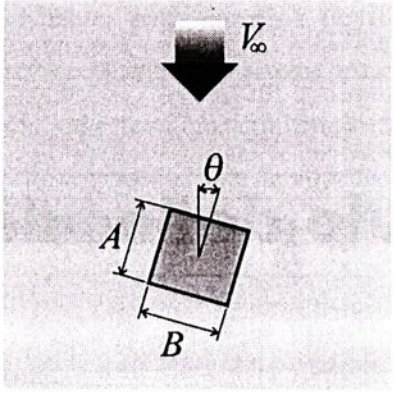


Figura 6.1 – Cilindro quadrado imerso perpendicularmente na corrente livre uniforme, com um ângulo de incidência θ.

Para o caso do número de Strouhal, a dimensão característica do cilindro quadrado também pode ser definida com base na sua dimensão transversal projetada, dada pela expressão

$$D = A\,\mathrm{sen}\,\theta + B\cos\theta \tag{6.3}$$

resultando em

$$St_D = \frac{f\,D}{V_\infty} \tag{6.4}$$

No presente trabalho, investigou-se os efeitos do ângulo de incidência sobre o escoamento ao redor de cilindros de base quadrada, para números de Reynolds inferiores a 10^3 e ângulos de incidência variando entre 0° e 45°.

6.2 Revisão Bibliográfica

Vickery (1966) realizou um estudo experimental do escoamento ao redor de um cilindro com seção transversal quadrada, analisando a influência da turbulência da corrente livre e do ângulo de incidência sobre alguns parâmetros do escoamento, tais como os coeficientes de

sustentação, de arrasto e de pressão na base, bem como o número de Strouhal. Medindo a flutuação de pressão na superfície do corpo e utilizando um extensômetro unidirecional instalado no seu interior, Vickery verificou a influência do ângulo de ataque sobre o número de Strouhal, para números de Reynolds compreendidos entre 4×10^4 a $1{,}6\times10^5$. Segundo o autor, dentro da faixa de incerteza experimental característica de seus ensaios, o número de Strouhal não apresentou dependência com o número de Reynolds.

Obasaju (1983) investigou experimentalmente as alterações que ocorrem no escoamento ao redor de um cilindro com seção transversal quadrada quando o ângulo de ataque é variado entre 0° e 45°, para números de Reynolds da ordem de 10^4. Para a determinação da freqüência de emissão dos vórtices, foi utilizado um transdutor de pressão instalado no interior do cilindro, além de uma sonda de fio quente posicionada na esteira turbilhonária à jusante do corpo. Os resultados obtidos pelo autor indicam que, ao variar o ângulo de incidência de 0° a 45°, o número de Strouhal apresenta uma pequena diminuição no início e, em seguida, um acentuado crescimento, atingindo um valor máximo local para ângulos de incidência em torno de 13,5°, voltando a diminuir gradualmente a partir de então. Seus resultados mostram algumas discrepâncias, quando comparados com os de outros autores, que também divergem entre si. O autor atribui esta discordância à diferença entre os números de Reynolds e, possivelmente, diferentes níveis de intensidade turbulenta dos escoamentos investigados.

Norberg (1993) conduziu uma investigação experimental do escoamento em torno de cilindros retangulares com ângulo de ataque variando entre 0° e 90°, para números de Reynolds entre 10^3 e 3×10^4. As forças e momentos induzidos pelo escoamento sobre os cilindros puderam ser estimadas com base nas medidas da distribuição de pressão estática na superfície dos modelos, enquanto que a freqüência de emissão de vórtices foi determinada com o auxílio de um anemômetro de fio quente.

No que se refere aos cilindros quadrados, o autor observou que para um número de Reynolds igual a 10^3, à medida em que o ângulo de ataque aumenta de 0° para aproximadamente 15°, o número de Strouhal cresce de maneira acentuada. Neste ângulo, a curva de Strouhal atinge um ponto de máximo local, e então decai de forma assintótica. Quanto aos cilindros retangulares com razão de forma $A/B > 1$, as curvas de Strouhal apresentam algumas diferenças em relação ao cilindro quadrado: o ângulo em que o número de Strouhal atinge o valor máximo é menor, e não existe simetria da curva de Strouhal para ângulos de incidência entre 45° e 90°.

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 unesp 12 13 14 15 16 17 18

Sohankar *et al.* (1997) realizaram uma investigação numérica acerca da influência do ângulo de ataque sobre o escoamento ao redor de cilindros retangulares. Suas simulações, realizadas para números de Reynolds – baseado na dimensão transversal projetada D – inferiores a 200, permitiram o cálculo de diversos parâmetros do escoamento, tais como o número de Strouhal e os coeficientes de arrasto, sustentação e momento.

Seus resultados, referentes à influência do ângulo de ataque, mostram que os parâmetros estudados apresentam um comportamento mais complexo para ângulos de ataque situados entre 0° e 20° e entre 70° e 90°. Para cilindros retangulares com razão de forma $A/B > 1$, esta complexidade se concentra na região de baixos ângulos de ataque. Neste caso, o número de Strouhal atinge um valor máximo local para um ângulo de ataque crítico, situado entre 6° e 10°.

Lindquist *et al.* (1997) estudaram o escoamento ao redor de um corpo de base quadrada, posicionado perpendicularmente à corrente livre. Dois diferentes ângulos de ataque foram considerados ($\theta = 0°$ e 45°), para números de Reynolds inferiores a 300. Os ensaios foram realizados num túnel hidrodinâmico vertical, utilizando-se apenas de técnicas de visualização e processamento de imagens. A técnica de visualização empregada foi a injeção de corantes líquidos, e as imagens obtidas foram registradas em filme fotográfico e em fita de vídeo. O número de Strouhal, que caracteriza o fenômeno de emissão dos vórtices na esteira de von Kármán, foi determinado pela análise das imagens registradas, pela contagem de fotogramas. Os resultados obtidos indicam que ocorre uma sensível alteração no parâmetro investigado, para os dois ângulos de ataque considerados.

Lindquist *et al.* (1999) realizaram uma investigação experimental do escoamento ao redor de corpos cilíndricos com seção transversal quadrada, posicionados perpendicularmente à corrente livre, com ângulo de incidência variando entre 0° e 45°, para números de Reynolds compreendidos entre 50 e 500. A freqüência de emissão de vórtices foi determinada pela análise espectral do sinal de velocidade obtido com o auxílio de uma sonda de filme quente posicionada na esteira de vórtices do cilindro. Os resultados obtidos evidenciam a influência marcante do ângulo de ataque sobre o número de Strouhal de cilindros com seção transversal quadrada. Este estudo mostrou que, para um dado número de Reynolds, o número de Strouhal atinge um valor máximo para ângulos de ataque situados entre 10° e 15°, em concordância com dados de outros autores.

unesp

6.3 Metodologia Experimental

6.3.1 Anemometria de Filme Quente

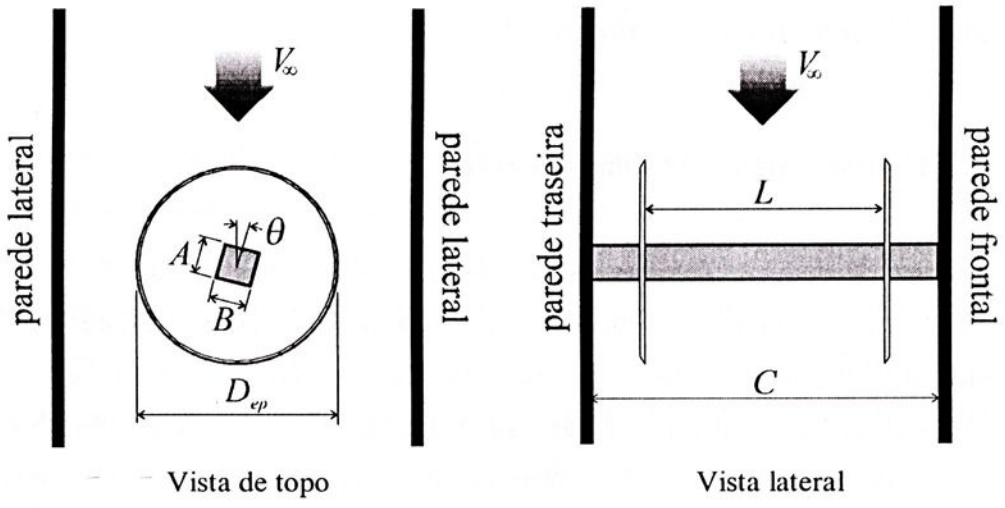
Durante a condução dos ensaios de anemometria de filme quente, foi utilizado um modelo cilíndrico de base quadrada (modelo A1) provido de duas placas circulares (*end plates*), que possuem a finalidade de isolar a influência da camada limite do túnel sobre a esteira do cilindro. A distância L entre as placas foi ajustada para obter-se uma razão de aspecto $L/B = 40$. Para que o ângulo de incidência do escoamento pudesse ser facilmente variado, o cilindro foi instalado numa janela traseira especial, que possui uma escotilha giratória graduada (Figura 6.2). O cilindro foi firmemente engastado no centro da escotilha giratória, com ângulo de incidência nulo ajustado com o auxílio de um esquadro.

A sonda de filme quente, instalada num suporte em forma de cotovelo e montada sobre o dispositivo posicionador, foi introduzida na seção de testes através de um orifício localizado na estação 5 da janela lateral. A sonda de temperatura do anemômetro foi introduzida na seção de testes no seu ponto mais a jusante (estação 8).

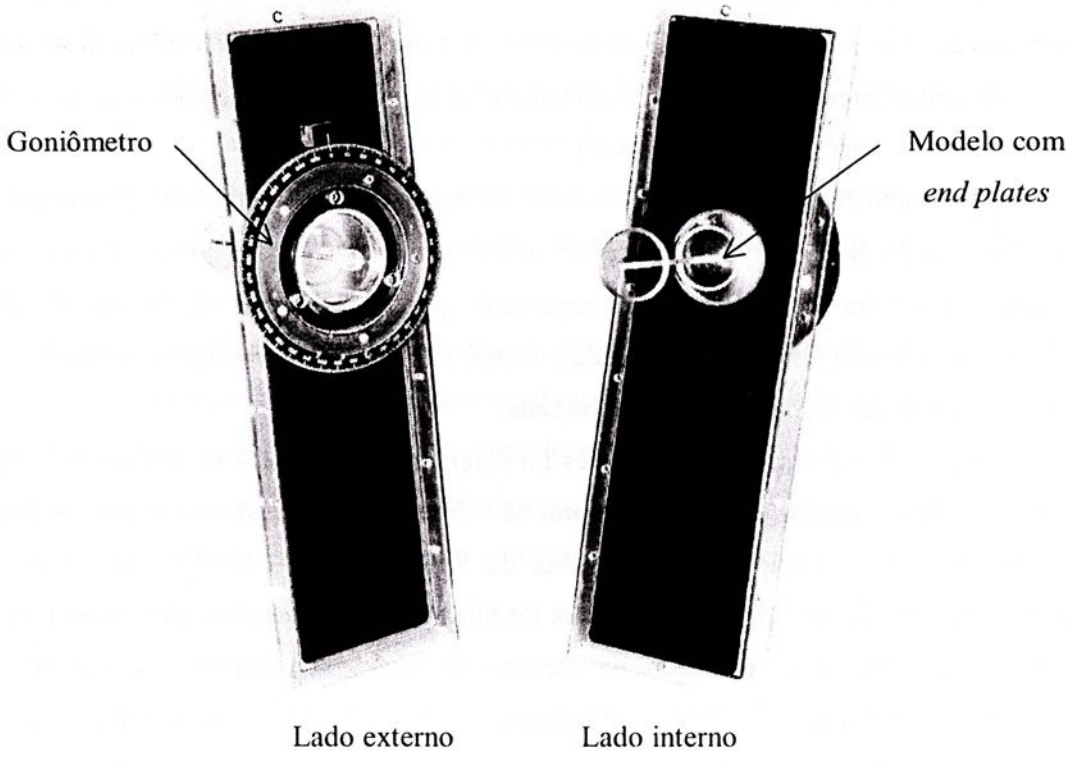
Após estabilizada a velocidade do túnel, os ensaios foram conduzidos para ângulos de ataque aumentando progressivamente de 0° a 45°. Em cada ensaio, o sinal temporal da velocidade na esteira do cilindro foi registrado por um sistema de aquisição digital computadorizado a uma taxa de aquisição de 100 Hz, e o sinal discretizado foi armazenado em cinco blocos independentes, com 4096 pontos cada.

A freqüência de emissão dos vórtices foi determinada com base na análise espectral do sinal de velocidade adquirido. O sinal temporal da velocidade foi transformado para o domínio da freqüência com o auxílio da transformada de Fourier discreta (FFT). Para cada bloco adquirido, a freqüência de emissão dos vórtices foi tomada como a freqüência correspondente ao centro geométrico do pico verificado no espectro de potência calculado. A freqüência de Strouhal foi então calculada pela média da freqüência de emissão dos vórtices, determinada para cada um dos cinco blocos.

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 unesp 12 13 14 15 16 17 18



(a) Ilustração esquemática.



(b) Vistas em perspectiva do cilindro instalado na janela traseira especial.

Figura 6.2 – Montagem experimental para os ensaios de anemometria.

6.3.2 Visualização do Escoamento

A visualização de escoamentos foi utilizada no âmbito da presente investigação com duas finalidades principais. A primeira foi a de auxiliar no posicionamento da sonda de filme quente no interior da esteira de vórtices, que interfere diretamente na qualidade das medições por anemometria de filme quente. A segunda finalidade foi a de possibilitar o registro de imagens do escoamento ao redor do cilindro quadrado, que permitiram uma melhor compreensão do fenômeno em estudo.

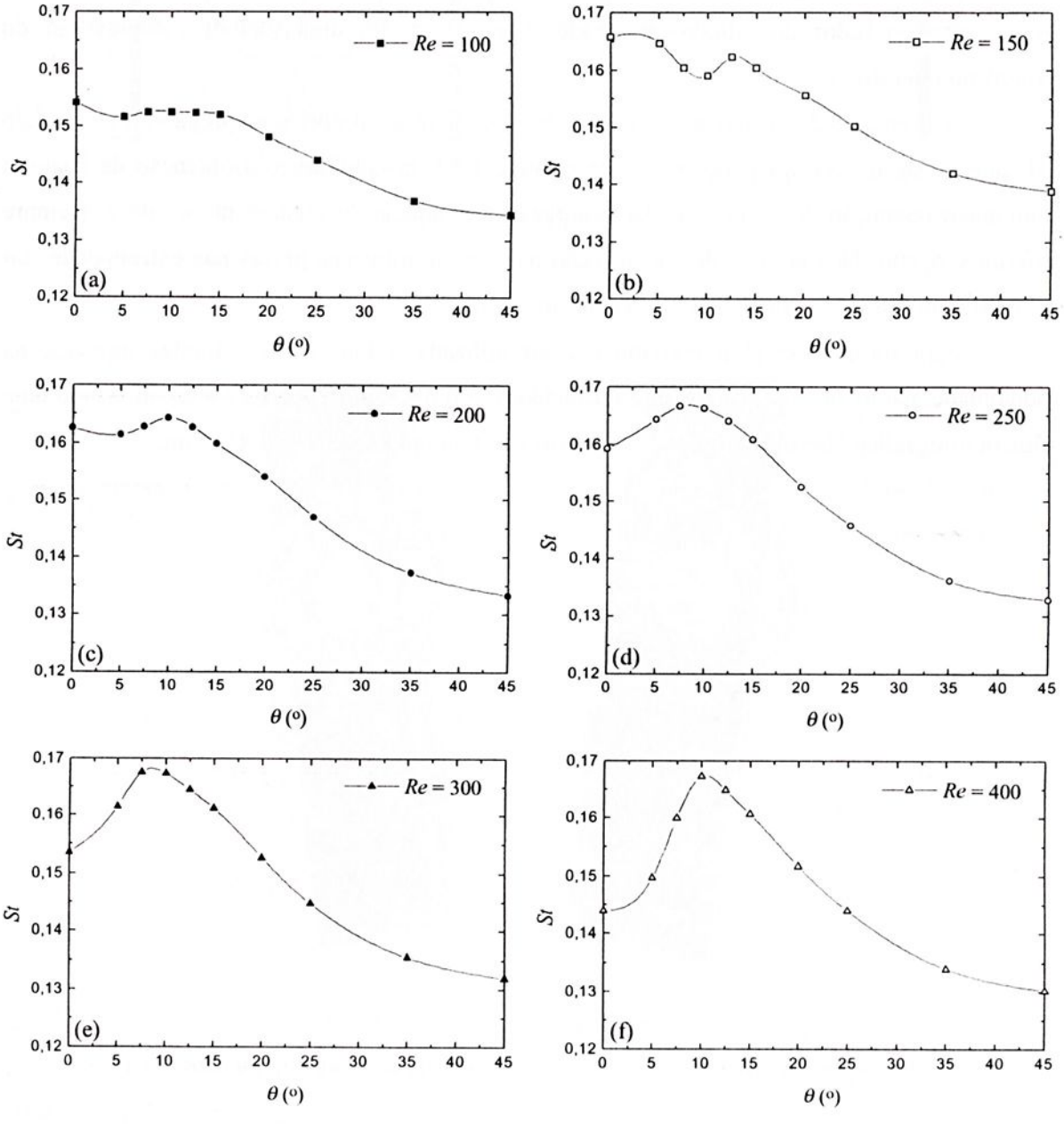
Nos ensaios de visualização de escoamentos, o corpo cilíndrico empregado foi o modelo B1, que possui dimensões maiores do que o modelo A1, possibilitando a obtenção de imagens com maior resolução, mantendo, ainda, uma razão de bloqueio do escoamento aceitável (sempre inferior a 6,5%). Nos ensaios de visualização não foram utilizadas placas nas extremidades do cilindro, a fim de não prejudicar a nitidez das imagens.

Para tornar visível o escoamento, foi utilizada a injeção de corantes líquidos, na modalidade *dye wash*. As imagens foram captadas em filme fotográfico ISO 400, utilizando uma câmara fotográfica Nikon F4 equipada com uma objetiva Nikkor Medical 120 mm.

unesp

6.4 Resultados e Discussão

A Figura 6.3 apresenta a influência do ângulo de ataque do escoamento sobre o número de Strouhal de um cilindro quadrado, para números de Reynolds compreendidos entre 10^2 e 10^3.



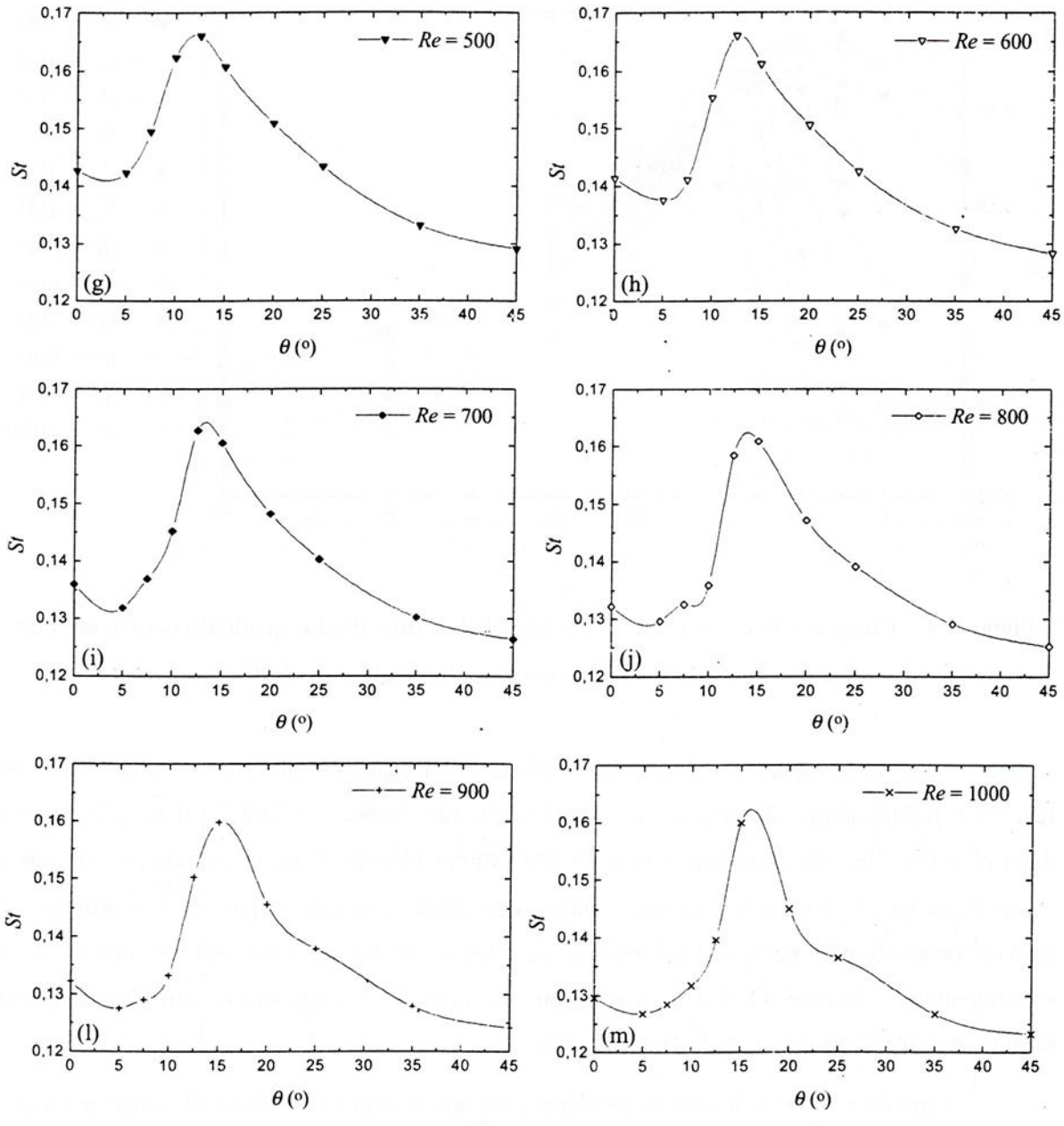


Figura 6.3 – Curvas de Strouhal *versus* ângulo de ataque, para números de Reynolds entre 10^2 e 10^3.

Para facilitar a comparação entre estas diversas curvas, os gráficos da Figura 6.3 foram agrupados na Figura 6.4. Como pode-se observar, as curvas obtidas apresentam uma grande semelhança qualitativa entre si. Uma de suas características marcantes é a ocorrência de um pico, quando o ângulo de ataque atinge valores situados entre 10° e 15°, que torna-se tanto mais pronunciado quanto maior o número de Reynolds.

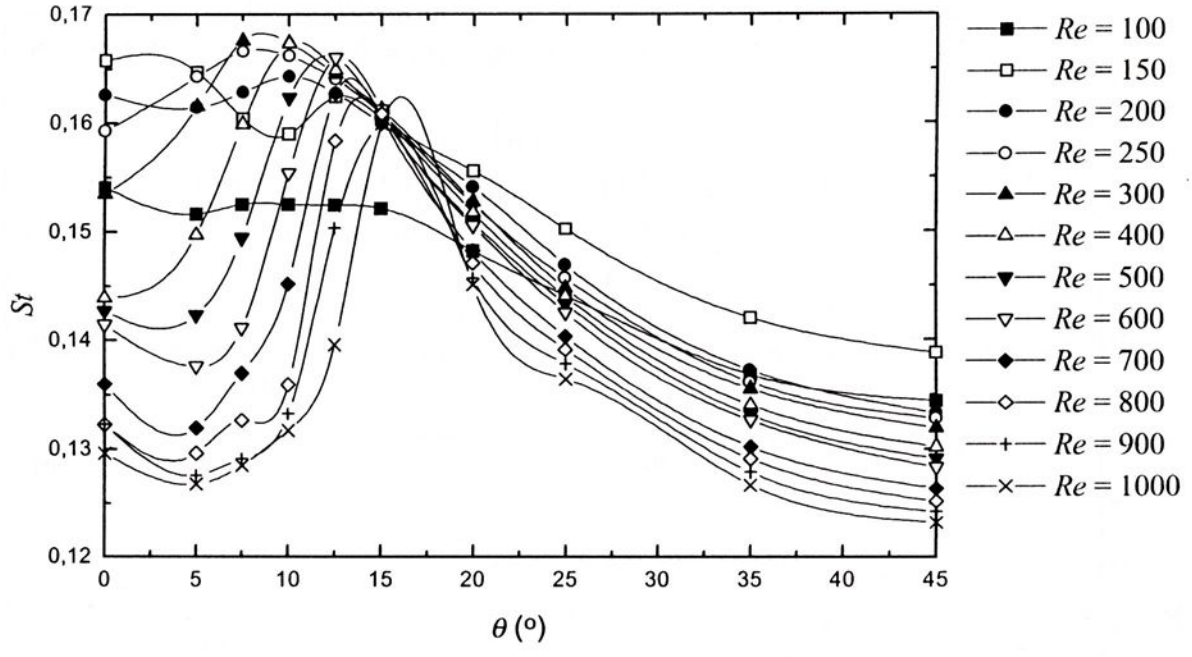


Figura 6.4 – Comparação entre as curvas de Strouhal de um cilindro quadrado com ângulo de ataque entre 0° e 45°, para números de Reynolds entre 100 e 1000.

A Figura 6.5 apresenta uma comparação dos resultados obtidos com os encontrados na literatura. Infelizmente, são poucos os artigos publicados sobre o assunto e a grande maioria deles considera uma faixa de números de Reynolds mais elevada. Entretanto, no caso em que a comparação foi possível, a concordância entre os resultados mostrou-se plenamente satisfatória, como pode-se observar na Figura 6.5, onde os resultados obtidos são confrontados com os dados experimentais de Norberg (1993). Vale ressaltar que, neste caso, o número de Strouhal baseia-se na dimensão transversal projetada D do cilindro.

A fim de estimar o ângulo de incidência em que o número de Strouhal atinge seu valor máximo, os três pontos experimentais mais próximos ao máximo local da curva $St \times \theta$ foram interpolados por um polinômio do segundo grau. A Figura 6.6 apresenta o comportamento do ângulo de ataque em que o número de Strouhal assume um valor máximo local para a faixa de números de Reynolds investigada. Como pode-se observar, o valor de θ_{max} diminui com o aumento do número de Reynolds, para $Re \leq 250$, ocorrendo o contrário para números de Reynolds maiores.

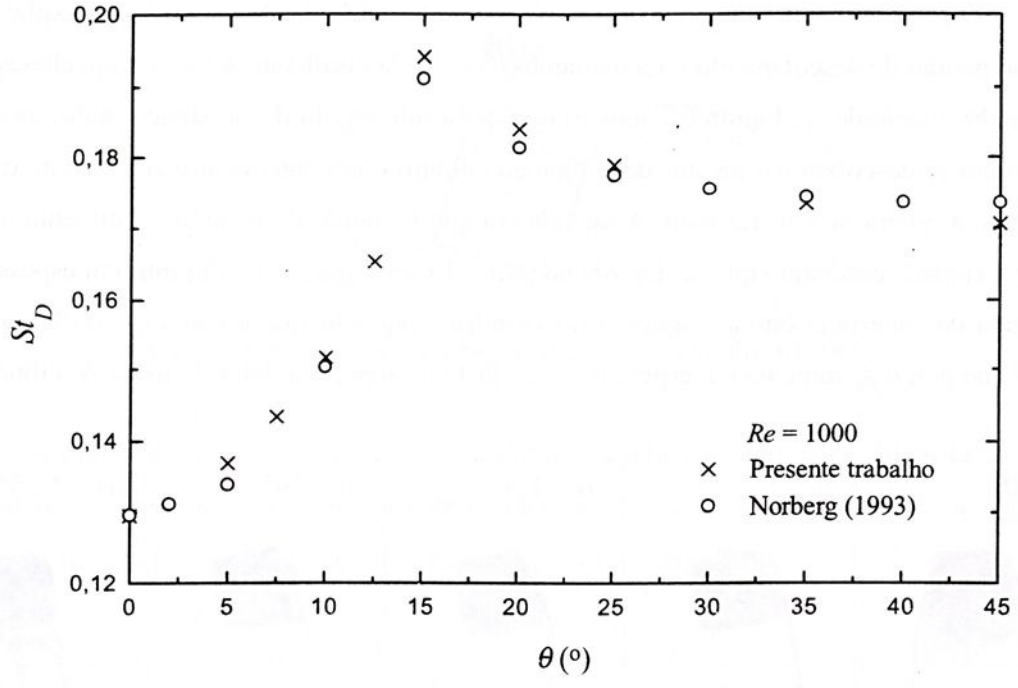


Figura 6.5 – Comparação com resultados da literatura.

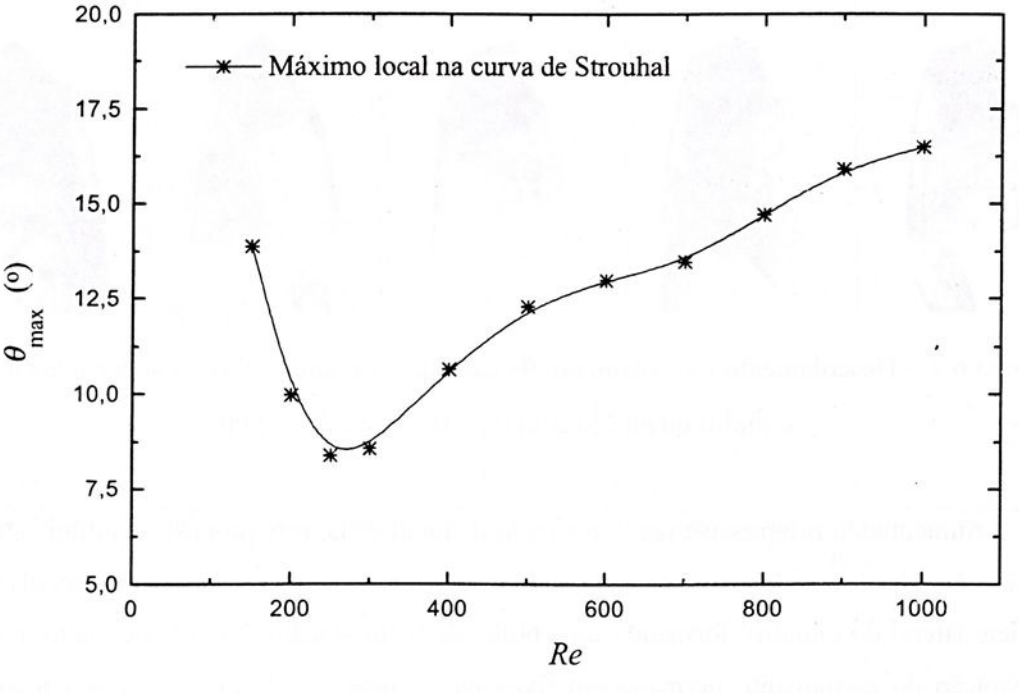


Figura 6.6 – Ângulo de incidência correspondente ao valor máximo local na curva de Strouhal.

O comportamento da curva de Strouhal *versus* ângulo de ataque pode ser explicado com base no padrão de descolamento e recolamento da camada cisalhante sobre as superfícies laterais do cilindro quadrado. A Figura 6.7 mostra que, para um ângulo de incidência nulo, as camadas cisalhantes se descolam nas arestas de ataque do cilindro e interagem entre si a jusante do corpo, formando a esteira de von Kármán. A medida em que o ângulo de incidência aumenta, observa-se que a camada cisalhante que se descola no ponto 1 (ver Figura 6.8), diminui em espessura e se aproxima da superfície lateral esquerda do cilindro, enquanto que a camada cisalhante que se descola no ponto 2, aumenta em espessura e se afasta da superfície lateral direita do cilindro.

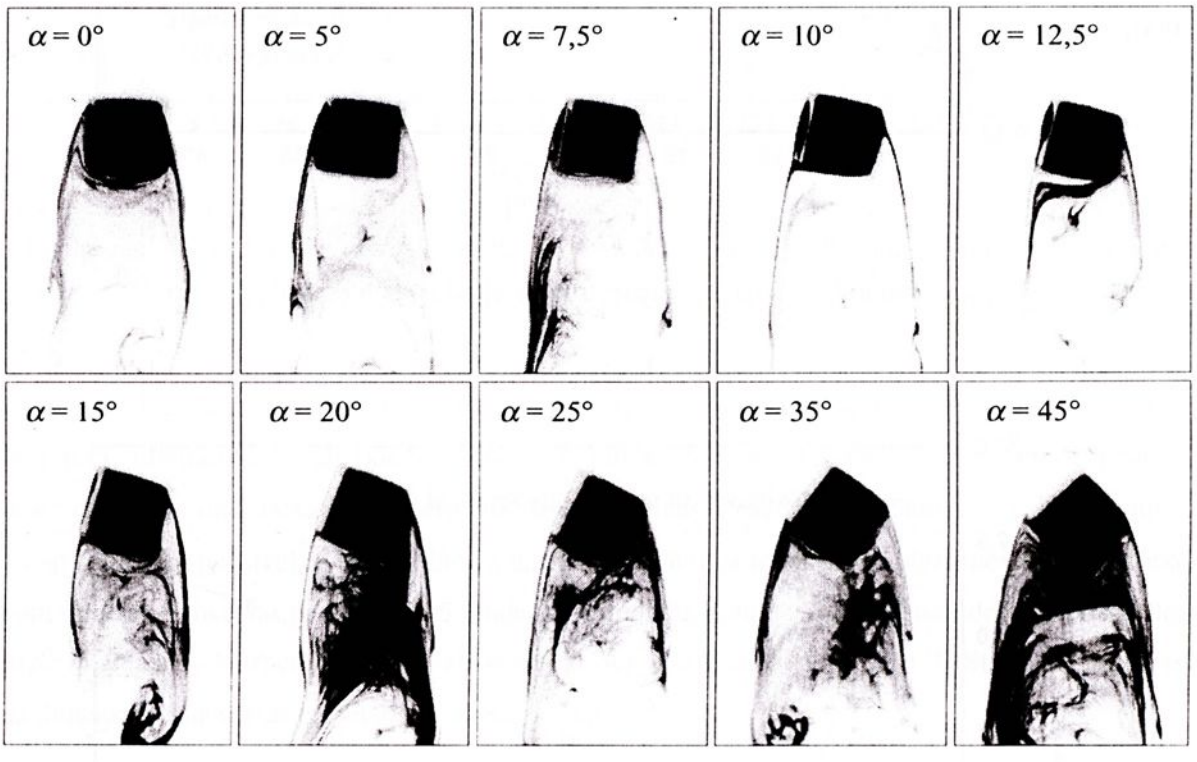


Figura 6.7 – Descolamento e recolamento da camada cisalhante sobre as superfícies de um cilindro quadrado com $0° \leq \theta \leq 45°$ e $Re = 500$.

Aumentando progressivamente o ângulo de incidência, este processo continua até que se atinja um ângulo de incidência crítico, quando a camada cisalhante esquerda se recola sobre a superfície lateral do cilindro, formando uma bolha de recirculação. A partir de então, os pontos de separação do escoamento permanecem fixos nos pontos 2 e 3. Com base nas imagens da Figura 6.7, pode-se constatar que este ângulo crítico está situado entre 10° e 12,5°, que corresponde ao ângulo em que o número de Strouhal atinge seu valor máximo.

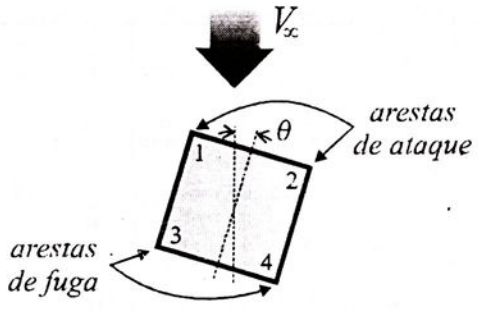
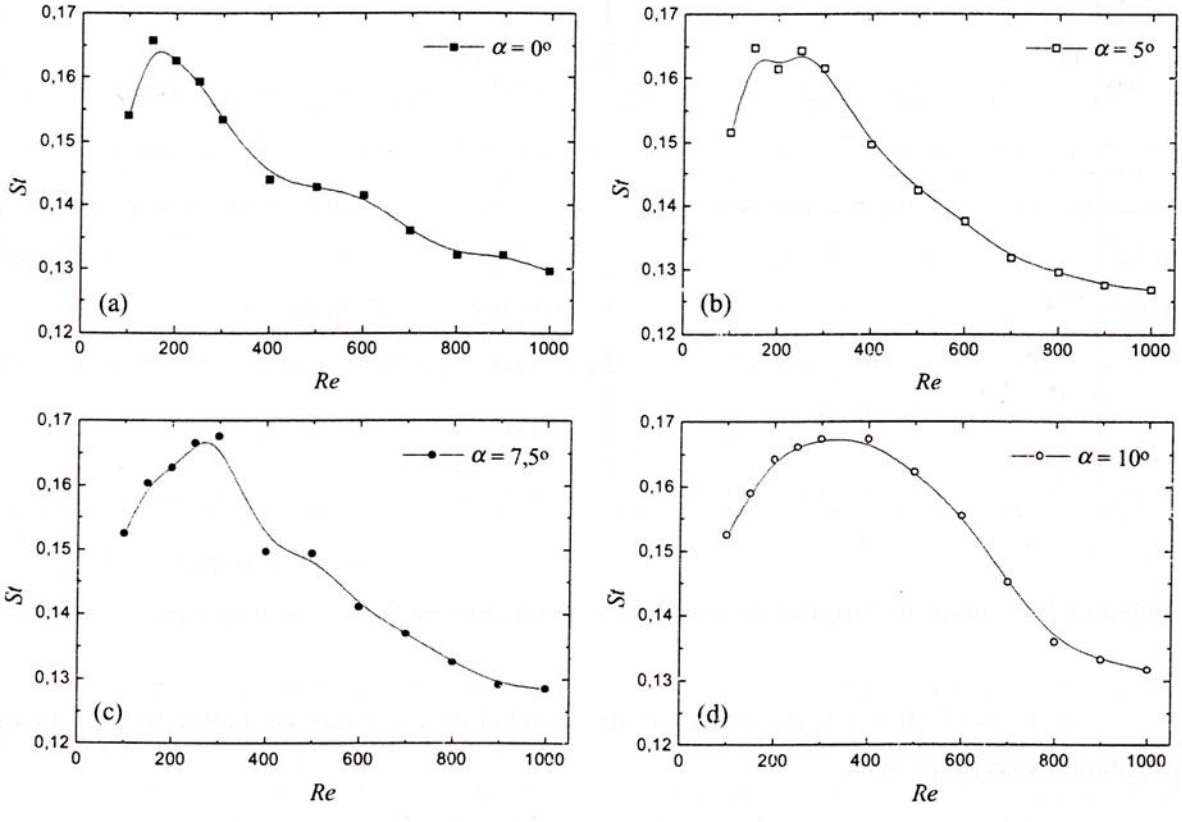


Figura 6.8 – Identificação das arestas de um cilindro quadrado.

A Figura 6.9 apresenta os mesmos resultados expressos, agora, na forma de curvas de Strouhal *versus* Reynolds, para ângulos de incidência $0° \leq \alpha \leq 45°$. Como era de se esperar, o número de Reynolds possui grande influência sobre o escoamento.



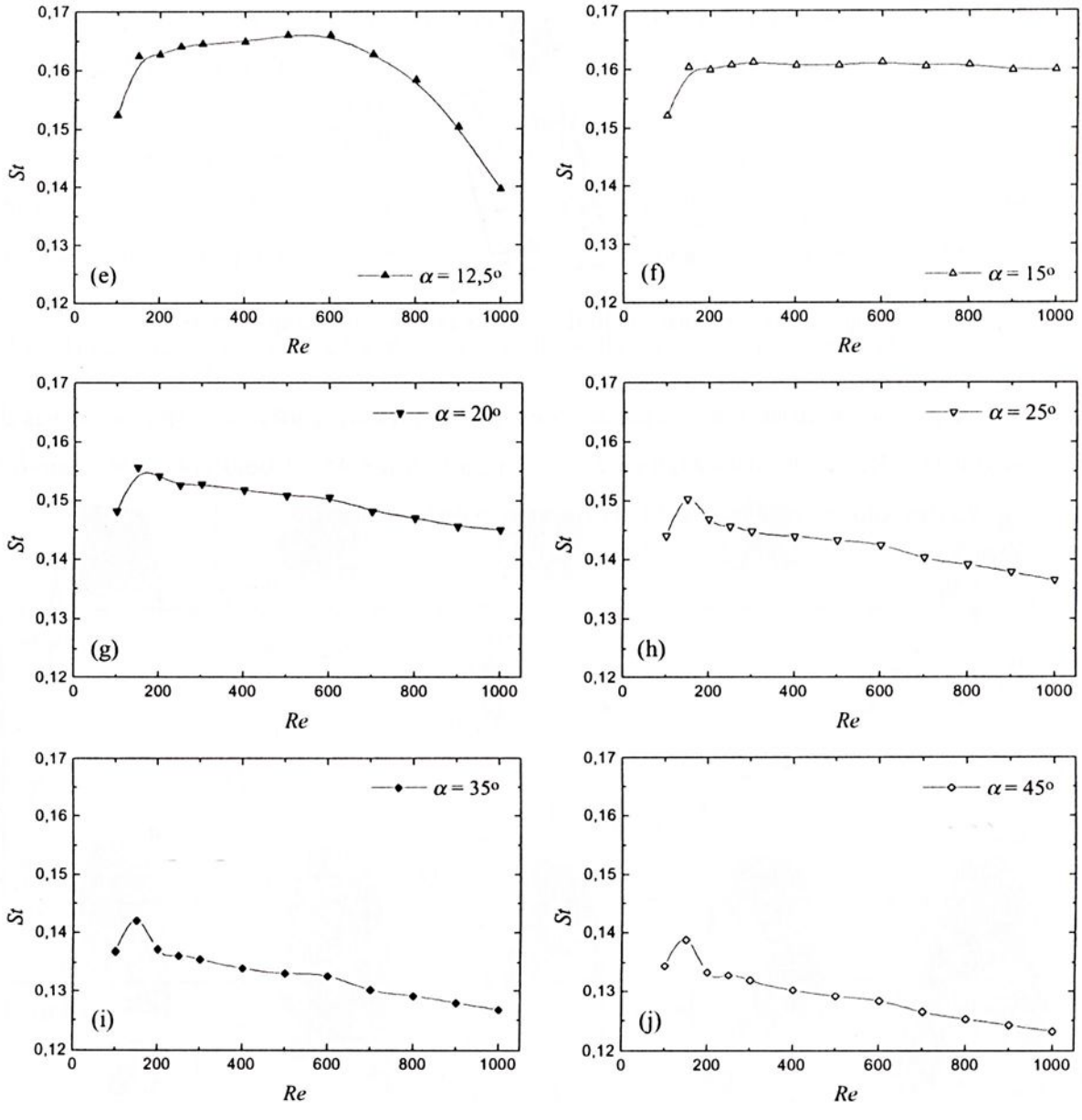


Figura 6.9 – Curvas de Strouhal de um cilindro quadrado com ângulo de ataque entre 0° e 45°.

A Figura 6.10 condensa as curvas de Strouhal apresentadas na Figura 6.9, a fim de possibilitar sua comparação.

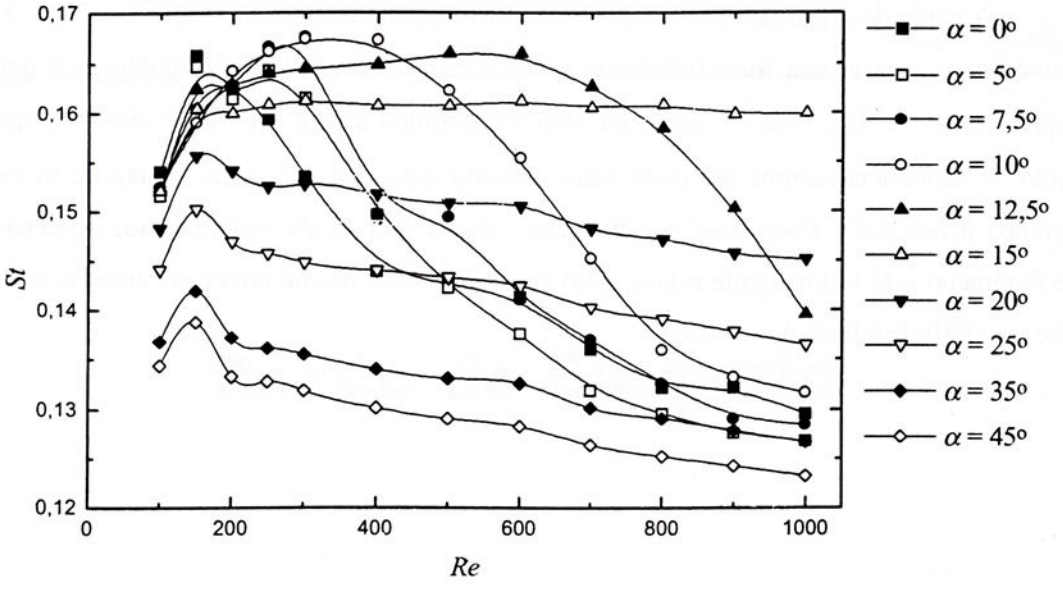


Figura 6.10 – Comparação entre as curvas de Strouhal de um cilindro quadrado com ângulo de ataque entre 0° e 45°.

Entre as curvas apresentadas, chama a atenção aquela correspondente a $\theta = 15°$ (triângulo branco apontando para cima), que exibe um comportamento praticamente constante e igual a 0,16 para $Re \geq 150$. Esta característica torna este tipo de obstáculo particularmente adequado à utilização em medidores de vazão a efeito vórtice (*vortex meters*), com a vantagem de possuir uma geometria simples e permitir a operação em fluxo reverso.

6.5 Conclusões

No presente estudo, investigou-se a influência do ângulo de ataque sobre a esteira de um cilindro quadrado, para números de Reynolds inferiores a 10^3. Durante a condução dos ensaios experimentais, foram utilizadas duas metodologias complementares: a anemometria de filme quente, para a determinação da freqüência de emissão dos vórtices, e a visualização de escoamentos, para a aquisição de imagens das camadas cisalhantes que se formam sobre as superfícies do cilindro.

A partir dos resultados obtidos durante a campanha de ensaios, verifica-se que o ângulo de incidência exerce uma forte influência sobre a esteira de vórtices. Variando-se o ângulo de ataque entre 0° e 45°, nota-se que o número de Strouhal atinge um valor máximo, quando o ângulo de incidência assume um dado valor, situado entre 8 e 16°, para a faixa de números de Reynolds investigada. Com base nas imagens obtidas através da visualização, observa-se que este fenômeno está intimamente relacionado com o recolamento de uma das camadas cisalhantes sobre a superfície lateral do cilindro.

unesp

Capítulo 7

Razão de Bloqueio

7.1 Introdução

Em diversas situações, o escoamento ao redor de corpos cilíndricos pode ser considerado como ocorrendo em meio infinito. Em outros casos, entretanto, a dinâmica de geração dos vórtices pode ser fortemente afetada pela proximidade de superfícies sólidas, tal como se verifica em ensaios conduzidos no interior de túneis ou outros dispositivos com seção de testes fechada, quando a presença das paredes não pode ser negligenciada.

Seja um corpo cilíndrico com seção transversal quadrada, imerso perpendicularmente num escoamento com velocidade uniforme e constante V_∞. A Figura 7.1 ilustra esta situação, na qual o escoamento é parcialmente bloqueado por um corpo cilíndrico de base quadrada.

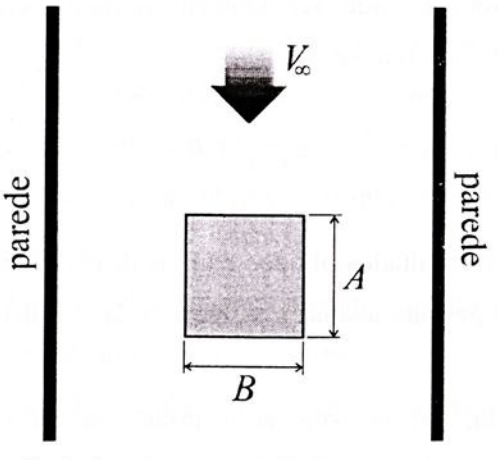


Figura 7.1 – Cilindro quadrado imerso perpendicularmente num escoamento confinado.

O bloqueio devido à obstrução parcial do escoamento pelo corpo sólido pode ser quantificado pela razão de bloqueio sólido, definida como

$$\beta = \frac{A_{cp}}{A_{st}} \cdot 100\% \tag{7.1}$$

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

Da mesma forma que nos casos anteriores, os números de Strouhal e de Reynolds são dados por

$$St = \frac{f\,B}{V_\infty} \tag{7.2}$$

$$Re = \frac{V_\infty\,B}{\nu} \tag{7.3}$$

onde f é a freqüência com que os vórtices são emitidos de um mesmo lado do cilindro, B é a dimensão característica do cilindro, V_∞ é a velocidade da corrente livre uniforme e ν é a viscosidade cinemática do fluido.

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 cilindro. A velocidade média do escoamento na seção bloqueada pode ser estimada com uso do princípio da continuidade, resultando em

$$V_b = \frac{V_\infty}{(1 - A_{cp}/A_{st})} \tag{7.4}$$

O número de Strouhal pode ser também definido com base na velocidade do escoamento bloqueado V_b. Assim, tem-se

$$St_b = \frac{f\,B}{V_b} \tag{7.5}$$

A comparação entre resultados obtidos com as duas definições do número de Strouhal (dadas pelas Eqs. 7.2 e 7.5) permite avaliar a influência da escolha da velocidade de referência sobre os resultados.

No presente estudo, foi investigada a influência da razão de bloqueio sobre o escoamento ao redor de cilindros de base quadrada, para números de Reynolds inferiores a 10^3.

unesp

A razão de bloqueio foi variada entre 2,5 e 30%, utilizando-se corpos cilíndricos de base quadrada com diferentes dimensões.

7.2 Revisão Bibliográfica

West & Apelt (1982) realizaram um estudo sobre os efeitos das razões de aspecto e de bloqueio sobre o escoamento ao redor de cilindros circulares, para números de Reynolds situados entre 10^4 e 10^5. Durante os experimentos, conduzidos em um túnel aerodinâmico, foram utilizados sete modelos cilíndricos com diâmetro variando entre 3,2 e 41 mm, abrangendo uma faixa de razão de bloqueio de 2 a 16%.

Os autores concentraram sua atenção sobre dois parâmetros do escoamento: os coeficientes de arrasto e de pressão na base, embora também apresentem alguns resultados relativos ao número de Strouhal. Estes dois coeficientes foram calculados com base em medidas de pressão na superfície dos modelos, utilizando um manômetro de coluna d'água de precisão. Já a freqüência de emissão dos vórtices, necessária para o cálculo do número de Strouhal, foi determinada com base nas figuras de Lissajous observadas em um osciloscópio, quando o sinal de uma sonda de fio quente era visualizado contra um sinal produzido por um gerador de ondas. Os autores não fornecem nenhuma estimativa das incertezas envolvidas na determinação da freqüência de emissão dos vórtices por este método.

Seus resultados mostram que, para razões de bloqueio inferiores a 6%, os efeitos do bloqueio sobre a distribuição de pressão e o coeficiente de arrasto de cilindros circulares são pequenos, enquanto que o número de Strouhal não é afetado. Já para razões de bloqueio maiores, ocorre uma considerável distorção do escoamento e os efeitos do bloqueio passam a ser significativos e complexos. Neste caso, para um dado número de Reynolds, o número de Strouhal cresce rapidamente com o aumento da razão de bloqueio. Para uma razão de bloqueio igual a 16%, os resultados sugerem que a curva de Strouhal se torna insensível ao número de Reynolds, dentro da faixa investigada.

Davis & Moore (1982) investigaram numericamente o escoamento ao redor de corpos cilíndricos retangulares em meio infinito. Posteriormente, este trabalho foi estendido por Davis *et al.* (1984), no sentido de estudar, numérica e experimentalmente, o escoamento confinado ao redor de cilindros com seção transversal retangular. Os parâmetros investigados,

unesp

neste caso, foram a razão de forma da seção retangular, a razão de bloqueio e o perfil de velocidade da corrente livre na entrada do domínio computacional.

A análise experimental deste problema foi conduzida em um túnel aerodinâmico de baixa velocidade. O modelo de ensaio, uma barra de aço laminada a frio com seção transversal quadrada sem usinagem adicional, foi montado entre duas paredes móveis no interior da seção de testes do túnel. A freqüência de emissão dos vórtices foi determinada com o auxílio de uma sonda de fio quente, e a esteira de vórtices foi visualizada com fumaça.

Para números de Reynolds entre 100 e 1850, e valores da razão de bloqueio iguais a 0, 17 e 25%, os autores observaram que tanto o número de Strouhal quanto o coeficiente de arrasto dos cilindros quadrados aumentam significativamente com a razão de bloqueio, embora mantenham o mesmo comportamento qualitativo. Foram observadas, também, regiões de recirculação se movendo entre a esteira e as paredes, principalmente para números de Reynolds mais elevados.

Laneville (1990) propôs um método empírico para a correção do efeito da razão de bloqueio sólido sobre os coeficientes de arrasto e de pressão na base, levando em consideração a razão de aspecto do cilindro. Este método, quando aplicado a alguns dados disponíveis na literatura, mostrou-se eficiente, mesmo para escoamentos turbulentos e com ângulo de incidência não nulo.

Mukhopadhyay *et al.* (1992) conduziram uma investigação numérica sobre o escoamento confinado ao redor de cilindros quadrados, para números de Reynolds inferiores a 800 e razão de bloqueio entre 12,5 e 37,5%, com o perfil de velocidade parabólico na entrada do domínio computacional. Os parâmetros do escoamento investigados foram o número de Strouhal, o coeficiente de sustentação do cilindro, e o coeficiente de atrito nas paredes laterais do canal.

O número de Strouhal foi determinado com base na freqüência de oscilação dos valores da velocidade local num determinado ponto da malha de cálculo, ou ainda do coeficiente de sustentação do cilindro. Os resultados mostraram que o número de Strouhal cresce significativamente com o aumento da razão de bloqueio. Para a faixa de números de Reynolds compreendidos entre 87 e 312, as curvas de Strouhal apresentam pequenas diferenças qualitativas entre si.

Suzuki *et al.* (1993) empreenderam um estudo numérico e experimental sobre o escoamento no interior de um canal, parcialmente obstruído por um cilindro com seção transversal quadrada, posicionado perpendicularmente à corrente livre no plano central do canal.

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 unesp 12 13 14 15 16 17 18

A investigação computacional foi desenvolvida para diferentes razões de bloqueio sólido, números de Reynolds e perfis de velocidade da corrente livre. Alguns parâmetros do escoamento foram calculados, tais como o número de Strouhal e o coeficiente de arrasto. Paralelamente à análise numérica, foram conduzidas diversas visualizações experimentais do escoamento, com o objetivo de revelar as estruturas encontradas na esteira de vórtices e próximo às paredes do canal. A comparação entre as visualizações numéricas e experimentais apresenta boa concordância.

Para diversos casos do escoamento bloqueado, observou-se um interessante fenômeno de emissão cruzada dos vórtices, ou seja, os vórtices emitidos de um determinado lado do corpo cruzam o plano central do canal e se dirigem em direção à parede do lado oposto, à medida em que eles se deslocam à jusante. Este fenômeno foi confirmado nos ensaios de visualização experimental, pela injeção de corantes diferentes em cada lado do corpo cilíndrico. Os autores também determinaram as condições necessárias para a ocorrência deste fenômeno, em função do número de Reynolds e da razão de bloqueio, além de verificarem que o desalinhamento do cilindro em relação ao plano central do canal não afeta significativamente a emissão cruzada dos vórtices.

Lindquist *et al.* (1998a) investigaram experimentalmente a influência da razão de bloqueio sobre o número de Strouhal de corpos cilíndricos com seção transversal quadrada, para números de Reynolds inferiores a 300. Os ensaios foram conduzidos em um túnel hidrodinâmico vertical, utilizando-se exclusivamente técnicas de visualização por injeção de corantes líquidos. A razão de bloqueio foi variada com a utilização de corpos cilíndricos com diferentes dimensões, posicionados com um ângulo de incidência igual a 0° e 45°.

Para cada corpo, a freqüência de emissão dos vórtices, necessária ao cálculo do número de Strouhal, foi determinada a partir da análise de imagens registradas em fitas de vídeo, com o auxílio da técnica de contagem de fotogramas. Os resultados obtidos permitiram concluir que ocorre uma acentuada elevação do número de Strouhal com o aumento da razão de bloqueio, em concordância com a literatura especializada.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 12 13 14 15 16 17 18

7.3 Metodologia Experimental

Os ensaios foram conduzidos em modo contínuo, para $Q \geq 0{,}3$ l/s, e em modo *blow-down,* para vazões menores. A fim de variar a razão de bloqueio do escoamento, foram utilizados seis corpos cilíndricos de base quadrada com diferentes dimensões, resumidas na Tabela 7.1.

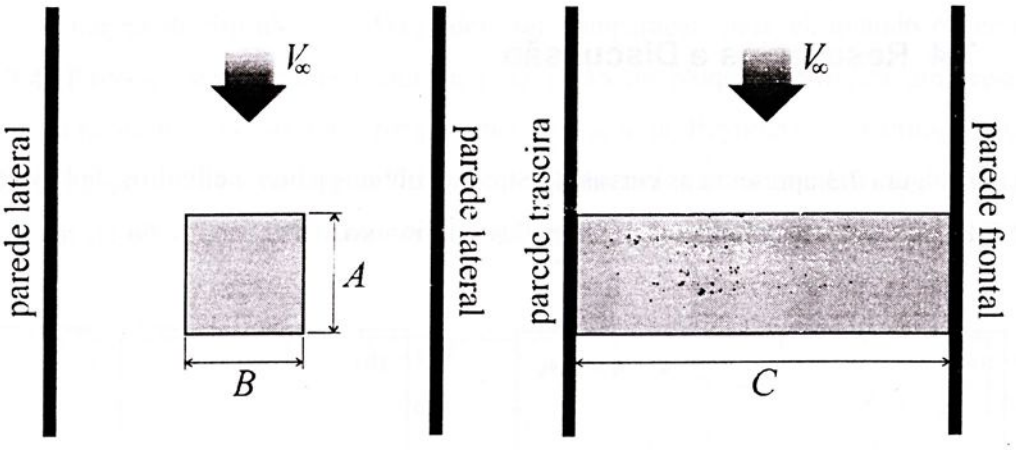
Tabela 7.1 – Principais características dos corpos cilíndricos utilizados.

Modelo	B [mm]	$\alpha = C/B$	β (%)	β nominal (%)
A1	3,03	48,4	2,44	2,5
C1	12,57	11,7	10,0	10
C2	19,02	7,3	15,1	15
C3	24,92	5,9	19,8	20
C4	31,44	4,7	25,0	25
C5	38,01	3,8	30,2	30

Como mostra a Tabela 7.1, a razão de aspecto α dos modelos cilíndricos, definida como a razão entre o comprimento C (ou envergadura) do cilindro e a dimensão B da base de sua seção transversal, varia entre aproximadamente 4 e 48. Como será mostrado no próximo capítulo, a razão de aspecto pode exercer uma forte influência sobre o escoamento ao redor de um cilindro quadrado, especialmente para números de Reynolds inferiores a 600. As implicações deste acoplamento entre a razão de bloqueio e a razão de aspecto, bem como possíveis soluções para este problema, são apresentadas na seção 7.5.

Os modelos cilíndricos foram firmemente engastado na janela traseira da seção de testes, com ângulo de incidência nulo, ajustado com o auxílio de um esquadro. A Figura 7.2 ilustra a montagem dos cilindros no interior da seção de testes.

unesp



(a) vista de topo (b) vista lateral

Figura 7.2 – Montagem dos cilindros quadrados no interior da seção de testes.

A sonda de filme quente foi instalada num suporte em forma de cotovelo, introduzido na seção de testes através da estação 6 da janela lateral. A sonda de temperatura do anemômetro foi introduzida na seção de testes no seu ponto mais a jusante (estação 8). Os sinais de velocidade na esteira, obtidos com o auxílio da anemometria de filme quente, foram adquiridos a uma taxa de 100 Hz e armazenados em cinco blocos com N pontos cada. A fim de possibilitar a passagem de um número suficiente de vórtices pela sonda anemométrica, o número de amostras armazenadas em cada bloco foi ajustado em $N = 2048$ para razões de bloqueio mais baixas ($\beta \leq 10\%$), $N = 4096$ pontos para razões de bloqueio intermediárias ($\beta = 15$ e 20%), e $N = 8192$ pontos para razões de bloqueio mais elevadas ($\beta \geq 25\%$). A análise dos sinais adquiridos foi realizada de acordo com os procedimentos descritos na seção 3.4.

A fim de tornar o escoamento visível, foi utilizada a técnica de visualização por injeção de corantes líquidos, na modalidade *dye wash*. Esta técnica de visualização permite a observação do escoamento ao redor do cilindro para velocidades baixas e moderadas. Já para velocidades mais elevadas, o corante é "lavado" rapidamente, não permitindo a obtenção de imagens nítidas. As imagens do escoamento foram captadas em filme fotográfico, utilizando uma câmara Nikon F4 equipada com uma objetiva Micro Nikkor 60mm.

unesp

7.4 Resultados e Discussão

A Figura 7.3 apresenta as curvas de Strouhal obtidas para os cilindros de base quadrada com $2{,}5\% \leq \beta \leq 30\%$, para números de Reynolds inferiores a 1000.

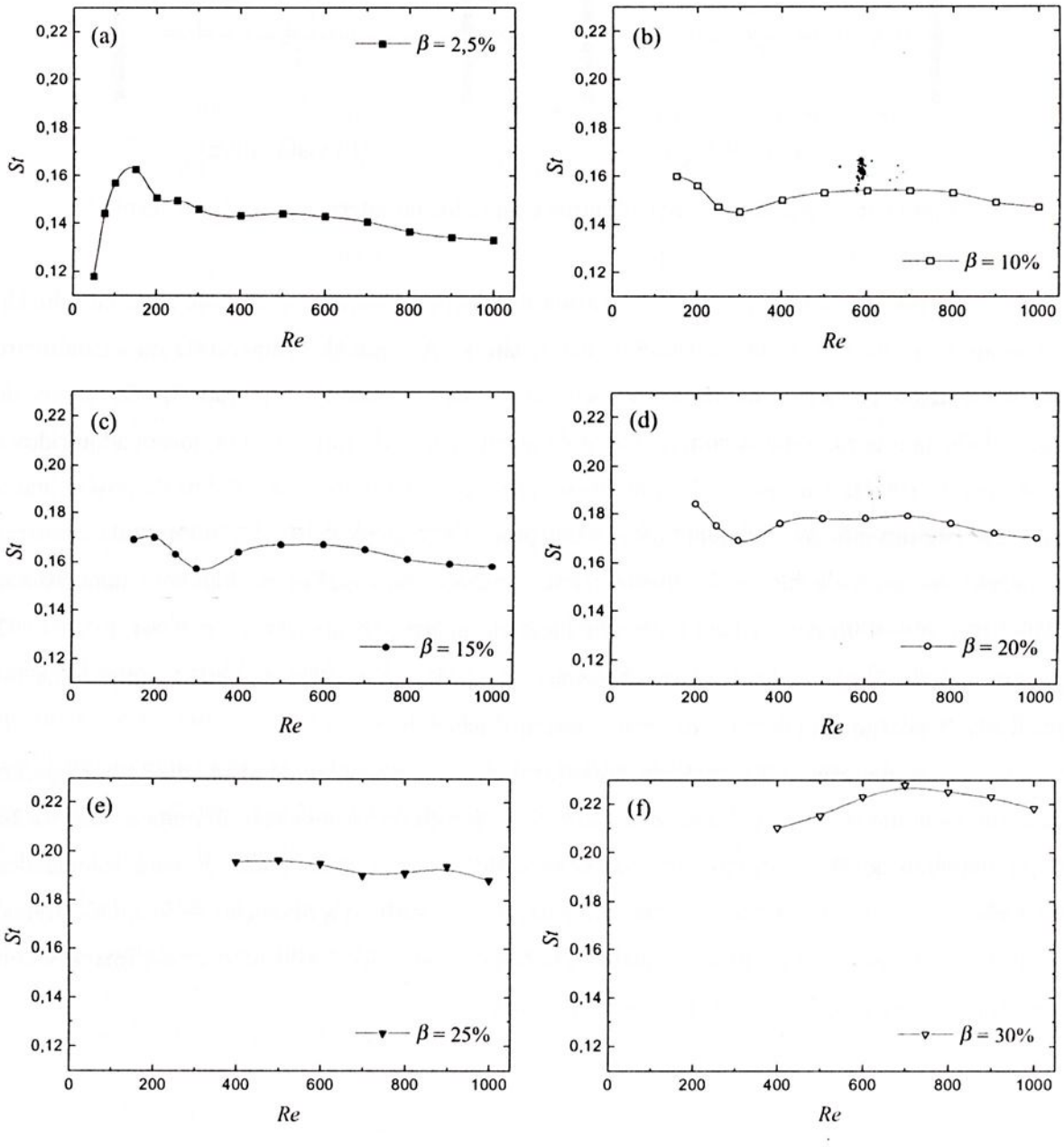


Figura 7.3 – Curvas de Strouhal *versus* Reynolds para cilindros quadrados com $2{,}5\% \leq \beta \leq 30\%$.

As curvas de Strouhal obtidas podem ser comparadas entre si, quando observadas na Figura 7.4. Pode-se verificar que o aumento da razão de bloqueio provoca um crescimento significativo no número de Strouhal, para um dado número de Reynolds. Esta situação fica ainda mais evidente no gráfico da Figura 7.5, onde se observa que o número de Strouhal pode aumentar em até 60%, quando a razão de bloqueio varia de 2,5 a 30%.

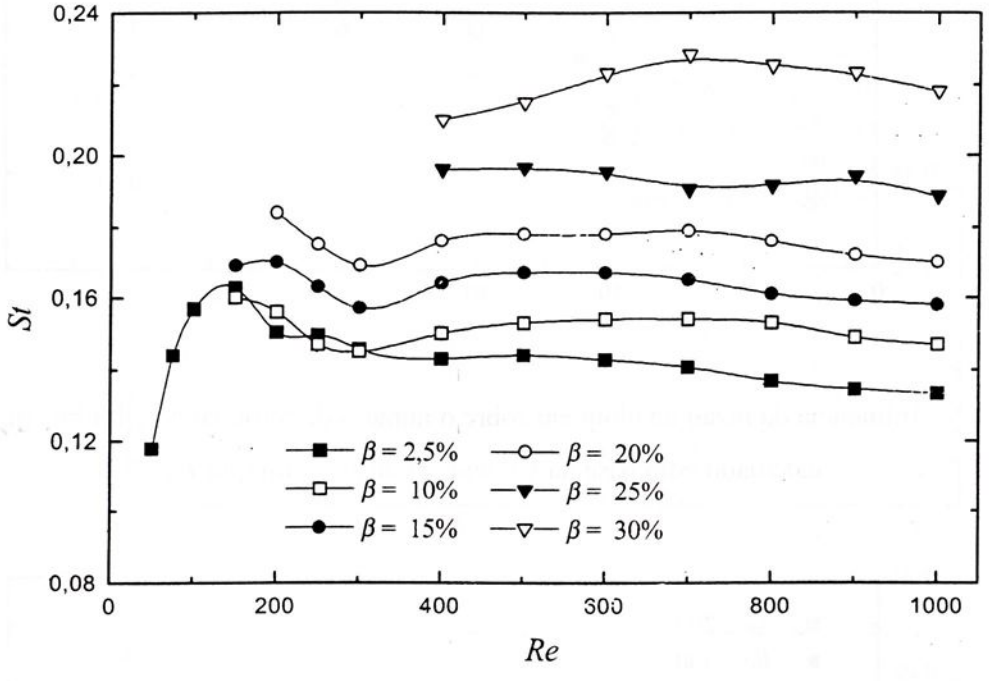


Figura 7.4 – Comparação entre as curvas de Strouhal de um cilindro quadrado com razão de bloqueio entre 2,5 e 30%.

A fim de estimar a influência da velocidade característica utilizada no cálculo do número de Strouhal, este parâmetro também foi calculado com base na velocidade do escoamento na seção bloqueada, dada pela Eq.(7.4). É fácil verificar que, neste caso, a influência da razão de bloqueio sobre St_b é significativamente menor do que sobre St, calculado com base na velocidade da corrente livre não perturbada. Assim, a Eq.(7.5) pode ser utilizada como uma primeira aproximação para corrigir os efeitos da razão de bloqueio sobre o número de Strouhal.

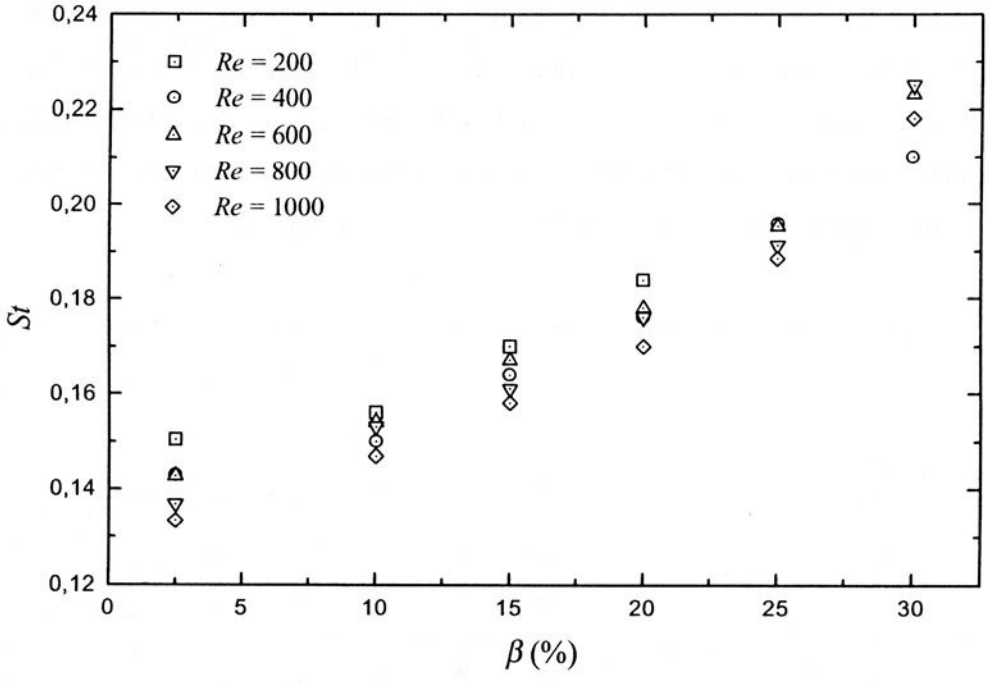


Figura 7.5 – Influência da razão de bloqueio sobre o número de Strouhal de cilindros quadrados, calculado com base na velocidade de aproximação V_∞.

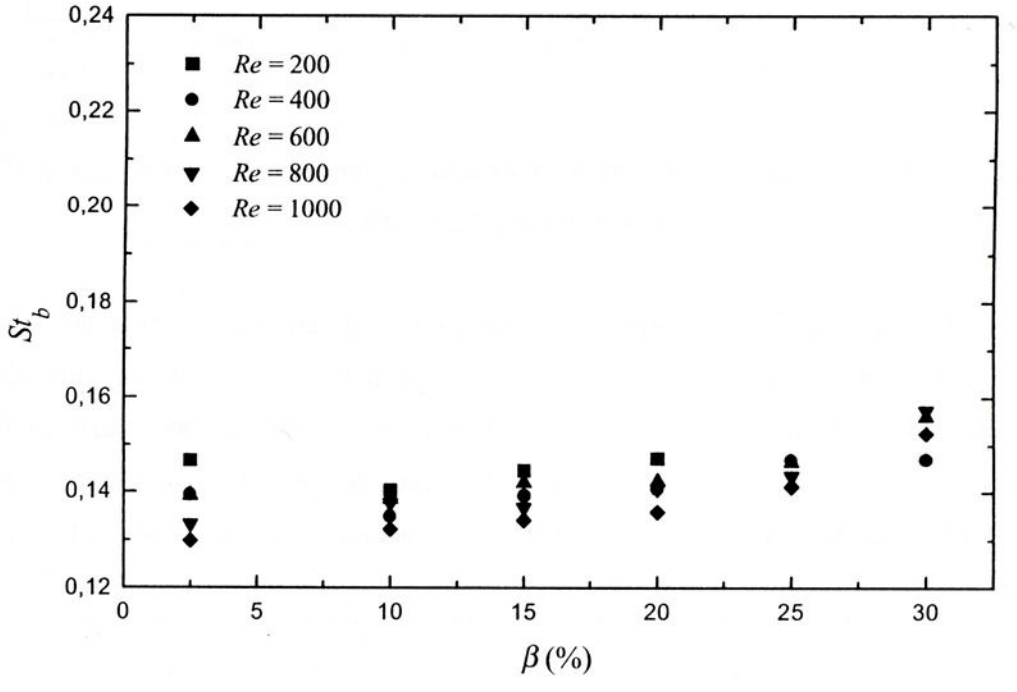


Figura 7.6 – Influência da razão de bloqueio sobre o número de Strouhal de cilindros quadrados, calculado com base na velocidade média da seção bloqueada V_b.

A Figura 7.7 permite a comparação dos resultados obtidos no âmbito do presente trabalho com dados disponíveis na literatura. Considerando as diferenças nos arranjos experimentais e as incertezas de medição ou simulação das grandezas de interesse, a concordância entre os resultados pode ser considerada aceitável.

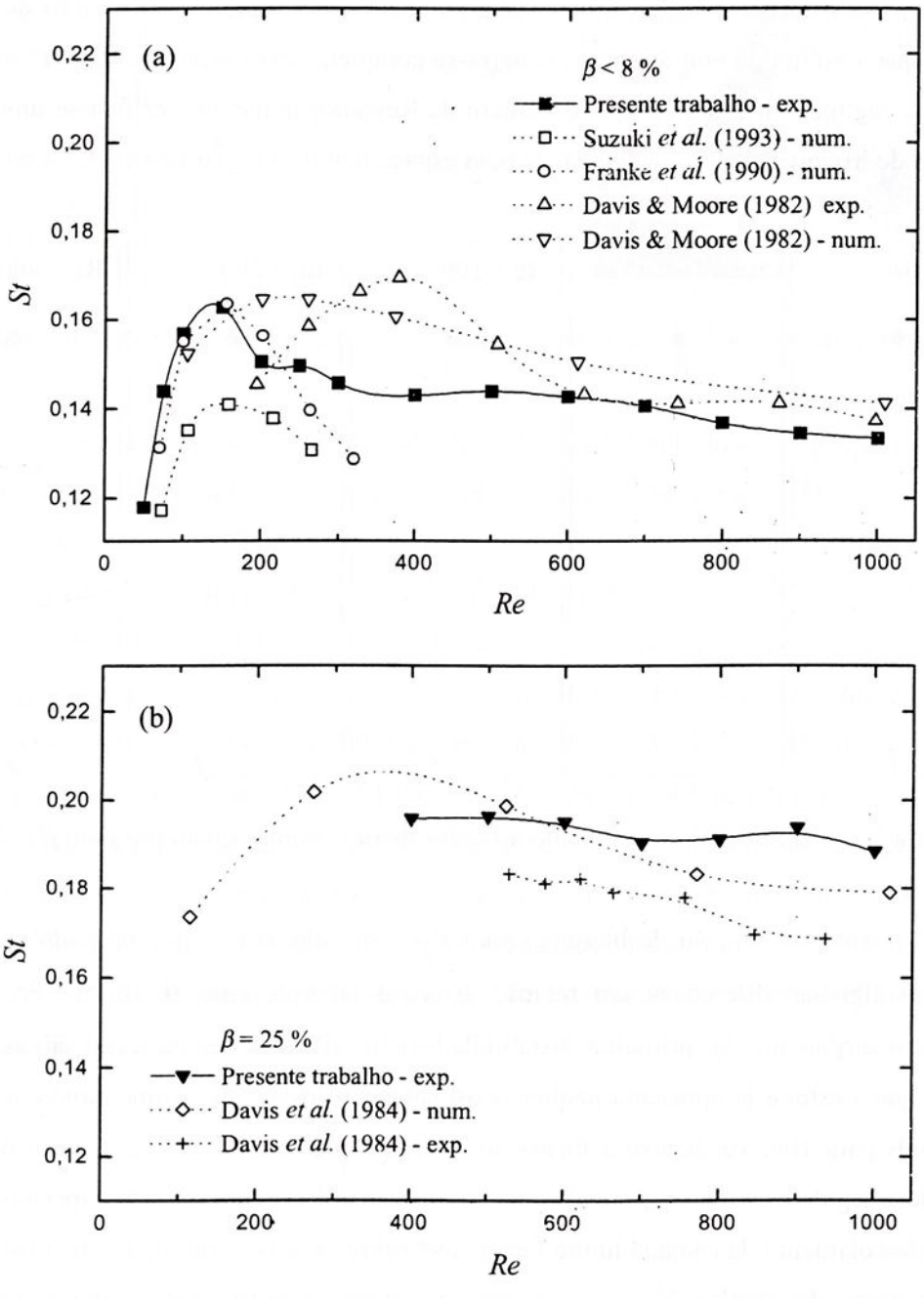


Figura 7.7 – Comparação dos resultados obtidos com dados de outros autores.

A Figura 7.8 apresenta imagens da esteira a jusante de um cilindro quadrado com baixa razão de bloqueio ($\beta = 2{,}5\%$), para diferentes números de Reynolds. Pode-se observar que, para $Re = 40$, ocorre a formação de duas bolhas de recirculação simétricas junto à base do cilindro, seguidas de uma esteira estável. Aumentando-se o número de Reynolds para 50, verifica-se que as bolhas de recirculação tornam-se assimétricas e oscilantes, assim como a esteira que se forma à jusante. Estas oscilações se amplificam com aumentos subsequentes no número de Reynolds, de forma que a esteira de von Kármán encontra-se completamente estabelecida para $Re = 100$. A partir deste regime, à medida em que o número de Reynolds aumenta, verifica-se uma crescente incidência de irregularidades, evidenciadas pelo espaçamento irregular dos vórtices na esteira.

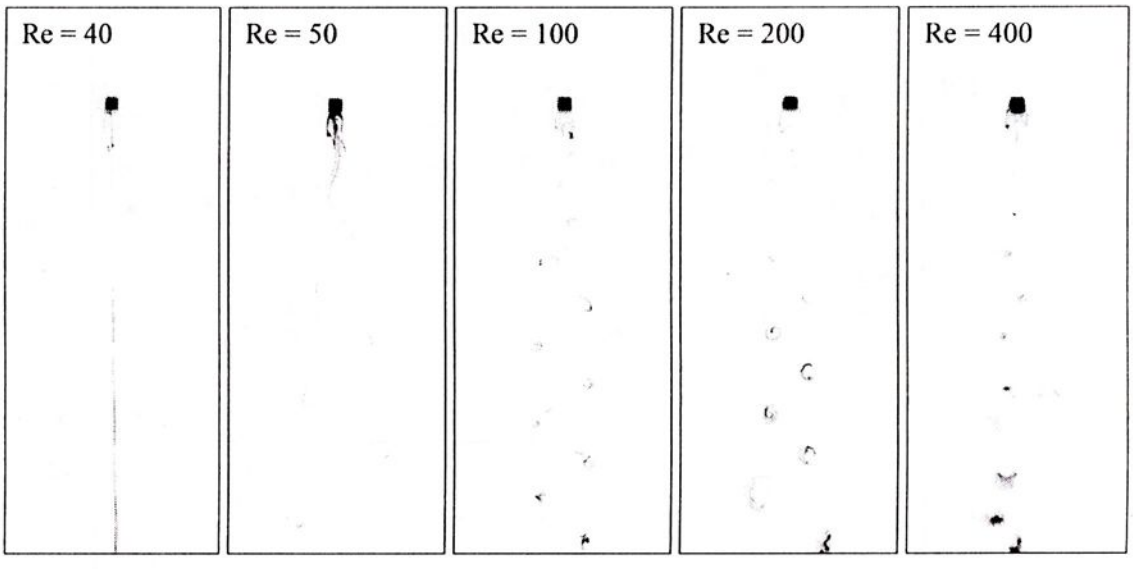


Figura 7.8 – Regimes do escoamento ao redor de um cilindro quadrado com $\beta = 2{,}5\%$.

Aumentando a razão de bloqueio para $\beta = 10\%$, observa-se que os padrões da esteira apresentam algumas diferenças em relação ao caso anterior com $\beta = 2{,}5\%$. Para $Re = 50$, verifica-se o surgimento das primeiras instabilidades - as bolhas de recirculação são assimétricas, enquanto que a esteira já apresenta pequenas oscilações transversais. Aumentando-se o número de Reynolds para 100, verifica-se a formação da esteira de von Kármán a jusante do cilindro, com vórtices regulares e com aspecto laminar. Já para números de Reynolds superiores a 400, o ponto de descolamento da camada limite localiza-se sobre as arestas de fuga, e não mais sobre as arestas de ataque do cilindro. Nestes casos, observa-se que os vórtices apresentam instabilidades secundárias tridimensionais, que lhes conferem um aspecto mais difuso.

unesp

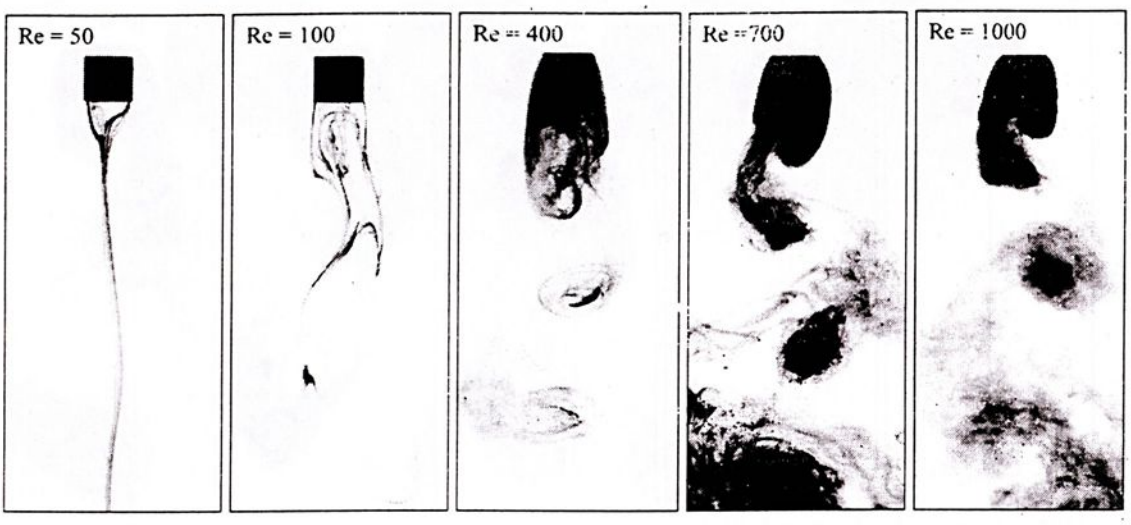


Figura 7.9 – Regimes do escoamento ao redor de um cilindro quadrado com $\beta = 10\%$.

Deve-se ressaltar que os limites laterais das imagens apresentadas não coincidem com as paredes da seção de testes do túnel hidrodinâmico. A razão para isso reside no fato de que o campo de visão é limitado pelo tamanho da janela de observação.

Aumentando-se ainda mais a razão de bloqueio do escoamento, observa-se uma influência crescente das paredes da seção de testes sobre a esteira de vórtices formada a jusante dos cilindros quadrados. Conforme pode ser verificado nas imagens fornecidas pelas Figuras 7.10 a 7.12, os vórtices emitidos na esteira turbilhonar apresentam um aspecto mais achatado, evidenciando a ação mecânica das paredes sobre a esteira. Para baixos números de Reynolds, quando a esteira ainda apresenta-se simétrica e estável, nota-se que as duas bolhas de recirculação que se formam junto à base do cilindro possuem um aspecto comprimido, devido à deformação do perfil de velocidade na seção bloqueada. Para números de Reynolds mais elevados ($Re = 1000$), os grandes turbilhões aglutinam estruturas secundárias tridimensionais de menores escalas e freqüências mais elevadas.

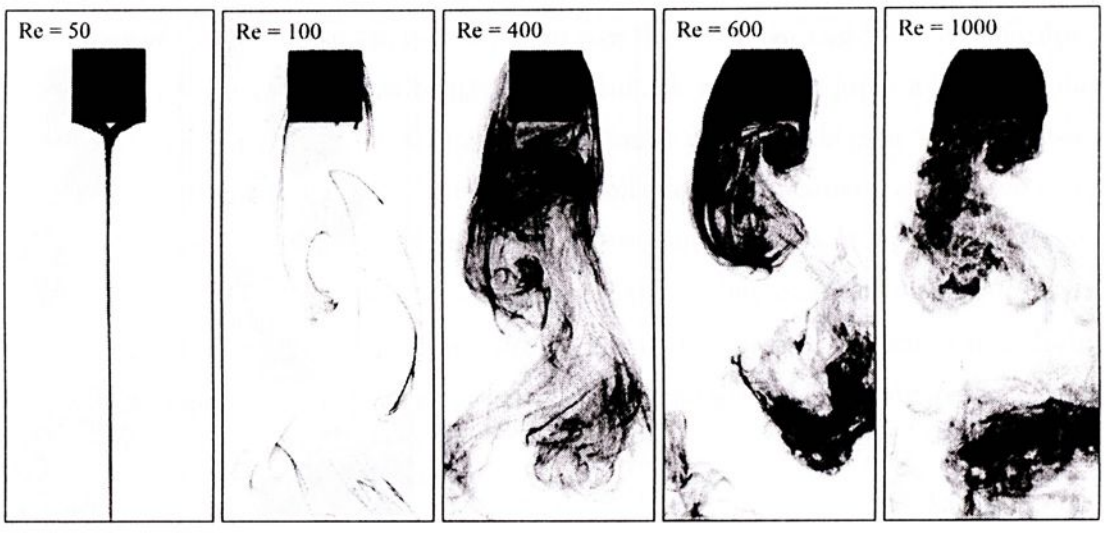


Figura 7.10 – Regimes do escoamento ao redor de um cilindro quadrado com $\beta = 15\%$.

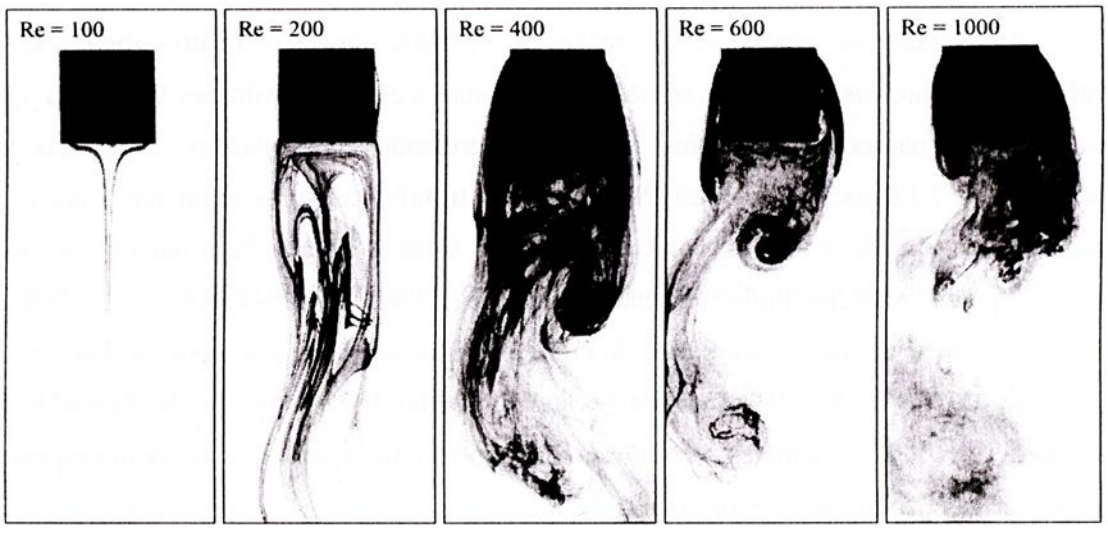


Figura 7.11 – Regimes do escoamento ao redor de um cilindro quadrado com $\beta = 20\%$.

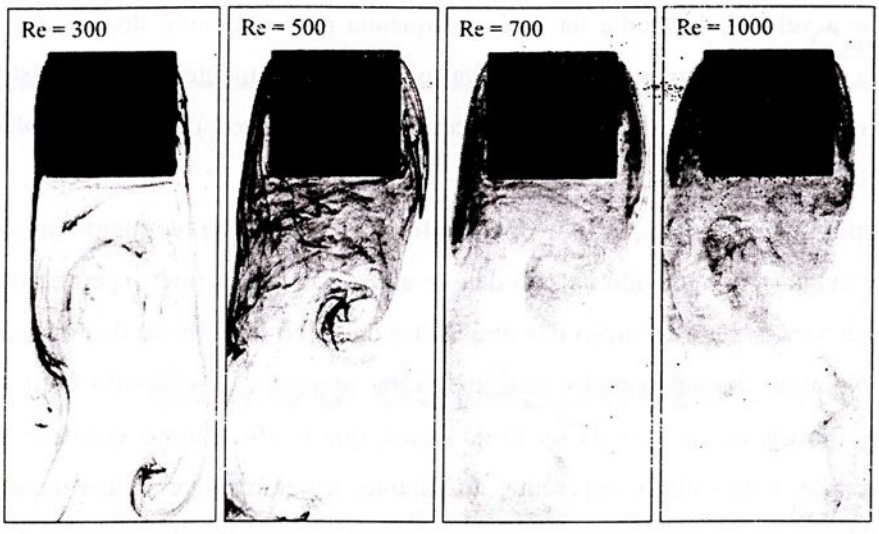


Figura 7.12 – Regimes do escoamento ao redor de um cilindro quadrado com $\beta = 25\%$.

Para $\beta = 30\%$ não são apresentadas imagens do escoamento, uma vez que a esteira turbilhonar encontra-se quase totalmente oculta pelos limites da janela de observação da seção de testes. Entretanto, os resultados observados reforçam a constatação de que a influência das paredes sobre a esteira se torna cada vez mais importante, à medida em que aumenta o bloqueio do escoamento.

7.5 Conclusões

Neste capítulo, foi apresentado um estudo experimental do escoamento ao redor de cilindros com seção transversal quadrada, no qual o bloqueio do escoamento não pode ser desconsiderado. Utilizando-se modelos cilíndricos com diferentes dimensões, variou-se a razão de bloqueio entre 2,5% e 30%. Neste caso, além das curvas de Strouhal, foram apresentadas, também, imagens do escoamento para diferentes razões de bloqueio e diversos regimes de escoamento.

Conforme mostram os resultados obtidos, a razão de bloqueio exerce uma grande influência sobre o fenômeno de emissão de vórtices na esteira de cilindros de base quadrada. Para razões de bloqueio superiores a 10%, observa-se uma nítida elevação das curvas de Strouhal *vs* Reynolds, quando este parâmetro é calculado com base na velocidade da corrente livre.

Utilizando-se a velocidade média da seção bloqueada para o cálculo do número de Strouhal, a influência da razão de bloqueio sobre as curvas obtidas é fortemente atenuada. Este artifício pode ser utilizado como um método simples de correção dos efeitos da razão de bloqueio sobre o número de Strouhal de cilindros quadrados.

Na presente investigação, o acoplamento entre a razão de bloqueio e a razão de aspecto não pôde ser evitado. Isto, devido ao fato de que a seção de testes possui geometria fixa, fazendo com que fosse necessária a variação das dimensões da seção transversal dos cilindros para variar a razão de bloqueio do escoamento. Este problema poderia ser resolvido com a utilização de duas paredes móveis no interior da seção de testes, que confinariam o escoamento ao redor do cilindro quadrado. Esta solução apresenta, no entanto, fortes inconvenientes técnicos que devem ser contornados para que sua aplicação seja praticável. Entre eles, destacam-se a dificuldade de medição da velocidade média do escoamento entre as paredes móveis, bem como a introdução de uma sonda de filme quente na esteira de vórtices.

Os *end plates* móveis, que, de uma certa forma, permitiriam variar o comprimento útil do cilindro, não puderam ser utilizados para manter a razão de aspecto constante, devido às grandes dimensões dos cilindros empregados. Entretanto, ainda que os *end plates* fossem utilizados, a razão de aspecto ficaria limitada a um valor não superior a $\alpha \cong 3$, que corresponde à maior razão de aspecto atingível por todos os modelos cilíndricos empregados.

unesp

Capítulo 8

Razão de Aspecto

8.1 Introdução

Nos capítulos anteriores, o escoamento ao redor dos corpos cilíndricos foi considerado como bidimensional, posto que o foco das atenções estava dirigido apenas para a região central do cilindro. Contudo, na maioria das aplicações práticas, este tipo de corpo sólido possui comprimento finito, situação em que a presença das extremidades pode induzir a emissão de rolos de vórtices tridimensionais, cujo comportamento dinâmico mostra-se bem mais complexo.

Seja um corpo cilíndrico com comprimento C e com seção transversal quadrada, imerso perpendicularmente num escoamento com velocidade uniforme e constante V_∞, conforme ilustrado na Figura 8.1.

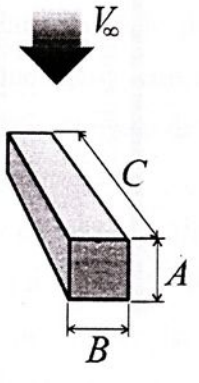


Figura 8.1 – Cilindro quadrado imerso perpendicularmente num escoamento uniforme.

Em regime de emissão de vórtices alternados, o número de Strouhal é definido como

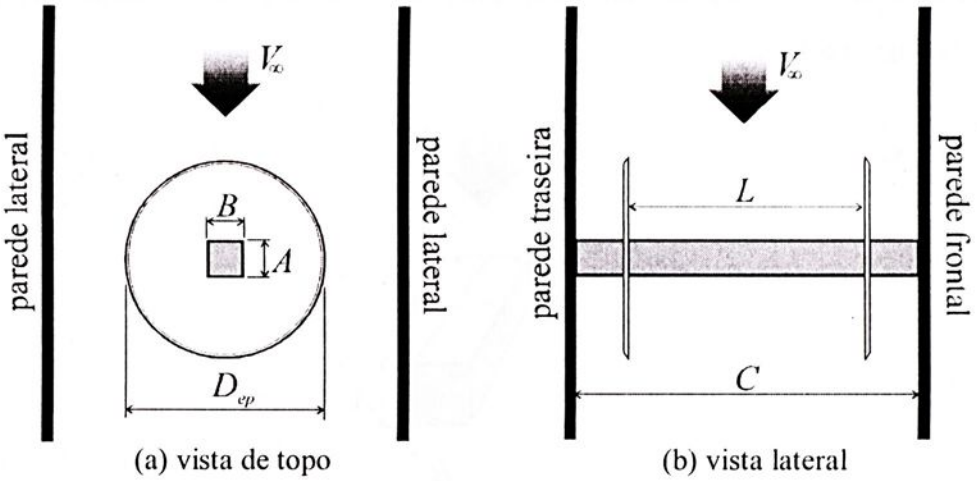
$$St = \frac{f\ B}{V_\infty} \tag{8.1}$$

onde f é a freqüência com que os vórtices são emitidos de um mesmo lado do cilindro, V_∞ é a velocidade da corrente livre uniforme e B é a dimensão característica do cilindro. O parâmetro governante deste problema é o número de Reynolds, definido por

$$Re = \frac{V_\infty\ B}{\nu} \tag{8.2}$$

onde ν é a viscosidade cinemática do fluido.

A razão de aspecto do cilindro, dada pela relação entre o seu comprimento (ou envergadura) e a sua dimensão característica, pode influenciar fortemente o escoamento ao redor de um corpo cilíndrico. Para produzir uma variação na razão de aspecto do cilindro, pode-se, evidentemente, alterar qualquer uma destas dimensões. No presente trabalho, no entanto, o comprimento do cilindro não pode ser alterado, uma vez que a seção de testes possui geometria fixa. Por outro lado, ao se modificar a dimensão da base do cilindro, provoca-se, também, uma variação proporcional no bloqueio sólido do escoamento. Este acoplamento indesejável entre a razão de aspecto e o bloqueio do escoamento pode ser evitado com o uso de duas placas móveis (*end plates*) instaladas ao longo do cilindro, permitindo variar o seu comprimento útil, sem a necessidade de modificar suas dimensões físicas. A Figura 8.2 ilustra esta configuração.



(a) vista de topo (b) vista lateral

Figura 8.2 – Cilindro quadrado imerso perpendicularmente no escoamento, com duas placas móveis próximas às extremidades (fora de escala).

Desta forma, a razão de aspecto é definida como

$$\alpha = \frac{L}{B} \tag{8.3}$$

onde L é o comprimento útil do cilindro – dado pela distância entre as placas móveis – e B é a sua dimensão característica. Estas placas possuem, ainda, o papel de isolar os efeitos da camada limite do túnel e do vórtice em forma de ferradura que se forma junto às extremidades do cilindro.

No presente estudo foi investigada a influência da razão de aspecto sobre o escoamento ao redor de um cilindro de base quadrada, para números de Reynolds inferiores a 10^3. A razão de aspecto foi variada entre 5 e 40 com o auxílio de dois *end plates* circulares, posicionados simetricamente ao longo do cilindro. A freqüência de emissão dos vórtices foi determinada com uma sonda de filme quente posicionada na esteira de vórtices, e os padrões do escoamento foram registrados em película fotográfica, com o auxílio de técnicas de visualização de escoamentos.

8.2 Revisão Bibliográfica

Durante a revisão bibliográfica, não foi encontrado nenhum trabalho que tratasse da influência da razão de aspecto sobre o escoamento ao redor de cilindros de base quadrada, mas apenas de cilindros de base circular. Não obstante, uma vez que se trata de um fenômeno semelhante, estes trabalhos foram analisados, cuja síntese pode ser encontrada a seguir.

West & Apelt (1982) investigaram os efeitos da razão de aspecto sobre o escoamento ao redor de cilindros com seção transversal circular, para números de Reynolds compreendidos entre 10^4 e 10^5. Os experimentos foram conduzidos num túnel aerodinâmico, abrangendo uma faixa de razão de aspecto entre 4 e 10, variada por meio de placas móveis instaladas próximo às extremidades dos corpos cilíndricos empregados.

Os resultados relativos à influência da razão de aspecto sobre os parâmetros em estudo, apesar de escassos e restritos a uma pequena faixa de valores de razão de aspecto, permitem concluir que os coeficientes de arrasto e de pressão na base diminuem suavemente com o aumento da razão de aspecto, para a faixa de números de Reynolds investigada. Já o número de

unesp

Strouhal não se mostrou sensível à variação da razão de aspecto entre 4 e 10, dentro da incerteza experimental inerente aos resultados.

Szepessy & Bearman (1992) investigaram os efeitos da razão de aspecto sobre a freqüência de emissão de vórtices de cilindros circulares, para números de Reynolds situados entre 8×10^3 e $1{,}4\times10^5$. Os ensaios, conduzidos em um túnel aerodinâmico, visaram medir as forças flutuantes que atuam sobre o cilindro, a freqüência de emissão dos vórtices e a sua correlação longitudinal.

Próximo às extremidades, o cilindro circular foi provido de um par de placas móveis, projetadas segundo as recomendações de Stansby (1974), permitindo variar a razão de aspecto sem alterar a razão de bloqueio, que permaneceu constante em 7,7%. Variando a razão de aspecto entre 0,25 e 12, os autores observaram uma forte influência deste fator sobre as forças oscilantes que atuam sobre o cilindro, principalmente sobre a força de sustentação. Além disso, foi constatado que o efeito da razão de aspecto possui forte dependência com o número de Reynolds. Os autores também verificaram a ocorrência de perturbações tridimensionais no escoamento, evidenciadas por ciclos fracos de emissão de vórtices, que apareceram nos sinais de velocidade em intervalos de aproximadamente 10 a 20 vezes o período de Strouhal. Entretanto, os autores observaram que este fenômeno pode ser atenuado com o uso de *end plates* apropriados e pequenas razões de aspecto.

Norberg (1994) conduziu um estudo experimental sobre escoamento ao redor de um cilindro circular, com o objetivo de investigar a influência da razão de aspecto sobre dois importantes parâmetros do escoamento: o número de Strouhal e o coeficiente médio de sução na base. Segundo o autor, estas duas quantidades apresentam-se como eficientes indicadores de mudanças significativas na estrutura do escoamento.

Os ensaios foram conduzidos num túnel aerodinâmico em circuito fechado, com intensidade turbulenta da corrente livre inferior a 0,06%. O número de Reynolds foi variado entre 50 e 4×10^4, e a razão de bloqueio sólido foi mantida sempre inferior a 1,6%. Diferentes valores de razão de aspecto foram obtidos, variando-se a distância entre os *end plates* circulares, com os quais foram equipados os corpos cilíndricos, constituídos de fios ou tubos com seção transversal circular.

A freqüência de emissão dos vórtices foi determinada através da análise espectral do sinal de velocidade temporal, obtido com o auxílio de uma sonda de fio quente posicionada na esteira de vórtices. Além disso, foram realizadas visualizações do escoamento, a fim de

unesp

evidenciar outros aspectos, tais como o comprimento da região de formação dos vórtices, diferentes padrões de emissão de vórtices, entre outros.

Seus resultados mostram que a razão de aspecto exerce grande influência sobre os dois parâmetros em estudo. Para razões de aspecto maiores do que 100, com a corrente livre incidente uniforme, o número de Strouhal se mostrou independente da razão de aspecto, com os vórtices sendo emitidos paralelamente ao cilindro, para números de Reynolds inferiores a 70. Para razões de aspecto menores do que 20, o número de Strouhal diminui significativamente, especialmente para números de Reynolds inferiores a 10^3, quando o diâmetro relativo dos *end platres* (D_{ep}/D) também se mostra um fator importante.

8.3 Metodologia Experimental

Os ensaios foram conduzidos no túnel hidrodinâmico vertical, operado em modo contínuo, para $Re \geq 150$, e em modo *blow-down*, para números de Reynolds menores. Durante a realização dos ensaios, foi empregado o modelo cilíndrico A1, cujas dimensões características podem ser encontradas no Apêndice A.

A fim de variar a razão de aspecto, o cilindro foi equipado com duas placas circulares móveis, instaladas simetricamente ao longo da envergadura do cilindro (ver Figura 8.2). A distância L entre as placas foi ajustada com o auxílio de um paquímetro, e a perpendicularidade das placas em relação ao eixo do cilindro foi verificada com um esquadro. As placas foram instaladas de forma que a borda chanfrada permanecesse voltada para fora, ou seja, em direção às extremidades do cilindro.

8.3.1 Anemometria de Filme Quente

Para os ensaios de anemometria, o modelo cilíndrico foi engastado na janela traseira da seção de testes, por meio de sua haste de fixação. A sonda de filme quente foi instalada num suporte em forma de cotovelo introduzido na seção de testes através da estação 5 da janela lateral. A sonda de temperatura do anemômetro foi introduzida na seção de testes através da

unesp

estação 8. A sonda de filme quente foi deslocada com o auxílio de um dispositivo posicionador, e foi posicionada na esteira do cilindro.

O sinal temporal da velocidade na esteira, fornecido pelo anemômetro, foi adquirido a uma taxa de 100 Hz e armazenado em cinco blocos independentes com 4096 pontos cada. A freqüência de emissão dos vórtices foi determinada com base na análise espectral dos sinais obtidos, de acordo com os procedimentos descritos na seção 3.4. A freqüência de Strouhal foi então calculada com base na média dos resultados obtidos para os cinco blocos adquiridos.

8.3.2 Visualização do Escoamento

Para a visualização da esteira de vórtices vista de topo, foi utilizada a técnica de injeção de corantes líquidos, na modalidade *dye wash*. Neste caso, o modelo cilíndrico foi engastado na janela posterior da seção de testes, com o eixo longitudinal perpendicular ao plano de observação. O corante foi injetado por uma agulha retrátil em forma de cotovelo, introduzida na seção de testes pela janela lateral. A iluminação em contra luz foi obtida com lâmpadas incandescentes posicionadas atrás da seção de testes.

A técnica de visualização por bolhas de hidrogênio foi utilizada para permitir o registro de imagens do padrão tridimensional de emissão dos vórtices. Para tal, o cilindro foi engastado na janela lateral da seção de testes, através da estação 3, com o eixo de simetria longitudinal paralelo ao plano de observação. O fio de tungstênio foi introduzido a montante do cilindro por meio de bujões instalados nas estações 2 de ambas as janelas laterais. Neste caso, a iluminação do escoamento foi realizada por meio de duas unidades de *flash*, posicionadas junto às janelas laterais. Em ambos os casos, o equipamento fotográfico utilizado consistiu numa câmara Nikon F4 equipada com uma objetiva Nikkor Micro 60mm e com filme ISO 100.

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 unesp 12 13 14 15 16 17 18

8.4 Resultados e Discussão

A Figura 8.3 apresenta as curvas de Strouhal de um cilindro de base quadrada com razão de aspecto $5 \leq \alpha \leq 40$, para números de Reynolds entre 50 e 10^3.

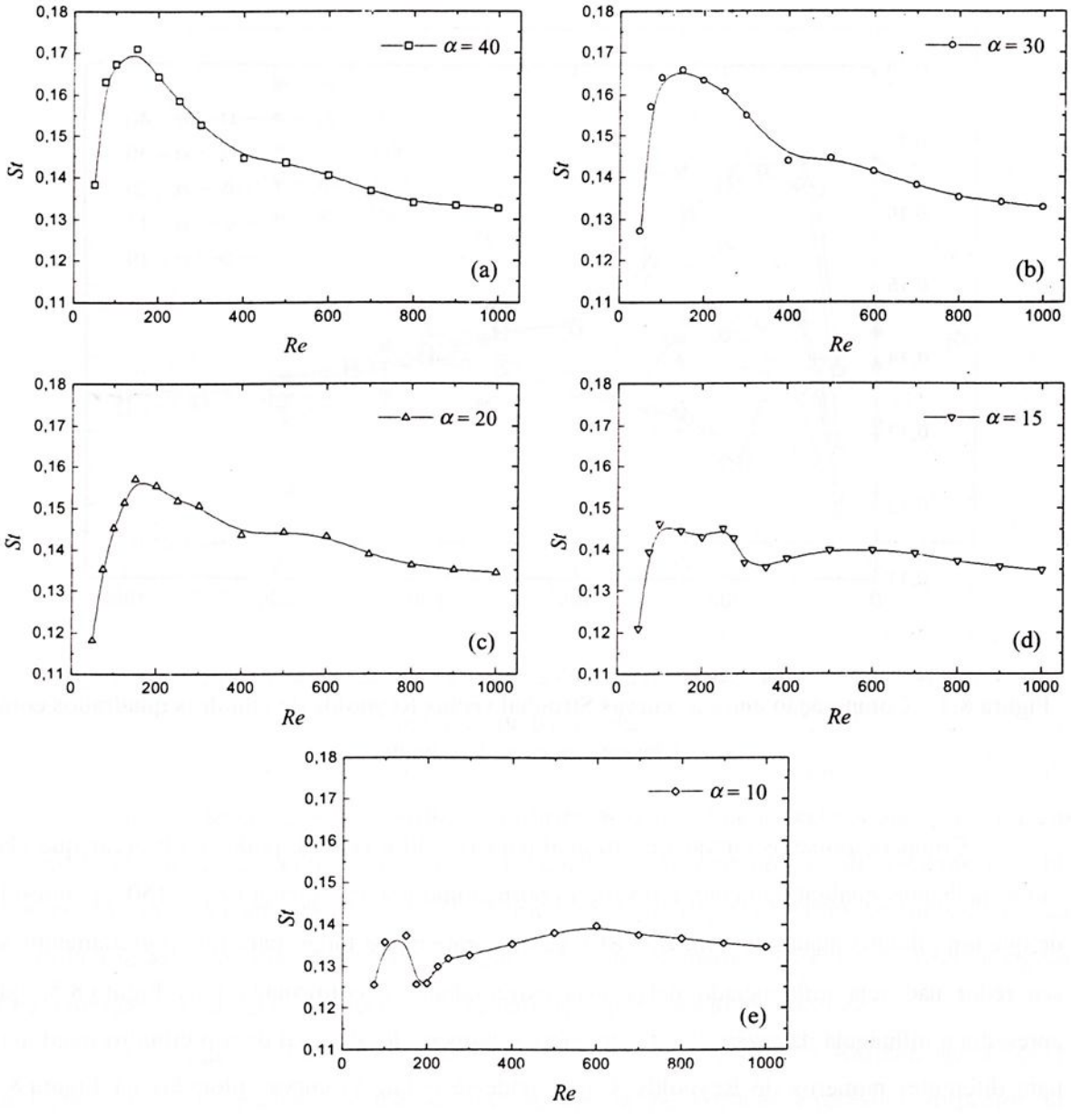


Figura 8.3 – Curvas Strouhal *versus* Reynolds de cilindros quadrados com diferentes razões de aspecto.

A Figura 8.4 condensa as curvas exibidas na Figura 8.3, permitindo observar nitidamente uma influência marcante da razão de aspecto sobre a emissão de vórtices. Comparando os resultados obtidos, pode-se notar que a influência da razão de aspecto é mais significativa para $Re < 600$, e especialmente para $Re \cong 200$, quando a variação do número de Strouhal atinge 25%. Já para $Re > 600$, as curvas de Strouhal apresentam-se praticamente sobrepostas, para todo o restante da faixa de números de Reynolds investigada.

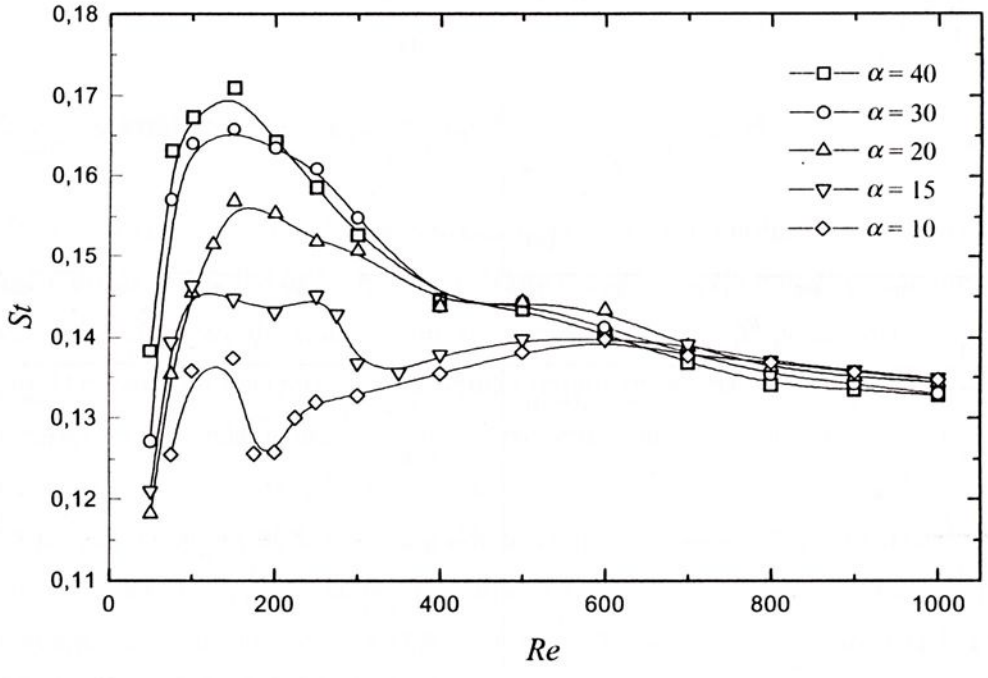


Figura 8.4 – Comparação entre as curvas Strouhal *versus* Reynolds de cilindros quadrados com diferentes razões de aspecto.

Comparando-se as curvas de Strouhal para $\alpha = 30$ e $\alpha = 40$, pode-se observar que elas são semelhantes qualitativamente, e divergem no máximo em 3%, quando $Re = 150$. A sugestão de que um cilindro quadrado com $\alpha = 40$ seja suficientemente longo para que o escoamento ao seu redor não seja influenciado pelas suas extremidades é confirmada pela Figura 8.5, que apresenta a influência da razão de aspecto sobre o número de Strouhal de um cilindro quadrado, para diferentes números de Reynolds. Como pode-se notar, as curvas plotadas na Figura 8.5 exibem a tendência de atingir um valor assintótico constante, quando a razão de aspecto assume valores maiores do que 30.

Interessantemente, para números de Reynolds mais baixos ($Re = 200$), o número de Strouhal cresce com o aumento da razão de aspecto, enquanto que para números de Reynolds mais elevados ($Re = 800$ e 1000) ocorre o inverso. Já para números de Reynolds intermediários ($Re = 400$ e 600) ocorre uma combinação destes dois comportamentos: o número de Strouhal aumenta com a razão de aspecto para $\alpha \leq 20$, e diminui para $\alpha > 20$.

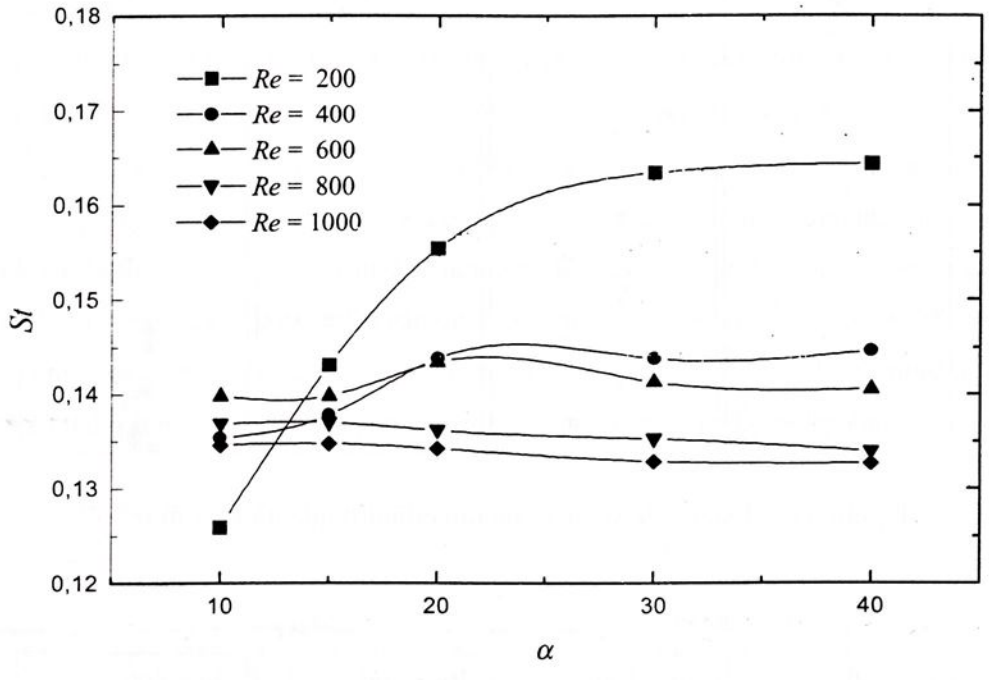


Figura 8.5 – Influência da razão de aspecto sobre o número de Strouhal, para diferentes números de Reynolds.

A fim de se compreender melhor a influência da razão de aspecto sobre o escoamento ao redor de um corpo cilíndrico com seção quadrada, a visualização de escoamentos foi empregada como ferramenta de trabalho. A Figura 8.6 oferece uma visão de topo da esteira formada a jusante do cilindro com $\alpha = 40$, para diferentes números de Reynolds. Estas imagens foram obtidas com o auxílio da técnica de visualização por injeção de corantes.

Como pode-se observar, para $Re = 50$ e 100, a esteira de von Kármán apresenta-se completamente desenvolvida, exibindo uma seqüência de vórtices alternados dispostos de maneira perfeitamente simétrica. Aumentando o número de Reynolds, começam a surgir as primeiras instabilidades na formação e emissão dos vórtices, que se tornam mais evidentes à medida em que são convectados ao longo da esteira. Observa-se, também, que os rolos de

vórtices adquirem uma forma tridimensional, após um certo tempo de existência, como se vê na Figura 8.6 e 8.7, para Re = 200 e 400.

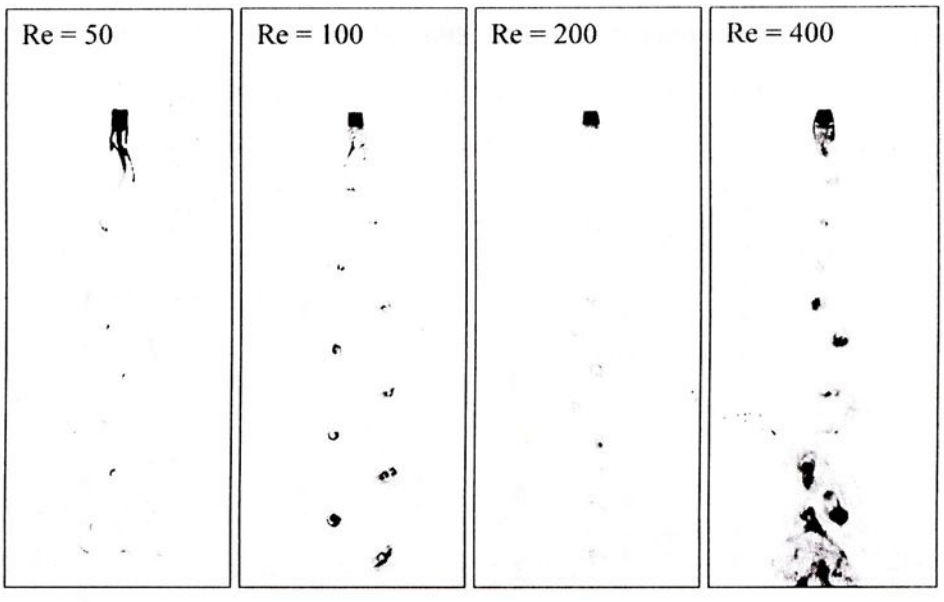


Figura 8.6 – Esteira de vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 40$.

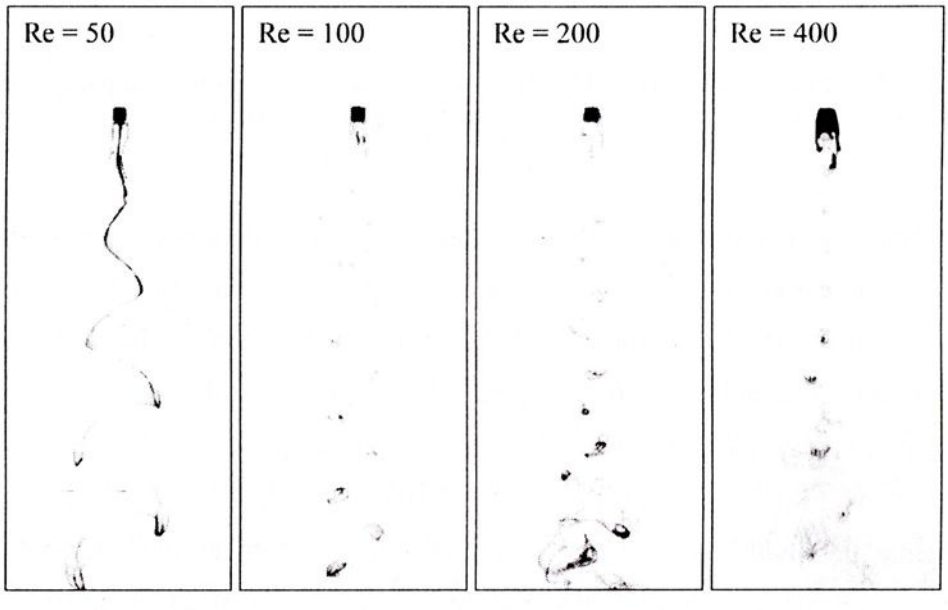


Figura 8.7 – Esteira de vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 30$.

Comparando as Figuras 8.6 e 8.7, observa-se que existe uma pequena diferença qualitativa entre as configurações da esteira para um mesmo número de Reynolds, exceto para $Re = 50$. Neste caso, a esteira de von Kárman apresenta-se menos desenvolvida para $\alpha = 30$ do que para $\alpha = 40$. Paralelamente a esta pequena diferença qualitativa, observa-se, também, que as curvas de Strouhal para $\alpha = 40$ e $\alpha = 30$ são quase coincidentes, para números de Reynolds superiores a 200, apresentando uma maior divergência para $Re = 50$, em concordância com o observado nos ensaios de visualização.

A Figura 8.8 apresenta uma visão lateral da esteira de vórtices formada a jusante de um cilindro quadrado com $\alpha = 30$. Os *end plates*, embora não apareçam nas imagens exibidas, foram posicionados próximos à extremidades do cilindro, simetricamente em relação ao seu ponto central. Como pode-se observar, os rolos de vórtices (vistos longitudinalmente) possuem um aspecto mais retilíneo à medida em que o número de Reynolds aumenta, enquanto que para números de Reynolds mais baixos, estes são emitidos em forma de arco. Para $Re = 200$, observa-se que existem duas regiões próximas às extremidades do comprimento útil do cilindro que são fortemente afetadas pela presença das paredes, neste caso, representadas pelos *end plates*.

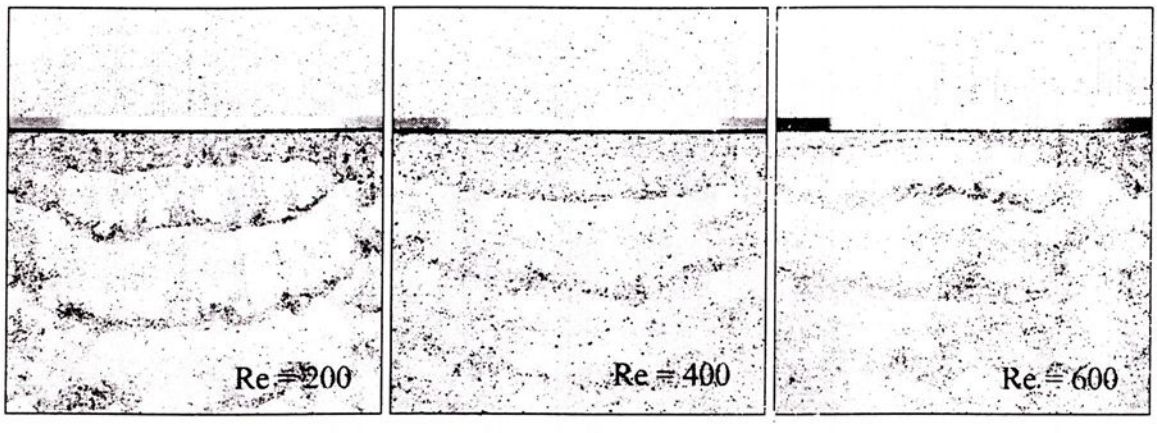


Figura 8.8 – Padrão de emissão dos vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 30$.

A Figura 8.9 apresenta imagens da esteira de vórtices formada a jusante de um cilindro quadrado com $\alpha = 20$, onde se verifica um comportamento semelhante àquele observado para $\alpha = 30$, com uma influência das extremidades mais acentuada para números de Reynolds mais baixos.

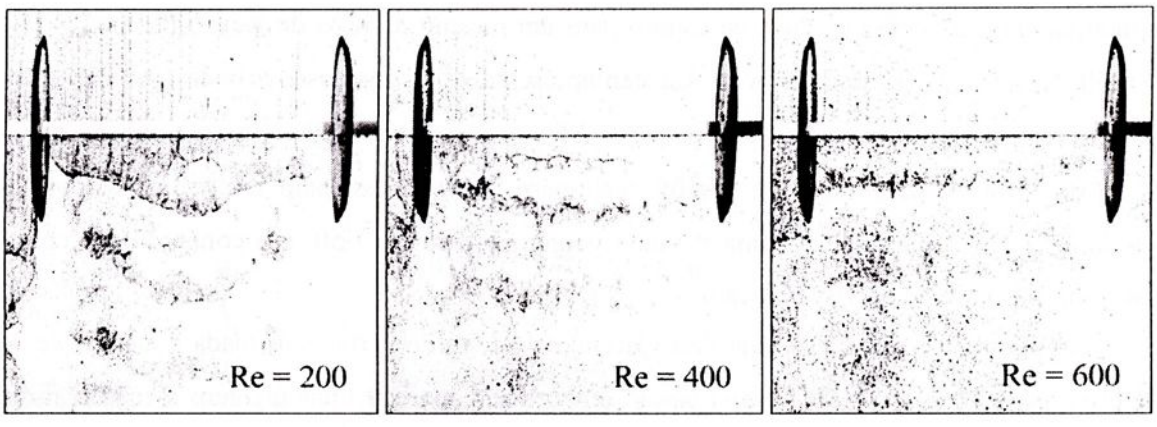


Figura 8.9 – Padrão de emissão dos vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 20$.

Comparando as imagens fornecidas pelas Figuras 8.10 a 8.13, observa-se que a diminuição da razão de aspecto provoca duas mudanças facilmente detectáveis na esteira turbilhonar formada a jusante do cilindro quadrado.

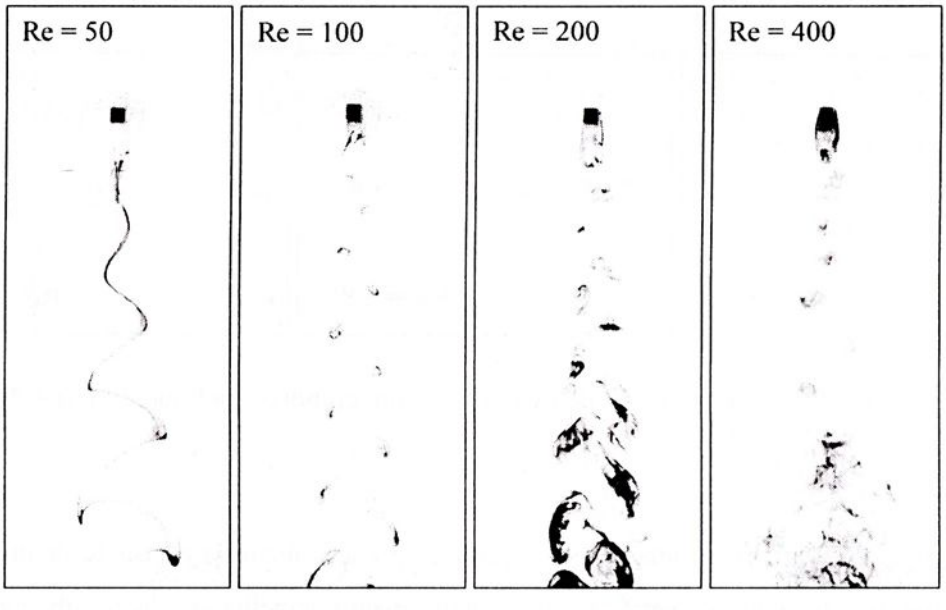


Figura 8.10 – Esteira de vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 20$.

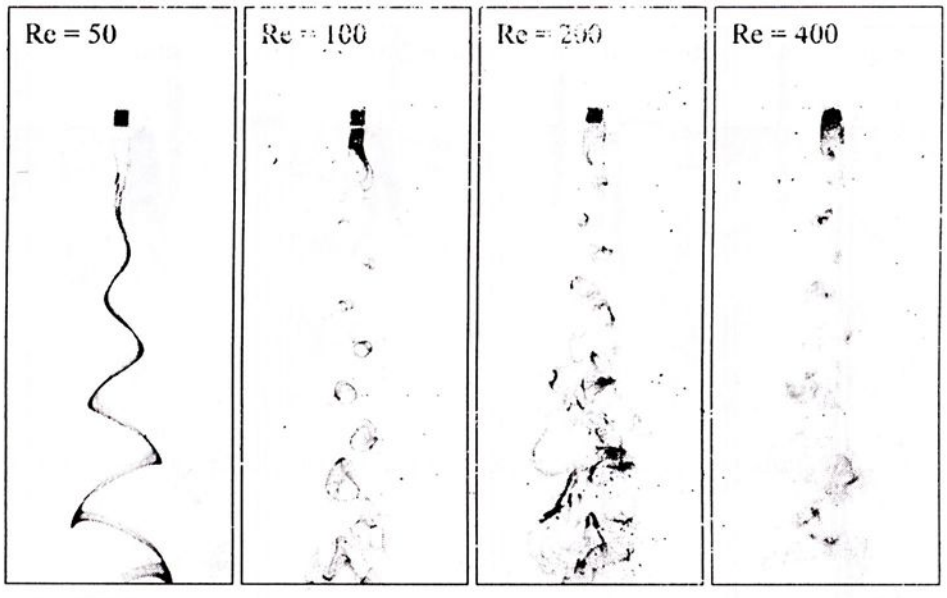


Figura 8.11 – Esteira de vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 15$.

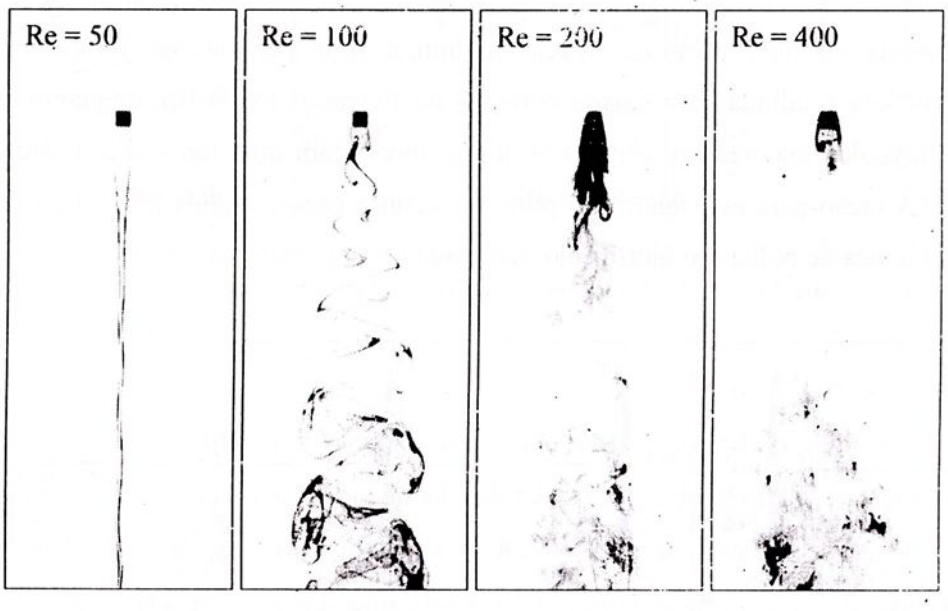


Figura 8.12 – Esteira de vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 10$.

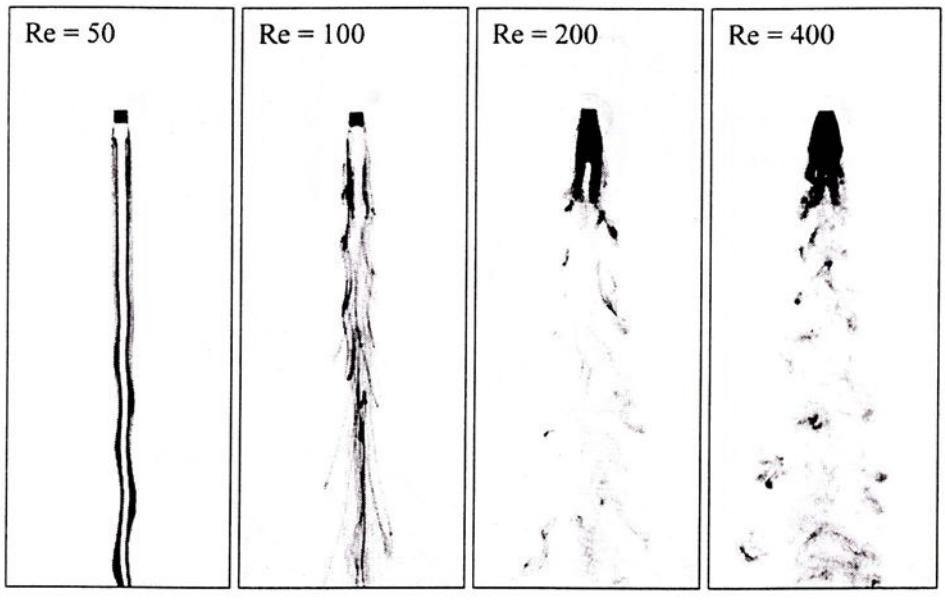


Figura 8.13 – Esteira de vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 5$.

À medida em que a razão de aspecto diminui, a primeira mudança observada é que a emissão de vórtices é inibida para baixos números de Reynolds ($Re = 50$), enquanto que para números de Reynolds maiores, os vórtices emitidos apresentam uma tendência à degeneração mais precoce. A razão para este fenômeno pode ser melhor compreendida pela visualização da esteira com a técnica de bolhas de hidrogênio, mostrada nas Figuras 8.14 a 8.16.

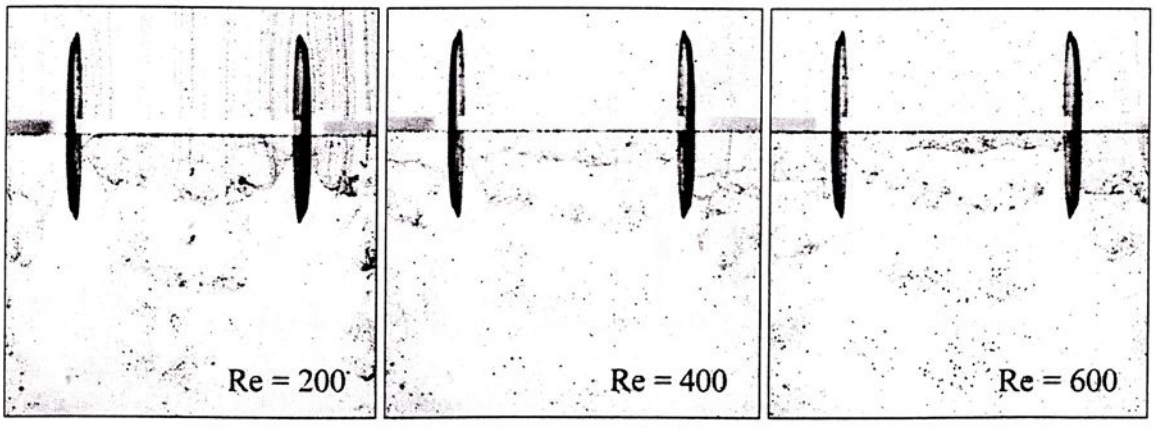


Figura 8.14 – Padrão de emissão dos vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 15$.

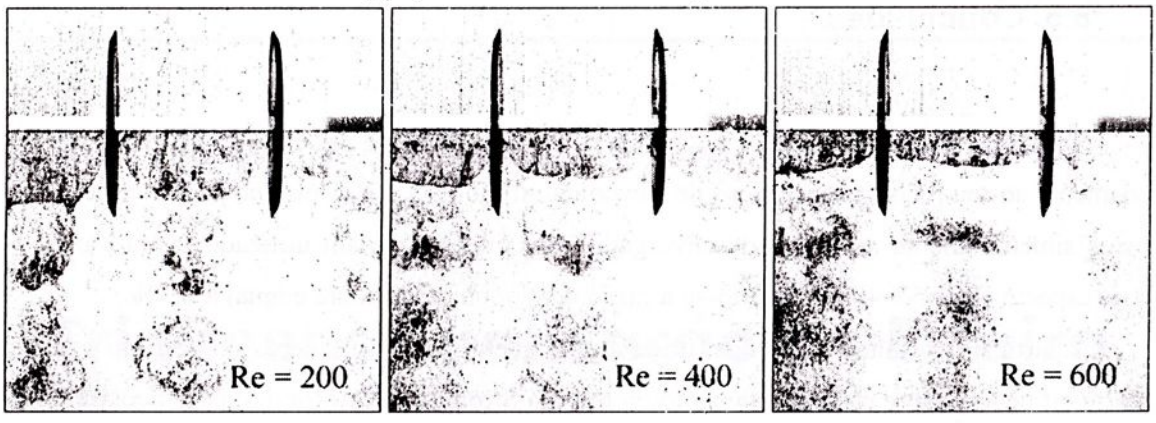


Figura 8.15 – Padrão de emissão dos vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 10$.

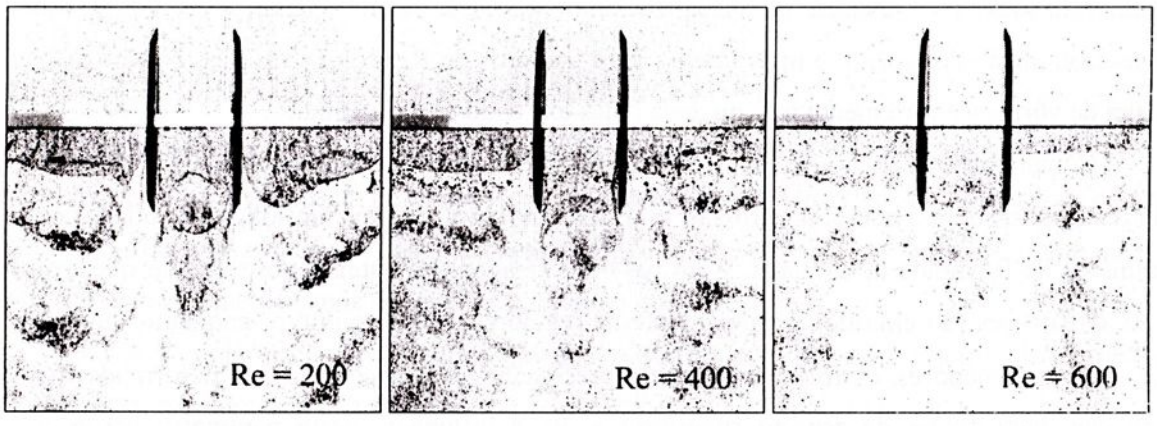


Figura 8.16 – Padrão de emissão dos vórtices de um cilindro quadrado com $\alpha = 5$.

Como pode-se observar, à medida em que a razão de aspecto diminui, a esteira de vórtices é gradualmente confinada pelas paredes dos *end plates*, adquirindo um aspecto cada vez mais abaulado, principalmente para números de Reynolds relativamente baixos ($Re \leq 400$). Já para números de Reynolds mais elevados ($Re \geq 600$), a influência da razão de aspecto sobre a esteira é atenuada, quando os vórtices tendem a ser emitidos paralelamente ao cilindro.

8.5 Conclusões

Neste capítulo, abordou-se os efeitos da razão de aspecto de um cilindro quadrado sobre o escoamento ao seu redor, para número de Reynolds inferiores a 10^3. Dois *end plates* circulares, dispostos simetricamente ao longo da envergadura do cilindro, foram utilizados para variar a razão de aspecto entre 5 e 40, mantendo-se a razão de bloqueio constante e igual a 2,5%.

A partir dos resultados obtidos, observou-se que a razão de aspecto do cilindro exerce uma forte influência sobre o comportamento da relação Strouhal *versus* Reynolds, especialmente para números de Reynolds inferiores a 600. Para $Re = 200$ e razões de aspecto compreendidas entre 10 e 40, verificou-se que o número de Strouhal varia em até 60%. Este fenômeno pôde ser melhor compreendido com o auxílio da visualização do escoamento. A partir das imagens obtidas, utilizando-se a técnica de visualização por bolhas de hidrogênio, observou-se que influência da razão de aspecto é mais intensa para números de Reynolds menores. Nestes casos, a esteira de vórtices é fortemente influenciada pelas extremidades do cilindro.

Comparando-se os resultados obtidos para $\alpha = 30$ e 40, verificou-se que a influência da razão de aspecto sobre a curva de Strouhal *versus* Reynolds é pequena, ao longo de toda a faixa de números de Reynolds investigada. Com base nas imagens da esteira, observou-se que, para $\alpha \geq 30$, os vórtices são emitidos paralelamente na região central do cilindro, enquanto que para razões de forma menores, os rolos de vórtices apresentam um aspecto bastante deformado. Isto sugere que, para razões de aspecto superiores a 30, a influência deste parâmetro perde em importância.

Capítulo 9

Tridimensionalização da Esteira

9.1 Introdução

Nos últimos anos, tem se verificado um crescente interesse pelos fenômenos tridimensionais que acontecem na esteira de corpos cilíndricos. A tridimensionalização da esteira pode afetar significativamente os parâmetros globais do escoamento, uma vez que altera profundamente os mecanismos de geração e emissão dos vórtices.

Seja um corpo cilíndrico com seção transversal quadrada, imerso perpendicularmente num escoamento com velocidade uniforme e constante V_∞. O cilindro possui comprimento C e seção transversal quadrada de lados A igual a B, conforme ilustrado na Figura 9.1.

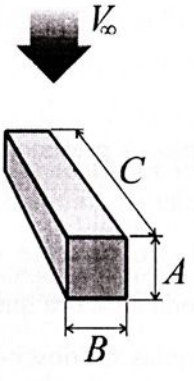


Figura 9.1 – Cilindro quadrado imerso perpendicularmente num escoamento uniforme.

Os números de Reynolds e de Strouhal podem ser definidos, respectivamente, como

$$Re = \frac{V_\infty B}{\nu} \tag{9.1}$$

$$St = \frac{f B}{V_\infty} \tag{9.2}$$

onde V_∞ é a velocidade da corrente livre, B é a dimensão característica do cilindro, ν é a viscosidade cinemática do fluido, e f é a freqüência com que os vórtices são emitidos de um mesmo lado do corpo.

Nos capítulos 5 a 7, o escoamento ao redor dos cilindros foi considerado como bidimensional. Entretanto, como evidenciado no capítulo anterior, a esteira de vórtices pode apresentar padrões de emissão tridimensionais. Por se tratar de um problema tridimensional, o escoamento ao redor de um corpo cilíndrico finito pode ser fortemente influenciado pelas condições das suas extremidades. Entre as configurações mais freqüentemente encontradas na literatura, destacam-se aquelas em que o cilindro possui as duas extremidades simplesmente engastadas, ou as duas extremidades providas com placas (*end plates*).

Na presente investigação, foram utilizados dois *end plates* circulares posicionados próximo às extremidades do cilindro, simetricamente em relação às paredes da seção de testes, guardando uma distância L entre si. Como destacado no capítulo anterior, a razão de aspecto, definida como

$$\alpha = \frac{L}{B} \tag{9.3}$$

exerce forte influência sobre o escoamento. A presença das placas, além de possibilitar o ajuste da razão de aspecto, permitem, ainda, isolar os efeitos da camada limite que se desenvolve sobre as paredes da seção de testes do túnel. No presente estudo, os *end plates* foram utilizados, também, para permitir a observação de toda a esteira que se forma ao longo do comprimento útil do cilindro (entre as placas), pois as janelas de observação não possibilitam visualizar toda a envergadura do cilindro.

unesp

9.2 Revisão Bibliográfica

A medida da freqüência dos vórtices emitidos por cilindros circulares tornou-se objeto de intenso debate, desde que Tritton (1959) observou que sua curva de Strouhal apresentava uma descontinuidade para $Re = 100$, separando um modo de 'baixa velocidade' de um modo de 'alta velocidade'. Tritton sugeriu que esta descontinuidade seria causada pela transição entre uma instabilidade com origem na esteira e uma outra com origem na região próxima à base do cilindro. Gerrard (1978) sugeriu que esta descontinuidade seria, de certo modo, relacionada com o fim de um regime, no qual a difusão de vorticidade desempenharia um papel importante na emissão de vórtices. Williamson (1988 e 1989) mostrou que estas descontinuidades na curva de Strouhal não eram causadas por nenhum desses mecanismos, mas sim pela mudança no modo de emissão oblíqua dos vórtices. Induzindo a emissão paralela, pela manipulação das condições nas extremidades do cilindro, a curva de Strouhal obtida mostrou-se contínua, concordando com dados obtidos numa instalação diferente.

Os estudos de Williamson (1988 e 1989) e Hammache & Gharib (1991) mostraram que as extremidades dos cilindros podem exercer uma grande influência sobre a esteira de vórtices ao longo de toda a sua envergadura, mesmo para cilindros com elevada razão de aspecto (centenas de vezes o diâmetro). A partir de então, passou-se a acreditar que as condições de extremidade são responsáveis por diversos fenômenos tridimensionais observados experimentalmente, tais como emissão oblíqua de vórtices (Tritton, 1959), regiões ao longo da envergadura do cilindro com diferentes freqüências de emissão dos vórtices (Gerich & Eckelmann, 1982), e desarranjos na estrutura de emissão dos vórtices (Williamson, 1989 e 1992).

Entre as investigações numéricas sobre as instabilidades tridimensionais na esteira turbilhonária de corpos cilíndricos circulares destacam-se os trabalhos de Karniadakis & Triantafyllou (1992) e Thompson *et al.* (1996), utilizando elementos espectrais de alta ordem. Neste último, foram capturados dois modos de instabilidade tridimensional, designados como modos A e B, ambos encontrados experimentalmente por Williamson (1996a).

Graham (1969) estudou a influência de placas instaladas próximo às extremidades do modelo (*end plates*), sobre a bidimensionalidade da esteira turbilhonar de um corpo rombudo. Os ensaios foram conduzidos em um túnel aerodinâmico de baixa velocidade em circuito fechado, cuja corrente livre no interior da seção de testes apresentava intensidade turbulenta inferior a 0,2%. O modelo de ensaio era consistido de um corpo cilíndrico com seção transversal em forma de "D", orientado com a parte rombuda em direção a montante. Medidas de correlação do sinal

unesp

de velocidade na esteira de vórtices foram realizadas com o auxílio de um anemômetro de fio quente.

Com base nos resultados obtidos, o autor verificou que, quando o cilindro empregado possuía elevada razão de aspecto entre os *end plates*, o escoamento ao seu redor apresentava uma baixa correlação na direção da envergadura, para pontos distantes entre si. Contudo, utilizando os *end plates* com a forma e a orientação prescritas, a correlação do sinal ao longo da envergadura aumentava significativamente e os vórtices eram emitidos paralelamente, desde que o espaço entre as placas fosse menor ou igual a quatro vezes a dimensão da base do corpo.

A influência dos *end plates* sobre o coeficiente de pressão na base de um cilindro circular foi investigada por Stansby (1974). Os experimentos foram realizados num túnel aerodinâmico em circuito aberto, com intensidade turbulenta da corrente livre aproximadamente igual a 0,25%. Os dois modelos empregados nos ensaios apresentavam razão de aspecto igual a 8 e 16, com razão de bloqueio iguais a 5 e 10%.

Os autor concluiu que os *end plates* devem ser retangulares, com uma dimensão a montante (distância entre a borda de ataque da placa e o eixo longitudinal do cilindro) suficientemente grande para isolar o vórtice em forma de ferradura que se forma na junção do cilindro com a parede do túnel e, ao mesmo tempo, suficientemente pequena para evitar um crescimento substancial da camada limite sobre a própria placa. Além disso, a dimensão da placa a jusante deveria ser adequada para evitar qualquer interferência do escoamento externo sobre a esteira.

Os resultados obtidos, para números de Reynolds da ordem de 10^4 e utilizando *end plates* com geometria variável, mostram que a adição das placas provoca uma redução substancial nas medidas de pressão na base e, consequentemente, um aumento no arrasto. Segundo o autor, os resultados referentes ao arrasto e à distribuição de pressão publicados anteriormente, obtidos sem a utilização de *end plates*, não são representativos de um escoamento bidimensional.

Um dos poucos estudos da influência das condições de extremidade sobre o escoamento ao redor de cilindros com seção retangular é apresentado por Obasaju (1979). Seus experimentos, conduzidos em um túnel aerodinâmico com intensidade turbulenta inferior a 0,04%, objetivaram investigar os efeitos dos *end plates* sobre as forças médias que agem sobre corpos cilíndricos com seção transversal quadrada, para números de Reynolds compreendidos entre 3×10^4 e $1{,}2\times10^5$ e ângulos de incidência entre 0° e 45°.

unesp

Os modelos cilíndricos utilizados nos ensaios, com razão de aspecto igual a 18 e razão de bloqueio sempre inferior a 7,8%, possuíam 40 tomadas de pressão distribuídas ao longo de sua envergadura. Os resultados obtidos mostraram que a pressão na base do cilindro é sensível à presença dos *end plates*, bem como ao tipo de placas utilizadas. Principalmente para elevados ângulos de incidência (>15°), observou-se que a sucção na base do cilindro diminui quando são utilizadas placas pequenas, enquanto que placas grandes tendem a provocar um aumento do arrasto e da sucção na base, acima dos valores encontrados na literatura.

Gerich & Eckelmann (1982) investigaram a influência de diferentes condições de extremidade de cilindros circulares, tais como *end plates* e extremidade livre, sobre a freqüência de emissão de vórtices. Os ensaios experimentais foram conduzidos num túnel aerodinâmico em circuito aberto, com intensidade turbulenta inferior a 0,14%. Os corpos cilíndricos empregados consistiam de fios com seção transversal circular, confeccionados em vários materiais e com diferentes diâmetros. A emissão de vórtices foi detectada com o auxílio de uma sonda de fio quente posicionada na esteira do cilindro.

Os resultados obtidos mostraram que, numa região próxima às placas ou às extremidades livres, a freqüência de emissão dos vórtices é menor do que a freqüência de Strouhal regular, observada ao longo do restante do cilindro. A ocorrência simultânea dessas duas freqüências produz um fenômeno de batimento na interface das duas regiões. Uma terceira freqüência pode ser observada ao longo de toda extensão do cilindro, quando este possui placas em ambas extremidades, distantes entre si de não mais do que 20 a 30 diâmetros característicos do cilindro. Neste caso, o número de Reynolds crítico para que a emissão de vórtices seja iniciada é deslocado para aproximadamente 60, contra 30 - 40 em condições normais. A faixa de números de Reynolds em que o escoamento é laminar, por sua vez, é estendida, de até aproximadamente 150, para valores em torno de 250.

Desde as primeiras investigações sobre a emissão de vórtices na esteira de cilindros circulares, os resultados publicados por diferentes autores apresentavam diferenças de até 20% entre si, embora a medição da freqüência de emissão de vórtices fosse relativamente fácil e precisa. Visando definir um relacionamento universal e contínuo entre os números de Strouhal e de Reynolds, Williamson (1988) conduziu um estudo experimental sobre a emissão laminar de vórtices na esteira de cilindros circulares.

O autor demonstrou que a ocorrência de uma descontinuidade na curva de Strouhal é causada por uma mudança no modo de emissão dos vórtices. Induzindo a emissão paralela de vórtices, através da manipulação das condições de extremidade do cilindro, com o auxílio de *end*

unesp

plates, foi observado que a curva de Strouhal torna-se contínua. Williamson constatou que, dividindo-se o número de Strouhal (obtido com emissão oblíqua de vórtices) pelo coseno do ângulo de emissão dos vórtices, os pontos experimentais recaem sobre a curva de Strouhal contínua e universal, obtida para emissão paralela de vórtices. Os dados apresentados concordam com outros obtidos em uma instalação totalmente diferente, evidenciando a universalidade da curva de Strouhal contínua para cilindros circulares.

Para números de Reynolds compreendidos entre 70 e 160, a esteira de um cilindro circular com razão de aspecto finita normalmente apresenta o fenômeno de emissão oblíqua dos vórtices, provocando descontinuidades na curva de Strouhal. A fim de contornar este problema, Hammache & Gharib (1989) introduziram um novo método para promover a emissão paralela dos vórtices na esteira de cilindros circulares. Segundo os autores, esta técnica elimina a maior parte do empirismo que caracteriza a utilização de *end plates* como elementos de controle das condições nas extremidades do cilindro.

O método proposto consiste, basicamente, em posicionar dois cilindros circulares perpendicularmente e a montante do cilindro que se deseja induzir a emissão paralela de vórtices. Estes dois cilindros, denominados cilindros de controle, devem possuir um diâmetro maior do que o do cilindro em estudo. A principal função dos cilindros de controle é impor uma condição de contorno simétrica para a pressão nas duas extremidades do cilindro principal e, assim, inibir a evolução de instabilidades tridimensionais.

A distância entre os cilindros de controle e o cilindro em estudo desempenha um papel decisivo sobre o modo de emissão de vórtices. Se esta distância for menor ou maior que uma distância ótima, os vórtices são emitidos na forma de arcos, enquanto que, se as distâncias que separam cada cilindro de controle do cilindro principal forem diferentes, é verificada a emissão oblíqua dos vórtices. Além de induzir a emissão paralela dos vórtices, este método também é capaz de retardar a transição do regime laminar para o regime turbulento.

Kubo *et al.* (1989) conduziram um estudo experimental sobre as características aerodinâmicas de diversos perfis estruturais, tais como placa plana, cilindro circular e três cilindros retangulares com diferentes razões de forma. Durante os experimentos, conduzidos em um túnel aerodinâmico, foram utilizados *end plates* circulares com 14 diâmetros diferentes, a fim de investigar o seu efeito sobre alguns parâmetros do escoamento.

A partir dos resultados obtidos para o coeficiente de arrasto e de pressão na base, observou-se que existe um diâmetro ótimo das placas, a partir do qual estes parâmetros atingem

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 unesp 12 13 14 15 16 17 18

um valor assintótico. Na prática, os autores recomendam que a relação entre o diâmetro das placas e o diâmetro característico do modelo (D_{ep}/d) seja maior do que 8,5.

Ensaios de visualização do escoamento com bolhas de hidrogênio, realizados num canal de água, permitiram observar o papel que os *end plates* desempenham na manutenção do escoamento bidimensional ao redor dos corpos submersos. As imagens obtidas mostraram que, para pequenos *end plates*, parte do escoamento externo às placas é arrastado para dentro da esteira de vórtices formada entre as placas, causando uma recuperação parcial da pressão mais baixa ali verificada. Entretanto, para *end plates* maiores ($D_{ep}/d > 8$), esta recuperação da pressão na esteira é impedida pelas placas, que não permitem que o escoamento exterior aos *end plates* invadam a esteira de vórtices que se desenvolve a jusante do cilindro.

Zdravkovich *et al.* (1989) investigaram experimentalmente o escoamento ao redor de corpos cilíndricos circulares, com ambas extremidades livres. Durante os ensaios, realizados em um túnel aerodinâmico, foram efetuadas medidas do coeficiente de arrasto, para números de Reynolds na faixa de 6×10^4 a $2{,}6\times10^5$. Os modelos de ensaio utilizados consistiam de cilindros circulares com razão de aspecto compreendida entre 1 e 10, com as extremidades livres planas ou hemisféricas.

Os autores observaram que a emissão de vórtices de cilindros circulares com ambas extremidades livres não é inibida para pequenos valores da razão de aspecto, mesmo quando esta razão diminui para valores tão baixos quanto 2. Neste caso, no entanto, a emissão dos vórtices é irregular, apresenta espectro de banda larga e é intermitentemente interrompida, com número de Strouhal variando entre 0,14 e 0,25.

Com base nos resultados obtidos, os autores observaram que, quando se forma a esteira turbilhonar, os vórtices são emitidos com uma única freqüência, embora esta não seja a mesma em diferentes instantes. Neste caso, o conceito de uma curva de Strouhal universal, tal como a estabelecida para cilindros que não sofrem a influência das extremidades, não pode ser utilizado. Isto acontece em escoamentos com alto grau de tridimensionalidade.

Fox & West (1990) conduziram uma investigação experimental com o objetivo de determinar a influência do espaçamento entre os *end plates* sobre as pressões médias na base e os coeficientes de arrasto e de sustentação flutuantes, que atuam sobre um cilindro circular com baixa razão de bloqueio sólido. Os ensaios foram executados em um túnel aerodinâmico de baixa velocidade, em circuito fechado, para números de Reynolds na faixa de $(3{,}3 - 13{,}2)\times10^4$, complementando o trabalho prévio de Stansby (1974).

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 unesp 12 13 14 15 16 17 18

Os modelos utilizados consistiam em duas longas barras polidas, com diâmetros diferentes, de forma a garantir razões de aspecto iguais a 38 e 27,5 e razões de bloqueio de 4% e 6%. Os cilindros possuíam *end plates* com as proporções recomendadas por Stansby (1974), cujo espaçamento era variado a fim de se conseguir diferentes razões de aspecto. A pressão média na base foi medida com o auxílio de uma tomada de pressão existente na superfície do cilindro, enquanto que os coeficientes de arrasto e de sustentação foram determinados através de transdutores de pressão instalados numa seção transversal do cilindro.

Os resultados obtidos sem a utilização dos *end plates* indicam que a parede do túnel exerce uma grande influência sobre o escoamento, como evidenciam os parâmetros calculados, que se propaga até aproximadamente 15 diâmetros a partir da extremidade fixa do cilindro. Assim, os autores sugerem que se a razão de aspecto for maior do que 30, não há necessidade de se empregar *end plates* para se alcançar um escoamento bidimensional na região central do cilindro circular. A adição de *end plates* ao cilindro resulta numa região bidimensional no centro do cilindro, desde que a razão de aspecto entre as placas seja superior a um valor mínimo de 7. Neste caso, os efeitos de interferência das próprias placas se estendem por uma distância constante de 3,5 diâmetros ao longo da envergadura do cilindro, de tal forma que a região não perturbada seja linearmente relacionada com a razão de aspecto entre os *end plates*.

Aprofundando os estudos realizados anteriormente (Hammache & Gharib, 1989), Hammache & Gharib (1991) empreenderam uma investigação experimental sobre o fenômeno de emissão paralela e oblíqua de vórtices na esteira de cilindros circulares, para números de Reynolds compreendidos entre 40 e 160. Dois cilindros de controle foram posicionados montante do cilindro principal, para atuar sobre o ângulo de emissão dos vórtices na esteira deste cilindro. As distâncias respectivas entre cada cilindro auxiliar (ou de controle) e o cilindro principal foram utilizadas para induzir a emissão oblíqua com diferentes ângulos, a emissão curva, bem como a emissão paralela de vórtices. Foram medidas a distribuição de pressão estática na região da base do cilindro e a velocidade ao longo da sua envergadura.

Com base nos dados obtidos, verificou-se que a distribuição de pressão na base do cilindro deve ser simétrica, para que a emissão dos vórtices ocorra de forma paralela, e que a emissão oblíqua deve-se, justamente, à ausência de simetria. A assimetria da distribuição de pressão na base do cilindro indica a ocorrência de escoamento na direção da envergadura do cilindro, na região localizada próxima a ele. De fato, com o auxílio da técnica de velocimetria Laser Doppler, foi detectada uma componente da velocidade na direção axial do cilindro

unesp

principal, quando a emissão de vórtices assume a configuração oblíqua. Já para a emissão paralela de vórtices, este escoamento transversal não foi verificado.

Szepessy (1993) realizou um estudo experimental acerca da influência dos *end plates* sobre o escoamento ao redor de cilindros circulares, para números de Reynolds situados entre 4×10^3 e $4{,}8\times10^4$ e razões de aspecto entre 0,25 e 27,6. Foram utilizados diversos *end plates* retangulares com diferentes dimensões. O trabalho envolveu a realização de medições de pressão na esteira de vórtices e na base do cilindro, ao longo de sua envergadura, além de visualizações do escoamento.

Os resultados mostraram que as dimensões dos *end plates* possuem uma grande influência sobre o seu desempenho em manter uma boa uniformidade do escoamento entre as placas. Variando-se as dimensões da parte anterior e posterior das placas (distâncias entre a borda de ataque e entre a borda de fuga e o eixo do cilindro, respectivamente), o autor concluiu que os *end plates* recomendados por Stansby são adequados para as faixas abrangidas pelo número de Reynolds e pela razão de aspecto.

Miller & Williamson (1994) descrevem um novo método para variar as condições nas extremidades de um cilindro circular de maneira contínua, possibilitando um controle transiente da esteira de vórtices, até então impossível com os métodos mecânicos de controle existentes. Este método, que consiste na sucção do escoamento junto às extremidades do cilindro, permite a fácil obtenção dos padrões clássicos de emissão de vórtices, tais como emissão paralela e oblíqua ou emissão em forma de V (*chevron*).

Além disso, os autores puderam verificar que a emissão oblíqua de vórtices pode ocorrer para uma ampla faixa de ângulos de emissão, e não somente para determinados ângulos. Os resultados obtidos para emissão oblíqua, quando transformados com o uso da chamada fórmula do coseno, apresentaram boa concordância com a curva de Strouhal universal. No entanto, acima de um determinado ângulo crítico, a emissão oblíqua de vórtices se colapsa em células com diferentes freqüências.

A fim de estudar o escoamento ao redor de corpos cilíndricos não aerodinâmicos para baixos números Reynolds, Leweke & Provansal (1995) realizaram uma investigação sobre o escoamento ao redor de anéis (corpos cilíndricos sem extremidades), tanto experimentalmente quanto pela aplicação do modelo fenomenológico de Ginzburg-Landau.

As esteiras dos anéis foram estudadas num túnel aerodinâmico em circuito aberto, de baixa velocidade e com intensidade turbulenta da corrente livre igual a 0,1%. Foram utilizados quatro anéis, com diferentes diâmetros externos e vários diâmetros da seção transversal circular,

unesp

abrangendo, assim, uma faixa de razão de aspecto variando entre 30 e 100. Segundo os autores, a esteira de um anel com elevada razão de aspecto, isto é, pequena curvatura, pode ser considerada localmente como uma esteira de um cilindro retilíneo. Neste caso, o anel pode ser, qualitativamente, considerado como um corpo bidimensional, com condições de contorno periódicas.

O fenômeno de emissão oblíqua de vórtices, normalmente observado na esteira de cilindros circulares retilíneos, também foi verificado na esteira dos anéis. Neste caso, devido à periodicidade das condições de contorno, a esteira apresenta estruturas com diferentes modos de emissão de vórtices: anéis paralelos ao corpo anular (emissão paralela de vórtices), ou hélices simples, duplas ou triplas (emissão oblíqua de vórtices).

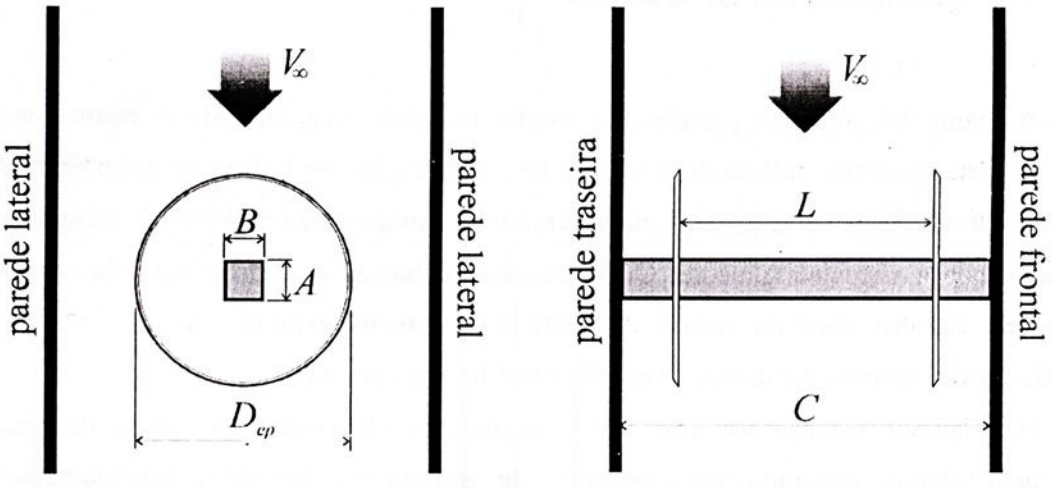
Semelhantemente ao cilindro circular, a freqüência de emissão dos vórtices, e consequentemente o número de Strouhal, diminui com o aumento do ângulo de emissão dos vórtices em relação ao eixo do corpo sólido. Este efeito pode ser compensado pela utilização da fórmula proposta por Williamson (1989), fazendo com que as curvas de Strouhal sejam coincidentes, independentemente da emissão oblíqua dos vórtices. Uma vez que os corpos utilizados (anéis) não possuem extremidades, pôde-se concluir que o fenômeno de emissão oblíqua de vórtices é intrínseco à esteira de corpos cilíndricos, e não ligados a condições de extremidade específicas, embora, certamente, influenciado por estas.

Uma extensa revisão sobre a dinâmica de emissão de vórtices na esteira de cilindros circulares é apresentada por Williamson (1996a, 1996b). Segundo o autor, muitas das respostas às questões relacionadas à dinâmica da esteira de vórtices tem sido fornecidas pela recente atenção dada aos fenômenos tridimensionais observados em esteiras nominalmente bidimensionais. Apesar do emprego bem sucedido de novas técnicas experimentais, como fluorescência induzida a laser e velocimetria por imagens de partículas, muitas das últimas descobertas são devidas ao uso cuidadoso de métodos clássicos. Paralelamente aos progressos na área experimental, grandes avanços em direção à compreensão dos fenômenos observados na esteira de cilindros circulares têm sido possíveis com o auxílio de simulações numéricas diretas, bem como pelo uso da modelagem analítica destes escoamentos, envolvendo, sobretudo, a análise de estabilidade secundária, utilizada por Dauchy *et al.* (1997).

unesp

9.3 Metodologia Experimental

No presente estudo, foram realizados apenas ensaios de visualização, com o objetivo de investigar a ocorrência de padrões de emissão de vórtices tridimensionais na esteira de um cilindro quadrado. Os ensaios foram conduzidos com o túnel operando em modo contínuo, com número de Reynolds fixo em $Re = 100$. O cilindro empregado foi o modelo 1a, que permite a realização de ensaios com baixa razão de bloqueio ($\beta = 2{,}5\%$) e maiores razões de aspecto, uma vez que sua seção transversal quadrada possui pequenas dimensões ($A = B = 3$ mm). Neste caso, a razão de aspecto foi ajustada em $\alpha = 20$, de forma que todo o comprimento útil (L) do cilindro pudesse ser visualizado. A Figura 9.2 ilustra o arranjo experimental empregado.



(a) Vista de topo (b) Vista lateral

Figura 9.2 – Corpo cilíndrico de base quadrada com *end plates* (fora de escala)

Os *end plates* circulares foram confeccionados em acrílico, usinados a partir de uma chapa com espessura de 1 mm, com bordas chanfradas. A relação entre o diâmetro externo dos *end plates* e a dimensão da base do cilindro foi fixada em $D_{cp}/B = 13$, seguindo as recomendações de Kubo *et al.* (1989).

A fim de evidenciar os padrões tridimensionais de emissão de vórtices, foi utilizada a técnica de visualização por bolhas de hidrogênio. O fio gerador de bolhas e o corpo cilíndrico foram inseridos na seção de testes através das estações 2 e 3, respectivamente, localizadas nas janelas laterais da seção de testes. O fio gerador de bolhas de hidrogênio foi disposto paralelamente ao cilindro, a uma distância de 50 mm a jusante deste. O ânodo – formado por um

bujão de latão inserido na estação 1 da janela lateral – e o fio gerador de bolhas de hidrogênio (cátodo) foram conectados a uma fonte de tensão contínua, necessária para produzir a eletrólise da água.

Uma câmara fotográfica Nikon F4, equipada com filme ISO 100 e uma objetiva Nikkor Micro 60 mm, foi posicionada em frente à janela frontal da seção de testes, de forma que o cilindro pudesse ser observado conforme ilustrado na Figura 9.2(b). A iluminação do escoamento foi obtida com o auxílio de duas unidades de *flash*, posicionadas junto às janelas laterais da seção de testes.

9.4 Resultados e Discussão

A Figura 9.3 apresenta imagens da esteira tridimensional formada a jusante de um cilindro de base quadrada, utilizando a técnica de visualização por bolhas de hidrogênio. Nas fotografias apresentadas, vê-se as duas placas circulares posicionadas próximo às extremidades do cilindro, que é visto lateralmente. O fio gerador de bolhas de hidrogênio está situado a montante do cilindro, fora do campo de visão das imagens exibidas. As imagens foram adquiridas para as mesmas condições de ensaio, em diferentes instantes.

Na Figura 9.3(a) aparece uma das configurações observadas na esteira turbilhonar emitida pelo cilindro quadrado, onde os rolos de vórtices são formados paralelamente ao cilindro. A esteira de vórtices, neste caso, pode ser considerada bidimensional, configuração ideal para a determinação do número de Strouhal, pois a freqüência de emissão dos vórtices é constante e universal.

Na Figura 9.3(b) observa-se que os vórtices são emitidos em forma de arco, cuja corda é paralela ao eixo longitudinal do cilindro. Neste caso, a esteira não pode mais ser considerada como sendo bidimensional, e a freqüência de emissão dos vórtices passa a depender da forma dos rolos de vórtices emitidos na esteira.

Uma outra configuração da esteira pode ser observada na Figura 9.3(c), onde se verifica um interessante padrão de emissão dos vórtices. Neste caso, vê-se claramente a formação de filamentos entre dois vórtices emitidos consecutivamente. Estas estruturas atuam mecanicamente sobre os rolos de vórtices, deformando seu eixo de rotação na direção do escoamento,

unesp

conferindo-lhes o aspecto de uma rede de vórtices entrelaçados. Esta configuração tridimensional da esteira não é observada com muita freqüência.

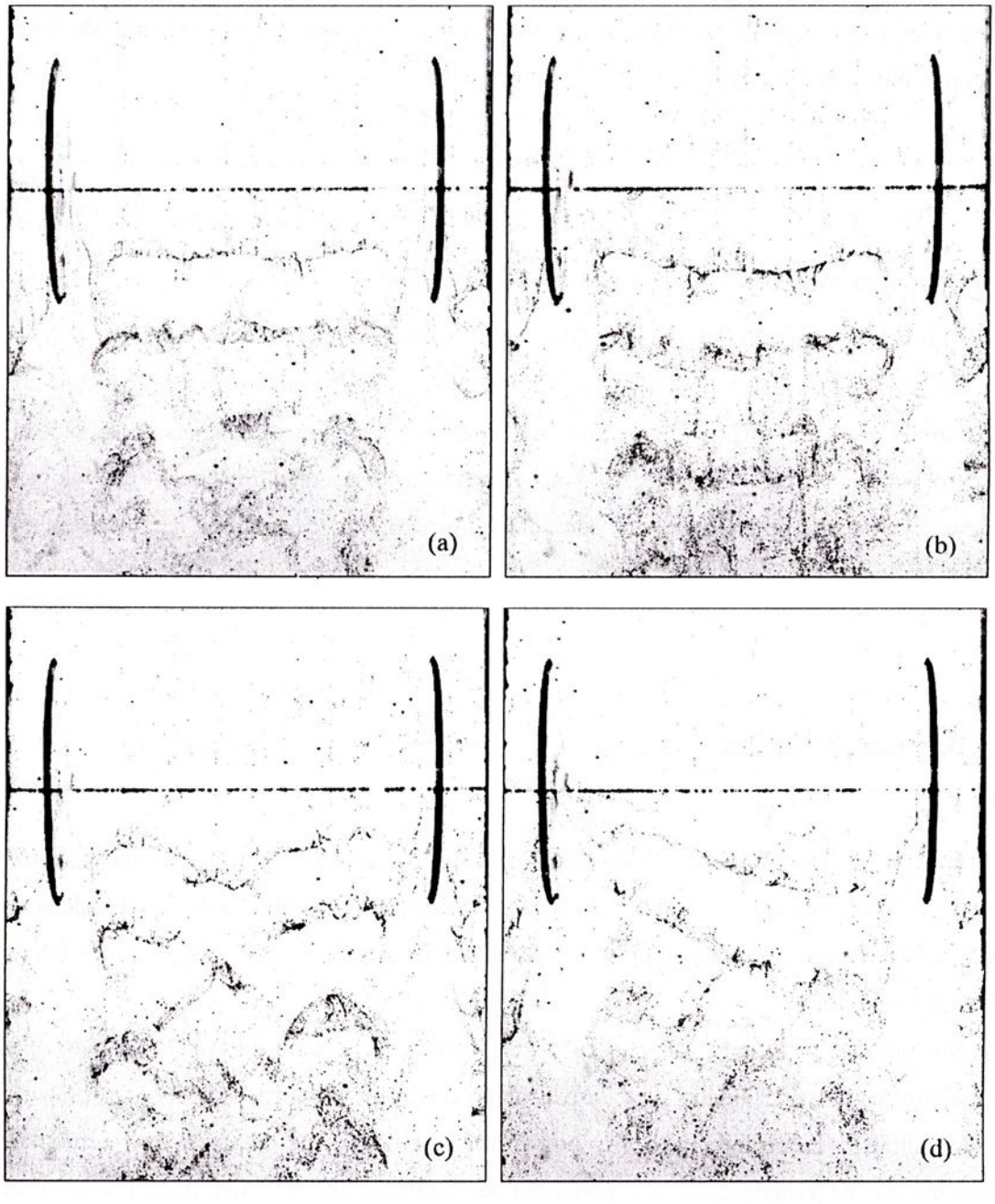


Figura 9.3 – Padrões tridimensionais de emissão de vórtices de um cilindro quadrado (Re = 100, α = 20 e D_{ep}/B = 13).

A Figura 9.3(d) apresenta uma configuração tridimensional clássica da esteira de vórtices emitida por corpos cilíndricos. Como pode-se observar, os rolos são emitidos de maneira oblíqua, formando um determinado ângulo com o eixo de simetria longitudinal do cilindro. Quando a esteira possui esta configuração, a freqüência de emissão dos vórtices pode ser relacionada com a freqüência obtida com emissão paralela, através da fórmula do coseno proposta por Williamson (1989)

$$St_{//} = \frac{St_{\theta}}{\cos\theta} \tag{9.4}$$

onde $St_{//}$ é o número de Strouhal obtido com emissão paralela de vórtices, St_{θ} é o número de Strouhal obtido com emissão oblíqua, e θ é o ângulo de emissão oblíqua dos vórtices.

As razões para a ocorrência destes fenômenos tridimensionais na esteira de um corpo cilíndrico ainda não estão totalmente esclarecidas, embora se saiba que pequenas perturbações no escoamento, ou ainda pequenas assimetrias no arranjo experimental ou no perfil de velocidade da corrente livre, sejam suficientes para desencadear a formação de padrões tridimensionais na esteira de vórtices.

9.5 Conclusões

Na presente investigação sobre o fenômeno de tridimensionalização da esteira, pôde-se observar a ocorrência de quatro diferentes padrões de emissão de vórtices, dos quais apenas um apresenta configuração aproximadamente bidimensional, com rolos que se desprendem paralelamente ao cilindro.

Nos ensaios de visualização, utilizou-se a técnica de geração de bolhas de hidrogênio, que se mostrou bastante adequada para a observação dos rolos de vórtices que se propagam na esteira do cilindro. Entretanto, não foi possível a realização de ensaios de anemometria paralelamente aos de visualização, que poderiam ser interessantes para determinar a influência da tridimensionalização da esteira sobre a freqüência de emissão dos vórtices. Esta restrição decorre exatamente da técnica de visualização empregada, que utiliza a eletrólise da água para

unesp

gerar as bolhas de hidrogênio, exigindo a introdução de uma diferença de potencial elétrico no escoamento, que poderia danificar a sonda de filme quente.

Embora o uso de *end plates* seja amplamente difundido, sua influência sobre a esteira de um corpo cilíndrico não é, ainda hoje, completamente compreendida. Apesar de existirem diversos trabalhos publicados que tratam da influência dos *end plates* sobre a esteira de cilindros circulares, muito pouco tem sido feito em relação aos cilindros retangulares. Assim, se faz necessário um estudo mais detalhado sobre o papel dos *end plates* no controle da esteira de cilindros retangulares, que possa servir de base para a definição de critérios de concepção e dimensionamento destes dispositivos, tornando-os capazes de assegurar a emissão paralela de vórtices.

unesp

Conclusão

No presente trabalho apresentou-se um estudo experimental do escoamento ao redor de cilindros de base quadrada e retangular posicionados perpendicularmente à corrente livre, onde foram investigados diversos parâmetros que podem exercer influência sobre o comportamento da curva Strouhal *vs* Reynolds. Mais precisamente, analisou-se a razão de forma, o ângulo de incidência, a razão de bloqueio e a razão de aspecto. Além disso, padrões tridimensionais de emissão de vórtices, que afetam sobremaneira a dinâmica da esteira e, consequentemente, o número de Strouhal, foram identificados.

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

De maneira geral, os parâmetros investigados mostraram forte influência sobre o escoamento. Os resultados obtidos foram, sempre que possível, comparados com dados da literatura, revelando, na maioria das vezes, ótima concordância. As conclusões específicas, referentes a cada um dos parâmetros investigados, encontram-se ao final de cada capítulo, onde são abordados.

unesp

10.1 Recomendações para Futuros Trabalhos

Devido à complexidade do escoamento ao redor de corpos cilíndricos, dificilmente um estudo experimental sobre o assunto poderia abordar a totalidade de suas múltiplas facetas. Dessa forma, o presente trabalho concentrou sua atenção no estudo do comportamento da freqüência de emissão de vórtices, analisando alguns dos principais fatores de influência, que caracterizam o problema. 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:

- para todos os casos considerados, ampliar a faixa do número de Reynolds, o que implicaria na utilização de uma outra instalação experimental;
- investigar o escoamento ao redor de cilindros retangulares com outras razões de forma, o que permitiria identificar as razões de forma críticas, para as quais ocorre a mudança de patamar na curva de Strouhal;
- estudar a influência do ângulo de ataque para cilindros retangulares ($\phi > 1$), posto que este tipo de escoamento apresenta forte interesse em aplicações industriais e ambientais;
- determinar a razão de bloqueio máxima aceitável para considerá-la como desprezível, mapeando-se os perfis de velocidade e de pressão em diferentes estações da seção de testes;

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

- utilizar *end plates* no estudo do escoamento ao redor dos corpos retangulares com $\phi > 1$, empregando-se modelos menores e com *end plates* retangulares;
- utilizar *end plates* no estudo da influência da razão de bloqueio, a fim de desacoplar a influência da razão de aspecto, levando em conta as considerações tecidas no Capítulo 7;
- injetar o corante através de orifícios confeccionados nos próprios modelos cilíndricos, de forma a permitir a visualização do escoamento para números de Reynolds mais elevados;

unesp

A lista de sugestões de trabalhos que poderiam ser desenvolvidos, investigando-se a influência de fatores que interferem sobre este tipo de escoamento, é praticamente infindável. Entretanto, algumas delas poderiam, sem muito esforço, ser implementadas na própria instalação experimental utilizada no âmbito desta pesquisa. São elas:

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

unesp

Referências Bibliográficas

Balint, E., 1953, "Techniques of flow visualization", Aircraft Engineering, Vol.25, pp.161-167.

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.

Bruun, H.H., 1995, "Hot-wire Anemometry", Oxford Science Publications, Oxford, 507 p.

Carcaillet, R., Manie, F., Pagan, D. & Solignac, J.L., 1986, "Leading edge vortex flow over a 75 degree swept delta wing: experimental and computational results", ONERA TP No.1986–122.

Clayton, B.R. & Massey, B.S., 1967, "Flow visualization in water: a review of techniques", Journal of Scientific 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, No.6, p.1203.

Dauchy, C., Dusek, J. & Fraunié, P., 1997, "Primary and secondary instabilities in the wake of a cylinder with free ends", Journal of Fluid Mechanics, Vol.332, pp.295-339.

Davis, R.W. & Moore, E.F., 1982, "A numerical study of vortex shedding from rectangles", Journal of Fluid Mechanics, Vol.116, pp.475-506.

Davis, R.W., Moore, E.F. & Purtell, L.P., 1984, "A numerical-experimental study of confined flow around rectangular cylinders", Physics of Fluids, Vol.27, No.1, pp.46-59.

Davis, W. & Fox, R.W., 1967, "An evaluation of the hydrogen bubble technique for the quantitative determination of fluid velocities within clear tubes", Journal of Basic Engineering, Vol.89, pp.771-781.

Dobrodzicki, G.A., 1982, "Flow visualization water tunnel - its construction and capabilities", NAE - National Aeronautical Establishment, Aeronautical Report LR-610 NRC No.20235.

Elle, B.J. & Jones, J.P., 1961, "A note on the vorticity distribution on the surface of slender delta wings with leading edge separation", Journal of the Royal Aeronautical Society, Vol.65, pp.195-198.

unesp

Fox, T.A. & West, G.S., 1990, "On the use of end plates with circular cylinders", Experiments in Fluids, Vol.9, pp.237-239.

Franke, R., Rodi, W. & Schönung, B., 1990, "Numerical calculation of laminar vortex-shedding flow past cylinders", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.35, pp.237-257.

Freymuth, P., 1993, "Flow visualization in fluid mechanics", Review of Scientific Instrumentation, Vol.64, No.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, No.4, p.417.

Gad-el-Hak, M., 1988, "Visualization techniques for unsteady flows: an overview", Journal of Fluids Engineering, Vol.110, pp.231-243.

Gallon, M., 1989, "Application of the hydrogen bubble visualization method to the water tunnels of ONERA", Flow Visualization V (ed. Reznicek, R.), pp.535-542.

Gerich, D. & Eckelmann, H., 1982, "Influence of end plates and free ends on the shedding frequency of circular cylinders", Journal of Fluid Mechanics, Vol.122, pp.109-121.

Gerrard, J.H., 1978, "The wakes of cylindrical bluff bodies at low Reynolds number", Philosophical Transactions of The Royal Society, Vol.288, pp.351-382.

Gersten, K., 1983, "Immersed bodies", Heat Exchanger Design Handbook, Hemisphere Publishing Co, Vol.2, pp.223.1–223.9.

Graham, J.M.R., 1969, "The effect of end-plates on the two-dimensionality of a vortex wake", Aeronautical Quarterly, Vol.20, pp.237-247.

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.

Hammache, M. & Gharib, M., 1989, "A novel method to promote parallel vortex shedding in the wake of circular cylinders", Physics of Fluids A, Vol.1, No.10, pp.1611-1614.

Hammache, M. & Gharib, M., 1991, "An experimental study of the parallel and oblique vortex shedding from circular cylinders", Journal of Fluid Mechanics, Vol.232, pp.567-590.

Han, T. & Patel, V.C., 1979, "Flow separation on a spheroid at incidence", Journal of Fluid Mechanics, Vol.92, part 4, pp.643-657.

Howland, B., Springer, G.S. & Hill, M.G., 1966, "Use of electrochemiluminescence in visualizing separated flows", Journal Fluid Mechanics, Vol.24, part 4, pp.697-704.

Karniadakis, G. & Triantafyllou, G., 1992, "Three-dimensional dynamics and transition to turbulence in the wake of bluff objects", Journal of Fluid Mechanics, Vol.238, pp.1-30.

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 unesp 12 13 14 15 16 17 18

King, L.V., 1914, "On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid: determination of the convective constants of small platinum wires with applications to hot-wire anemometry", Philosophical Transactions of the Royal Society, Vol.A214, pp.373-432.

Kline, S.J. & McClintock, F.A., 1953, "Describing uncertainties in single-sample experiments", Mechanical Engineering, January, pp.3-8.

Kramers, H., "Heat transfer from spheres to flowing media", Physica, Vol.12, pp.61-80, 1946.

Kubo, Y., Miyazaki, M. & Kato, K., 1989, "Effects of end plates and blockage of structural members on drag forces", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.32, pp.329-342.

Laneville, A., 1990, "Turbulence and blockage effects on two dimensional rectangular cylinders", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, No.33, pp.11-20.

Laurien, E. & Kleiser, L., 1989, "Numerical simulation of boundary-layer transition and control", Journal of Fluid Mechanics, Vol.199, pp.403-440.

Lee, T. & Budwig, R., 1991, "Two improved methods for low speed hot wire calibration", Measurement Science and Technology, Vol.2, pp.643-646.

Leweke, T. & Provansal, M., 1995, "The flow behind rings: bluff body wakes without end effects", Journal of Fluid Mechanics, Vol.288, pp.265-310.

Lindquist, C., Mansur, S.S. & Vieira, E.D.R., 1998a, "Estudo experimental do número de Strouhal de corpos cilíndricos de base quadrada: influência da razão de bloqueio", Actas del VII Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia, Vol.2, Salta, Argentina, pp.548-552.

Lindquist, C., Mansur, S.S. & Vieira, E.D.R., 1998b, "Visualização experimental do escoamento em torno de cilindros retangulares para aplicação em trocadores de calor compactos", Anais do VII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, Vol.1, Rio de Janeiro, Brasil, pp.557-561.

Lindquist, C., Mansur, S.S. & Vieira, E.D.R., 1999, "Influência do ângulo de ataque sobre o número de Strouhal de cilindros com seção transversal quadrada", CD-ROM Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Lindoia, Brasil.

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", CD-ROM Anais do XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Bauru, Brasil, paper code 58.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 12 13 14 15 16 17 18

Lindquist, C., Vieira, E.D.R. & Mansur, S.S., 1999, "Flow visualization of the von Kármán vortex street: a tool for fluid mechanics learning", CD-ROM Proceedings of the International Conference on Engineering and Computer Education, Rio de Janeiro, Brasil.

Merzkirch, W., 1987, "Flow visualization", ed.2, Academic Press, Orlando.

Miller, G.D. & Williamson, C.H.K., 1994, "Control of three-dimensional phase dynamics in a cylinder wake", Experiments in Fluids, Vol.18, pp.26-35.

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., 1985, "Using uncertainty analysis in the planning of an experiment", Journal of Fluids Engineering, Vol.107, pp.173-178.

Moffat, R.J., 1988, "Describing the uncertainties in experimental results", Experimental Thermal and Fluid Science, No.1, pp.3-17.

Mordoff, K.F., 1986, "NASA water tunnel aids flow dynamics research", Aviation Week & Space Technology, Vol.22, No.14, pp.130-131.

Mukhopadhyay, A., Biswas, G. & Sundararajan, T., 1992, "Numerical investigation of confined wakes behind a square cylinder in a channel", International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol.14, pp.1473-1484.

Nakamura, Y., Ohya, Y. & Tsuruta, H., 1991, "Experiments on vortex shedding from flat plates with square leading and trailing edges", Journal of Fluid Mechanics, Vol.222, pp.437-447.

Nakamura, Y., Ohya, Y., Ozono, S. & Nakayama, R., 1996, "Experimental and numerical analysis of vortex shedding from elongated rectangular cylinders at low Reynolds numbers 200-10^3", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.65, pp.301-308.

Norberg, C., 1993, "Flow around rectangular cylinders: pressure forces and wake frequencies", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.49, pp.187-196.

Norberg, C., 1994, "An experimental investigation of the flow around a circular cylinder: influence of aspect ratio", Journal of Fluid Mechanics, Vol.258, pp.287-316.

Obasaju, E.D., 1979, "On the effects of end plates on the mean forces on square sectioned cylinders", Journal of Industrial Aerodynamics, Vol.5, pp.179-186.

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.

unesp

Ohya, Y., Nakamura, Y., Ozono, S., Tsuruta, H. & Nakayama, R., 1992, "A numerical study of vortex shedding from flat plates with square leading and trailing edges", Journal of Fluid Mechanics, Vol.236, pp.445-460.

Okajima, A., 1982, "Strouhal numbers of rectangular cylinders", Journal of Fluid Mechanics, Vol.123, pp.379-398.

Okajima, A., 1990, "Numerical simulation of flow around rectangular cylinders", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.33, pp.171-180.

Persen, L.N. & Saetran, L.R., 1983, "Hot film measurements in a water tunnel", Journal of Hydraulic Research, Vol.21, No.5, pp.379-387.

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, No.1, pp.21–25.

Prandtl, L. & Tietjens, O.G., 1957, "Applied Hydro- and Aeromechanics", Dover Publications Inc., New York, 311 p.

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, No.8, pp.1313-1323.

Sohankar, A., Norberg, C. & Davidson, L., 1997, "Numerical simulation of unsteady low-Reynolds number flow around rectangular cylinders at incidence", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.69-71, pp.189-201.

Stansby, P.K., 1974, "The effects of end plates on the base pressure coefficient of a circular cylinder", Aeronautical Journal, Vol.78, pp.36-37.

Suzuki, H, Inoue, Y., Nishimura, T, Fukutani, K & Suzuki, K, 1993, "Unsteady flow in a channel obstructed by a square rod (crisscross motion of vortex)", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.14, No.1, pp.2-9.

Szepessy, S. & Bearman, P.W., 1992, "Aspect ratio and end plate effects on vortex shedding from a circular cylinder", Journal of Fluid Mechanics, Vol.234, pp.191-217.

Szepessy, S., 1993, "On the control of circular cylinder flow by end plates", European Journal of Mechanics B – Fluids, Vol.12, pp.217-244.

Thompson, M., Hourigan, K. & Sheridan, J., 1996, "Three-dimensional instabilities in the wake of a circular cylinder", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.12, pp.190-196.

unesp

Tritton, D.J., 1959, "Experiments on the flow past a circular cylinder at low Reynolds numbers", Journal of Fluid Mechanics, Vol.6, pp.547-567.

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 de escoamentos ao redor de corpos não-aerodinâmicos utilizando-se técnicas de visualização em meio hidrodinâmico", Tese de doutorado, ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil, 200 p.

Werlé, H., 1973, "Hydrodynamic flow visualization", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol.5, pp.361-382.

West, G.S. & Apelt, C.J., 1982, "The effects of tunnel blockage and aspect ratio on the mean flow past a circular cylinder with Reynolds numbers between 10^4 and 10^5 ", Journal of Fluid Mechanics, Vol.114, pp.361-377.

White, F.M., 1986, "Fluid Mechanics", ed.2, McGraw-Hill, New York, 736 p.

Williamson, C.H.K., 1988, "Defining a universal and continuous Strouhal-Reynolds number relationship for the laminar vortex shedding of a circular cylinder", Physics of Fluids, Vol.31, pp.2742-2744.

Williamson, C.H.K., 1989, "Oblique and parallel modes of vortex shedding in the wake of a circular cylinder at low Reynolds numbers", Journal of Fluid Mechanics, Vol.206, pp.579–627.

Williamson, C.H.K., 1992, "The natural and forced formation of spot-like 'vortex dislocations' in the transition of a wake", Journal of Fluid Mechanics, Vol.243, pp.393-441.

Williamson, C.H.K., 1996a, "Three-dimensional vortex dynamics in bluff body wakes", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.12, pp.150-168.

Williamson, C.H.K., 1996b, "Vortex dynamics in the cylinder wake", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol.28, pp.477-539.

Winter, E.F. & Deterding, J.H., 1956, "Apparatus and techniques for the application of a water flow system to the study of aerodynamic systems", British Journal of Applied Physics, Vol.7, No.7, pp.247-260.

Zdravkovich, M.M., Brand, V.P., Mathew, G. & Weston, A., 1989, "Flow past circular cylinders with two free ends", Journal of Fluid Mechanics, Vol.203, pp.557-575.

unesp

Modelos Cilíndricos

A.1 Processo de Fabricação

Os modelos de ensaio da Série "A" foram confeccionados à partir de uma chapa de aço inoxidável ANSI 304, com 1/8" de espessura nominal. Após o corte de tiras com as dimensões aproximadas dos modelos, os modelos foram usinados preliminarmente por processo de retificação. Em seguida, foi torneada a haste de fixação em uma de suas extremidades, que possui um segmento de rosca M3. A fim de assegurar um bom acabamento superficial, os modelos de ensaio assim obtidos foram lixados manualmente, utilizando-se lixas com granulação decrescente.

Os modelos de ensaio das Série "B" e "C" foram construídos à partir de chapas e tarugos de liga de alumínio, usinados por processo de fresamento. Após a obtenção das dimensões desejadas, foram usinados, no centro geométrico de apenas uma das extremidades de cada modelo, um orifício com rosca M3, para permitir sua fixação aparafusada na seção de testes. O acabamento superficial foi executado de modo semelhante ao realizado nos modelos da Série "A".

unesp

A.2 Aferição Metrológica

Após sua confecção, os modelos de ensaio foram submetidos a uma aferição metrológica, com o objetivo de se verificar suas respectivas qualidades dimensionais e geométricas. Mais precisamente, foram realizadas várias medições, visando determinar o desvio de forma da seção transversal e da envergadura e o desvio dimensional da seção transversal.

O desvio de forma da seção transversal e da envergadura foi verificado com o auxílio de um esquadro de precisão e uma fonte luminosa, observando-se a perpendicularidade das arestas da seção transversal e a retidão da envergadura dos modelos.

As dimensões da seção transversal dos modelos de ensaio (A e B) foram medidas com o auxílio de um paquímetro digital *Mitutoyo Digimatic* 0.01-150 mm. As medições foram efetuadas em 3 posições eqüidistantes ao longo da envergadura dos modelos, quais sejam, em ambas as extremidades e no seu ponto central. Os resultados médios, obtidos ao longo da envergadura, podem ser observados nas Tabelas A.1 a A.3.

Tabela A.1 – Dimensões médias dos modelos cilíndricos da Série "A".

Modelo	$\overline{A}$ (mm)	$\overline{B}$ (mm)	$\overline{A/B}$
A1	3,16	3,03	1,04
A2	5,99	3,01	1,99
A3	8,95	3,02	2,97
A4	12,14	3,01	4,03
A5	18,18	3,04	5,99
A6	24,26	3,02	8,04
A7	36,29	3,01	12,06
A8	48,36	3,00	16,10

Tabela A.2 – Dimensões médias dos modelos cilíndricos da Série "B".

Modelo	$\overline{A}$ (mm)	$\overline{B}$ (mm)	$\overline{A/B}$
B1	5,96	5,90	1,01
B2	12,37	6,13	2,02
B3	18,61	6,22	2,99
B4	24,82	6,20	4,00
B5	37,41	6,16	6,07
B6	49,98	6,20	8,06
B7	74,98	6,25	12,01
B8	100,05	6,24	16,03

Tabela A.3 – Dimensões médias dos modelos cilíndricos da Série "C".

Modelo	$\overline{A}$ (mm)	$\overline{B}$ (mm)	$\overline{A/B}$	$\overline{\beta}$
C1	12,62	12,59	1,00	10,04
C2	19,05	19,02	1,00	15,16
C3	24,91	24,92	1,00	19,84
C4	31,46	31,44	1,00	25,03
C5	38,02	38,01	1,00	30,27

Lei de King

A lei que rege o comportamento térmico do fio quente imerso no escoamento de um fluido pode ser determinada avaliando-se a taxa de transferência de calor através de uma seção elementar do fio, como ilustra a Figura B.1. O balanço térmico num elemento do fio pode ser descrito pela seguinte equação:

$$d\dot{Q}_e = d\dot{Q}_{cf} + d\dot{Q}_c + d\dot{Q}_r + d\dot{Q}_a \tag{B.1}$$

onde $d\dot{Q}_e = \frac{I^2 \chi}{A_f} dx$ (taxa de geração de calor pelo efeito Joule)

$d\dot{Q}_{cf} = \pi d h (T_f - T_a) dx$ (taxa de transferência de calor por convecção forçada)

$d\dot{Q}_c = -k A_f \frac{\delta^2 T_f}{\delta x^2} dx$ (taxa de transferência de calor por condução)

$d\dot{Q}_r = \pi \sigma \varepsilon (T_f^4 - T_a^4) dx$ (taxa de transferência de calor por radiação)

$d\dot{Q}_a = \rho c A_f \frac{\delta T_f}{\delta t}$ (taxa de acumulação de calor)

Nestas expressões, I representa a corrente elétrica que percorre o fio, χ a resistividade do fio, A_f a área da seção transversal do fio, d o diâmetro do fio, T_f a temperatura do fio, T_a a temperatura do escoamento, k a condutividade térmica do fio à temperatura T_f, σ a constante de Stefan-Boltzmann, ε a emissividade do fio e ρ a sua massa específica.

unesp

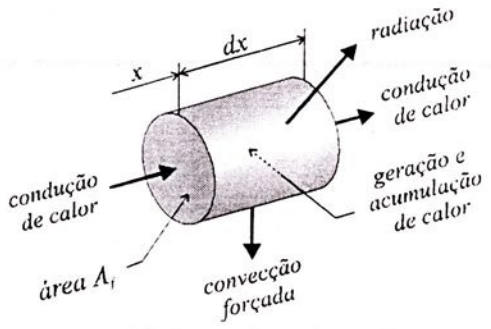


Figura B.1 – Transferência de calor em uma seção elementar de fio quente.

Em aplicações onde o fluido de trabalho apresenta temperatura relativamente baixa, o termo relativo à transferência de calor por radiação é muito pequeno e pode ser desprezado, sem que se incorra em erros significativos. Nestas condições, o equilíbrio térmico do fio pode ser representado como

$$\frac{I^2 \chi}{A_f} dx - \pi dh(T_f - T_a)dx + kA_f \frac{\delta^2 T_f}{\delta x^2} dx - \rho c A_f \frac{\delta T_f}{\delta t} = 0 \qquad \text{(B.2)}$$

A partir da Eq.(B.2), em regime permanente ($\delta T_f/\delta t = 0$), Bruun (1995) mostra que é possível determinar a distribuição de temperatura ao longo do comprimento do fio. A partir da solução obtida, conclui-se que o comprimento do fio deve ser o mais longo possível e que a sua condutividade térmica deve ser baixa.

A resistência R_f de um fio de comprimento L à temperatura uniforme é dada por

$$R_f = \frac{\chi L}{A_f} \qquad \text{(B.3)}$$

Como o material do fio é termo-resistivo, a sua resistência segue uma lei da forma

$$R_f = R_a + R_{20}\alpha_{20}(T_f - T_a) \qquad \text{(B.4)}$$

onde R_a e R_{20} representam o valor da resistência do fio à temperatura ambiente (do fluido) e a 20°C, respectivamente, e α_{20} o coeficiente de temperatura do material à 20°C.

Para um fio infinitamente longo e em regime permanente, a Eq.(B.2) reduz-se a

$$I^2 R_f = \pi dLh(T_f - T_a) \qquad \text{(B.5)}$$

A transferência de calor convectiva de um fio infinitamente longo pode ser expressa de forma adimensional, em função dos números de Nusselt e de Reynolds, através de uma correlação do tipo

$$Nu = A + B\,Re^{1/2} \tag{B.6}$$

onde A e B são constantes empíricas (King, 1914). Segundo Kramers (1946), uma expressão válida para uma larga faixa de números de Reynolds e de Prandtl ($10^{-1} < \mathrm{Re} < 10^4$ e $0{,}71 < \mathrm{Pr} < 10^3$) pode ser escrita como

$$Nu = 0{,}42Pr^{0{,}2} + 0{,}57Pr^{0{,}33}Re^{0{,}5} \tag{B.7}$$

Rescrevendo a Eq.(B.5) e utilizando a definição do número de Nusselt ($Nu = hd/k$), vem

$$I^2R_f = k\pi L(T_f - T_a)Nu \tag{B.8}$$

ou, utilizando as Eqs.(B.4) e (B.7),

$$I^2R_{20} = \pi Lk\frac{T_f - T_a}{1-\alpha_{20}(T_f - T_{20})}(0{,}42Pr^{0{,}2} + 0{,}57Pr^{0{,}33}Re^{0{,}5}) \tag{B.9}$$

Multiplicando ambos os lados da Eq.(B.9) por R_{20}, obtém-se, finalmente

$$E^2 = A + BU^{0{,}5} \tag{B.10}$$

onde

$$A = 0{,}42k\pi L\frac{R_{20}(T_f - T_a)}{1-\alpha_{20}(T_f - T_{20})}Pr^{0{,}2}$$

e

$$B = 0{,}57k\pi L\frac{R_{20}(T_f - T_a)}{1-\alpha_{20}(T_f - T_{20})}Pr^{0{,}33}(\rho d/\mu)^{0{,}5}$$

que fornece a relação entre a diferença de potencial elétrico nas extremidades de um fio infinitamente longo e a velocidade do escoamento incidente.

Para um fio de dimensões finitas, entretanto, as perdas por condução de calor em suas extremidades devem ser levadas em consideração. Na prática, utiliza-se um expoente n na Eq.(B.10), que é rescrita na forma

$$E^2 = A + BU^n \tag{B.11}$$

unesp

Nesta equação, conhecida como Lei de King, as constantes A, B e n devem ser determinadas experimentalmente, através do processo de calibração da sonda. Ainda que a Eq.(B.11) tenha sido deduzida para um elemento infinitesimal de um fio quente, uma relação similar pode ser obtida para sondas de filme quente, modificando-se as correlações utilizadas para avaliar os mecanismos de troca de calor entre a sonda e o meio fluido, em função da geometria apresentada pelo elemento sensor.

unesp

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 associado a um resultado experimental, baseando-se em observações da dispersão dos dados utilizados no cálculo deste resultado, é chamada de Análise de Incerteza. Antes de iniciar uma revisão sobre a análise de incerteza, faz-se necessário definir claramente a terminologia empregada. O termo "variável" significa uma quantidade básica observada diretamente em um laboratório, enquanto que o "resultado" é obtido fazendo-se correções aos valores registrados das variáveis, ou cálculos com eles. Os valores registrados das variáveis chamam-se "dados", que em alguns casos podem ser iguais aos resultados.

unesp

O "erro" de uma medição é definido como a diferença entre o valor verdadeiro e o valor medido. Embora esta definição seja clara e objetiva, sua utilidade é discutível, uma vez que em situações práticas não se conhece o valor verdadeiro - se este fosse conhecido, a medição não seria mais necessária. As únicas situações reais em que podemos ao menos reivindicar conhecer ambos os valores (verdadeiro e medido) são aquelas em que calibramos ou qualificamos um experimento utilizando dados fundamentais ou leis básicas de conservação. Na maioria das vezes, entretanto, não se pode dizer com confiança qual *é* o erro de uma medição, mas sim quanto ele *deve ser*, dentro de um intervalo em que cremos estar limitado (Moffat, 1988).

O termo "incerteza" é então utilizado para referir-se a "um possível valor que o erro pode ter", segundo a definição de Kline & McClintock (1953). Assim, para uma única medição, o erro é um valor único e fixo. A incerteza, por sua vez, pode variar consideravelmente, dependendo das circunstâncias em que a medição foi realizada. Os termos "incerteza" e "intervalo de incerteza" são geralmente usados como sinônimos, ambos significando o intervalo ao redor do valor medido, dentro do qual acredita-se que o valor verdadeiro se encontra.

Do ponto de vista da análise de incertezas, os experimentos podem ser classificados em duas categorias: experimentos de amostragem simples e de amostragem múltipla. Idealmente, seria desejável repetir todas as medições muitas vezes, utilizando-se diversos observadores e vários instrumentos, de tal forma que a confiabilidade dos resultados pudesse ser avaliada pelo uso da estatística. Experimentos em que as incertezas são avaliadas através da repetição de medições independentes são chamados de experimentos de amostragem múltipla.

Infelizmente, na maioria dos casos de experimentos em engenharia, não é prático estimar as incertezas pela repetição de medições independentes. Além de outros motivos, o tempo requerido e o custo operacional são muito grandes para permitir a repetição de todos os aspectos de um experimento. Este tipo de experimento, em que as incertezas não são determinadas pela repetição, é chamado experimento de amostragem simples.

Numa definição mais ampla, a diferença entre a análise por amostragem simples ou múltipla reside na quantidade de observações independentes realizadas em cada ponto experimental, e como os dados são manipulados. Com a tecnologia atual de aquisição digital de alta velocidade, a questão da independência entre medições sucessivas tem se tornado mais tênue do que nos anos 50, quando o termo foi cunhado (Moffat, 1988).

Imagine, por exemplo, um sistema de medição com capacidade para adquirir dados a uma taxa de 100 kHz. Ao ser conectado a um experimento cuja saída varia numa taxa de 100 MHz, o sistema de aquisição realizará 100 leituras num período de 1 ms. Assim, cada leitura

efetuada pode ser considerada uma medição independente do processo, assumindo que o tempo decorrido entre as medições sucessivas é grande quando comparado com o tempo de autocorrelação do sinal adquirido. Este conjunto de 100 leituras seria, portanto, um conjunto de observações de amostragem múltipla. O mesmo equipamento, quando conectado a um experimento cuja saída varia numa taxa de 1 Hz, produziria uma medição de amostragem simples do processo, talvez contaminada por erros randômicos de alta freqüência presentes no sistema de medição. Assim, a classificação de um dado experimento entre amostragem simples e múltipla deve levar em conta não somente o número de observações realizadas em cada ponto experimental, mas também a taxa de amostragem e o espectro das freqüências significativas do processo em estudo, e se os dados são processados antes ou depois de ser feita a média.

A incerteza atribuída a uma medição é uma estimativa do possível erro residual daquela medição, após todas as correções propostas terem sido efetuadas. A distinção entre o erro original e o residual deve ser sempre mantida, pois a incerteza é determinada pelo erro residual após a correção, e não pelo erro original.

Uma fonte de erro é geralmente classificada como "fixa" ou "aleatória", dependendo se o erro que ela introduz é constante ou varia com o tempo, durante a execução do experimento. Estes erros são chamados de *erros sistemáticos* (ou *fixos*) e *erros de precisão* (ou *aleatórios*), respectivamente. O erro de precisão comporta-se aleatoriamente, com média igual a zero. Para a maioria dos experimentos em engenharia, existe ainda uma terceira categoria de erros, chamados de "variáveis mas determinísticos". Esta classificação não depende somente de como a fonte de erros se comporta com o tempo, mas também da taxa de amostragem das observações, pois qualquer processo pode parecer aleatório se a taxa de amostragem é suficientemente baixa (Moffat, 1988).

C.2 Análise de Incerteza para 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).

A análise de incerteza por amostragem simples pode ser encontrada na literatura nos trabalhos de Kline & McClintock (1953) e Moffat (1982, 1985 e 1988). Além de sua utilidade mais visível, a descrição da incerteza de um resultado numa publicação científica, a análise de incerteza produz informações auxiliares adicionais sobre o experimento, geralmente muito úteis como ferramentas de diagnóstico, tanto na fase de planejamento como de execução de um experimento.

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

$$X_i = X_i(\text{medido}) \pm \delta X_i \qquad (20:1) \qquad \text{(C.1)}$$

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 Eq.(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.

unesp

O resultado R do experimento, calculado a partir de um conjunto de medições, é representado por

$$R = R(X_1, X_2, X_3, ..., X_N) \tag{C.2}$$

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

$$\delta R_{X_i} = \frac{\partial R}{\partial X_i} \delta X_i \tag{C.3}$$

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:

$$\delta R = \left[\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial R}{\partial X_i} \delta X_i \right)^2 \right]^{1/2} \tag{C.4}$$

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 Eq.(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

unesp

$$R = X_1^a X_2^b X_3^c ... X_N^m \tag{C.5}$$

então

$$\frac{\delta R}{R} = \left[\left(a \frac{\delta X_1}{X_1} \right)^2 + \left(b \frac{\delta X_2}{X_2} \right)^2 + ... + \left(m \frac{\delta X_N}{X_N} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{C.6}$$

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 Eq.(C.6).

C.3 Análise de Incerteza das Variáveis de Interesse

Comprimento

As dimensões características dos modelos cilíndricos foram medidas com o auxílio de um paquímetro digital Mitutoyo Digimatic 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. Cada medição iniciou com a verificação do zero no mostrador digital do paquímetro, em seguida o corpo de prova foi tomado numa das mãos e o paquímetro na outra, e então foi realizada a medição. 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 ($S = 6\times10^{-3}$ mm), pode-se calcular a incerteza associada à medição das dimensões dos modelos cilíndricos, dada por

$$\delta D = \pm t_{95\%} \frac{S}{\sqrt{N}} \tag{C.7}$$

onde δD 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 $\delta A = \delta B = \delta C = 2\times10^{-3}$ mm.

unesp

Temperatura

A temperatura da água é um parâmetro que exerce uma grande influência sobre as suas propriedades, tais como a viscosidade e a densidade. A temperatura foi medida de duas maneiras distintas, dependendo do tipo de ensaio realizado. 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 ±0,1°C. Já nos ensaios de anemometria, a temperatura foi medida utilizando-se a sonda de temperatura do anemômetro. Esta sonda é do tipo termistor, e mede temperaturas na faixa de 0-150°C, com incerteza de ±0,1°C.

Viscosidade Cinemática

A viscosidade cinemática da água é uma propriedade física que possui forte dependência com a temperatura, e pode ser escrita como

$$\nu(T) = \frac{\mu(T)}{\rho(T)} \tag{C.8}$$

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 $\mu_o = 1{,}788\times10^{-3}$	White (1986)	±0,2%
$\rho(T)$ $[\text{kg.m}^{-3}]$	$\rho = 1000 - 0{,}0178\left\|T(^\circ C) - 4\right\|^{1{,}7}$		

A incerteza associada ao cálculo da viscosidade cinemática pode ser então estimada como sendo

$$\delta\nu = \left[\left(\frac{\delta\mu}{\rho}\right)^2 + \left(-\frac{\mu}{\rho^2}\delta\rho\right)^2\right]^{1/2} \tag{C.9}$$

ou, em termos relativos,

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = \left[\left(\frac{\delta\mu}{\mu}\right)^2 + \left(-\frac{\delta\rho}{\rho}\right)^2\right]^{1/2} \tag{C.10}$$

Para a faixa de temperatura na qual foram realizados os ensaios, entre 20 e 30°C, a incerteza relativa da viscosidade cinemática da água é de ±0,3%.

Ângulo

O ângulo de ataque do corpo de prova pode ser ajustado de duas formas distintas, de acordo com o tipo da janela posterior instalada na seção de testes. Quando se utiliza a janela padrão, o corpo de prova é fixo por meio de um parafuso, através de um orifício existente na janela. Neste caso, o ângulo de ataque permanece fixo, e é ajustado com o auxílio de um esquadro ou goniômetro, em relação à borda lateral da janela. Já quando é utilizada a janela traseira especial, que possui uma escotilha giratória provida de um goniômetro, pode-se variar o ângulo de ataque do cilindro durante a execução do ensaio. Neste caso, o ângulo de ataque inicial é ajustado com o auxílio de um esquadro, mantendo-se o goniômetro numa posição conhecida, normalmente na marca de 0°.

Utilizando-se a janela padrão, em que o ângulo de ataque permanece fixo, a incerteza do ângulo de ataque é igual a incerteza do seu ajuste com um esquadro, estimada em ±1°. Quando se utiliza a janela especial, além da incerteza do ajuste com o esquadro, existe ainda uma incerteza associada à leitura do goniômetro com o qual a janela está equipada. Neste caso, a incerteza global do ângulo de ataque é estimada em ±1,5°.

Freqüência

A freqüência de emissão dos vórtices, ou freqüência de Strouhal, foi determinada aplicando-se a transformada discreta de Fourier ao sinal temporal da velocidade, adquirido num determinado ponto da esteira turbilhonária. O valor da freqüência de Strouhal é então tomado como sendo igual à freqüência correspondente ao centro geométrico do pico da distribuição de potência espectral resultante. A incerteza da determinação da freqüência de Strouhal pode ser estimada pelo valor da resolução da freqüência da distribuição de potência espectral, dada por

$$\delta f = \frac{F}{N} \ [\mathrm{s}^{-1}] \tag{C.11}$$

onde F é a freqüência de amostragem e N é a quantidade de amostras do sinal adquirido. Nos ensaios de anemometria conduzidos para a determinação da freqüência de emissão dos vórtices, o sinal de velocidade foi adquirido num bloco com 4096 pontos, a uma taxa de 100 Hz. Assim, sua incerteza pode ser estimada como $\delta f = 0{,}02 \ \mathrm{s}^{-1}$

Vazão

A vazão do escoamento que flui através da seção de testes é medida com o auxílio de um medidor de vazão eletromagnético. Segundo a especificação do fabricante, este instrumento possui uma precisão de ±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 ±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 $\delta Q = 0{,}025$ l/s, para vazões inferiores a 2,5 l/s, e $\delta Q = 0{,}01 Q$ [l/s], para vazões superiores a 2,5 l/s.

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 unesp 12 13 14 15 16 17 18

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,

$$V_\infty = \frac{Q}{A} \tag{C.12}$$

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

$$\delta V_\infty = \left[\left(\frac{\delta Q}{A} \right)^2 + \left(-\frac{Q}{A^2} \delta A \right)^2 \right]^{1/2} \tag{C.13}$$

A Tabela C.2 apresenta valores típicos da incerteza da velocidade da corrente livre, calculados para o caso de um cilindro retangular da Série "A", imerso num escoamento com temperatura ambiente.

Tabela C.2 – Valores típicos da incerteza da velocidade da corrente livre.

Re	Q (l/s)	V_∞ (m/s)	δV_∞ (m/s)	$\delta V_\infty / V_\infty$
100	0,5	0,027	0,0013	5%
500	2,5	0,136	0,0014	1%
1000	5,0	0,270	0,0028	1%

Número de Reynolds

O número de Reynolds do escoamento ao redor de um corpo cilíndrico é definido pela seguinte expressão:

$$Re = \frac{V_\infty B}{\nu} \tag{C.14}$$

onde B é a dimensão da base da seção transversal retangular.

A incerteza do número de Reynolds pode ser calculada como

$$\delta Re = \left[\left(\frac{B}{\nu} \delta V_\infty \right)^2 + \left(\frac{V_\infty}{\nu} \delta B \right)^2 + \left(- \frac{V_\infty B}{\nu^2} \delta \nu \right)^2 \right]^{1/2} \tag{C.15}$$

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	$\delta Re / Re$
100	5	5%
500	5	1%
1000	11	1%

Comparando os termos da Eq.(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 freqüência adimensional de emissão dos vórtices de um dos lados do corpo, e pode ser escrito como

$$St = \frac{f\, B}{V_\infty} \tag{C.16}$$

onde f é a freqüência de emissão dos vórtices na esteira de von Kármán. De maneira semelhante, a incerteza associada ao cálculo do número de Strouhal pode ser estimada por

$$\delta St = \left[\left(\frac{B}{V_\infty} \delta f \right)^2 + \left(\frac{f}{V_\infty} \delta B \right)^2 + \left(- \frac{fB}{V_\infty^2} \delta V_\infty \right)^2 \right]^{1/2} \tag{C.17}$$

Para o mesmo caso considerado anteriormente, são apresentados valores típicos da incerteza do número de Strouhal, resumidos na Tabela C.4.

Tabela C.4 – Valores típicos da incerteza do número de Strouhal.

Re	f (Hz)	δSt	$\delta St / St$
100	1,45	0,008	5%
500	6,51	0,002	1%
1000	12,03	0,001	1%

Razão de Aspecto

A razão de aspecto de um corpo cilíndrico é dada pela relação entre o seu comprimento e sua dimensão característica. Assim, temos que

$$\alpha = \frac{L}{B} \tag{C.18}$$

onde L é o comprimento útil do cilindro e B é a sua dimensão característica. A incerteza da medição de L, dada pela distância entre os *end plates*, é estimada em 0,5 mm.

Assim, a incerteza associada a este parâmetro pode ser estimada por

$$\delta\alpha = \left[\left(\frac{\delta L}{B}\right)^2 + \left(-\frac{L}{B^2}\delta B\right)^2\right]^{1/2} \tag{C.19}$$

Os valores incerteza da razão de aspecto podem ser encontrados na Tabela C.5.

Tabela C.5 – Valores da incerteza do cálculo da razão de aspecto.

α	$\delta\alpha$	$\delta\alpha / \alpha$
40	0,17	0,4%
20	0,16	0,8%
10	0,16	1,6%
5	0,16	3,3%

unesp

Razão de Bloqueio

A razão de bloqueio é dada pela relação entre a área frontal projetada do corpo de prova (A_{cp}) e a área transversal da seção de testes (A_{st}), ou seja,

$$\beta = \frac{A_{cp}}{A_{st}} \tag{C.20}$$

e, portanto,

$$\delta\beta = \left[\left(\frac{\delta A_{cp}}{A_{st}} \right)^2 + \left(-\frac{A_{cp}}{A_{st}^2} \delta A_{st} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{C.21}$$

A área frontal projetada de um cilindro retangular é dada pela seguinte expressão

$$A_{cp} = B\,C \tag{C.22}$$

cuja incerteza é dada por

$$\delta A_{cp} = \left[(B\,\delta C)^2 + (\delta B\,C)^2 \right]^{1/2} \tag{C.23}$$

As dimensões da seção de testes foram medidas com o auxílio de um paquímetro, e em função da dificuldade de acesso, a incerteza de medição das suas dimensões é estimada em ±0,3 mm. Desta forma, a área transversal da seção de testes, na posição em que o modelo é instalado, é dada por $A_{st} = 18460 \pm 60$ mm^2

A incerteza da razão de bloqueio imposta pelos modelos cilíndricos, calculada através da Eq.(C.21), possui o mesmo valor percentual para todos os modelos utilizados: $\delta\beta/\beta = 0{,}3\%$.

Razão de Forma

A razão de forma é um parâmetro que expressa a relação entre a altura e a base da seção transversal retangular do cilindro, ou seja,

$$\phi = \frac{A}{B} \tag{C.24}$$

unesp

A incerteza associada à determinação deste parâmetro pode ser estimada pela expressão

$$\delta\phi = \left[\left(\frac{\delta A}{B}\right)^2 + \left(-\frac{A}{B^2}\delta B\right)^2\right]^{1/2} \qquad \text{(C.25)}$$

Calculando a incerteza da razão de forma dos modelos da Série "A", verifica-se que a incerteza percentual possui o mesmo valor para todos os cilindros: $\delta\phi/\phi = 0{,}1\%$

unesp
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