



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

***ESTUDO DO ESCOAMENTO AO REDOR DE
CILINDROS ELÍPTICOS***

Dissertação de Mestrado

Fábio Basaglia Fonseca

Orientador: Prof. Dr. Edson Del Rio Vieira

Co-orientador: Prof. Dr. Sérgio Said Mansur

Ilha Solteira – SP

Março/2013

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

***“ESTUDO DO ESCOAMENTO AO REDOR DE
CILINDROS ELÍPTICOS”***

Fábio Basaglia Fonseca

Orientador: Prof. Dr. Edson Del Rio Vieira

Co-orientador: Prof. Dr. Sérgio Said Mansur

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

Área de Conhecimento: Ciências Térmicas.

Ilha Solteira – SP

Março/2013

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

F676e	Fonseca, Fábio Basaglia. Estudo do escoamento ao redor de cilindros elípticos / Fábio Basaglia Fonseca. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2013 97 f. : il. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Conhecimento: Ciências Térmicas, 2013 Orientador: Edson Del Rio Vieira Coorientador: Sérgio Said Mansur 1. Escoamento em torno de cilindros elípticos. 2. Razão entre eixos. 3. Escoamento. 4. Visualização de escoamento. 5. Vórtices. 6. Frequência de emissão de vórtices.
-------	---



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

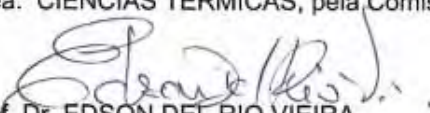
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Estudo do escoamento ao redor de cilindros elípticos

AUTOR: FÁBIO BASAGLIA FONSECA

ORIENTADOR: Prof. Dr. EDSON DEL RIO VIEIRA

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



Prof. Dr. EDSON DEL RIO VIEIRA

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. JOAO BATISTA APARECIDO

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. FRANCISCO AUGUSTO APARECIDO GOMES

Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus
Pato Branco

Data da realização: 26 de março de 2013.

RESUMO

Este trabalho experimental realizado em um túnel hidrodinâmico vertical estudou os padrões do escoamento ao redor de cilindros elípticos com diferentes razões entre eixo. A investigação foi executada devido à importância destes escoamentos na engenharia e também devido à relativa escassez de pesquisas que aborde as características pertinentes a este trabalho. Os ensaios foram realizados com cilindros elípticos com razões de eixos de 0,33; 0,4; 0,5 e 0,67 e com um cilindro circular, para números de Reynolds variando até cerca de 2000. Os cilindros elípticos foram posicionados de forma que o maior eixo da elipse fosse paralelo à direção do escoamento. Os resultados obtidos mostram imagens dos escoamentos visualizados em torno dos cilindros para diferentes regimes de escoamento e a variação da frequência de emissão de vórtices (número de Roshko e número de Strouhal) com o número de Reynolds. Foram comparados os resultados referentes aos escoamentos em torno do cilindro circular com trabalhos precedentes e observou-se boa concordância, validando os demais resultados. A comparação entre as visualizações dos escoamentos para os diferentes cilindros elípticos revelaram que os cilindros com menores razões entre eixos (mais delgados) se aproximam mais da definição de corpos aerodinâmicos. Assim como observado nas visualizações de escoamento, os resultados obtidos com a anemometria de filme quente mostraram que, para números de Reynolds inferiores a 500, os escoamentos em torno dos cilindros ensaiados apresentaram comportamento semelhante em relação à frequência de emissão de vórtices. Quando os valores de Re ultrapassam a faixa de 500, a variação da frequência de emissão referente a cada cilindro difere entre os casos ensaiados. Os resultados referentes à variação do número adimensional de Roshko com o número de Reynolds apresentaram características semelhantes àqueles observados na variação da frequência de emissão. Quanto à variação do número de Strouhal com o número de Reynolds, para números de Reynolds até cerca de 500, existe uma irregularidade no comportamento do número de Strouhal. Porém, para números de Reynolds acima de 500, foi possível obter uma correlação não linear entre as duas grandezas medidas, Re e St .

Palavras-chave: Escoamento em torno de cilindros elípticos. Razão entre eixos. Visualização de escoamento. Frequência de emissão de vórtices.

ABSTRACT

This work is an experimental study about the flow around elliptical cylinders with different axis ratios carried out in a hydrodynamic vertical tunnel. The investigation was performed due to the relevance of these flows in an engineering view point and because the lack of research in this area. Tests were performed with elliptical cylinders with axis ratios of 0.33, 0.4, 0.5 and 0.67 and with a circular cylinder, for Reynolds numbers up to about 2,000. The elliptical cylinders were positioned transversally to the non-perturbed flow with null attack angle. Qualitative results were presented as the images of the visualized flow and quantitative results shown the vortex shedding frequency, the Roshko number and the Strouhal number in function of Reynolds number. The results for the flow around the circular cylinder were compared with previous work and showed a good agreement, validating the other results. A comparison of the flow visualizations for the different cylinders revealed that the cylinders with smaller axis ratios (thinner) are closer to the definition of aerodynamic bodies. The results obtained with hot film anemometry showed that for Reynolds numbers less than 500, the flows around the tested cylinders showed very similar behavior to the vortex shedding frequency. For Reynolds numbers more than 500, the variation of the vortex shedding frequency differs significantly in each cylinder tested. The results concerning of the Roshko number in function of Reynolds number exhibited similar behavior to those observed in the variation of frequency. As regards the variation of the Strouhal, for Reynolds numbers up to about 500, there is an irregularity in the behavior of the Strouhal number. However, for Reynolds numbers over 500, it was possible to obtain a nonlinear correlation between the two measured quantities, Reynolds and Strouhal.

Keywords: Flow around elliptical cylinders. Axis ratio. Flow visualization. Vortex shedding frequency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Exemplos de ocorrências de escoamentos em torno de corpos rombudos	14
Figura 2	– Esboço da separação das camadas limites em escoamentos em torno de um corpo rombudo e de um corpo aerodinâmico	15
Figura 3	– Emissão alternada de vórtices a jusante de um corpo rombudo	15
Figura 4	– Queda da ponte do estreito de Tacoma, EUA – vibração induzida por vórtices e ressonância	16
Figura 5	– Edifícios em forma de cilindros elípticos	17
Figura 6	– Tubos de seção transversal elíptica usados em trocadores de calor.....	18
Figura 7	– Variação da razão de eixo de uma elipse	18
Figura 8	– Regimes de escoamento em torno de um cilindro circular	23
Figura 9	– Modelo do processo de geração e desprendimento de vórtices na esteira de cilindros.....	25
Figura 10	– Regiões do escoamento perturbado	26
Figura 11	– Transições nas regiões perturbadas (BL = camada limite, L = laminar, T = turbulento, Tr = transição e S = separação).....	26
Figura 12	– Perturbações típicas: (a) turbulência; (b) superfície rugosa; (c) bloqueio de parede; (d) parede próxima; (e) efeito de extremidade; (f) extremidade livre; (g) oscilação transversal; (h) oscilações de fluxo direto	27
Figura 13	– <i>Creeping Flow</i> , $Re = 1$	28
Figura 14	– Esteira próxima fechada e permanente, $Re = 23$	28
Figura 15	– Esteira laminar periódica	29
Figura 16	– Transição na esteira.....	29
Figura 17	– Transição nas camadas cisalhante livres.....	30
Figura 18	– Número de Strouhal versus número de Reynolds para cilindro circular	33
Figura 19	– Ilustração esquemática do túnel hidrodinâmico vertical.....	39
Figura 20	– Vista do túnel hidrodinâmico mostrando a seção de testes e parte da estrutura de sustentação	40
Figura 21	– Seção de testes	41
Figura 22	– Configuração de janelas utilizadas na seção de testes do túnel	42
Figura 23	– Cilindros utilizados nos ensaios.....	44
Figura 24	– Dispositivo de injeção de corantes líquidos.....	46

Figura 25	– Jato livre axissimétrico em meio quiescente, visualizado com o auxílio de duas técnicas de injeção de corante e iluminação em	48
Figura 26	– (a) Imagem sem edição; (b) Imagem editada com técnicas computacionais...	50
Figura 27	– Diferentes tipos de sondas anemométricas de fio quente: (a) sonda comercial <i>Dantec</i> ; (b) sonda sendo calibrada com auxílio de um micro tubo de Pitot em um túnel aerodinâmico; (c) sonda de fabricação própria.....	52
Figura 28	– Elementos básicos da cadeia de medição do anemômetro CTA.....	52
Figura 29	– Anemômetro de temperatura constante <i>Dantec StreamLine</i>	53
Figura 30	– Visualização de escoamento em torno de um cilindro circular ($AR = 1$) para $7 \leq Re \leq 1714$	56
Figura 31	– Visualização de escoamento em torno de um cilindro elíptico de $AR = 0,67$ para números de Reynolds entre 13 e 1789	57
Figura 32	– Visualização de escoamento em torno de um cilindro elíptico de $AR = 0,5$ para Re entre 28 e 1890.....	59
Figura 33	– Visualização de escoamento em torno de um cilindro elíptico de $AR = 0,4$ para $9 \leq Re \leq 1950$	60
Figura 34	– Visualização de escoamento em torno de um cilindro elíptico de $AR = 0,33$ para $5 \leq Re \leq 587$	61
Figura 35	– Visualização de escoamento em torno de um cilindro elíptico de $AR = 0,33$ para $676 \leq Re \leq 1999$	62
Figura 36	– Exemplo do posicionamento correto da sonda	64
Figura 37	– (a) Sinal temporal; (b) Espectro de frequência	64
Figura 38	– (a) Sinal temporal; (b) Espectro de frequência	65
Figura 39	– (a) Sinal temporal; (b) Espectro de frequência	65
Figura 40	– Variação da frequência de emissão de vórtices com o número de Reynolds para os escoamentos em torno dos diferentes cilindros ensaiados	66
Figura 41	– Variação da frequência de emissão de vórtices com o número de Reynolds para o escoamento em torno do cilindro elíptico com $AR = 0,33$	67
Figura 42	– Variação do número de Roshko com o número de Reynolds para os escoamentos em torno dos diferentes cilindros ensaiados	69
Figura 43	– Variação do número de Strouhal com o número de Reynolds para o escoamento em torno do cilindro circular.....	70
Figura 44	– Desvios dos resultados do presente trabalho em comparação com a correlação de Roshko (1954).....	70

Figura 45	–	Variação do número de Strouhal com o número de Reynolds para os escoamentos em torno dos diferentes cilindros ensaiados	71
Figura 46	–	Aparato experimental utilizado na calibração da sonda	80
Figura 47	–	Rotâmetro.....	81
Figura 48	–	Perfil de velocidade de um jato livre	81
Figura 49	–	Curva de calibração da sonda de filme quente.....	82
Figura 50	–	Esquema da sonda com o suporte “ L ” e o posicionador utilizados para a aquisição de dados sem a presença de modelos na seção de testes	83
Figura 51	–	Perfil de velocidade do túnel hidrodinâmico para diferentes velocidades médias	83
Figura 52	–	Medições de velocidade no centro da seção de testes.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Resumo dos regimes de escoamento livres de perturbações	31
Tabela 2	– Regimes de escoamento em torno de um cilindro circular liso em corrente permanente	32
Tabela 3	– Resumo das características dos estudos apresentados sobre escoamentos em torno de cilindros elípticos.....	36
Tabela 4	– Características geométricas dos cilindros	44
Tabela 5	– Correlação entre f e Re para valores de Re entre 500 e 2000.....	68
Tabela 6	– Correlação entre Ro e Re para valores de Re entre 500 e 2000	69
Tabela 7	– Correlação entre St e Re para valores de Re entre 500 e 2000.....	72
Tabela 8	– Medições ao longo da envergadura dos corpos de prova	85
Tabela 9	– Expressões comuns para propagação de incertezas	89
Tabela 10	– Correlações para o cálculo da viscosidade cinemática da água	91
Tabela 11	– Valores típicos da incerteza da vazão	93
Tabela 12	– Valores típicos da incerteza da velocidade da corrente livre	94
Tabela 13	– Valores típicos da incerteza do número de Reynolds	95
Tabela 14	– Valores típicos da incerteza do número de Strouhal.....	96
Tabela 15	– Valores típicos da incerteza do número de Roshko	97

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	densidade [kg.m ⁻³]
D	diâmetro do cilindro [m]
f	frequência de emissão de vórtices [Hz]
v	velocidade média [m/s]
μ	viscosidade dinâmica [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]
ν	viscosidade cinemática [m ² /s]
a	eixo da elipse paralelo ao escoamento [mm]
b	eixo da elipse perpendicular ao escoamento [mm]
L	envergadura do cilindro [mm]
k	rugosidade [mm]
G	<i>gap</i> [mm]
B	bloqueio de parede [mm]
H	extremidade livre [mm]
A_T	oscilação transversal [mm]
A_L	oscilação de fluxo direto [mm]
E	tensão de saída do anemômetro [V]
u	velocidade instantânea [m/s]
$v_{média}$	velocidade média temporal [m/s]

Adimensionais

Re	número de Reynolds
Ro	número de Roshko

St	número de Strouhal
AR	razão entre eixos (a/b)
AR_{crl}	razão entre eixos crítica
R	coeficiente de correlação
R^2	coeficiente de determinação
n	índice de fluido <i>power-law</i>

Siglas

L	laminar
$TrSL$	transição nas camadas cisalhantes
$TrBL$	transição nas camadas limites
TrW	transição na esteira
T	turbulência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Motivação	13
1.2	Objetivos e escopo do trabalho.....	19
1.3	Estrutura do trabalho.....	20
2	ASPECTOS FENOMENOLÓGICOS	22
2.1	Introdução	22
2.2	Mecanismo de formação e emissão de vórtices alternados	24
2.3	Escoamento em torno de um cilindro circular	25
2.4	Escoamento em torno cilindros elípticos	34
3	TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	38
3.1	Túnel hidrodinâmico vertical	38
<i>3.1.1</i>	<i>Seção de testes</i>	<i>41</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Corpos de prova</i>	<i>43</i>
<i>3.1.3</i>	<i>Operação do túnel</i>	<i>44</i>
3.2	Visualização de escoamentos com injeção de corantes líquidos	45
3.3	Técnicas fotográficas	47
3.4	Edição de imagens.....	49
3.5	Anemometria de filme quente.....	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
4.1	Introdução	54
4.2	Visualização de escoamento	54
4.3	Determinação da frequência de emissão de vórtices	63
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	73
	REFERÊNCIAS.....	75

APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DA Sonda E CARACTERÍSTICAS DO TÚNEL	80
A.1 Curva de calibração	80
A.2 Perfil de velocidade e intensidade turbulenta	82
A.3 Medições realizadas nos corpos de prova.....	85
 APÊNDICE B – ANÁLISES DE INCERTEZAS	 86
B.1 Erros e incertezas.....	86
B.2 Incertezas teóricas e experimentais	87
B.3 Propagação de incertezas.....	87
B.4 Análise de incerteza das variáveis de interesse	90
<i>B.4.1 Comprimento</i>	<i>90</i>
<i>B.4.2 Temperatura</i>	<i>90</i>
<i>B.4.3 Área</i>	<i>90</i>
<i>B.4.4 Viscosidade cinemática</i>	<i>91</i>
<i>B.4.5 Frequência.....</i>	<i>92</i>
<i>B.4.6 Vazão</i>	<i>92</i>
<i>B.4.7 Velocidade</i>	<i>93</i>
<i>B.4.8 Número de Reynolds.....</i>	<i>94</i>
<i>B.4.9 Número de Strouhal.....</i>	<i>95</i>
<i>B.4.10 Número de Roshko.....</i>	<i>96</i>
B.5 Coeficiente de determinação.....	97

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

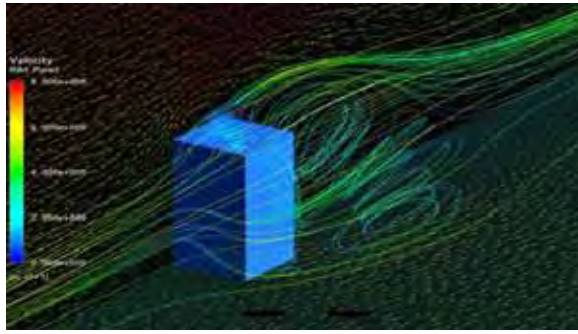
Escoamentos em torno de corpos rombudos apresentam grande interesse científico e tecnológico devido à elevada frequência com que esse tipo de escoamento aparece na indústria, na construção civil, nos transportes e na natureza. Exemplos típicos são os escoamentos através de feixes de tubos de trocadores de calor, o movimento do ar em torno de edifícios e pontes e o movimento da água em torno de estruturas *offshore*. Situação análoga ocorre quando veículos aéreos, terrestres ou aquáticos de formato não aerodinâmico se deslocam no meio fluido. Na natureza, tais fenômenos são observados em escoamentos hidrodinâmicos ou atmosféricos em torno de ilhas e formações rochosas. Tais casos de escoamentos são ilustrados na Figura 1.

Quando um corpo rombudo, também chamado de não aerodinâmico, é submerso em uma corrente fluida, ocorre, em geral, o descolamento prematuro da camada limite. Já no caso dos corpos aerodinâmicos, esse descolamento tende a ser retardado e a camada limite permanece colada ao corpo ao longo da maior parte de sua extensão. A Figura 2 ilustra a diferença entre os pontos de separação das camadas limites nos escoamentos em torno de um corpo rombudo e de um corpo aerodinâmico.

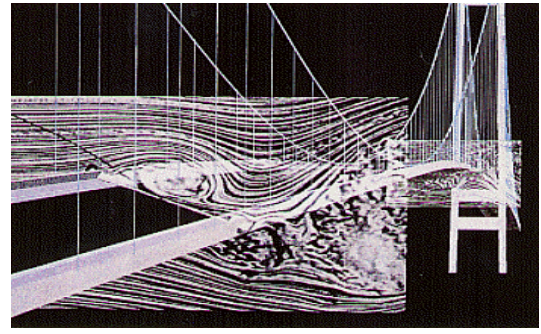
Em determinados regimes de escoamento em torno de corpos rombudos, ocorre a formação de vórtices que se desprendem alternadamente de ambos os lados do corpo, como ocorre, por exemplo, no escoamento a jusante do cilindro circular mostrado na Figura 3.

Nos escoamentos em torno de corpos onde há emissão alternada de vórtices, ocorrem flutuações cíclicas nos campos de pressão e de velocidade, produzindo forças de natureza periódica sobre o corpo imerso. Quando a frequência dessas forças se aproxima da frequência natural do corpo, pode ocorrer o fenômeno da ressonância, ocasionando, nos casos mais críticos, até mesmo a destruição de grandes estruturas de engenharia. Um exemplo bem conhecido dos efeitos produzidos pela ressonância é o que aconteceu nos Estados Unidos, em 1940, com a bem conhecida ponte de Tacoma. Embora existam controvérsias sobre a real causa do colapso da estrutura, a hipótese mais aceita e difundida é de que o movimento do ar ao redor da ponte tenha provocado fortes deslocamentos e movimentos de torção, que resultaram no desmoronamento da estrutura, conforme ilustra a Figura 4.

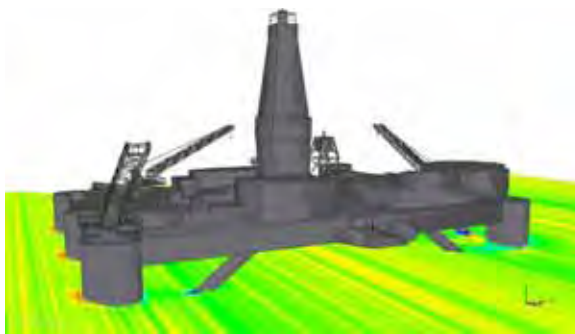
Figura 1 – Exemplos de ocorrências de escoamentos em torno de corpos rombudos.



(a) Simulação de escoamento em torno de um edifício.
Fonte: Cleanfield Energy (2013).



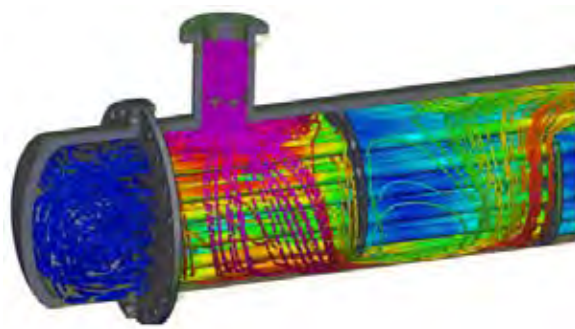
(b) Escoamento do vento em torno de uma ponte.
Fonte: RIAM (2011).



(c) Simulação do escoamento aquático em torno de uma plataforma petrolífera.
Fonte: XFLOW (2013).



(d) Visualização do escoamento de ar em torno de um modelo de caminhão.
Fonte: Auld e Srinivas (2006).

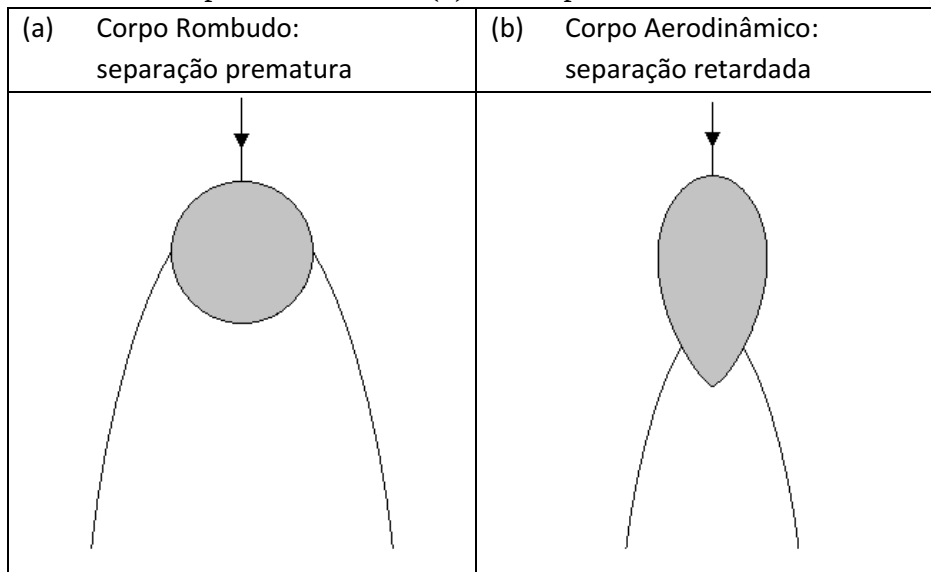


(e) Simulação do escoamento em um trocador de calor casco e tubo.
Fonte: SIMERICS (2012).



(f) Escoamento atmosférico em torno de ilhas.
Fonte: Meteorologia (2010).

Figura 2 – Esboço da separação das camadas limites em escoamentos em torno de (a) um corpo rombudo e de (b) um corpo aerodinâmico.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 3 – Emissão alternada de vórtices a jusante de um corpo rombudo.



Fonte: Bhatia (2008).

As formas de corpos rombudos mais elementares são os cilindros, que estão presentes em várias aplicações nas estruturas de engenharia. Os principais exemplos da aplicação de cilindros na engenharia são edifícios, torres, vigas, pilares e chaminés de seções transversais quadradas, circulares, triangulares e outras mais complexas. Os escoamentos em torno de cilindros de base quadrada e circular, por exemplo, foram estudados detalhadamente em trabalhos precedentes. Porém, escoamentos em torno de outros tipos de cilindros, como o caso dos elípticos, carecem de estudos mais profundos. Segundo Badr (1994) e

Faruquee *et al.* (2007), os cilindros elípticos também encontram aplicações em diversas áreas da engenharia, como edifícios, pilares de sustentação de plataformas marítimas, cabos ou tubos subaquáticos, veículos em geral, trocadores de calor, aerofólios e pás de máquinas de fluxo. Alguns exemplos da aplicação de cilindros elípticos na engenharia estão ilustrados nas Figuras 5 e 6, como edifícios e tubos de trocadores de calor, respectivamente.

Figura 4 – Queda da ponte do estreito de Tacoma, EUA – vibração induzida por vórtices e ressonância.



Fonte: Vitor (2012).

As elipses são caracterizadas pela relação entre seus eixos principais. Variando-se a razão entre estes eixos, diferentes configurações geométricas são obtidas. Define-se aqui a razão de eixos da elipse (AR) como a divisão do comprimento do eixo perpendicular ao escoamento b pelo comprimento do eixo paralelo ao escoamento a , conforme ilustrado na Figura 7 (a). As Figuras 7 (b), (c) e (d) mostram os três casos particulares que merecem destaque quando a razão entre os eixos da elipse é variada: (b) uma placa plana paralela ao escoamento, quando $AR \rightarrow 0$; (c) um cilindro circular, quando $AR = 1$ e (d) uma placa plana perpendicular ao escoamento quando $AR \rightarrow \infty$.

Figura 5 – Edifícios em forma de cilindros elípticos.



Fonte: Structural Engineering Associates (2008).



Fonte: Metropolitan... (2008).



Fonte: Panoramio (2010).



Fonte: EDING APS (2012).

Figura 6 – Tubos de seção transversal elíptica usados em trocadores de calor.

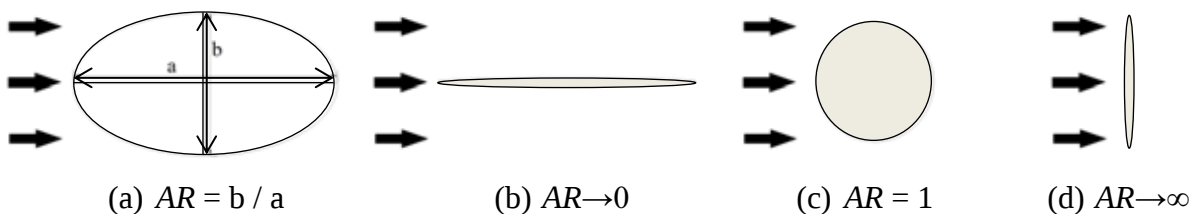


Fonte: Yatal Aluminium (2012).



Fonte: EVAPCO (2011).

Figura 7 – Variação da razão de eixo de uma elipse.



Fonte: Elaboração do autor.

Em várias aplicações, os cilindros elípticos são preferíveis aos cilindros circulares, pois podem oferecer menor resistência hidrodinâmica ao escoamento e maior taxa de transferência de calor (Khan *et al.*, 2005). Além disso, a largura da esteira e, conseqüentemente, o coeficiente de arrasto de um cilindro de base elíptica são, em geral, menores que os encontrados no escoamento em torno de um cilindro circular, de acordo com Raman *et al.* (2010).

A influência da razão de eixos de um cilindro elíptico sobre o escoamento foi verificada por Faruquee *et al.* (2007). Este estudo numérico foi realizado para Re até 40, com o número adimensional calculado com base no diâmetro hidráulico. Os efeitos da razão de eixos foram explorados examinando-se a forma da esteira e as distribuições de pressão e velocidade e, os escoamentos bidimensionais, permanentes, incompressíveis e uniformes foram simulados com cilindros de valores de razão entre eixos entre 0.3 e 1.0 (cilindro circular). O fluido do escoamento simulado (ar) foi considerado incompressível e a hipótese do escoamento ser bidimensional implicou que o cilindro fosse considerado infinitamente

longo, de forma que os efeitos de extremidades fossem desprezados. Os resultados mostraram que o tamanho da esteira aumenta à medida que AR é aumentada de 0,4 até 1. Um valor interpolado de AR , definido como AR_{crit} (AR crítico), com base no comprimento da esteira, foi calculado para cada número de Reynolds simulado. Quando $AR > AR_{crit}$, um par de vórtices estáveis se formava atrás do cilindro e quando $AR < AR_{crit}$, o par constante de vórtices desaparecia. Por fim, os resultados simulados da forma da esteira, do coeficiente de arrasto e da velocidade no eixo traseiro concordaram muito bem com aqueles disponíveis na literatura existente.

Raman *et al.* (2010) também simularam o escoamento em torno de um cilindro elíptico com várias AR s (de 0,1 a 1), a fim de prever características do escoamento de fluidos em número de Reynolds iguais a 50 e 100. As equações governantes foram utilizadas para um escoamento transiente de fluido incompressível com propriedades constantes. As simulações executadas para Re de 50 e 100, com as AR s descritas anteriormente, mostraram que a emissão de vórtices depende somente de Re e de AR . A AR crítica foi identificada utilizando a evolução temporal do coeficiente de sustentação.

As principais conclusões foram: a AR crítica para o surgimento de vórtices para $Re = 50$ e 100 é $AR_{crs} = 0,9$ e $0,6$, respectivamente; a AR crítica para a formação da esteira permanente atrás do cilindro foi $AR_{crw} = 0,29$ e $0,18$ para números de $Re = 50$ e 100 , respectivamente, dando continuidade aos resultados obtidos por Faruquee *et al.* (2007); os valores do coeficiente de arrasto médio, comprimento de esteira e velocidade do eixo traseiro aumentaram com AR crescente e os valores críticos de AR para início da emissão de vórtices e as formas da esteira diminuíram com o aumento do número de Reynolds.

Este trabalho de natureza estritamente experimental abordará, por sua vez, o escoamento incompressível em torno de cilindros elípticos de razões de eixos de 0,33 a 1 (cilindro circular) para números de Reynolds até 2000.

1.2 Objetivos, escopo e contribuição do trabalho

O presente estudo visa à compreensão da estrutura do escoamento permanente e incompressível em torno de cilindros elípticos com razões de eixos variando de 0,33 a 1. Os cilindros serão posicionados com o maior eixo da elipse paralelo à direção do escoamento, resultando em um ângulo de incidência nulo. A faixa de número de Reynolds estudada está entre valores próximos a 5 até cerca de 2000, considerando o eixo da elipse perpendicular ao

escoamento como o comprimento característico. Para o entendimento da estrutura desse tipo de escoamento foram traçados objetivos específicos como segue:

- Identificar e registrar os padrões dos escoamentos em torno dos cilindros através de técnicas de visualização de escoamento apropriadas em meio líquido;
- Quantificar as frequências de emissão de vórtices para os escoamentos em torno de cada cilindro, variando-se o número de Reynolds;
- Comparar os padrões de escoamento em torno de cilindros circulares com os padrões de escoamento em torno de cilindros elípticos para uma mesma faixa de número de Reynolds;
- Obter uma base de dados que possa servir à validação de trabalhos numéricos que abordem o mesmo assunto.

Alguns fatores relacionados aos escoamentos em torno de cilindros elípticos não foram abordados neste trabalho, como o caso da variação do ângulo de incidência, a quantificação dos coeficientes de arrasto e sustentação, o estudo de escoamentos transientes, entre outros, pois fogem ao escopo do trabalho.

Este trabalho procura preencher uma lacuna de conhecimento na área de mecânica dos fluidos, pois, os estudos que já investigaram a influência da razão de eixos de cilindros elípticos sobre a estrutura do escoamento não englobam todas as características hidrodinâmicas e geométricas estudadas aqui. Ou seja, os estudos precedentes sobre este tema tiveram enfoques diferentes do atual trabalho, como a observação das forças que atuam sobre os cilindros, o estudo de escoamentos transientes, a variação do ângulo de incidência do escoamento, dentre outros. Adicionalmente, pouquíssimos trabalhos abordam a faixa de número de Reynolds que será estudada aqui para os valores de razão de eixos de cilindros elípticos entre 0,33 e 1, confirmando a importância do presente estudo.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos e dois apêndices. Após este primeiro capítulo introdutório, o Capítulo 2 apresenta um estudo detalhado dos fenômenos que ocorrem nos escoamentos em torno de cilindros circulares e uma breve discussão sobre estudos precedentes relacionados a escoamentos em torno de cilindros elípticos. Estão presentes, neste capítulo, fundamentos teóricos necessários para o estudo a ser realizado como, por exemplo, o mecanismo físico de formação e despreendimento de vórtices alternados.

O Capítulo 3 detalha os métodos utilizados para a aquisição de resultados, como a visualização de escoamentos com a utilização de corantes líquidos, a anemometria de filme quente, a captação de imagens, o processamento dos sinais da sonda e os procedimentos para a operação do túnel hidrodinâmico.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados e as discussões pertinentes ao trabalho realizado, além de comparações com estudos precedentes. Os resultados são apresentados na forma de imagens fotográficas e de gráficos comparativos entre os escoamentos em torno dos diferentes cilindros. Os gráficos presentes no Capítulo 4 são o da frequência de emissão de vórtices versus o número de Reynolds e o do número de Strouhal versus o número de Reynolds.

As conclusões finais do trabalho e as sugestões para trabalhos posteriores serão apresentadas no Capítulo 5.

O Apêndice A apresenta a curva de calibração da sonda e as características hidrodinâmicas do túnel vertical utilizado no trabalho além de medições realizadas nos corpos de prova.

Por fim, o Apêndice B exhibe a análise de incerteza das grandezas que fazem parte deste estudo experimental que foi inteiramente desenvolvido segundo a metodologia proposta por Moffat (1988).

2 ASPECTOS FENOMENOLÓGICOS

2.1 Introdução

Os cilindros circulares são, talvez, os corpos rombudos que, quando submersos em um escoamento, apresentam as características hidrodinâmicas mais próximas do escoamento em torno de um cilindro elíptico. Por exemplo, quando existe um escoamento em torno de um cilindro de base quadrada, têm-se praticamente definidos os pontos de separação da camada limite como sendo as arestas do quadrado. No caso dos cilindros circulares e elípticos, esses pontos de separação variam conforme a velocidade do escoamento, aparecendo nos pontos mais a jusante do corpo e deslocando-se para a região mais a montante, conforme a velocidade do escoamento aumenta. Por esse motivo, supõe-se, neste trabalho, que os padrões de escoamento em torno de um cilindro circular sejam semelhantes aos padrões de escoamento em torno de um cilindro elíptico.

Os escoamentos em torno de cilindros elípticos até o presente momento não foram estudados detalhadamente e, devido à escassez de estudos nesta área, não é possível encontrar um trabalho que aborde os padrões de escoamento em torno de cilindros elípticos para uma ampla faixa de número de Reynolds. Ao contrário disso, o escoamento em torno de um cilindro circular foi estudado de forma minuciosa e um exemplo é a publicação de Zdravkovich (1997). Portanto, para que sejam apresentados padrões de escoamento semelhantes àqueles que se espera encontrar em torno de um cilindro elíptico, o conteúdo que se segue nesta seção resume a estrutura de escoamentos em torno de cilindros circulares.

Os regimes de escoamentos em torno de um cilindro circular são caracterizados pelo número adimensional de Reynolds, definido como:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (1)$$

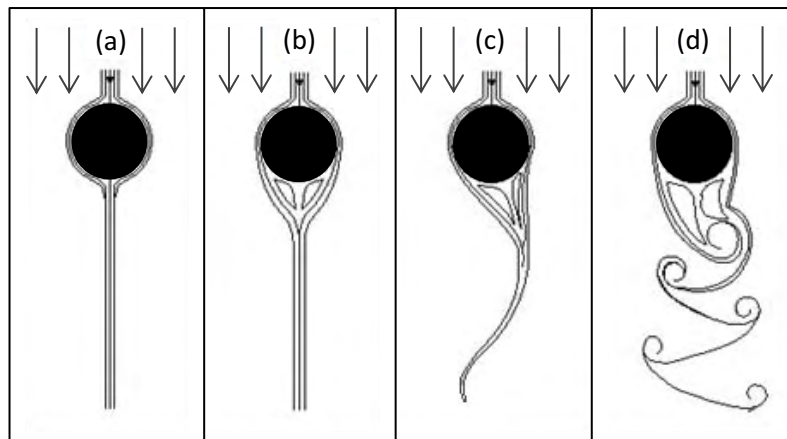
onde ρ é a massa específica do fluido, v é a velocidade média do fluido, D é um comprimento característico (neste caso é o diâmetro) e μ é a viscosidade absoluta do fluido.

Em escoamentos em torno de um cilindro circular, para o casos de Re até 5, as camadas limites não se separam do corpo e as linhas de corrente tendem a contornar toda a superfície do cilindro. Este padrão de escoamento está esboçado na Figura 8-(a). Com um aumento suficiente da velocidade do escoamento (por exemplo, $Re = 20$), como ilustrado na

Figura 8-(b), ocorre a separação das camadas limites em relação ao corpo, formando uma região a jusante do cilindro chamada esteira próxima. Esta região é simétrica neste regime, apresentando duas bolhas de recirculação estáveis em seu interior.

Na Figura 8-(c), quando o número de Reynolds está entre 40 e 60, observa-se a ruptura da simetria na esteira próxima e um posterior movimento oscilatório a jusante da esteira. Um último aumento na velocidade do escoamento proporciona a ocorrência do regime ilustrado na Figura 8-(d), que pode ser observado para Re entre 80 e 180. Este regime assimétrico é marcado pela ausência do recolamento das camadas limites a jusante da esteira próxima e pela formação e emissão de vórtices alternados.

Figura 8 – Regimes de escoamento em torno de um cilindro circular.



Fonte: Elaboração do autor.

Nos regimes de escoamento onde existe um movimento de oscilação ou emissões alternadas de vórtices, pode-se definir outro número adimensional, o número de Strouhal St , que é definido matematicamente como:

$$St = \frac{f D}{v} \quad (2)$$

onde f é a frequência de emissão de vórtices.

2.2 Mecanismo de formação e emissão de vórtices alternados

Uma característica notável de escoamentos em torno de corpos rombudos é a formação e emissão de vórtices. Este fenômeno foi estudado por Gerrard (1966). Ele concluiu que a interação mútua entre duas camadas cisalhantes, formadas em razão da separação da camada limite, constitui um elemento decisivo no processo de formação de vórtices da esteira. Para auxiliar a compreensão do modelo de Gerrard (1966), a Figura 9 esboça as linhas de emissão instantâneas em torno de um cilindro circular. Segundo Gerrard (1966), um vórtice cresce ganhando circulação da camada cisalhante à qual se encontra conectado, atraindo, a partir de um dado instante, partículas de fluido da camada cisalhante do lado oposto. Ao se deslocarem na direção do vórtice maior, as partículas podem seguir três direções distintas: (a) elas podem se unir ao vórtice em formação, no lado oposto da esteira; (b) elas podem mover-se em direção da camada cisalhante oposta, que possui vorticidade de sinal inverso e; (c) elas podem se deslocar em direção ao cilindro, na direção da região da esteira próxima.

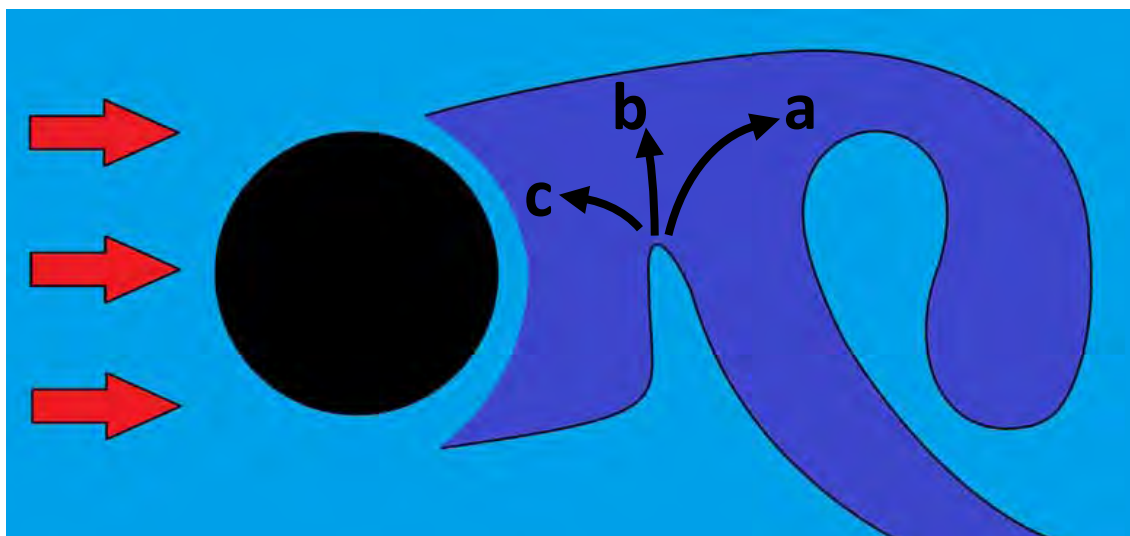
A parcela do escoamento que segue o caminho (a) mistura-se com o fluido que está formando um vórtice na região superior da esteira. Uma vez que essa parcela possui vorticidade contrária àquela do fluido que está constituindo o vórtice, ela colabora para uma diminuição da circulação total desse último.

Aquela parcela que segue em direção à camada cisalhante oposta (b) tem um papel importante no que se refere à estabilidade do escoamento. Havendo uma diminuição da pressão, a camada cisalhante que está se separando do corpo torna-se mais intensa e, por conseguinte, o vórtice também se torna mais intenso. Com isso, uma parcela maior da camada cisalhante oposta atravessará a linha de centro da esteira e uma porção maior de fluido com vorticidade de sinal contrário chocar-se-á com esta camada, fazendo com que haja uma diminuição da intensidade do vórtice que está crescendo. Isso, em última instância, causa a interrupção da alimentação de circulação para este vórtice. Após esta interrupção, o vórtice adquire sua circulação final e desprende-se da camada cisalhante que lhe deu origem.

Finalmente, a parcela de fluido que segue o caminho indicado pela seta (c) colabora para a formação de um novo vórtice, agora, na parte inferior da esteira, fechando o ciclo de geração e desprendimento de vórtices. O balanço da massa de partículas que segue cada um destes caminhos controla o campo de vorticidade na esteira, a pressão na região posterior do corpo (pressão na base) e, evidentemente, a frequência de geração e desprendimento de vórtices coerentes.

Uma vez que o fenômeno de geração e desprendimento de vórtices envolve partículas de fluido com vorticidade de sinais opostos, a intensidade de um vórtice individual da esteira será menor que a circulação total que emanou da separação em um dos lados do corpo rombudo durante um ciclo de geração.

Figura 9 – Modelo do processo de geração e desprendimento de vórtices na esteira de cilindros.



Fonte: Adaptado de Gerrard (1966).

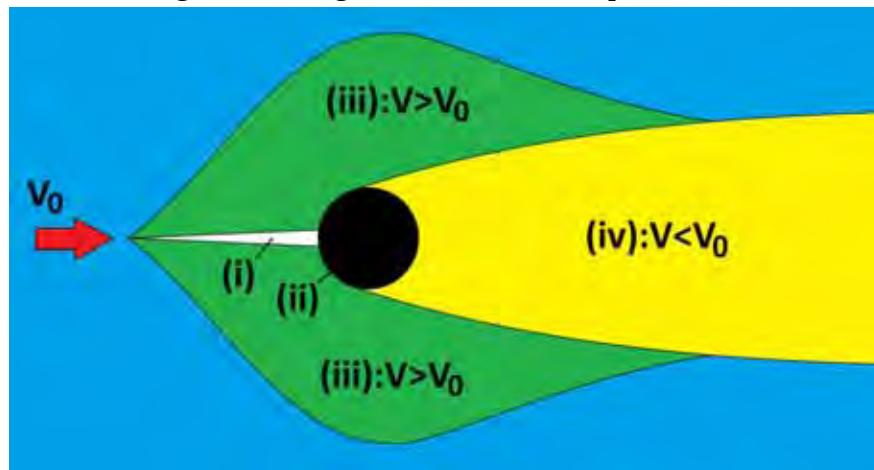
2.3 Escoamento em torno de um cilindro circular

Zdravkovich (1997) publicou um livro no qual o escoamento em torno de cilindros circulares foi detalhado de forma clara e objetiva. Dentro desta seção que aborda os aspectos fenomenológicos sobre os regimes de escoamentos em torno de cilindros circulares, todo o estudo apresentado pode ser observado em tal livro.

Inicialmente serão caracterizadas as regiões do escoamento em torno de um cilindro circular, que são divididas em quatro regiões distintas, conforme Figura 10.

- (i) Uma região estreita de escoamento desacelerado;
- (ii) Duas camadas limites junto à superfície do cilindro;
- (iii) Duas regiões de descolamento e aceleração do escoamento;
- (iv) Uma grande região à jusante de separação do escoamento chamada esteira.

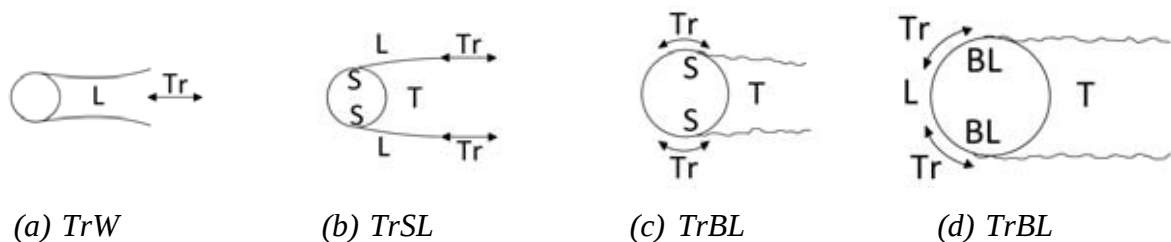
Figura 10 - Regiões do escoamento perturbado



Fonte: Adaptado de Zdravkovich (1997).

Nesses escoamentos, o desenvolvimento da transição ocorre em três diferentes regiões perturbadas, Figura 11: na esteira (TrW), nas camadas cisalhantes ($TrSL$) e nas camadas limites ($TrBL$). Cada transição é sensível a pequenas perturbações de vários tipos. Essas perturbações podem ser listadas por turbulência, rugosidade superficial, bloqueio de parede, proximidade de parede, efeito de extremidade, extremidade livre, oscilação transversal e oscilação no sentido da corrente, conforme a Figura 12.

Figura 11 – Transições nas regiões perturbadas (BL = camada limite, L = laminar, T = turbulento, Tr = transição e S = separação)



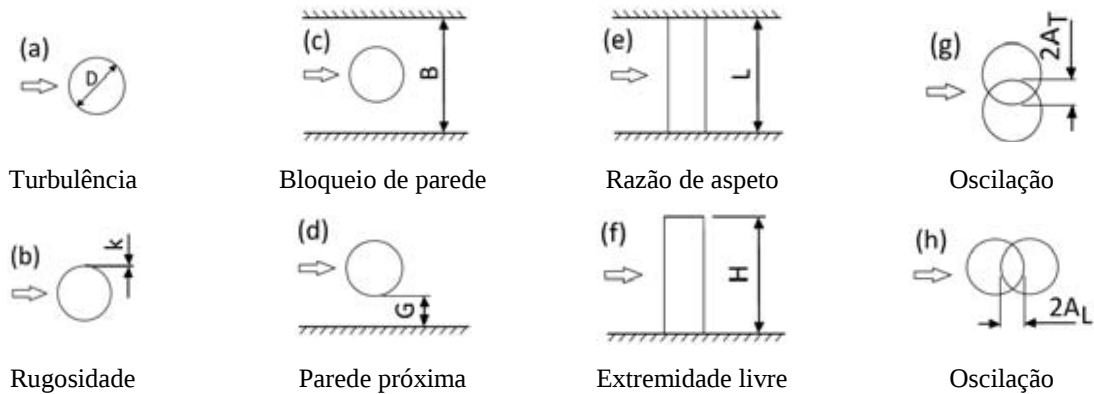
Fonte: Adaptado de Zdravkovich (1997).

Os estados laminar e turbulento, em escoamentos ao redor de cilindros circulares, são separados por três regiões distintas localizadas sequencialmente nas diferentes regiões perturbadas.

Para os escoamentos livres de perturbações, o estado de escoamento pode ser completamente laminar L , qualquer um dos regimes de transição (TrW , $TrSL$ e $TrBL$), ou

completamente turbulento. Cada estado pode ser descrito por tantos regimes de escoamentos que sejam necessários para o cálculo das variações observadas das estruturas do escoamento.

Figura 12 – Perturbações típicas: (a) turbulência; (b) superfície rugosa; (c) bloqueio de parede; (d) parede próxima; (e) efeito de extremidade; (f) extremidade livre; (g) oscilação transversal; (h) oscilações de fluxo direto.



Fonte: Adaptado de Zdravkovich (1997).

O estado laminar de escoamento pode ser subdividido em pelo menos três regimes básicos de escoamento:

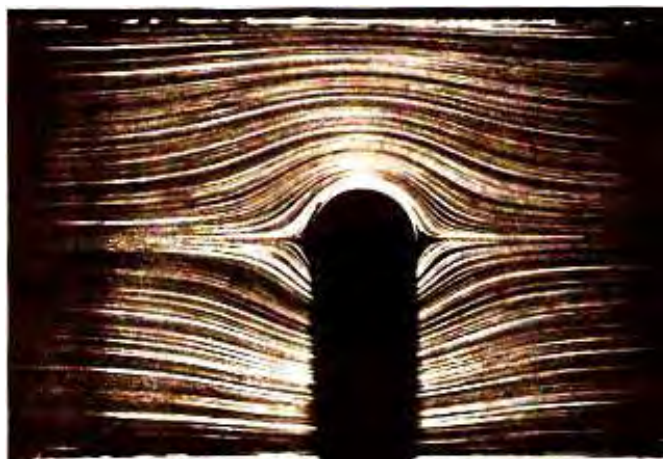
L1: Creeping flow ou regime não separado: $0 < Re < 4$ a 5, Figura 13;

L2: Separação permanente ou regime fechado da esteira próxima: 4 a $5 < Re < 30$ a 48 , Figura 14;

L3: Regime periódico laminar: 30 a $48 < Re < 180$ a 200 , Figura 15.

O *creeping flow* é firmemente ligado à superfície do cilindro em torno de toda a sua circunferência. O rastro das camadas cisalhantes laminares permanentes e simétricas não forma uma esteira visível neste regime.

Figura 13 – *Creeping flow*, $Re = 1$.



Fonte: Zdravkovich (1997).

A separação inicia-se com Re entre 4 e 5, quando uma distinta, permanente, simétrica e fechada esteira próxima é formada. As camadas cisalhantes livres se encontram desde o fim da esteira próxima até o ponto de confluência. A velocidade reversa ao longo do eixo da esteira próxima é geralmente uma ordem de grandeza menor que a velocidade da corrente livre.

Figura 14 – Esteira próxima fechada e permanente, Re 23.



Fonte: Zdravkovich (1997).

A esteira próxima fechada e alongada torna-se instável para $Re > 30-48$ e uma oscilação sinuosa de camadas cisalhantes começa no ponto de confluência, conforme a Figura 15 (a). O início espontâneo de oscilação é sensível a perturbações. A amplitude da trilha de oscilações aumenta com o crescimento de Re e para $Re > 45-65$ as camadas cisalhantes se enrolam nos cumes e vales, Figura 15 (b). O produto final é uma matriz escalonada de vórtices laminares como pode ser observado na Figura 15 (c). Os vórtices emitidos a jusante do cilindro formam a conhecida esteira de vórtices de Kármán-Bénard.

Figura 15 – Esteira laminar periódica.



(a) $Re = 54$



(b) $Re = 65$



(c) $Re = 102$

Fonte: Zdravkovich (1997).

A esteira laminar periódica se torna instável para altos Re mais a jusante na esteira. A transição se espalha gradualmente à montante com o aumento de Re , até que os vórtices se tornam turbulentos durante sua formação, Figura 16.

Figura 16 – Transição na esteira.



(a) $Re = 190$



(b) $Re = 340$

Fonte: Zdravkovich (1997).

O estado de transição na esteira (TrW) pode ser dividido em dois regimes:

$TrW1$: transição de vórtices laminares na esteira: $(180-200) < Re < (220-250)$ e

$TrW2$: transição de um vórtice irregular durante sua formação; $(220-250) < Re < (350-400)$.

Outro fenômeno importante aparece entre os regimes *TrW1* e *TrW2*. Uma forma de instabilidade da esteira laminar na formação e emissão de vórtices é realocada pelo vórtice turbulento enrolando-se a partir do cilindro. A mudança da forma de emissão de vórtices é refletida pela diferente variação na frequência de emissão expressa pelo número adimensional de Strouhal, *St*.

A segunda transição ocorre ao longo das camadas cisalhantes livres enquanto as camadas limites permanecem totalmente laminares, Figura 17. Existem três fases de transição ao longo das camadas de cisalhamento livres.

TrSL1: desenvolvimento das ondas de transição; $(350-400) < Re < (1.000-2.000)$;

TrSL2: formação dos vórtices de transição; $(1.000-2.000) < Re < (20.000-40.000)$;

TrSL3: ruptura para a turbulência; $(20.000-40.000) < Re < (100.000-200.000)$.

As ondas de transição aparecem primeiramente como ondulações das camadas cisalhantes livres. Com o aumento de *Re*, as ondas de transição se enrolam em vórtices discretos ao longo da camada cisalhante livre anterior, tornando o regime turbulento e então se enrolando em vórtices alternados. Finalmente, uma suave ruptura para a turbulência ocorre na camada cisalhante livre ao lado do cilindro e a formação de vórtices ocorre perto da parte posterior do cilindro.

A última transição, *TrBL*, foi dividida e nomeada por Zdravkovich (1997) em cinco regimes distintos:

TrBL0: regime pré crítico; $(10^5 - 2 \times 10^5) < Re < (3 \times 10^5 - 3,4 \times 10^5)$;

TrBL1: regime de uma bolha; $(3 \times 10^5 - 3,4 \times 10^5) < Re < (3,8 \times 10^5 - 4 \times 10^5)$;

TrBL2: regime de duas bolhas; $(3,8 \times 10^5 - 4 \times 10^5) < Re < (5 \times 10^5 - 10^6)$;

TrBL3: regime supercrítico; $(5 \times 10^5 - 10^6) < Re < (3,5 \times 10^6 - 6 \times 10^6)$;

TrBL4: regime pós crítico; $(3,5 \times 10^6 - 6 \times 10^6) < Re < (\text{indefinido})$.

Figura 17 – Transição nas camadas cisalhante livres.



(a) *Re* = 2 000

(b) *Re* = 8 000

(c) *Re* = 110 000

Fonte: Zdravkovich (1997).

Como no presente trabalho os ensaios atingem os maiores números de Reynolds na faixa de 2000, não serão apresentados e discutidos detalhes dos regimes onde o número de Reynolds é superior ao mencionado.

Por fim, o estado de escoamento turbulento T é alcançado quando todas as regiões de escoamento perturbado em torno do cilindro são turbulentas. O fim do estado T ocorre, teoricamente, com $Re \rightarrow \infty$ e este pode ser nomeado por último estado de escoamento.

A Tabela 1 apresenta um resumo elaborado por Zdravkovich (1997) dos regimes de escoamento em torno de um cilindro circular. Para o presente trabalho, como os valores máximos do número de Reynolds estudados são próximos de 2000, o regime mais distante que poderá ser verificado será provavelmente o regime de transição nas camadas cisalhantes intermediário, ou $TrSL2$.

Tabela 1 – Resumo dos regimes de escoamento livres de perturbações.

Estado		Regime		Faixa de Re
L	Laminar	1	<i>Creeping flow</i>	0 a 4-5
		2	Esteira fechada	4-5 a 30-48
		3	Esteira periódica	30-48 a 180-200
TrW	Transição na esteira	1	Esteira distante	180-200 a 220-250
		2	Esteira próxima	220-250 a 350-400
$TrSL$	Transição nas camadas cisalhantes	1	Inferior	350-400 a 1000-2000
		2	Intermediário	1000-2000 a 2×10^4 - 4×10^4
		3	Superior	2×10^4 - 4×10^4 a 10^5 - 2×10^5
$TrBL$	Transição nas camadas limites	0	Pré crítico	10^5 - 2×10^5 a 3×10^5 - $3,4 \times 10^5$
		1	Bolha simples	3×10^5 - $3,4 \times 10^5$ a $3,8 \times 10^5$ - 4×10^5
		2	Duas bolhas	$3,8 \times 10^5$ - 4×10^5 a 5×10^5 - 10^6
		3	Supercrítico	5×10^5 - 10^6 a $3,5 \times 10^6$ - 6×10^6
		4	Pós crítico	$3,5 \times 10^6$ - 6×10^6 a (?)
T	Completamente turbulento	1	Invariável	(?) a ∞
		2	Último	

Fonte: Adaptado de Zdravkovich (1997).

Sumer e Fredsoe (2006) também resumiram de maneira semelhante os regimes de escoamento em torno de um cilindro circular, de acordo com a Tabela 2. Nela, são apresentadas ilustrações dos padrões de escoamento e a faixa de Re para cada regime.

Outro aspecto importante no estudo do escoamento em torno de um cilindro circular, além dos padrões de escoamento, é a quantificação da frequência de emissão de vórtices. Roshko (1954) executou experimentos em um túnel de vento onde foram medidas as frequências de emissão de vórtices e, após as medições, ele construiu um gráfico relacionando o número de Strouhal com o número de Reynolds, conforme mostra a Figura 18.

Roshko (1954) utilizou seus resultados para relacionar o número de Strouhal com o número de Reynolds, obtendo assim as seguintes correlações para a faixa de Reynolds correspondente:

$$\text{a)} \quad St = 0,212(1 - 21,2/Re) \quad 50 < Re < 150 \quad (3)$$

$$\text{b)} \quad St = 0,212(1 - 12,7/Re) \quad 300 < Re < 2.000 \quad (4)$$

Tabela 2 – Regimes de escoamento em torno de um cilindro circular liso em regime permanente.

(continua)

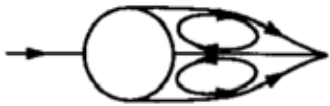
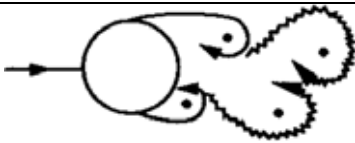
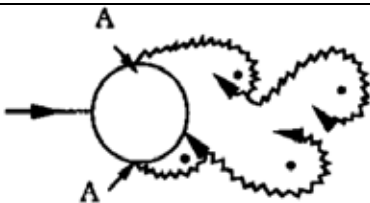
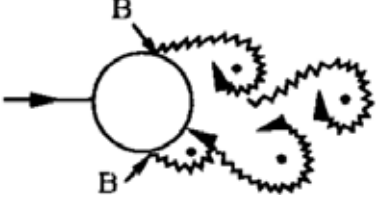
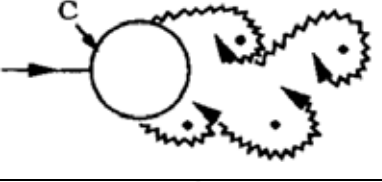
a)		Sem separação <i>Creeping flow</i>	$Re < 5$
b)		Um par fixo de vórtices simétricos	$5 < Re < 40$
c)		Esteira laminar de vórtices	$40 < Re < 200$
d)		Transição para turbulência na esteira	$200 < Re < 300$
e)		Esteira completamente turbulenta A: Separação laminar da camada limite	$300 < Re < 3 \times 10^5$ Subcrítico

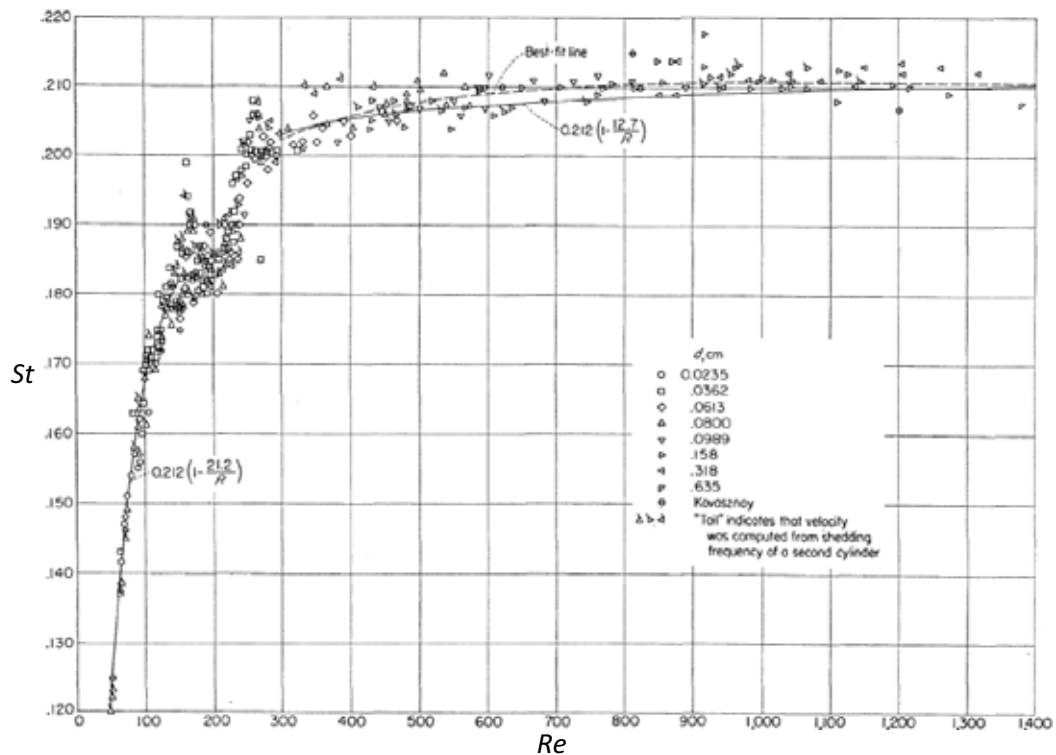
Tabela 2 – Regimes de escoamento em torno de um cilindro circular liso em regime permanente.

(conclusão)

g)		B: Separação turbulenta da camada limite, camada limite parcialmente laminar e parcialmente turbulenta	$3,5 \times 10^5 < Re < 1,5 \times 10^6$ Supercrítico
h)		C: Camada limite completamente turbulenta em um lado	$1,5 \times 10^6 < Re < 4 \times 10^6$ Transição superior
i)		C: Camada limite completamente turbulenta nos dois lados	$4 \times 10^6 < Re$ Transcrítico

Fonte: Adaptado de Sumer e Fredsoe (2006).

Figura 18 – Número de Strouhal versus número de Reynolds para cilindro circular.



Fonte: Roshko (1954).

A faixa de Reynolds entre 150 e 300 foi apontada por Roshko (1954) como um intervalo de transição entre a região estável ($50 < Re < 150$) e a região irregular ($300 < Re < 2.000$).

Outra forma de relacionar a velocidade do escoamento com a frequência de emissão de vórtices foi proposta por Roshko (1954) para o escoamento em torno de cilindro circular. Essa relação é mostradas nas Equações (5) e (6) através do número adimensional Ro (número de Roshko), definido na Equação (7).

$$a) \quad Ro = 0,212Re - 4,5 \quad 50 < Re < 150 \quad (5)$$

$$b) \quad Ro = 0,212Re - 2,7 \quad 300 < Re < 2.000 \quad (6)$$

$$Ro = St \cdot Re = \frac{fD^2}{\nu} \quad (7)$$

onde St e Re são, respectivamente, os números de Strouhal e de Reynolds, ν é a viscosidade cinemática do fluido e os parâmetros f e D possuem a mesma definição das Equações (1) e (2).

2.4 Escoamento em torno de cilindros elípticos

Os escoamentos em torno de cilindros elípticos até o presente momento não foram estudados detalhadamente como fora feito com escoamentos em torno de cilindros circulares. Porém, alguns estudos precedentes, de alguma forma abordaram aspectos fenomenológicos envolvidos neste tipo de escoamento. Por exemplo, Patel (1981) e Badr *et al.* (2001) estudaram escoamentos transientes em torno de cilindros elípticos. Tomotika e Aoi (1953) e Khan *et al.* (2005) estudaram as forças atuantes sobre um cilindro elíptico quando este está submerso em um escoamento. Outros autores também focaram seus estudos em diferentes aspectos do escoamento em torno de cilindros elípticos como Daichin e Lee (2003) que investigaram os efeitos da superfície livre localizada próxima ao cilindro e Wang (1967) que relatou a variação do ponto de separação das camadas limites sobre o cilindro para diferentes ângulos de incidência do escoamento. Poucos autores, como Faruquee *et al.* (2007) e Raman *et al.* (2010) estudaram os efeitos da variação da razão de eixo sobre os escoamentos em torno de cilindros elípticos. Dentre eles podemos citar Masliyah e Epstein (1971) e Mittal e Balachandar (1996) que realizaram investigações com pouca variação do número de Reynolds, tornando seus estudos parcialmente inviáveis para posteriores comparações.

Outro trabalho envolvendo a variação da razão entre eixos sobre o escoamento em torno de cilindros elípticos é o trabalho de Rao *et al.* (2010) que estudaram numericamente o escoamento de fluidos *power-law* e newtonianos em torno de cilindros elípticos de diferentes razões de eixos. Este trabalho relatou sobre valores críticos de números de Reynolds denotando o início da separação de escoamento e a emissão de vórtices para um cilindro elíptico em uma ampla faixa de índices de fluidos *power-law* ($0.3 \leq n \leq 1.8$) e de razões de eixos do cilindro ($0.2 \leq AR \leq 5$). O valor de AR foi obtido pela divisão do eixo na direção x pelo eixo na direção y . O escoamento foi considerado bidimensional e não confinado, ocorrendo na direção x , e o fluido, incompressível.

Os valores de Reynolds crítico aumentaram com a razão de eixos crescente. Já em relação ao índice n , ocorreu o contrário: o aumento do índice provocou uma redução dos valores de Reynolds críticos. A transição entre as oscilações e a emissão de vórtices ocorreu ao longo de uma gama muito estreita de número de Reynolds e, esta gama dependeu principalmente dos valores da razão de eixos do cilindro e do índice *power-law*. A influência dos dois parâmetros abordados sobre o número de Reynolds crítico de início de emissão de vórtices pode ser resumida de tal forma: o aumento da razão de eixos AR provoca um aumento no Reynolds crítico; já o aumento do índice n provoca uma queda no valor do Reynolds, no intervalo $0.6 \leq n \leq 1.8$; no intervalo $0.3 \leq n \leq 0.6$, o número de Reynolds crítico aumenta com o aumento do índice n . Outros dados também mostram que o aumento da razão entre eixos das elipses aumenta o número de Strouhal e diminui o coeficiente de arrasto de média temporal.

Os trabalhos abordados até aqui e outros ainda não mencionados mostram que o escoamento em torno de cilindros elípticos tem sido tratado por diferentes autores. Cada trabalho abrange uma determinada faixa de número de Reynolds e cilindros elípticos com diferentes razões de eixos. Os resultados também são apresentados de diferentes formas. Além disso, vários trabalhos têm como objetivo o estudo de aspectos do escoamento que fogem ao escopo do presente trabalho, como, por exemplo, a variação do ângulo de incidência do cilindro elíptico, os efeitos de solo e de superfície livre e a oscilação do cilindro ou do escoamento. A Tabela 3 apresenta um resumo das principais características dos estudos citados acima como a natureza do estudo (experimental, numérico ou analítico), a faixa de número de Reynolds dentro da qual o trabalho foi executado, as razões entre eixos das elipses ou dos cilindros elípticos utilizados nos estudos e o ângulo de inclinação entre o eixo principal da elipse e a direção da corrente livre do fluido.

Dentre os trabalhos referenciados na Tabela 3, observa-se que apenas onze entre eles tratam do escoamento em torno de cilindro elípticos com razão entre eixos de 0,33 a 1, ângulo de incidência da corrente livre de 0° e números de Reynolds inferiores a 2000. Porém, dentre estes trabalhos, aqueles com características mais próximas do presente estudo são os artigos de Faruquee *et al.* (2007), Masliyah e Epstein (1971), Mittal e Balachandar (1996), Raman *et al.* (2010) e Rao *et al.* (2010), que mesmo assim abrangem uma pequena faixa de número de Reynolds o que dificulta uma comparação minuciosa entre o presente trabalho e os estudos citados.

Em resumo, pode-se concluir que nenhum dos artigos referenciados apresenta um estudo detalhado dos padrões de escoamento em torno de cilindros elípticos com características geométricas e hidrodinâmicas semelhantes às que serão apresentadas neste estudo. Portanto, este trabalho preenche uma lacuna nesta área de conhecimento, possibilitando comparações com trabalhos futuros.

Tabela 3 – Resumo das características dos estudos apresentados sobre escoamentos em torno de cilindros elípticos.

(continua)

Trabalhos	Estudo	Ângulos (graus)	AR (Razão de eixos)	Re
Badr (1994)	N	30 e 60	0,6	100 a 1.000
Badr <i>et al.</i> (2001)	N	0 a 90	0,5 e 0,6	900 a 5.000
Chandna (1997)	A	90	0,001; 0,01; 0,1; 0,5 e 1,0	-
Choi e Lee (2000)	E	0	0,5 e 1,0	14.000
Daichin e S. J. Lee (2003)	E	0	0,25; 0,33 e 0,5	2.000, 2.300 e 2.800
Faruquee <i>et al.</i> (2007)	N	0	0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,75 e 1,0	até 40
Hourigan <i>et al.</i> (2001)	N	90	0,1 a 1,0	30 a 200
Hourigan <i>et al.</i> (2004)	N	90	0,01 a 1,0	75 a 175
Hourigan <i>et al.</i> (2007)	N	90	0,5	40, 75, 125, 150, 175 e 250
Khan <i>et al.</i> (2005)	A	0	0,01 a 1,0	100 a 100.000
Kocabiyik e D'Alessio (2004)	N	30, 45, 60 e 90	0,5	1.000
Lakshmana <i>et al.</i> (1987)	N	90	0,5	até 300
Lugt e Haussling (1974)	N	45	0,1; 0,2 e 1,0	15, 30 e 200
Masliyah e Epstein (1971)	N	0	0; 0,2; 0,5; 0,9e 1,0	até 100
Mittal e Balachandar (1996)	N	0 e 45	0,2; 0,5 e 1,0	180 a 1.000
Modi e Wiland (1970)	E	0, 30, 60 e 90	0,6 e 0,8	30.000 e 300.000
Nair e Sengupta (1996)	N	0	0,1; 0,25 e 1,0	10.000
Ota <i>et al.</i> (1987)	E	0 a 90	1:3	35.000 a 125.000
Park <i>et al.</i> (1989)	N	0 a 90	0,15	25 a 600

Tabela 3 – Resumo das características dos estudos apresentados sobre escoamentos em torno de cilindros elípticos.

(conclusão)

Trabalhos	Estudo	Ângulos (graus)	AR (Razão de eixos)	Re
Patel (1981)	A e N	0, 30, 45 e 90	0,3459 e 0,6743	60 e 200
Raman <i>et al.</i> (2010)	N	0	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 e 1,0	50 e 100
Rao <i>et al.</i> (2010)	N	0 e 90	0,2 a 5,0	até 300
Richards (1934)	E, A	0	1:6	400
Schubauer (1939)	E	0	0,34	~ 139.000
Tomotika e Aoi (1953)	A, N	0 e 90	0,25; 0,5 e 0	0,4 a 4
Wang (1967)	A, N	0 a 90	0,5	100

E – experimental, A – analítico, N – numérico

Fonte: Elaboração do autor.

3 TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 Túnel Hidrodinâmico Vertical

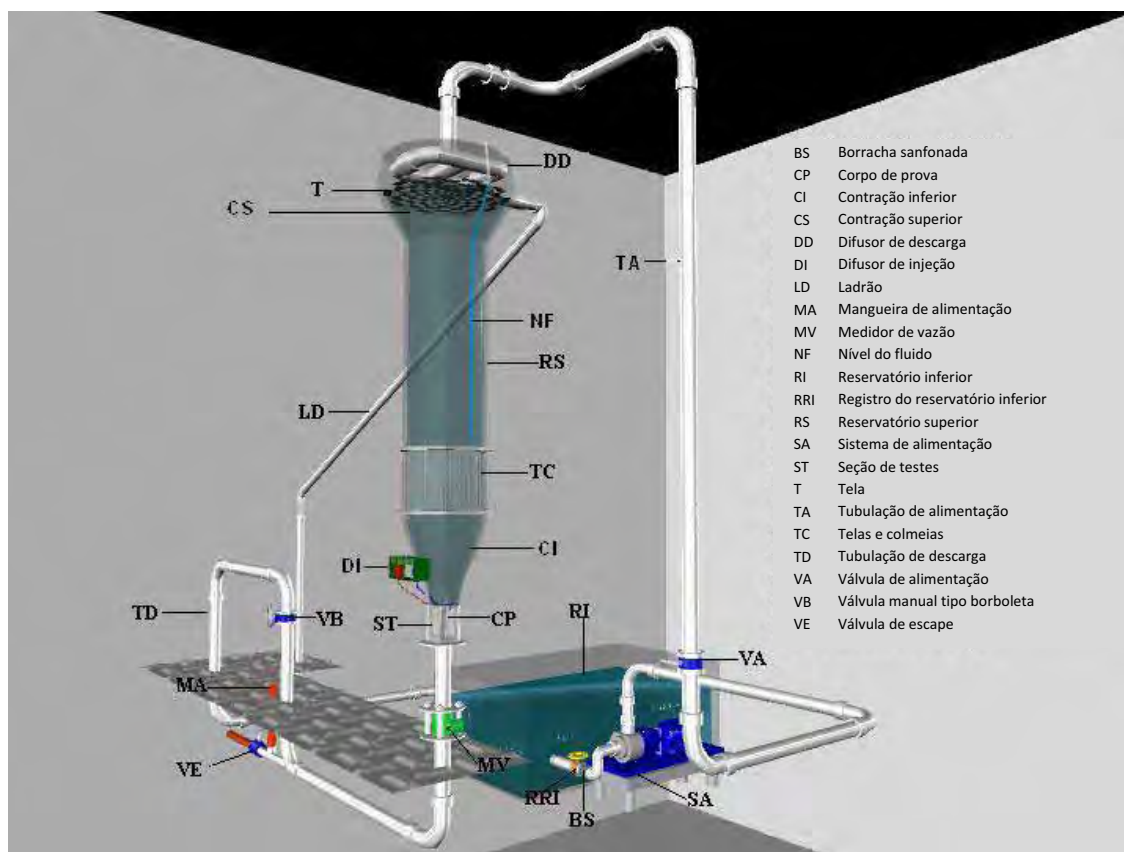
No presente trabalho, os padrões do escoamento ao redor de cilindros elípticos foram investigados com a utilização de um túnel hidrodinâmico vertical. Os ensaios conduzidos nessa instalação, empregando técnicas de visualização de escoamentos e de anemometria de filme quente, permitiram a obtenção de resultados qualitativos e quantitativos necessários para a compreensão dos fenômenos envolvidos em tal escoamento.

Além de sua simplicidade construtiva e operacional, um túnel hidrodinâmico utiliza líquido como fluido de trabalho, o que, por si só, constitui grande vantagem, facilitando o uso de técnicas de visualização de escoamento. Vórtices, recirculações, jatos, esteiras e descolamentos podem se tornar visíveis, com nitidez e clareza, utilizando-se partículas sólidas dispersas, filetes de tinta líquida injetados no escoamento ou pequenas bolhas gasosas em suspensão na corrente livre. Além disso, escoamentos uniformes com baixa intensidade turbulenta e baixos números de Reynolds podem ser gerados com maior facilidade neste tipo de instalação do que em túneis aerodinâmicos.

O túnel utilizado neste trabalho está instalado no Laboratório de Visualização de Escoamentos, no bloco M4, do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da UNESP – câmpus de Ilha Solteira. Ele foi construído de acordo com as instalações do TH1 existente no *Laboratoire de Visualisation Hydrodynamique* do ONERA (*Office National d'Etudes et Recherches Aérospatiales*), o qual está localizado em Chantillon, França. As características hidrodinâmicas do túnel estão expostas no Apêndice A e o esquema da instalação pode ser visto na Figura 19.

Esse equipamento é composto de um reservatório superior (RS) munido de uma tela (T), um compartimento de telas e colmeias (TC), uma contração inferior (CI), uma contração superior (CS) e um aparato para a verificação do nível do fluido (NF). O túnel também possui uma seção de testes (ST) no interior da qual se posiciona o corpo de prova (CP), um medidor de vazão (MV) e uma válvula do tipo borboleta (VB), que permite controlar a vazão do escoamento no interior da seção de testes. O fluido que passa por ST segue para a tubulação de descarga (TD).

Figura 19 – Ilustração esquemática do túnel hidrodinâmico vertical.



Fonte: Bassan, Mansur e Vieira (2011).

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

Completando a instalação, o sistema de abastecimento (SA) é composto por um registro do reservatório inferior (RRI) de 3 polegadas e por uma borracha sanfonada (BS), com a finalidade de atenuar vibrações na parede do reservatório inferior. Na sala de máquinas, ao lado do laboratório, no subsolo, está instalada uma bomba centrífuga que desloca o fluido do reservatório inferior para o difusor de descarga (DD) através da tubulação de alimentação (TA). A válvula de alimentação (VA), localizada na parte inferior da tubulação de alimentação, controla a vazão de fluido do reservatório inferior para o reservatório superior.

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

Finalizando, a operação do túnel exige um ambiente isento de exposição à radiação solar direta ou indireta. Por esse motivo as vidraças do laboratório foram cobertas por uma

película de alumínio comercial denominada de *isofoil* para reflexão da energia radiante minimizando os efeitos da radiação observados nos experimentos de baixa velocidade. Adicionalmente, encontra-se instalado no Laboratório de Visualização de Escoamentos o sistema de ar condicionado que garante uma melhor condição de operação do aparato experimental, mantendo a temperatura ambiente praticamente constante.

Na Figura 20 observa-se uma vista da instalação. No primeiro plano, à esquerda, visualiza-se a válvula de controle manual de vazão, (VB), e no centro da imagem, o túnel. Logo abaixo da seção de testes, observa-se a transição da seção quadrada de cantos cortados para uma seção circular de 100 mm de diâmetro para abrigar a tubulação de descarga (TD). Todos os flanges utilizados na tubulação de descarga são de material termoplástico PVC (cloreto de polivinila).

Figura 20 – Vista do túnel hidrodinâmico mostrando a seção de testes e parte da estrutura de sustentação.



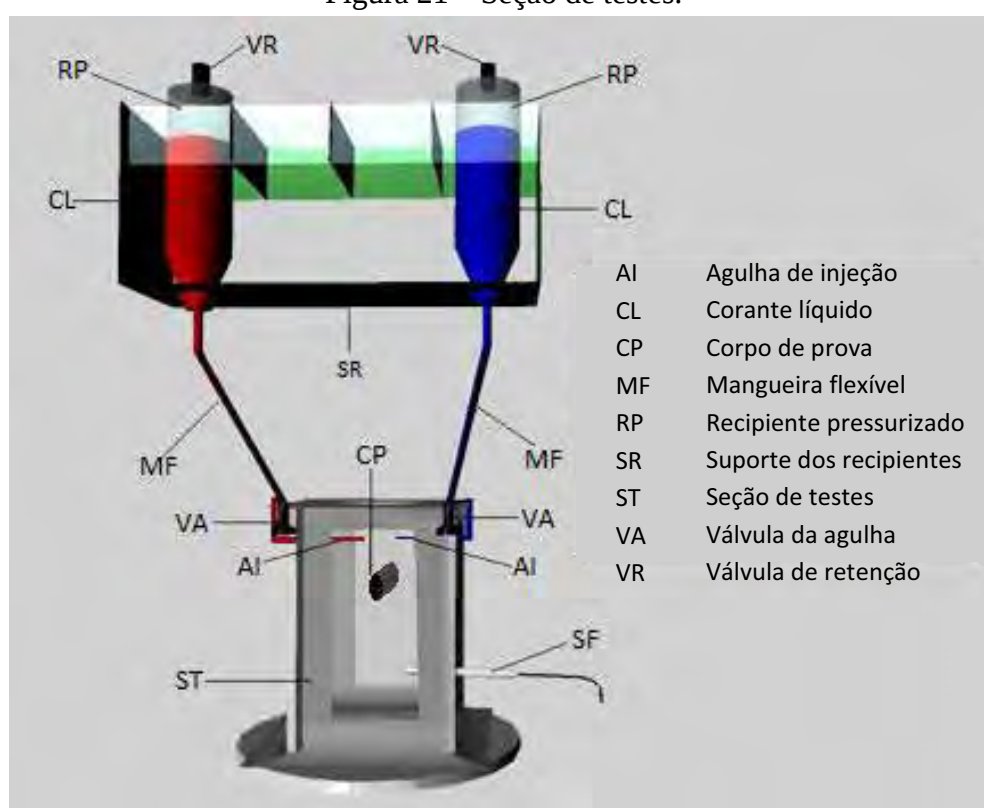
Fonte: Bassan, Mansur e Vieira (2011).

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

3.1.1 Seção de testes

A seção de testes do túnel possui seção transversal quadrada de 146×146 mm com cantos cortados e 500 mm de comprimento. Construída integralmente em alumínio aeronáutico 4050, a seção de testes possui quatro amplas janelas de observação, que a tornam particularmente adequada para a realização de ensaios de visualização de escoamentos. Detalhes da seção de teste são identificados na Figura 21.

Figura 21 – Seção de testes.



Fonte: Adaptado de Bassan, Mansur e Vieira (2011).

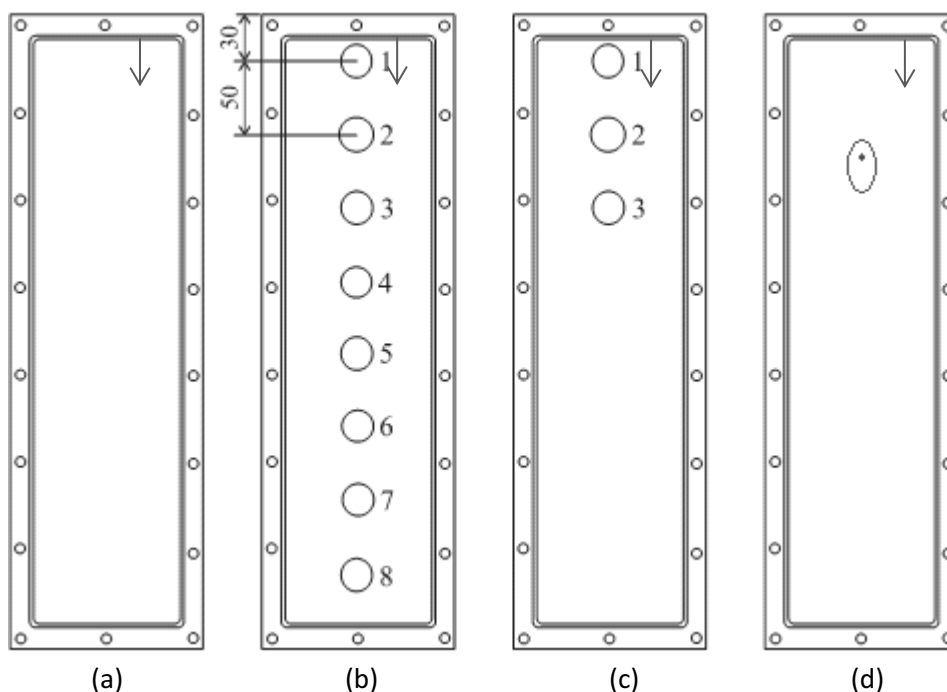
Cada canto interno da seção de testes é ocupado por um prisma de seção transversal triangular, que se estende ao longo de todo o seu comprimento, conferindo-lhe o formato quadrado de cantos cortados. Esses prismas afunilam-se em direção à jusante, de tal forma que o volume útil da seção de testes seja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

modelos de ensaio ou corpos de prova são fixados na seção de testes em uma área equivalente a cerca de 184 cm².

As quatro janelas da seção de testes são fixadas à estrutura metálica da seção por parafusos de aço inoxidável. A vedação das janelas é feita por meio de um fio de borracha do tipo *o-ring* de 4 mm de diâmetro e com a utilização de silicone comercial. Essa configuração permite uma substituição relativamente rápida e fácil das janelas para a realização de um determinado ensaio, garantindo uma boa vedação, mesmo depois de repetidas operações de troca. As janelas foram confeccionadas em chapas de acrílico transparente com 12 mm de espessura e apresentam boa qualidade óptica, de forma a permitir a visualização do escoamento no interior da seção de testes. Através de orifícios existentes em algumas janelas, podem-se introduzir agulhas para a injeção de corantes no escoamento, fios metálicos para a geração de bolhas de hidrogênio, sondas de filme quente e outros dispositivos que se fazem necessários durante os ensaios.

No atual trabalho, a janela anterior possui a configuração mais simples e consiste de uma seção lisa, como ilustrado na Figura 22 (a).

Figura 22 – Configuração de janelas utilizadas na seção de testes do túnel.



Fonte: Adaptado de Bassan, Mansur e Vieira (2011).

As janelas laterais apresentam duas diferentes configurações. Para os ensaios de anemometria de filme quente e injeção de corante líquido, foi utilizada uma janela lateral com

8 orifícios, cada qual situado numa estação identificada por números de 1 a 8, conforme ilustrado na Figura 22 (b). A outra janela lateral possui três orifícios, localizados nas estações identificadas por números de 1 a 3, que podem ser utilizados para injeção de corantes líquidos conforme ilustra a Figura 22 (c). Esses orifícios são vedados por bujões metálicos para garantir a vedação ou por bujões de polímeros com retentores, quando são introduzidos fios ou sondas no interior da seção de testes.

Finalmente, a janela posterior ou frontal abriga o corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 22 (d). Em alguns ensaios faz-se necessário a utilização de um posicionador de sondas, construído no próprio laboratório e esquematizado no Apêndice A.

3.1.2 *Corpos de prova*

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram confeccionados pelo Grupo de Pesquisa em Usinagem da UNESP - campus de Ilha Solteira. Os cilindros foram usinados em uma fresadora CNC (Comandos Numéricos Computadorizados) a partir de pequenas placas de acrílico. Como não foi possível confeccionar um cilindro inteiro de uma única vez, devido às suas dimensões, optou-se por usiná-lo em partes. Assim, cada corpo de prova foi construído a partir de três partes unidas pelas seções de testes com a utilização de adesivo próprio para materiais acrílicos. Para que as partes fossem unidas de forma homogênea, foram inseridos fios metálicos no interior das partes através de pequenos furos guias passantes. Esses fios, além de auxiliarem na fixação das seções também foram utilizados para posicionar o cilindro na seção de testes. A Figura 23 mostra os cinco diferentes cilindros utilizados nos ensaios.

Cada cilindro utilizado nos ensaios possui uma razão entre os eixos da elipse com valor próprio. A Tabela 4 apresenta as dimensões dos eixos das elipses de cada cilindro além da razão de eixos (AR) relativa a cada corpo de prova. Os detalhes das medidas de cada cilindro estão expostos no Apêndice A. Os cilindros possuem 146 mm de envergadura.

Os cilindros foram fixados na seção de testes com a utilização de silicone. Cada cilindro foi posicionado de forma que, sua maior dimensão (envergadura) fosse perpendicular à janela frontal e o maior eixo da elipse, fosse paralelo à corrente livre.

Figura 23 – Cilindros utilizados nos ensaios.



Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 4 – Características geométricas dos cilindros.

Cilindro	Eixo menor (mm)	Eixo maior (mm)	Seção transversal	Razão entre eixos (AR)
1	8,7	8,7		1,0
2	8,85	13,27		0,67
3	8,83	17,68		0,5
4	8,93	22,16		0,4
5	8,91	26,6		0,33

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

3.1.3 Operação do túnel

O túnel pode funcionar segundo dois modos de operação: o modo contínuo e o modo intermitente (*blow-down*). No modo contínuo, o reservatório superior do túnel é permanentemente abastecido durante a realização dos ensaios, com as válvulas VA e VB ajustadas de forma a manter o nível de água constante. Já no modo intermitente, após o enchimento do reservatório superior, o sistema de abastecimento é desligado e aguarda-se, no mínimo, duas horas, até que a água armazenada esteja completamente estagnada. Após esse período de repouso, dá-se início ao ensaio, que transcorre à medida que o reservatório superior é esvaziado.

O modo de operação contínuo é mais indicado para a realização de ensaios nos quais se deseja que as condições permaneçam constantes ao longo do tempo. Nesse modo de operação, podem ser realizados ensaios com duração virtualmente ilimitada, mantendo-se a velocidade média do escoamento no interior da seção de testes praticamente constante no decorrer do ensaio.

Já no modo de operação intermitente, a duração dos ensaios é limitada pela capacidade de armazenamento do reservatório superior e a velocidade média do escoamento decresce continuamente com o passar do tempo, à medida que o nível de água diminui. Em contrapartida, a intensidade turbulenta da corrente livre é significativamente menor que nos ensaios em regime contínuo.

3.2 Visualização de escoamentos com injeção de corantes líquidos

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

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

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

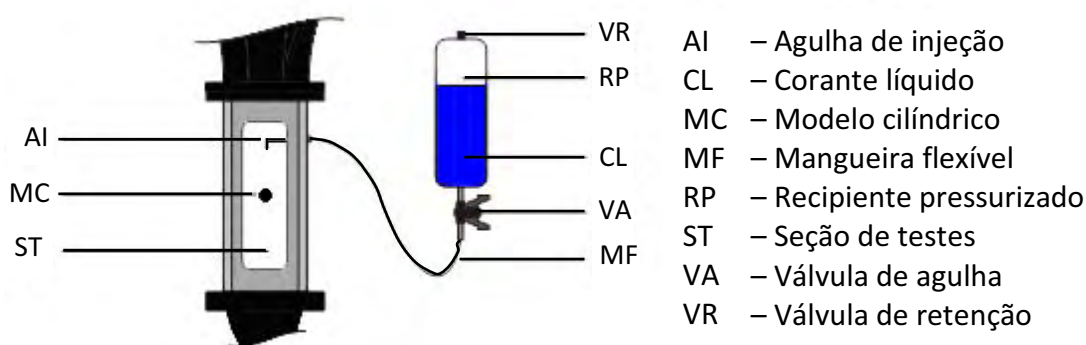
Corantes alimentícios podem ser facilmente obtidos em uma extensa gama de cores e podem ser eliminados do fluido de trabalho com o auxílio de alvejantes ou produtos de limpeza a base de hipoclorito de sódio. Em outras palavras, a água turva pela adição constante

de corantes ao longo de muitos ensaios é facilmente limpa com adição de uma pequena quantidade de produtos de limpeza, como água sanitária ou soluções de baixa concentração de hipoclorito de sódio. Entretanto, os corantes alimentares nem sempre conseguem produzir um filete opaco e contrastante.

Soluções de azul de metileno, preferivelmente de baixa concentração, podem ser também utilizadas produzindo um filete opaco e nítido, mas esse tipo de substância química, assim como outros corantes químicos, apresenta a tendência de aderir nas paredes da seção e no modelo de testes e, geralmente, a operação de limpeza mostra-se um trabalho lento e difícil de ser realizado.

O dispositivo de injeção deve ser constituído de um reservatório pressurizado, ligado a uma longa agulha hipodérmica de pequeno diâmetro externo instalada no interior da seção de ensaios. A velocidade e a pressão de injeção são controladas por intermédio de uma válvula de agulha, para produzir um filete de corante nítido e estável, introduzindo o mínimo de perturbações possível sobre o escoamento. A Figura 24 mostra um esquema exemplar de um dispositivo de injeção de corante acoplado à seção de testes.

Figura 24 – Dispositivo de injeção de corantes líquidos.



Fonte: Bassan, Mansur e Vieira (2011).

Ao longo dos anos, dezenas de substâncias foram sistematicamente testadas como corantes líquidos para a visualização em meio aquoso no Laboratório de Visualização do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP – campus de Ilha Solteira. Os melhores resultados foram obtidos com uma solução aquosa de pigmentos de tinta PVA (acetato de polivinila – disponível comercialmente nas lojas de materiais de construção), com grande poder de tingimento e baixo custo de aquisição. Foi adicionada a essa solução uma pequena quantidade de álcool etílico, para tornar a densidade da mistura mais próxima à da água e evitar a convecção em ensaios de velocidades muito baixas.

3.3 Técnicas fotográficas

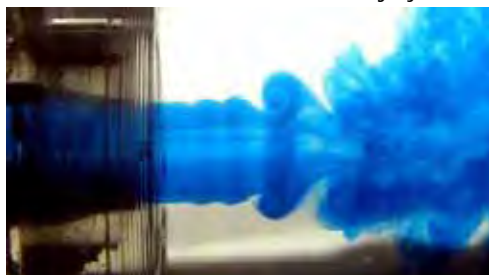
A correta iluminação do objeto é um importante passo para a obtenção de uma imagem de boa qualidade. Além disso, deve-se procurar perfeita sintonia entre os sistemas de iluminação e de captura utilizados, o que nem sempre pode ser conseguido facilmente. Os foto-sensores eletrônicos são incapazes de registrar com fidelidade aquilo que é observado pela visão humana. Em vista disso, na maioria dos trabalhos experimentais envolvendo a visualização de fenômenos físicos, uma série de testes preliminares deve ser realizada, até que se obtenham imagens exploráveis cientificamente.

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

No caso específico da captura de imagens para visualização de escoamentos, o trabalho de Vieira e Mansur (2010) apresenta uma série de recomendações. A iluminação em contraluz (onde as fontes de luz encontram-se apontadas diretamente para a câmera) pode produzir excelentes resultados para a técnica de injeção de corantes líquidos. Por exemplo, como apresentado na Figura 25, um jato livre axissimétrico descarregando em meio quiescente é visualizado por duas diferentes técnicas de injeção de corante. Na Figura 25 (a), o corante é misturado ao fluido a montante do bocal de descarga, ao passo que na Figura 25 (b), a injeção é feita com o auxílio de uma fina agulha hipodérmica (de 0,7 mm de diâmetro externo), posicionada próximo à parede interna do bocal. Em ambos os casos, as imagens fornecem uma série de informações sobre a topologia do escoamento, permitindo o reconhecimento de estruturas turbilhonares típicas e regiões de intensa atividade turbulenta.

Os melhores resultados, nos casos dos ensaios realizados para a visualização de escoamentos no Laboratório de Visualização, foram obtidos com a injeção de corantes líquidos com iluminação em contraluz.

Figura 25 – Jato livre axissimétrico em meio quiescente, visualizado com o auxílio de duas técnicas de injeção de corante e iluminação em contraluz.



(a) Injeção global.



(b) Injeção parietal.

Fonte: Vieira e Mansur (2010).

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

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

As imagens estáticas, do presente trabalho, foram capturadas com uma câmera *Nikon D90 DSLR* de 12,3 Mpixel equipada com uma objetiva *Nikkor Medical* macro de 120 mm de distância focal. As fotografias foram capturadas com $f/1:11$ e $1/250$ s para ISO 100. O emprego de obturadores fechados ($f/1:11$ ou ainda maiores) garante boa profundidade de campo, facilitando o ajuste de foco. As velocidades relativamente altas de obturação são necessárias para obtenção de imagens nítidas. Uma objetiva do tipo *Macro Medical* é projetada para aplicação em câmeras fotográficas que utilizavam filmes químicos do tipo 35 mm *full frame* (24×36 mm) em fotografias de cirurgia médica. Esse tipo de objetiva pode ser adaptado para ser utilizado em uma moderna câmera digital *DSLR* permitindo a obtenção de boas fotografias macro com mínima distorção. Vale a pena ressaltar que, em todas as operações de captura de imagens realizadas no laboratório, as câmeras fotográficas operam necessariamente em modo manual. Além disso, as funções de foco

automático e de controle automático de obturador e diafragma são desligadas. Dessa forma, antes do início dos ensaios, realiza-se o ajuste de foco por diferentes técnicas de focagem manual descritas nos manuais de fotografia. A fotometria da cena é realizada utilizando-se o próprio fotômetro da câmera para ajuste preciso do obturador e diafragma.

A câmera *Nikon D90* opera com um sensor do tipo *CMOS* de 23,6×15,8 mm de tamanho. A objetiva *Nikkor Medical* opera em *full frame* (24×36 mm) o que gera um fator de escala de aproximadamente 1,5 aumentando a distância focal da objetiva de 120 para 180 mm.

Câmeras *DSLR* com obturadores de cortina são uma boa opção para captura de imagens em visualização de escoamentos. Infelizmente, a maioria das câmeras digitais até então fabricadas tinham uma estimativa de vida útil do obturador de aproximadamente 30.000 disparos apenas, obrigando os profissionais de fotografia a trocar frequentemente de equipamento. A opção pela aquisição da câmera *Nikon D90* se deu ao fato de que esse tipo de câmera apresenta um obturador de alta precisão e com uma vida útil acima de 100.000 disparos.

3.4 Edição de imagens

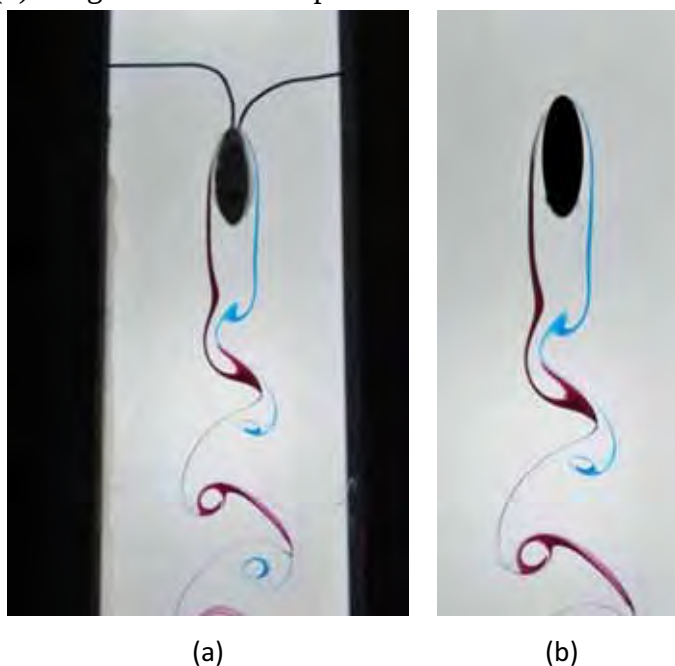
As imagens capturadas através da utilização das técnicas descritas anteriormente, apesar de apresentarem o conteúdo necessário para a comparação entre os padrões de escoamento, necessitam de recursos computacionais para facilitar a observação e a equiparação dos fenômenos presentes no escoamento. As edições realizadas nas imagens foram executadas nos programas *Paint*, *Adobe Photoshop CS2* e *Microsoft Office Picture Manager*.

Primeiramente, foram extraídas das imagens as partes que não tinham relevância na análise dos resultados, como as paredes da seção de testes, através de um procedimento denominado corte. As agulhas de injeção de corante, as marcas de corante a montante do cilindro e impurezas presentes no escoamento foram extraídas através de ferramentas computacionais com o cuidado de não modificar os padrões de escoamento registrados fotograficamente, um procedimento conhecido como operação de retoque.

Posteriormente, foram desenhadas e inseridas nas imagens figuras que representam a geometria dos cilindros utilizados nos ensaios, a fim de que se tenha uma visão mais próxima da realidade em relação à posição do cilindro em que o corante é injetado. Dessa forma, tem-

se a noção de que o corante é injetado perto do centro do cilindro e não na extremidade mais próxima do observador. Além disso, em algumas imagens foi utilizado o reforço de imagem, uma técnica de edição automática de cores e luminosidade para aproximá-las das características fotográficas das outras imagens. A Figura 26 mostra como exemplo a diferença entre uma imagem sem edição (Figura 26 (a)) e a mesma imagem após os procedimentos computacionais citados aqui (Figura 26 (b)).

Figura 26 – (a) Imagem bruta sem edição;
(b) Imagem editada com processamento de baixo nível.



Fonte: Elaboração do autor.

Esse tipo de processamento digital de imagens é conhecido como processamento de baixo nível onde apenas alguns retoques, cortes de partes inservíveis, reforços de cores, contraste e ajuste de tonalidade do branco são efetuados. O processamento de alto nível implica na obtenção de propriedades físicas das imagens visualizadas, como técnicas de velocimetria por imagens de partículas, o que não é objetivo do presente trabalho.

Finalmente, quando as imagens foram agrupadas e apresentadas nos resultados, procurou-se manter as proporções geométricas das imagens, possibilitando, assim, comparar estruturas presentes nos escoamentos para os ensaios de diferentes corpos de prova e em diferentes tomadas.

3.5 Anemometria de filme quente

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

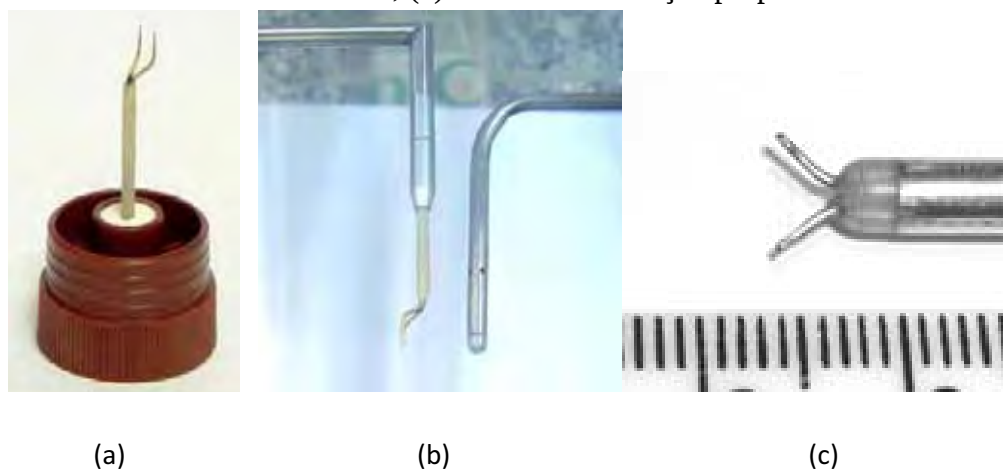
Seu princípio de funcionamento é razoavelmente simples e baseia-se na transferência de calor por convecção entre um pequeno elemento metálico aquecido eletricamente e o fluido circundante. Assim, não apenas a velocidade local instantânea do escoamento pode ser medida com o auxílio de um anemômetro de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

De maneira geral, todos os anemômetros de fio quente são compostos por duas partes fundamentais: uma sonda, com seus respectivos 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 micrometros de diâmetro ou espessura, montado sobre uma haste de dimensões reduzidas, confeccionada em resina epóxi ou material cerâmico, como mostrado na Figura 27. A escolha entre os vários tipos de sonda existentes depende fortemente da aplicação a que se destinam.

Em sua versão mais usual, conhecida como anemômetro de temperatura constante (CTA), o elemento sensor representa um dos resistores da ponte, tal como ilustra a Figura 28. Quando exposto ao movimento do fluido, esse elemento tende a se resfriar, provocando alterações em sua resistência elétrica. Nessas condições, o controlador do circuito é imediatamente acionado, ajustando automaticamente o valor da corrente elétrica para restabelecer a temperatura do sensor e, conseqüentemente, o equilíbrio da ponte.

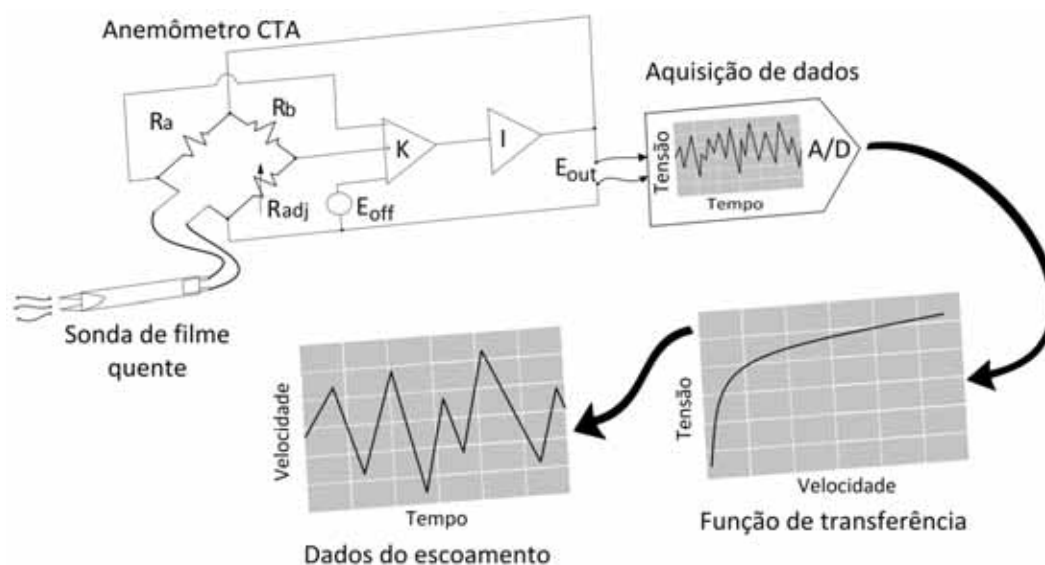
Assim, a velocidade local instantânea do escoamento pode ser determinada, medindo-se a diferença de tensão na saída do circuito que alimenta a sonda e realizando-se, em seguida, a conversão desse sinal elétrico em velocidade, com o auxílio de uma correlação.

Figura 27 – Diferentes tipos de sondas anemométricas de fio quente: (a) sonda comercial *Dantec*; (b) sonda sendo calibrada com auxílio de um micro tubo de Pitot em um túnel aerodinâmico; (c) sonda de fabricação própria.



Fonte: (a) Dantec; (b) Bassan, Mansur e Vieira (2011); (c) Eguti e Vieira (2005).

Figura 28 – Elementos básicos da cadeia de medição do anemômetro CTA.



Fonte: Adaptado de Bassan, Mansur e Vieira (2011).

A curva de calibração da sonda, que apresenta uma correlação entre os valores de tensão medidos pela sonda e os valores de velocidade, está disponível no Apêndice A deste trabalho.

A Figura 29 mostra o anemômetro utilizado no presente trabalho, que se baseia na plataforma *StreamLine 90N10*, produzida pela *Dantec Measurement Technology*. Esse anemômetro possui três módulos *CTA 90C10*, que permitem a medição simultânea de até três

componentes da velocidade local e instantânea. Os dados são coletados pela sonda *Dantec 55R11* em uma placa *A/D NI-DAQmx 8.7.1* (16 bits), da *National Instrument*.

Figura 29 – Anemômetro de temperatura constante *Dantec StreamLine*.



Fonte: Bassan, Mansur e Vieira (2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Introdução

Os resultados que serão apresentados nesta seção foram separados em duas etapas. Na primeira, serão apresentadas as imagens capturadas dos padrões de escoamento observados através da técnica de visualização de escoamento com o uso de corantes líquidos, o que permite observar as diferentes configurações do escoamento. Na segunda etapa serão apresentados os dados adquiridos com a utilização da anemometria de filme quente a fim de relacionar as frequências de emissão de vórtices com a velocidade do escoamento para cada cilindro utilizado. A união das técnicas mencionadas permite uma melhor compreensão dos fenômenos físicos envolvidos no escoamento ao redor de diferentes corpos rombudos. Assim, é possível observar estruturas presentes no escoamento através das visualizações e também quantificar propriedades físicas referentes ao escoamento com a utilização da anemometria. A base de cálculos para os números adimensionais de Reynolds, de Strouhal e de Roshko está disposta no Apêndice B.

4.2 Visualização de escoamento

Na visualização de escoamento por meio da injeção de corantes líquidos, os ensaios foram realizados com o túnel hidrodinâmico operando em regime *blow-down* para números de Reynolds até cerca de 1000. Para números de Reynolds superiores a um milhar, o túnel operou em regime contínuo. As imagens foram registradas com a utilização das técnicas fotográficas descritas no Capítulo 3 e o escoamento ocorre no sentido descendente, ou seja, da parte superior das figuras para a parte inferior. As imagens foram agrupadas de acordo com a região do escoamento que cada uma delas representava a fim de facilitar as comparações entre os diferentes padrões de escoamento para uma mesma área. Espera-se que a análise dos resultados mostre que os perfis elípticos mais delgados tenham características hidrodinâmicas mais próximas de corpos aerodinâmicos que os cilindros com razão entre eixos perto da unidade.

A Figura 30 mostra as imagens capturadas dos escoamentos em torno do cilindro circular ($AR = 1$) para números de Reynolds variando de 7 a 1714.

Para $Re = 7$, uma esteira simétrica e estável começa se forma atrás do cilindro, com os pontos de separação das camadas limites localizados na porção mais a jusante do cilindro. Com o aumento da velocidade, a esteira se torna mais evidente para $Re = 18$ e cresce com Reynolds aumentando para 39 e depois para 48, onde ela ainda é simétrica e possui duas bolhas de recirculação estáveis em seu interior. Com o aumento do número de Reynolds de 7 para 48, os pontos de separação das camadas limites se deslocam em direção a montante do cilindro. Para o escoamento com $Re = 48$, com uma esteira simétrica e fechada, o padrão de escoamento registrado no presente trabalho aparece como um caso limite da obra de Zdravkovich (1997), onde o regime laminar de esteira fechada é observado até $Re = 48$.

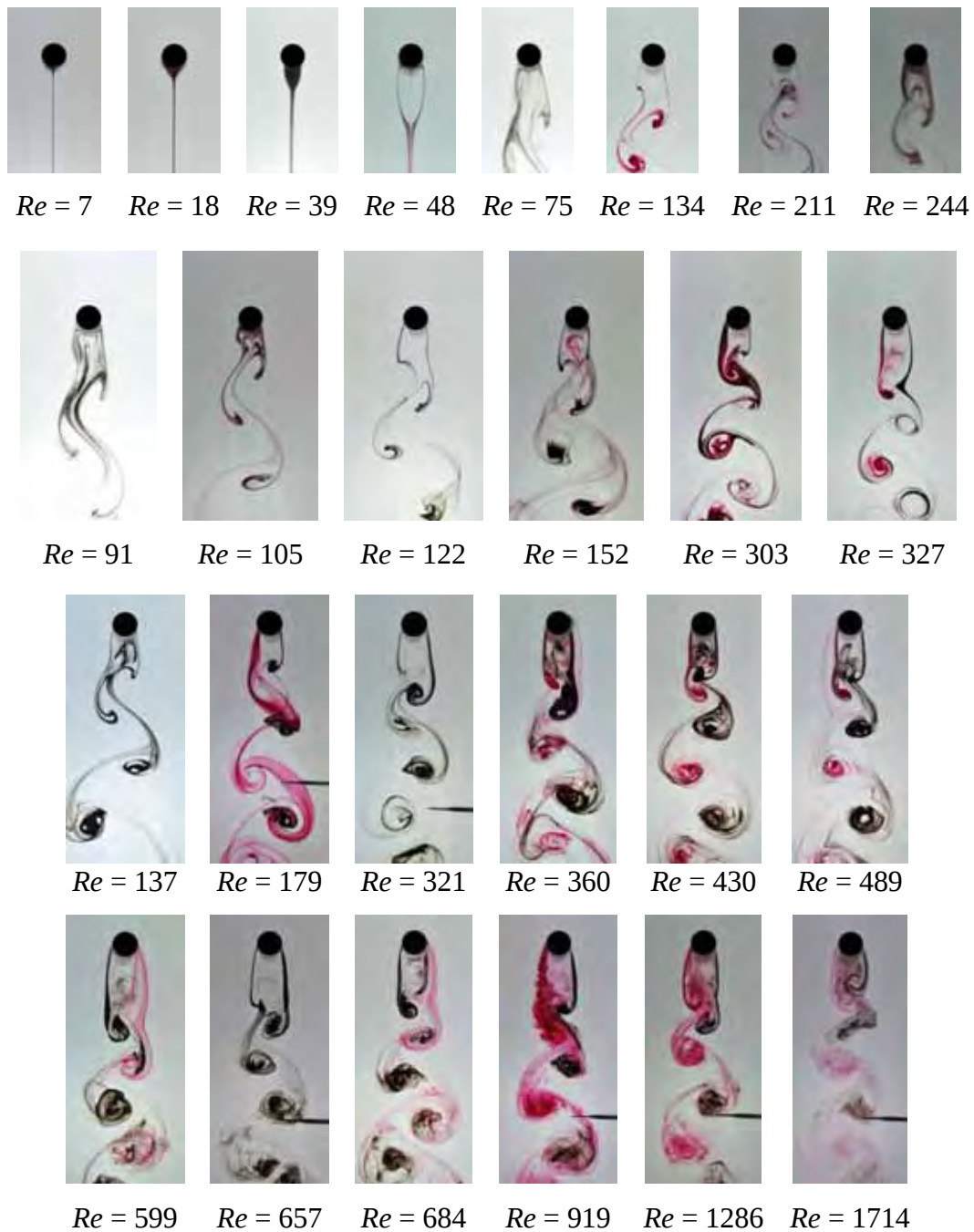
Ainda observando a Figura 30, para $Re = 75$, a esteira se torna assimétrica e oscilante a partir do ponto de confluência e para números de Reynolds superiores a 105, observa-se a emissão alternada de vórtices a jusante do cilindro. Quando Reynolds alcança a faixa de 500, os vórtices se apresentam de forma cada vez mais irregular com o aumento de Re . Outra característica que pode ser notada na Figura 30 é que os vórtices se aproximam uns dos outros com o aumento do número de Reynolds, mostrando que o intervalo de tempo entre a emissão de dois vórtices consecutivos diminui. Isto pode ser exemplificado observando-se as imagens dos escoamentos para $Re = 137$ e 489, em que, no primeiro caso, notam-se três vórtices já emitidos e mais um em formação. No segundo caso, notam-se quatro vórtices já emitidos e a metade de outro além da formação de um sexto elemento na esteira próxima.

Esses resultados mostram boa concordância com o estudo de Zdravkovich (1997), pois se observa o regime laminar de esteira fechada para números de Reynolds entre 7 e 48. Já os escoamentos entre $Re = 75$ e 179 se enquadram no regime laminar de esteira periódica. Os escoamentos para $Re = 211$ e 244 e $Re = 303$ a 360 podem ser enquadrados nos regimes de transição na esteira distante e na esteira próxima, respectivamente. Os escoamentos para números de Reynolds entre 430 e 1286 representariam o regime de transição nas camadas cisalhantes inferior e o caso de $Re = 1714$ seria classificado como regime de transição nas camadas cisalhantes intermediário, onde ocorre a formação dos vórtices de transição.

Contudo, existem alguns pontos de discrepância entre as imagens da Figura 30 e a classificação de regimes de escoamento feita por Sumer e Fredsoe (2006). A primeira observação é que, no presente trabalho, para $Re = 48$, ainda é possível notar as bolhas de recirculação simétricas e estáveis a jusante do cilindro, ao contrário do que é apresentado na Tabela 2, onde deveria ocorrer a emissão alternada de vórtices laminares para essa faixa de número de Reynolds. Uma segunda observação se dá para uma determinada faixa de número de Reynolds superior a 300. Neste caso, Sumer e Fredsoe (2006) assumem que a esteira atrás

do cilindro deveria ser completamente turbulenta, o que só é observado na Figura 30 para valores de Re superiores a 1714. Tais discrepâncias possivelmente ocorrem devido às diferentes condições com que os ensaios foram realizados, como, por exemplo, o nível de intensidade turbulenta e as perturbações existentes no decorrer dos experimentos.

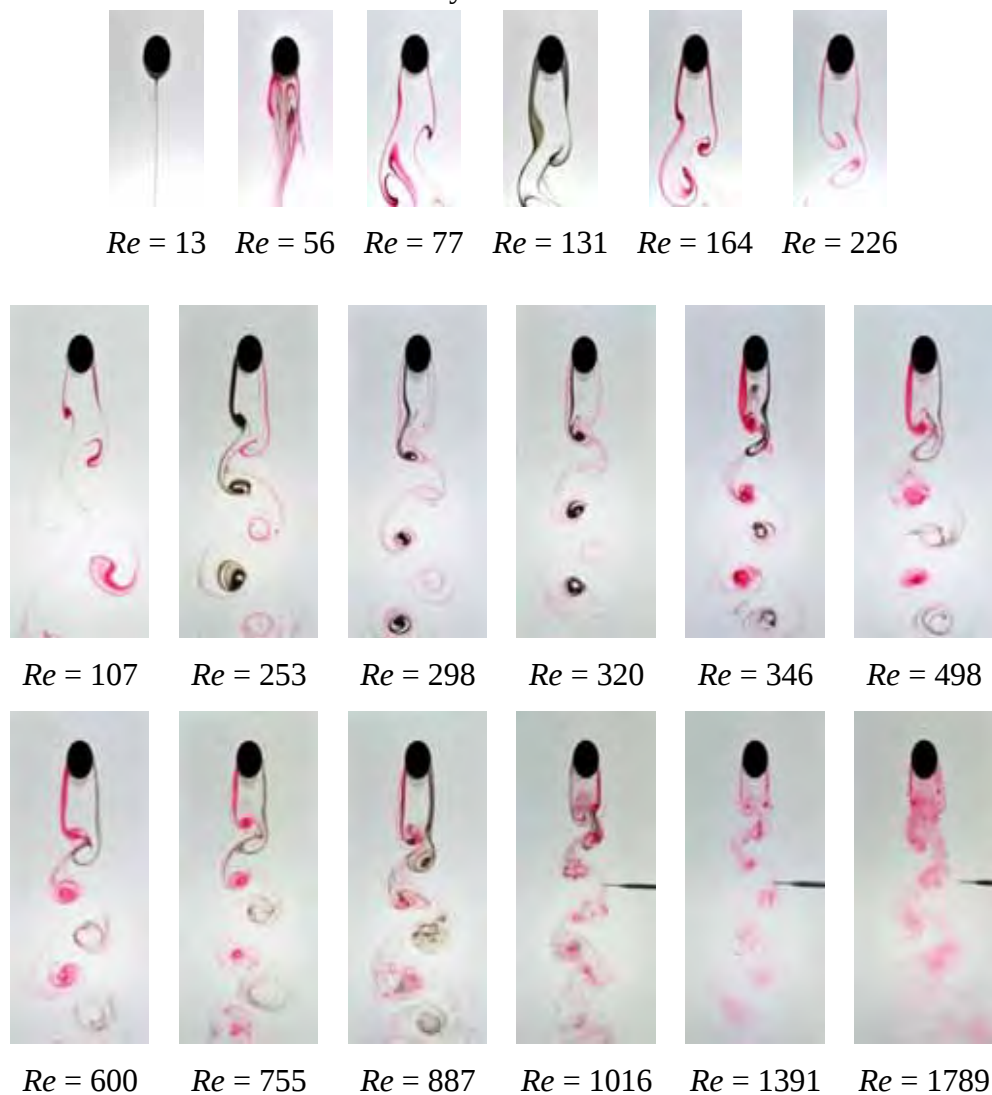
Figura 30 – Visualização de escoamento em torno de um cilindro circular ($AR = 1$) para $7 \leq Re \leq 1714$.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A Figura 31 representa os escoamentos em torno do cilindro elíptico de $AR = 0,67$ ensaiados para números de Reynolds entre 13 e 1789. Para $Re = 13$, pode-se constatar que o regime de escoamento é laminar e ocorre o início da formação da esteira próxima fechada e simétrica. Para $Re = 56$, a esteira já não é mais simétrica e nota-se o início do movimento oscilatório das linhas de emissão a jusante do cilindro. Para os escoamentos com o número de Reynolds igual ou superior a 77, tem-se o fenômeno da emissão alternada de vórtices. A transição na esteira não pode ser constatada de forma nítida, embora em algumas imagens capturadas, como para Re igual ou superior a 600, tem-se a impressão de que os vórtices mais a jusante se tornam irregulares. Para $Re = 1789$, a esteira atrás do cilindro não possui mais nenhum traço observável de regime laminar.

Figura 31 – Visualização de escoamento em torno de um cilindro elíptico de $AR = 0,67$ para números de Reynolds entre 13 e 1789.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Os padrões de escoamentos em torno do cilindro elíptico de $AR = 0,67$ são muito próximos daqueles observados nos escoamentos em torno do cilindro circular. Por exemplo, ao analisar a Figura 31 para os valores de Re de 107 e 498, nota-se que os vórtices se aproximam uns dos outros quando o número de Reynolds é aumentado, da mesma forma que ocorreu para o cilindro circular. Esse comportamento deve-se ao aumento da velocidade da corrente livre que diminui o período das oscilações das forças atuantes a jusante do cilindro e, conseqüentemente, provoca um aumento na frequência de formação e desprendimento de vórtices. Adicionalmente, quando se comparam $Re = 489$ na Figura 30 e $Re = 498$ na Figura 31, constata-se que os padrões de escoamento são semelhantes. Portanto, com os resultados apresentados até este ponto, nenhuma diferença evidente pode ser apontada entre os escoamentos em torno do cilindro circular e do cilindro elíptico com $AR = 0,67$.

A Figura 32 apresenta os registros fotográficos dos escoamentos em torno do cilindro elíptico de razão entre eixos igual a 0,5 para números de Reynolds variando de 28 até 1890.

Uma esteira simétrica com duas bolhas fixas de recirculação pode ser observada para $Re = 28$ e, para valores de Re igual ou superior a 72, já se pode notar a emissão alternada de vórtices a jusante do cilindro.

Nos resultados da Figura 32 podem-se constatar alguns problemas na injeção do corante, como pode ser observado nos contornos ondulados da esteira próxima principalmente para o caso de $Re = 1176$.

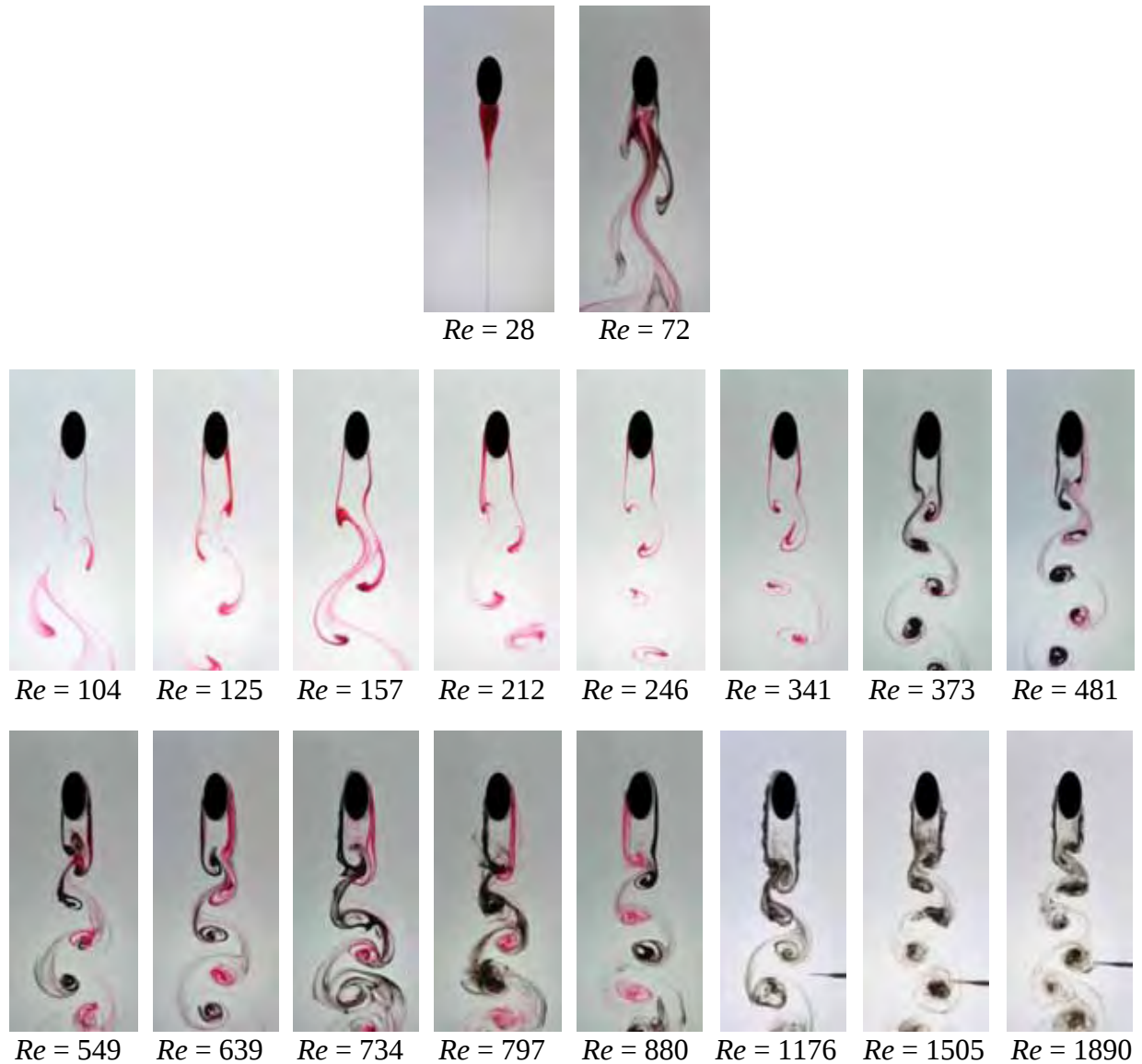
Os resultados da Figura 32 também não mostram nenhuma apreciável diferença entre os padrões de escoamento em torno de um cilindro elíptico com os padrões de escoamento em torno de um cilindro circular.

A Figura 33 apresenta registros das visualizações de escoamento em torno de um cilindro elíptico com $AR = 0,4$ para o número de Reynolds variando desde 9 até 1950.

Na primeira imagem, onde $Re = 9$, não é possível observar uma esteira atrás do cilindro, aparentando ser este um caso do regime laminar *creeping flow*, onde as linhas de emissão permanecem coladas à superfície do cilindro ao longo de todo seu perímetro. Duas bolhas de recirculação estáveis e simétricas podem ser constatadas para os casos de $Re = 22$; 64 e 85 e, a partir de $Re = 100$, a esteira realiza um movimento oscilatório até que se inicie a emissão alternada de vórtices, que está evidenciada nos casos onde o número de Reynolds é igual ou superior a 163. Para os escoamentos onde $Re = 1122$ e $Re = 1245$ observa-se que partículas de corantes emitidas de um lado do cilindro se interagem com vórtices do lado oposto, evidenciado pelas diferentes cores de corante emitidas de cada lado do cilindro. Já nas

últimas imagens, onde $Re = 1597$ e 1950 , nota-se que a esteira começa a perder sua identidade mais a jusante do cilindro, na parte inferior das imagens, mostrando-se turbulenta.

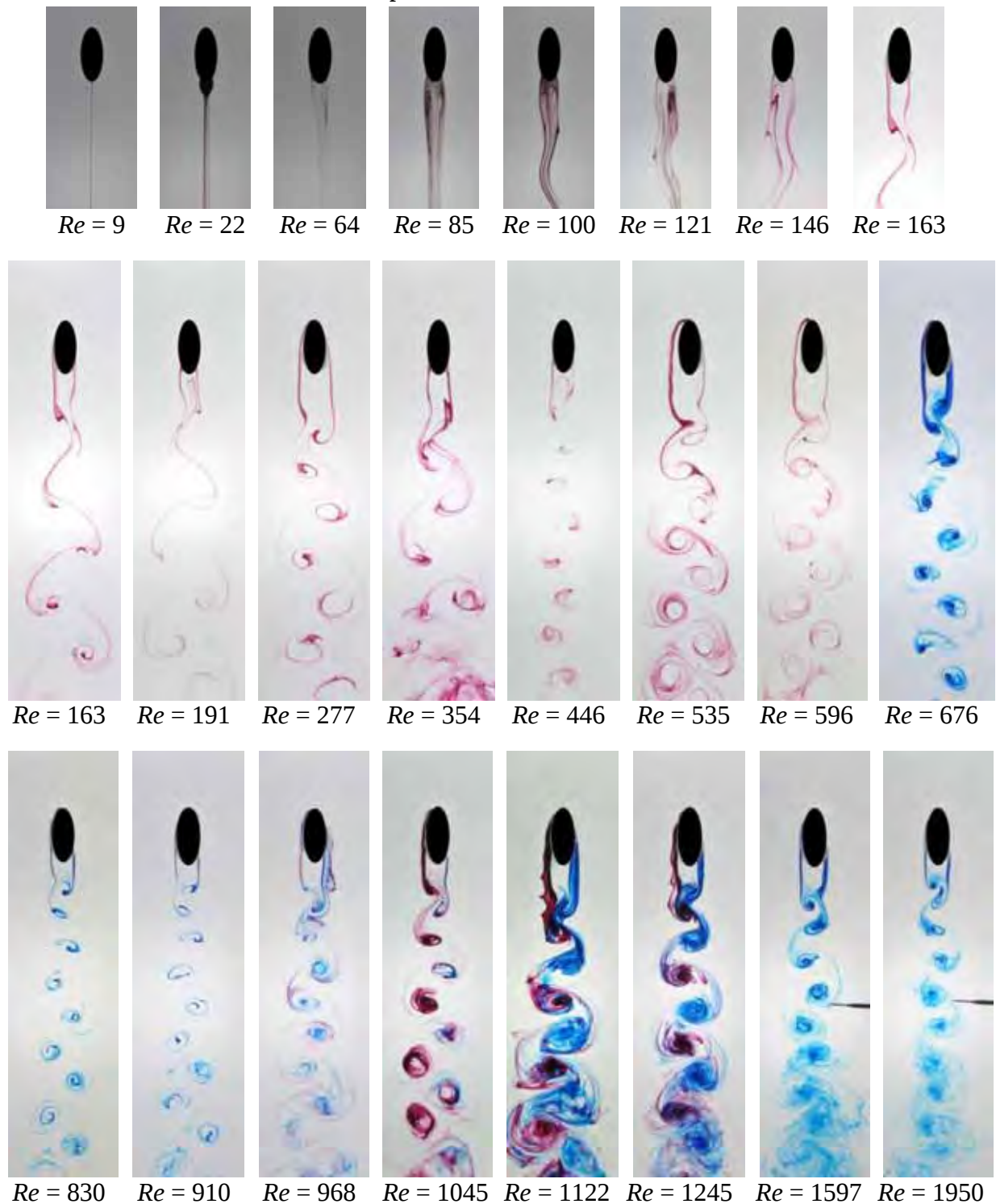
Figura 32 – Visualização de escoamento em torno de um cilindro elíptico de $AR = 0,5$ para Re entre 28 e 1890.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Uma comparação entre a Figura 30 – $Re = 75$ e a Figura 33 – $Re = 85$ mostra que, para o escoamento em torno de um cilindro circular, o movimento oscilatório da esteira e, conseqüentemente, a emissão de vórtices se inicia a um Re inferior em relação ao escoamento em torno do cilindro elíptico de $AR = 0,4$. Essa talvez seja uma primeira evidência de que os cilindros elípticos mais delgados possuem características aerodinâmicas mais próximas das encontradas em corpos aerodinâmicos.

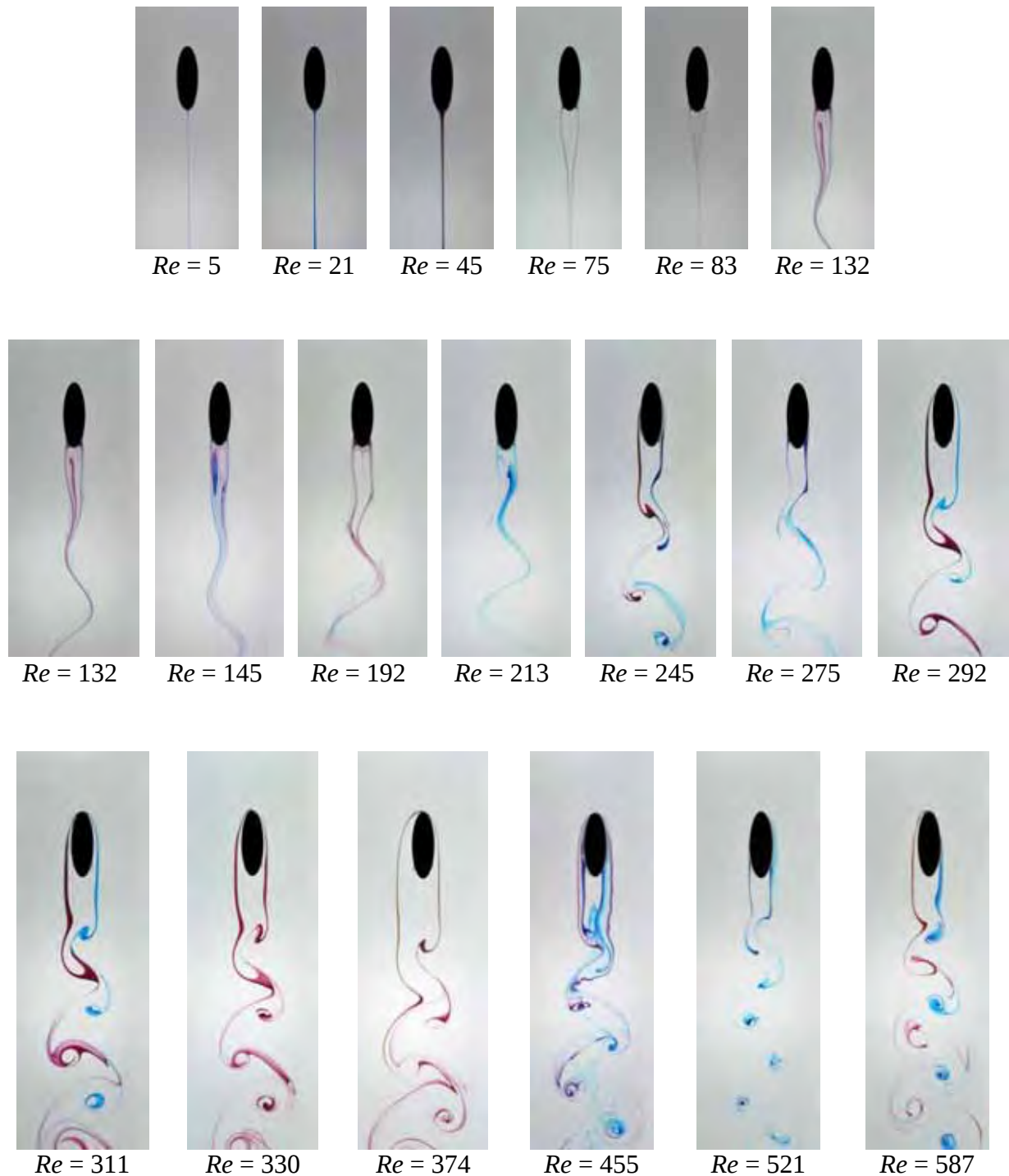
Figura 33 – Visualização de escoamento em torno de um cilindro elíptico de $AR = 0,4$ para $9 \leq Re \leq 1950$.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Finalmente, a Figura 34 e a Figura 35 mostram os padrões de escoamento em torno de um cilindro elíptico de $AR = 0,33$ para Re de 5 a 1999.

Figura 34 – Visualização de escoamento em torno de um cilindro elíptico de $AR = 0,33$ para $5 \leq Re \leq 587$.

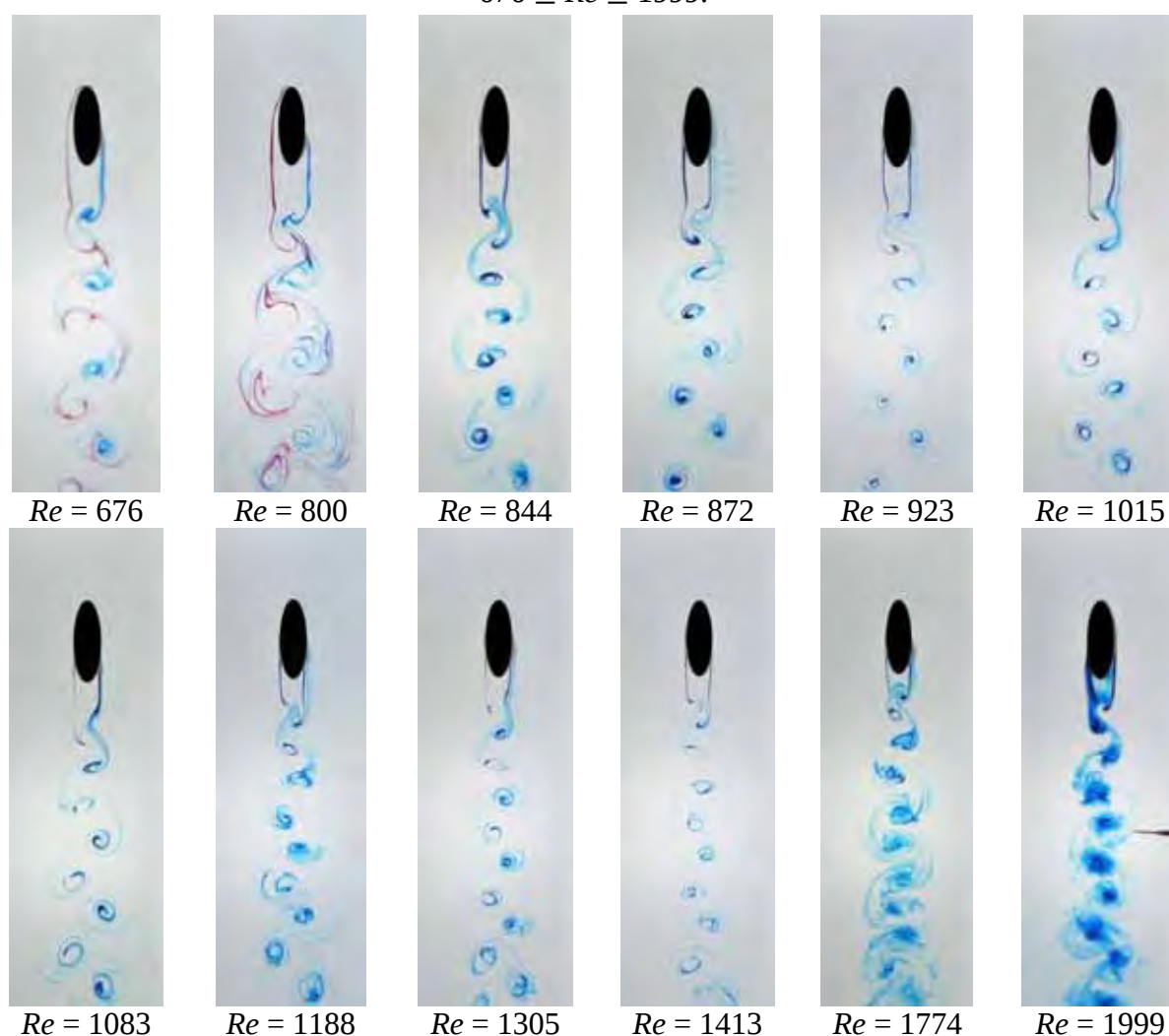


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

O regime *creeping flow* pode ser observado para $Re = 5$ e deve se estender até um valor próximo a $Re = 21$, onde uma discreta esteira simétrica aparece atrás do cilindro. Os indícios de que a esteira próxima permanece simétrica aparecem até para $Re = 75$ e, a partir de

$Re = 132$, nota-se claramente o movimento oscilatório das linhas de emissão a jusante do cilindro. Nas condições de escoamento em que o número de Reynolds alcança os valores de 192 e 213 nota-se um aumento da amplitude de oscilações levando as camadas cisalhantes a se enrolarem em cumes e vales. Já a emissão alternada de vórtices se apresenta de forma mais nítida para Re igual ou superior a 245.

Figura 35 – Visualização de escoamento em torno de um cilindro elíptico de $AR = 0,33$ para $676 \leq Re \leq 1999$.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Assim como ocorrido nos outros ensaios, é possível observar também nas Figuras 34 e 35 que o aumento no número de Reynolds diminui a distância entre dois vórtices consecutivos. Por exemplo, quando $Re = 311$, são observados quatro vórtices emitidos e a metade de um quinto, além de outro vórtice em formação, totalizando seis estruturas. Para

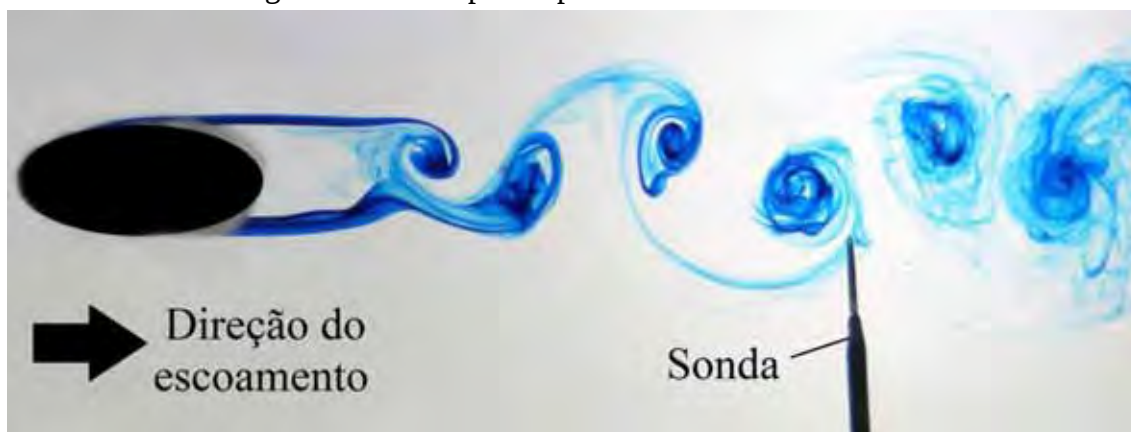
$Re = 587$, existem seis vórtices emitidos e mais um em formação, num total de sete componentes.

Outra observação importante pode ser feita ao comparar os regimes de escoamento em torno do cilindro circular (Figura 30) com o escoamento em torno do cilindro elíptico de $AR = 0,33$ (Figura 34) para $Re = 75$. No caso do cilindro circular, constata-se que a esteira atrás do corpo realiza um movimento oscilatório e inicia a formação alternada de vórtices. Diferentemente, no caso do cilindro elíptico a esteira próxima ainda é simétrica e possui duas bolhas fixas de recirculação em seu interior. Esta observação comprova o fato de que um cilindro elíptico mais delgado, posicionado no escoamento com a mesma inclinação dos ensaios realizados, apresenta características mais próximas de um corpo aerodinâmico. Neste caso, a diminuição na razão de eixos da elipse tende a retardar a instabilidade na esteira, que por sua vez provoca o início da oscilação e a consequente emissão de vórtices alternados.

4.3 Determinação da frequência de emissão de vórtices

A determinação da frequência de emissão de vórtices foi realizada com a utilização da anemometria de filme quente descrita no capítulo anterior e a aquisição dos dados foi executada com o túnel operando em regime contínuo. Após a instalação do anemômetro, é necessário posicionar adequadamente a sonda no interior da seção de testes para que o sinal captado seja claro e livre de grandes interferências, com uma boa relação sinal/ruído. A relação sinal/ruído pode ser otimizada de duas formas básicas: diminuindo os ruídos e interferências nos ensaios através da melhoria e aprimoramento das instalações e dos instrumentos utilizados nos experimentos ou como já mencionado, aumentando o nível do sinal que será captado, através do posicionamento adequado da sonda. Para isso, usa-se como auxílio a técnica de injeção de corantes. A Figura 36 mostra um exemplo do posicionamento da sonda. Nota-se que o sensor deve estar posicionado de forma a captar o movimento dos vórtices de apenas um lado do cilindro, para que os valores da frequência de emissão sejam relativos aos vórtices emitidos desse lado. Portanto, é necessário que a sonda esteja a certa distância dos vórtices do lado oposto para que estes não interfiram significativamente no sinal captado.

Figura 36 – Exemplo do posicionamento correto da sonda.

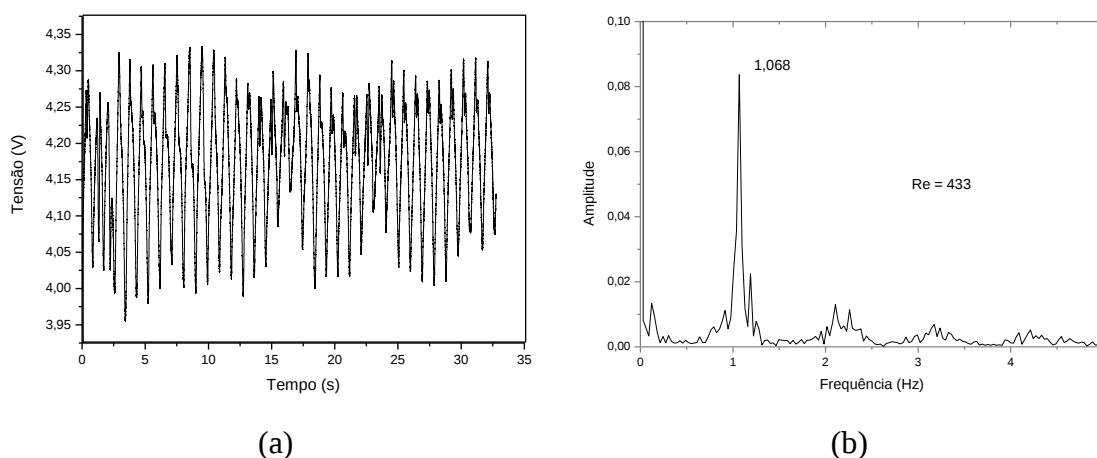


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Após o posicionamento da sonda (em regime *stand by*), deve-se interromper a injeção de corante para não danificar o elemento sensor. Somente depois que o escoamento não apresenta mais traços de corantes, o anemômetro pode ser ligado efetivamente, evitando-se a contaminação da sonda. Nesse aspecto, a utilização de corantes de PVA solúveis em água e com pouca aderência às paredes é altamente recomendável.

Um sinal periódico é capturado pela sonda, representando os vórtices emitidos. Um exemplo desse sinal é mostrado na Figura 37 (a). Com a utilização do programa *OriginPro 7*, é possível aplicar uma transformada rápida de Fourier (FFT) no sinal adquirido para que os resultados sejam apresentados no domínio da frequência. A Figura 37 (b) é um exemplo da aplicação da transformada rápida de Fourier no sinal mostrado pela Figura 37 (a).

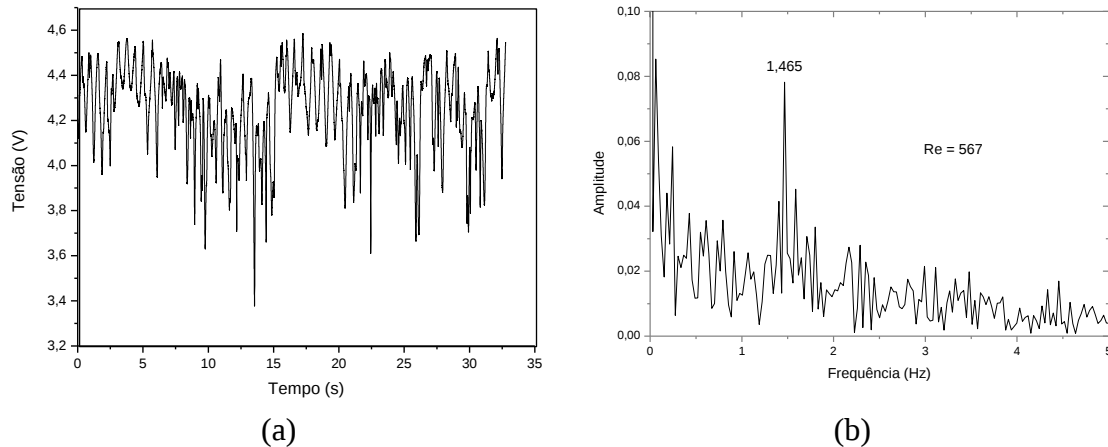
Figura 37 – (a) Sinal temporal; (b) Espectro de frequência.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Quando a sonda não está posicionada corretamente ou existe alguma interferência no sinal, a leitura dos dados adquiridos se torna impraticável. Porém, em alguns casos, mesmo com algumas interferências no sinal é possível quantificar a frequência de emissão de vórtices no escoamento. Um exemplo desse caso é apresentado na Figura 38.

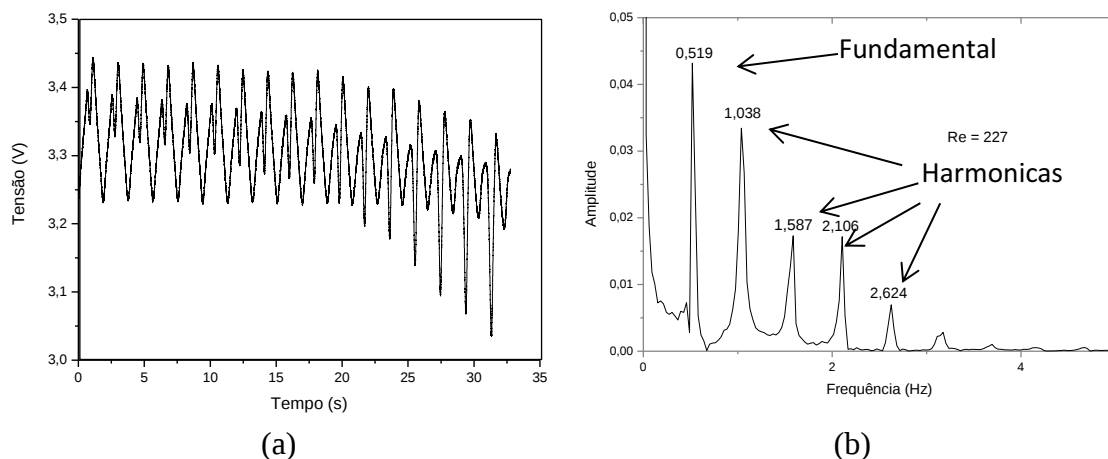
Figura 38 – (a) Sinal temporal; (b) Espectro de frequência.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Outra situação que foi verificada durante o processamento dos dados ocorre quando o sinal coletado pela sonda é forte e nítido. Isto faz com que os dados transformados para o domínio da frequência apresentem as frequências harmônicas de emissão de vórtices. A Figura 39 é um exemplo dessa situação que foi observada no escoamento em torno do cilindro circular. Concluiu-se que as frequências de menor amplitude eram as harmônicas da frequência fundamental de emissão porque seus valores eram praticamente múltiplos da frequência principal, como pode ser constatado na Figura 39 (b).

Figura 39 – (a) Sinal temporal; (b) Espectro de frequência.



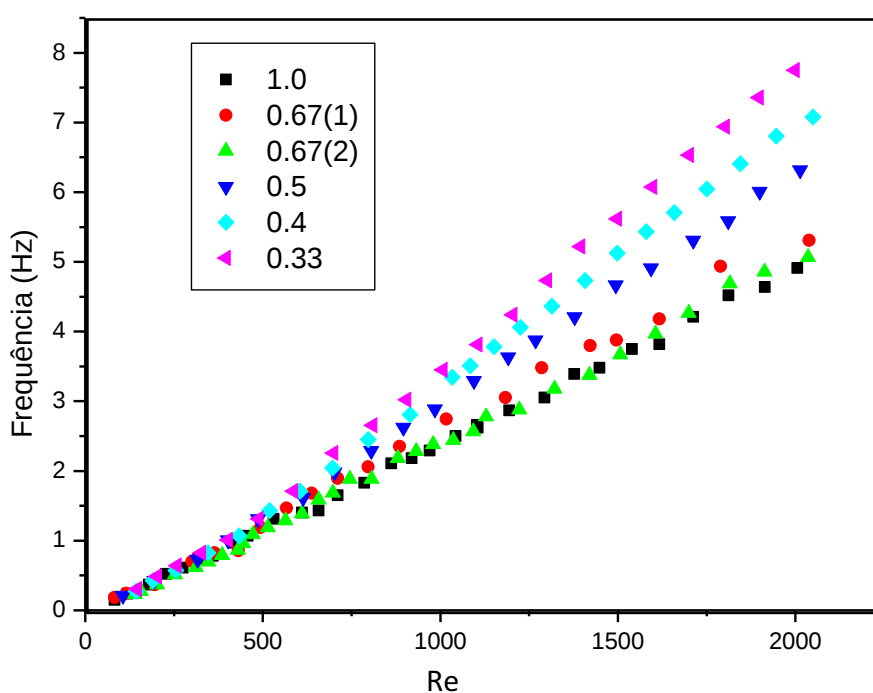
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Após os testes realizados para confirmar o posicionamento da sonda, iniciaram-se as medições da frequência de emissão para os escoamentos em torno dos cilindros utilizados nos ensaios. É importante observar que a frequência de emissão constatada nos resultados é relativa aos vórtices emitidos de apenas um lado do cilindro que foi ensaiado.

Inicialmente, foram construídos os gráficos que relacionam a frequência de emissão de vórtices com o número de Reynolds para os escoamentos em torno dos cinco cilindros ensaiados. A Figura 40 mostra essa relação entre as duas grandezas para os casos citados com o número de Reynolds atingindo valores próximos a 2000. A aquisição de dados do escoamento em torno do cilindro de $AR = 0,67$ foi repetida pelo fato dos primeiros resultados apresentarem uma dispersão relativamente grande.

Na Figura 40 é possível notar que, para números de Reynolds superiores a 500, para um cilindro elíptico mais delgado, a frequência de emissão de vórtices é maior para um mesmo valor de Re . Para explicar tal fenômeno, primeiramente deve-se ter em mente que, segundo os estudos de Faruquee *et al.* (2007) e Raman *et al.* (2010), as esteiras a jusante dos cilindros elípticos mais delgados se tornam mais estreitas. Posteriormente, segundo Williamson (1996), espera-se que a frequência de emissão seja inversamente proporcional à largura da esteira, ou seja, quanto menor for a largura da esteira, maior será a frequência de emissão de vórtices para um mesmo número de Reynolds.

Figura 40 – Variação da frequência de emissão de vórtices com o número de Reynolds para os escoamentos em torno dos diferentes cilindros ensaiados.

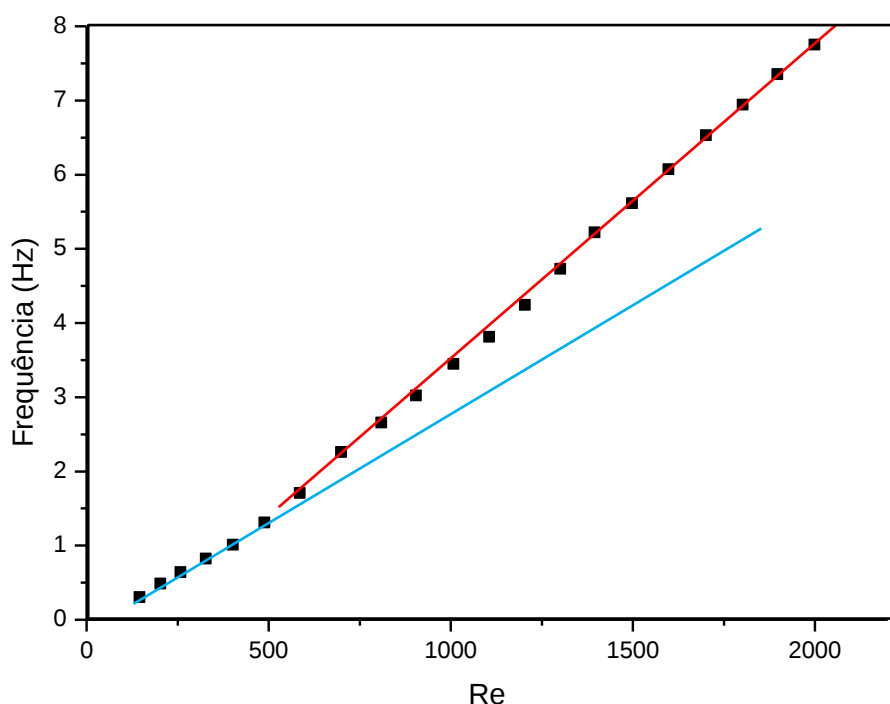


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A diferença entre as frequências de emissão tende a aumentar conforme a velocidade do escoamento cresce. Os casos do cilindro circular e do cilindro com $AR = 0,67$ mostram um comportamento muito parecido, assim como ocorreu nas visualizações de escoamento.

Para a faixa de número de Reynolds inferior a 500, os escoamentos em torno de todos os corpos de prova apresentaram comportamento muito próximo em relação à frequência de emissão de vórtices, mostrando que a correlação entre f e Re é linear nessa faixa. Quando os valores de Re ultrapassam a faixa de 500, cada cilindro parece seguir outra correlação linear com diferentes ângulos de inclinação. Isso pode ser explicado por Zdravkovich (1997), que afirmou haver uma mudança no modo de emissão de vórtices nos escoamentos em torno de cilindros circulares para números de Reynolds entre 200 e 400. Ele alegou que essa mudança é refletida pela diferente variação na frequência de emissão. Nos resultados apresentados na Figura 40 essa variação não é nítida para o caso do cilindro circular, mas pode ser notada claramente na Figura 41, para o caso do cilindro elíptico com $AR = 0,33$.

Figura 41 – Variação da frequência de emissão de vórtices com o número de Reynolds para o escoamento em torno do cilindro elíptico com $AR = 0,33$.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A Tabela 5 mostra as correlações entre a frequência de emissão de vórtices e o número de Reynolds para cada cilindro ensaiado estabelecidas para Re a partir de 500 até cerca de 2000, conforme os resultados mostrados na Figura 40. Para o cilindro com $AR = 0,67$, os dados utilizados são referentes ao segundo ensaio realizado por este apresentar menor

dispersão. O coeficiente de determinação é calculado através da equação mostrada no Apêndice B.

Tabela 5 – Correlação entre f e Re para valores de Re entre 500 e 2000.

Cilindro (AR)	Correlação	Coeficiente de Determinação
1,0	$f = 0,0025Re - 0,1205$	$R^2 = 0,9976$
0,67	$f = 0,0026Re - 0,1505$	$R^2 = 0,9963$
0,5	$f = 0,0033Re - 0,3465$	$R^2 = 0,9995$
0,4	$f = 0,0038Re - 0,5635$	$R^2 = 0,9997$
0,33	$f = 0,0043Re - 0,8375$	$R^2 = 0,9993$

Fonte: Dados da pesquisa do autor

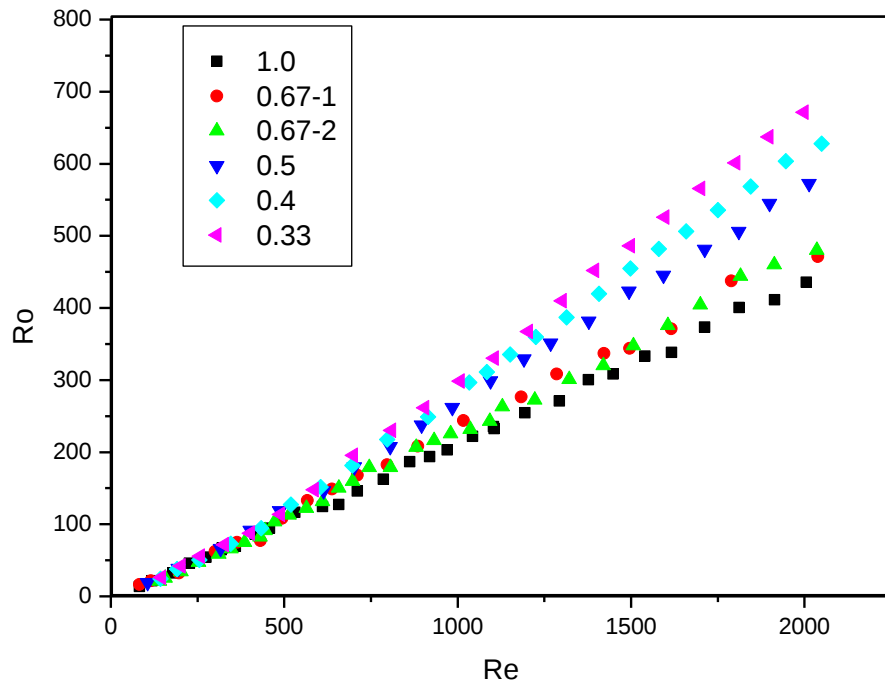
A correlação entre a frequência de emissão e o número de Reynolds para $Re < 500$ foi estabelecida para os escoamentos em torno dos cilindros utilizados e é expressa por:

$$f = 0,0025Re - 0,0709, \quad R^2 = 0,955$$

Outra forma utilizada neste trabalho para relacionar a frequência de emissão de vórtices com a velocidade do escoamento é através da variação do número adimensional de Roshko com o número de Reynolds. Os resultados que são mostrados na Figura 42 apresentam características semelhantes aos resultados da variação da frequência de emissão com o número de Reynolds.

Para números de Reynolds superiores a 500, quando a razão entre eixos do cilindro é diminuída, Ro é maior para um mesmo valor de Re . Essa diferença também tende a aumentar conforme a velocidade do escoamento cresce. Já para a faixa de número de Reynolds inferior a 500, a variação do número de Roshko com o número de Reynolds não sofre grandes alterações entre os diferentes cilindros ensaiados, assim como ocorrido com a frequência de emissão de vórtices. As correlações estabelecidas entre Ro e Re estão dispostas na Tabela 6, para $500 < Re < 2000$, lembrando que os dados do cilindro com $AR = 0,67$ são relativos ao segundo ensaio.

Figura 42 – Variação do número de Roshko com o número de Reynolds para os escoamentos em torno dos diferentes cilindros ensaiados.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Tabela 6 – Correlação entre Ro e Re para valores de Re entre 500 e 2000.

Cilindro (AR)	Correlação	Coefficiente de Determinação
1,0	$Ro = 0,2221Re - 10,685$	$R^2 = 0,9976$
0,67	$Ro = 0,2438Re - 14,263$	$R^2 = 0,9963$
0,5	$Ro = 0,3004Re - 31,409$	$R^2 = 0,9995$
0,4	$Ro = 0,3343Re - 49,967$	$R^2 = 0,9997$
0,33	$Ro = 0,374Re - 74,248$	$R^2 = 0,9992$

Fonte: Dados da pesquisa do autor

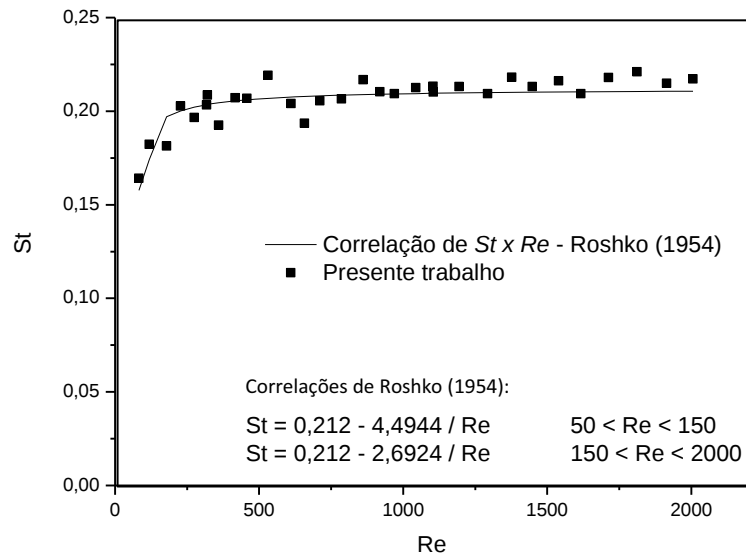
Para $Re < 500$ a correlação é expressa por:

$$Ro = 0,228Re - 7,1796, \quad R^2 = 0,979$$

A forma mais utilizada de relacionar a frequência de emissão de vórtices com a velocidade do escoamento é através dos números adimensionais de Strouhal e de Reynolds. A Figura 43 mostra esta relação construída com os dados adquiridos no presente trabalho comparada com as correlações estabelecidas por Roshko (1954) para o escoamento em torno

de um cilindro circular. O gráfico da Figura 43 ainda apresenta as correlações de Roshko (1954) escritas em forma de equação.

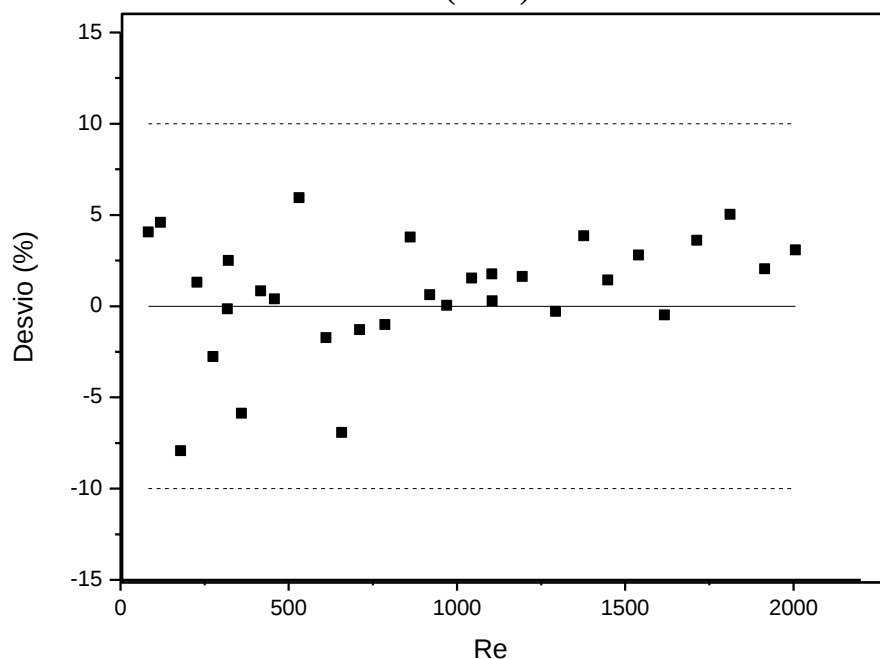
Figura 43 – Variação do número de Strouhal com o número de Reynolds para o escoamento em torno do cilindro circular.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A Figura 44 apresenta os desvios entre a correlação de Roshko (1954) e os resultados do presente trabalho.

Figura 44 – Desvios dos resultados do presente trabalho em comparação com a correlação de Roshko (1954).



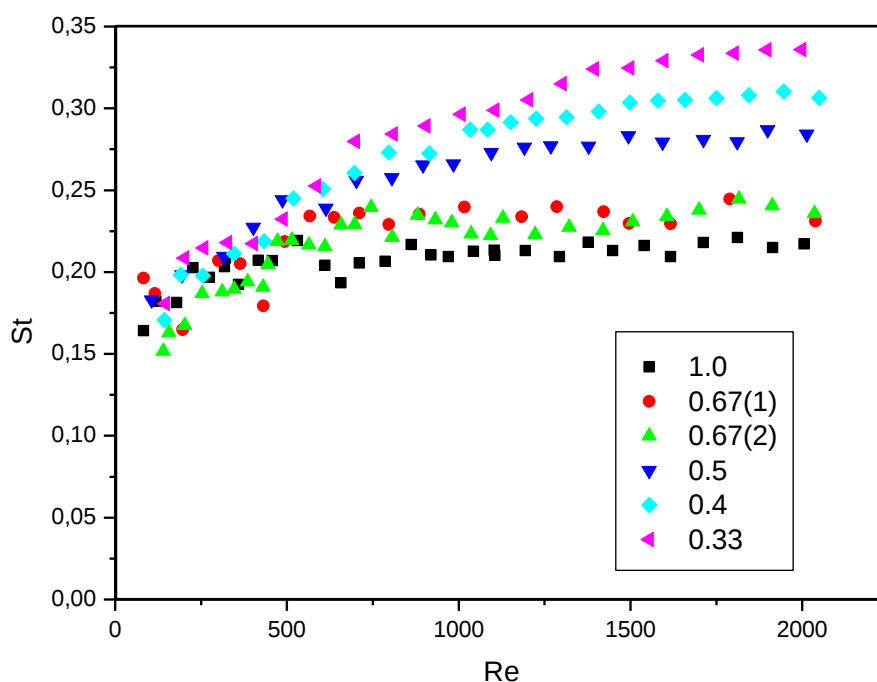
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Pode-se observar que a dispersão está dentro de uma faixa de 10% para mais ou para menos dos valores correlacionados. O maior desvio quantificado entre os resultados não alcançou o valor de 8%. Essa comparação valida os resultados obtidos através da anemometria de filme quente que estão sendo apresentados neste trabalho.

A Figura 45 mostra a variação de St com Re para todos os cilindros ensaiados. Para números de Reynolds até cerca de 500, existe uma irregularidade no comportamento do número de Strouhal. Esta característica pode ser explicada pelas incertezas calculadas para o número de Strouhal conforme os dados do Apêndice B, onde se constata que as incertezas são significativamente elevadas para esta faixa de número de Reynolds. Fora desta região, é possível obter uma correlação entre as duas grandezas medidas. Nota-se, na mesma figura, um comportamento em comum com os outros gráficos apresentados: a diminuição da razão de eixos do cilindro promove um aumento no número de Strouhal para um mesmo Re , da mesma forma que ocorrera para a frequência de emissão e para o número de Roshko. Contudo, observa-se que a relação entre as duas grandezas apresentadas na Figura 45 não é linear, conforme constatado por Roshko (1954).

A Tabela 7 mostra as correlações estabelecidas entre St e Re para os cilindros ensaiados juntamente com o coeficiente de correlação, para $500 < Re < 2000$.

Figura 45 – Variação do número de Strouhal com o número de Reynolds para os escoamentos em torno dos diferentes cilindros ensaiados.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Tabela 7 – Correlação entre St e Re para valores de Re entre 500 e 2000.

Cilindro (AR)	Correlação	Coefficiente de Determinação
1,0	$St = 0,22 - 7,9344 / Re$	$R^2 = 0,2451$
0,67	$St = 0,241 - 11,4187 / Re$	$R^2 = 0,3823$
0,5	$St = 0,305 - 36,9131 / Re$	$R^2 = 0,9522$
0,4	$St = 0,333 - 48,6173 / Re$	$R^2 = 0,9801$
0,33	$St = 0,37 - 69,106 / Re$	$R^2 = 0,9668$

Fonte: Dados da pesquisa do autor

Embora os dados experimentais, para o caso do cilindro circular, não tenham ultrapassado uma dispersão de 8% com relação à equação obtida por Roshko (1954), o coeficiente de determinação calculado para a equação aqui apresentada é pequeno, conforme a Tabela 7. Esse comportamento se estende para o caso do cilindro elíptico com $AR = 0,67$, onde $R = 0,3823$. Esses baixos valores dos coeficientes de determinação ocorreram provavelmente devido aos erros e incertezas experimentais e/ou a irregularidades nos corpos de provas, além de um possível desvio no posicionamento desses cilindros em relação à corrente livre. Já para os outros cilindros ensaiados ($AR = 0,5$; $0,4$ e $0,33$) nota-se que existe uma forte correlação entre as grandezas expressa pelas equações da Tabela 7.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Após analisar os resultados expostos no presente trabalho, podem-se compreender as características presentes nos escoamentos em torno de cilindros elípticos com os aspectos geométricos e hidrodinâmicos aqui abordados. Dentre várias observações realizadas neste trabalho, algumas conclusões importantes podem ser salientadas.

As comparações entre os padrões de escoamento através das técnicas de visualização do presente trabalho com o estudo de Zdravkovich (1997) mostraram boa concordância, podendo-se observar os regimes laminares *creeping flow*, de esteira fechada e de esteira periódica, com emissão alternada de vórtices. Porém, algumas discrepâncias ocorreram em relação ao estudo de Sumer e Fredsoe (2006).

Através das imagens obtidas com a visualização de escoamento, só é possível observar nitidamente as diferenças entre os padrões de escoamento em torno do cilindro circular e dos cilindros elípticos quando são comparadas as imagens de diferentes números de Reynolds relativas ao cilindro circular com aquelas referentes aos cilindros elípticos com $AR = 0,4$ e $0,33$. Essa comparação revela que os cilindros com menores razões entre eixos se aproximam mais da definição de corpos aerodinâmicos, porque estes corpos tendem a retardar o início da separação da camada limite e a posterior emissão alternada de vórtices.

Outra característica constatada através da visualização de escoamento foi de que o aumento do número de Reynolds, independente do cilindro ensaiado, aproxima um vórtice emitido de seu antecessor. Isto revela que o intervalo de tempo entre a emissão de dois vórtices consecutivos diminui com Re crescente. Esse comportamento é refletido no gráfico que relaciona a frequência de emissão de vórtices com o número de Reynolds, onde o aumento de Re provoca um aumento também em f , seguindo uma correlação linear.

Assim como observado nas visualizações de escoamento, os resultados obtidos com a anemometria de filme quente mostraram que os padrões de escoamento em torno do cilindro circular e do cilindro elíptico de $AR = 0,67$ são semelhantes. Adicionalmente, para números de Reynolds inferiores a 500, os escoamentos em torno dos cilindros ensaiados apresentaram um comportamento semelhante em relação à frequência de emissão de vórtices. Quando os valores de Re ultrapassam a faixa de 500, as inclinações das retas referentes a cada cilindro diferem entre si.

Os resultados referentes à variação do número adimensional de Roshko com o número de Reynolds apresentaram características semelhantes àqueles observados na variação da

frequência de emissão com Re . Quanto à variação do número de Strouhal com o número de Reynolds, os dados do presente trabalho referentes ao escoamento em torno do cilindro circular mostraram boa concordância com a correlação estabelecida por Roshko (1954), apresentando uma dispersão menor que 10%. Ademais, para números de Reynolds até cerca de 500, existe uma irregularidade no comportamento do número de Strouhal, provavelmente ocasionada pelos altos valores das incertezas. Porém, fora desta região, foi possível obter uma correlação não linear entre as duas grandezas medidas, Re e St .

Para trabalhos futuros sugere-se a verificação numérica dos resultados aqui apresentados e a quantificação da possível relação entre a razão de eixo dos cilindros e os coeficientes das equações de correlação entre St e Re . Um estudo experimental também pode ser realizado para tal finalidade. Para isso, é necessário ampliar o número de cilindros a serem ensaiados, de forma a abranger uma faixa mais ampla de razões entre eixos. Uma boa alternativa seria variar as razões entre eixos de 0,1 a 1,0, com um incremento de 1/10.

Outro ponto que não foi explorado no presente trabalho e aponta-se como sugestão é a observação das transições entre os diferentes regimes citados e apresentados. Para a execução de tal experimento seria necessário maior controle da velocidade do escoamento para se atingir números de Reynolds específicos e técnicas alternativas de visualização de escoamento, para proporcionar a distinção dos regimes.

REFERÊNCIAS

- AULD, D. J.; SRINIVAS, K. Flow visualisation. In: _____. **Aerodynamics for students**. Sydney: University of Sydney. School of Aerospace, Mechanical and Mechatronic Engineering - AMME, 2006. Disponível em: <http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/aerothermal_dvd_only/aero/vis/index.html>. Acesso em: 17 abr. 2012.
- BADR, H. M.; DENNIS S. C. R.; KOCABIYIK S. Numerical simulation of the unsteady flow over an elliptic cylinder at different orientations. **International Journal for Numerical Methods in Fluids**, Chichester, v. 37, n. 8, p. 905-931, 2001.
- BADR, H. M. Oscillating viscous flow over an inclined elliptic cylinder. **Ocean Engineering**, Kidlington, v. 21, n. 4, p. 401-426, 1994.
- BASSAN, R. A.; MANSUR, S. S.; VIEIRA, E. D. R. Visualização experimental de escoamentos no interior de canais munidos de protuberâncias parietais. In: CONGRESSO IBERO AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA – CIBEM, 10., 2011, Porto. **Anais...** Porto: FEUP, 2011.
- BHATIA, N. **Vortex induce vibrations**. [S.l.]: InfraNetLab, 16 Dec. 2008. Disponível em: <<http://infranetlab.org/blog/vortex-induced-vibrations>>. Acesso em: 17 abr. 2012.
- BRUUN, H. H. **Hot-wire anemometry**. Oxford: Oxford Science, 1995. 507 p.
- CARVALHO, G. B. **Estudo experimental do escoamento em torno de cilindros circulares em movimento de rotação**. 2003. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.
- CHANDNA, A. Flow past an elliptic cylinder. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, Amsterdam, v. 85, n. 2, p. 203-214, 1997.
- CHOI, J.-H.; LEE, S.-J. Ground effect of flow around an elliptic cylinder in a turbulent boundary layer. **Journal of Fluids and Structures**, London, v. 14, n. 5, 697-709, 2000.
- CLAYTON, B. R.; MASSEY, B. S. Flow visualization in water: a review of techniques. **Journal of Scientific Instrumentation**, Bristol, v. 44, n. 1, p. 2-11, 1967.
- CLEANFIELD ENERGY. **How vertical axis wind turbines (VAWTs) work**. North York, 2013. Disponível em: <http://www.cleanfieldenergy.com/how_VAWTs_work.php>. Acesso em: 20 jan. 2013.
- DAICHIN; LEE, S. J. Effect of free surface on near-wake flow of elliptic cylinders with different aspect ratios. In: SHEN, G. X.; CHA, S. S.; CHIANG, F.-P.; MERCER, C. R. (Eds.). **Optical technology and image processing for fluids and solids diagnostics**: Beijing, 2002. Bellingham: Proceedings of SPIE, 2003. v. 5058, p. 168-180.

DEL RIO, E. R. V.; MANSUR, S. S.; VIEIRA, E. D. R. Hot film calibration system using a free jet in water. In: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING – ENCIT, 14., 2012, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Ciências e Engenharia Mecânicas – ABCM, 2012. Paper code 141.

DENNIS, S. C. R.; CHANG, G. Z. Numerical integration of the Navier-Stokes equations in two, dimensions. **Technical Summary Report**, Madison, n. 859, p. 89, 1969.

EDING APS. **Torre Iberdrola - Bilbao**. Valencia, 2012. Disponível em: <http://www.evapco.com/products/ntx_galvanized_steel_coil>. Acesso em: 17 abr. 2012.

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

EVAPCO. **Thermal Pak Finned Coil**. Taneytown, 2011. Disponível em: <http://www.edingaps.com/obras_realizadas/torre-iberdrola-bilbao>. Acesso em: 17 abr. 2012.

FARUQUEE, Z.; TING, D. S-K.; FARTAJ, A.; BARRON, R. M.; CARRIVEAU, R. The effects of axis ratio on laminar fluid flow around an elliptical cylinder. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, Philadelphia, v. 28, n. 5, p. 1178-1189, 2007.

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

GERRARD, J. H. The mechanics of the formation region of vortices behind bluff bodies. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v. 25, n. 2, p. 401-413, 1966.

GOLDSTEIN, R. J.(Ed.). **Fluid mechanics measurements**. New York: Hemisphere, 1983. 630 p.

HONJI, H. Starting flows past spheres and elliptic cylinders. **Reports of Research Institute for Applied Mechanics**, Fukuoka-ken, v. 19, p. 271, 1972.

HOIRIGAN, K.; THOMPSON, M. C.; SHEARD, G. J.; RYAN, K.; LEONTINI, J. S.; JOHNSON, S. A. Low Reynolds number instabilities and transitions in bluff body wakes. **Journal of Physics: Conference Series**, Bristol, v. 64, p. 12-18, 2007.

JOHNSON, S. A.; THOMPSON, M. C.; HOIRIGAN, K. Flow past elliptical cylinders at low Reynolds numbers. In: AUSTRALASIAN FLUID MECHANICS CONFERENCE, 14., 2001, Adelaide. **Proceedings...** Adelaide: University of Adelaide, 2001. P. 343-346.

JOHNSON, S. A.; THOMPSON, M. C.; HOIRIGAN, K. Predicted low frequency structures in the wake of elliptical cylinders. **European Journal of Mechanics - B/Fluids**, Issy les Moulineaux, v. 23, n. 1, p. 229-239, 2004.

KHAN, W. A.; CULHAM, J. R.; YOVANOVICH, M. M. Fluid flow around and heat transfer from elliptical cylinders: analytical approach. **Journal of Thermophysics and Heat Transfer**, Reston, v. 19, n. 2, p. 178-185, 2005.

KOCABIYIK, S.; D'ALESSIO, S. J. D. Numerical study of flow around an inclined elliptic cylinder oscillating in line with an incident uniform flow. **European Journal of Mechanics - B/Fluids**, Issy les Moulineaux, v. 23, n. 2, p. 279-302, 2004.

LUGT, H. J.; HAUSSLING, H. J. Laminar flow past an abruptly accelerated elliptic cylinder at 45o incidence. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v. 65, n. 4, p. 711-734, 1974.

MANSUR, S. S.; VIEIRA, E. D. R.; SAITO, M.; ESPERANÇA, G. A. S. Visualização experimental do escoamento ao redor de cilindros de base quadrada posicionados transversalmente ao fluxo livre. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS – ENCIT, 6., 1996, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Associação Brasileira de Ciências e Engenharia Mecânicas – ABCM, 1996. v. 2, p. 1103-1108.

MASLIYAH, J. H.; EPSTEIN, N. Steady symmetric flow past elliptical cylinders. **Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals**, Washington-DC, v. 10, p. 293, 1971.

MERZKIRCH, W. **Flow visualization**. New York: Academic Press, 1974. 250 p.

METEOROLOGIA: Blog dos estudantes de meteorologia da UFPel. Vórtices. Pelotas, 2 mar. 2010. Disponível em: <<http://meteoroufpel.blogspot.com.br>>. Acesso em: 17 abr. 2012.

METROPOLITAN arranges 70,000 s/f lease expansion with Latham & Watkins. **New England Real Estate Journal**, Accord, 1-7 Jan. 2008. Disponível em: <<http://nerej.com/19701>>. Acesso em: 17 abr. 2012.

MITTAL, R.; BALACHANDAR, S. Direct numerical simulation of flow past elliptic cylinders. **Journal of Computational Physics**, Maryland Heights, v. 124, n. 2, p. 351-367, 1996.

MODI, V. J.; WILAND, E. Unsteady aerodynamics of stationary elliptic cylinders in subcritical flow. **AIAA Journal**, Reston, v. 8, n. 10, p. 1814-1821, 1970.

MOFFAT, R. J. Describing the uncertainties in experimental results. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Philadelphia, v. 1, p. 3-17, 1988.

NAIR, M.T.; SENGUPTA, T. K. Onset of asymmetry: flow past circular and elliptic cylinders. **International Journal for Numerical Methods in Fluids**, Chichester, v. 23, n. 12, p. 1327-1345, 1996.

OTA, T.; NISHIYAMA, H.; TAOKA, Y. Flow around an elliptic cylinder in the critical Reynolds number regime. **Journal of Fluids Engineering**, New York, v. 109, n. 2, p. 149-155, 1987.

PANORAMIO. **Shinagawa Intercity Tower A**. Tokyo, 2010. Disponível em: <<http://www.panoramio.com/photo/32514231?tag=Office>>. Acesso em: 17 abr. 2012.

PARK, J. K.; PARK, S. O.; HYUN, J. M. Flow regimes of unsteady laminar flow past a slender elliptic cylinder at incidence. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, Philadelphia, v. 10, n. 4, p. 311-317, 1989.

PATEL, V. A. Flow around the impulsively started elliptic cylinder at various angles of attack. **Computers and Fluids**, Kidlington, v. 9, n. 4, p. 435-462, 1981.

RAMAN, S. K.; ARUL PRAKASH, K.; VENGADESAN, S. Effect of axis ratio on fluid flow around an elliptic cylinder using immersed boundary method. In: NATIONAL CONFERENCE ON FLUID MECHANICS AND FLUID POWER, 37., 2010, Madras. **Proceedings...** Madras: IIT, 2010. 9 p.

RAO, L. S. K.; IYENGAR, T. K. V.; RAJU, K. V. The rectilinear oscillations of an elliptic cylinder in incompressible micropolar fluid. **International Journal of Engineering Science**, Philadelphia, v. 25, n. 5, p. 531-548, 1987.

RAO, P. K.; SAHU, A. K.; CHHABRA, R. P. Flow of newtonian and power-law fluids past an elliptical cylinder. a numerical study. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, Washington-DC, v. 49, n. 14, p. 6649-6661, 2010.

RIAM. Kyushu University Division of Renewable Energy Dynamics. Wind Engineering Section. **Aerodynamic characteristics and flutter phenomena of bluff bodies**. Fukuoka, 2011. Disponível em: <http://www.expo21xx.com/renewable_energy/19518_st3_renewable_energy_research>. Acesso em: 17 abr. 2012.

RICHARDS, G. J. On the motion of an elliptic cylinder through a viscous fluid. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A**, London, v. A233, p. 279-301, 1934.

ROSHKO, A. **On the development of turbulent wakes from vortex streets**. Washington-DC: National Advisory Committee for Aeronautics, 1954. (Technical Report, n. 1191).

SCHUBAUER, G. B. **Air flow in the boundary layer of an elliptic cylinder**. Washington-DC: National Advisory Committee for Aeronautics, 1939. (Technical Report, n. 652).

SIMERICS. **A shell and tube heat exchanger**: simulation of conjugated heat transfer of an industrial shell and tube heat exchanger. Huntsville, 2012. Disponível em: <http://www.simerics.com/gallery_heat_exchanger>. Acesso em: 17 abr. 2012.

STANFORTH A. N. **Studies of symmetrical and antisymmetrical viscous flows past impulsively started cylinders**. PhD thesis - The University of Western Ontario, London, 1972.

STRUCTURAL ENGINEERING ASSOCIATES - SEA. H&R block world headquarters. Kansas City, 2008. Disponível em: <<http://www.seassociates.com/hrblock.html>>. Acesso em: 17 abr. 2012.

SUMER, B. M.; FREDSOE, J. **Hydrodynamics around cylindrical structures**. Rev. ed. Kongens Lyngby: Technical University of Denmark, 2006. 548 p. (Advanced Series on Ocean Engineering, v. 26).

TOMOTIKA, S.; AOI, T. The steady flow of a viscous fluid past an elliptic cylinder and a flat plate at small Reynolds number. **The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics**, Oxford, v. 6, p. 290-312, 1953.

VIEIRA, E. D. R.; LINDQUIST, C.; WOISKI, E. R.; MANSUR, S. S. Vortex velocity measurement by hydrodynamic flow visualization. In: BRAZILIAN CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING – COBEM, 14., 1997, Bauru. **Proceedings...** Bauru: Unesp, 1997. Paper code COB 59.

VIEIRA, E. D. R.; MANSUR, S. S. Visualização experimental de escoamentos. In: MÖLLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. (Eds.). **Turbulência**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Ciências e Engenharia Mecânicas – ABCM, 2004. P. 33-71. (Coleção Cadernos de Turbulência, v. 4).

VIEIRA, E. D. R.; MANSUR, S. S. Fotografia em mecânica dos fluidos. In: MANSUR, S. S.; VIEIRA, E. D. R.; SILVEIRA NETO, A. (Eds.). **Turbulência**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Ciências e Engenharia Mecânicas – ABCM, 2010. P. 325-378. (Coleção Cadernos de Turbulência, v. 7).

VITOR, P. **Efeito de ressonância - Ponte de Tacoma**. [S.l.]: Baitapost, 11 mar. 2012. Disponível em: <<http://baitapost.com/?s=tacoma>>. Acesso em: 17 abr. 2012.

WANG, C. Separation and stall of an impulsively started elliptic cylinder. **Journal of Applied Mechanics**, New York, v. 34, n. 3, p. 823, 1967.

WHITE, F. M. **Fluid mechanics**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1986.

WILLIAMSON, C. H. K.; PRASAD, A. A new mechanism for oblique wave resonance in the ‘natural’ far wake. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v. 256, p. 269-313, 1993.

WILLIAMSON, C. H. K. Vortex dynamics in the cylinder wake. **Annual Review of Fluid Mechanics**, Palo Alto, v. 28, p. 477-539, 1996.

XFLOW. **Free surface**. [S.l.], 2013. Disponível em: <<http://www.xflowcfd.com/industries/view/civilengineering>>. Acesso em: 20 jan. 2013.

YATAL ALUMINIUM. **Elliptical tube**. Jiangsu, 2012. Disponível em: <<http://www.ecvv.com/product/Search.html?kw=Elliptical-Tube>>. Acesso em: 17 abr. 2012.

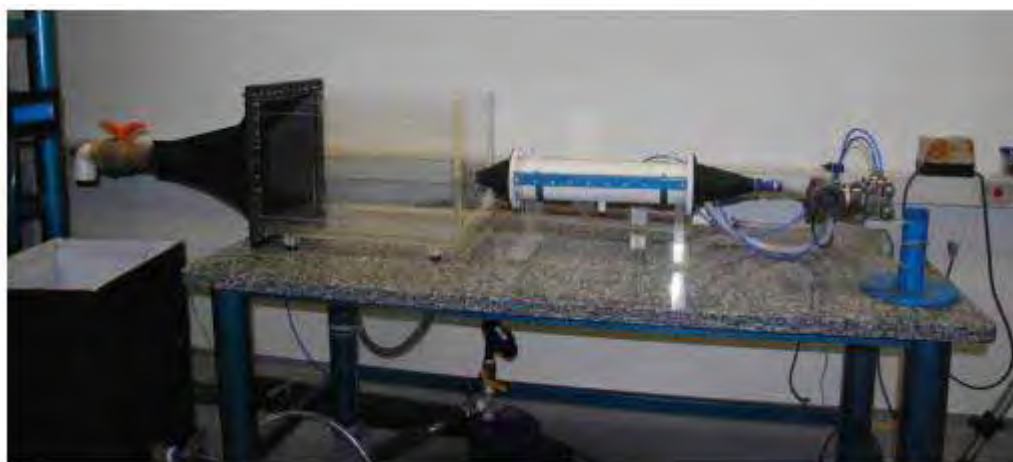
ZDRAVKOVICH, M. M. **Flow around circular cylinders: a comprehensive guide through flow phenomena, experiments, applications, mathematical models, and computer simulations**. Oxford: Oxford University Press, 1997. v. 1: Fundamentals.

APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DA SONDA E CARACTERÍSTICAS DO TÚNEL

A.1 Curva de calibração

A calibração da sonda é realizada com o objetivo de se obter uma correlação entre o sinal de saída do instrumento – tensão (V) – e a propriedade física que está sendo medida – velocidade (m/s). A calibração foi realizada em um módulo do Laboratório de Visualização de Escoamentos especialmente construído para tal função, descrito por Del Rio (2012). O aparato é constituído por uma seção de estabilização composto por telas e colmeias, seguida de uma contração ligada a seção de testes de superfície livre. A jusante da seção de testes encontra-se a seção de descarga, que alimenta um recipiente ligado a uma bomba centrífuga que, por sua vez, faz a realimentação do sistema. A Figura 46 mostra o módulo utilizado para a calibração.

Figura 46 – Aparato experimental utilizado na calibração da sonda.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Entre a bomba de alimentação e a seção de estabilização encontra-se um rotâmetro, Figura 47, no qual se realiza a medição de vazão.

Um desenho esquemático do perfil de velocidade de um jato livre em meio quiescente é mostrado na Figura 48. O núcleo potencial, indicado na figura, desaparece rapidamente, a uma distância de cerca de um a dois diâmetros da saída. Para os experimentos de calibração realizados, a sonda foi posicionada próxima à saída do jato (raiz), com uma distância significativamente menor que o diâmetro da tubulação. Portanto, assumiu-se que o perfil de velocidade do jato na região onde estava posicionada a sonda era um perfil

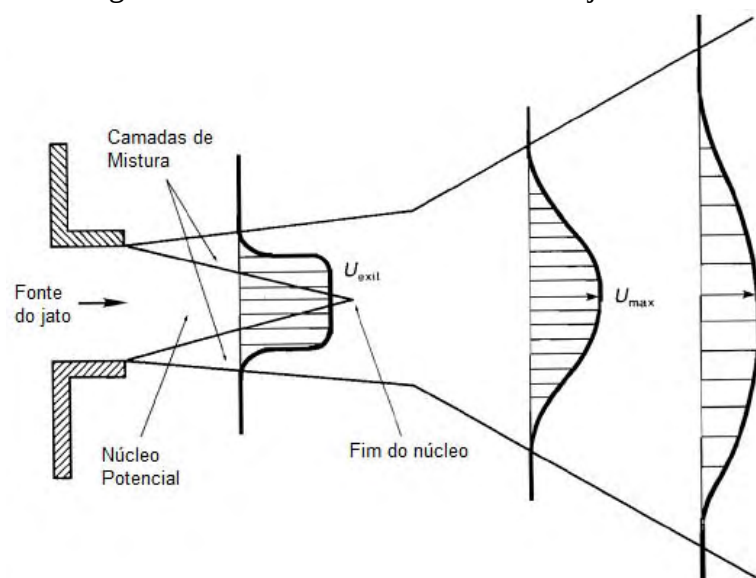
retangular, semelhante ao ilustrado na Figura 48. Assim, a velocidade do fluido pode ser calculada dividindo-se a vazão volumétrica, indicada pelo rotâmetro, pela área da seção de saída do jato livre, que corresponde a $506,71 \text{ mm}^2$.

Figura 47 – Rotômetro de precisão (1% de fundo de escala).



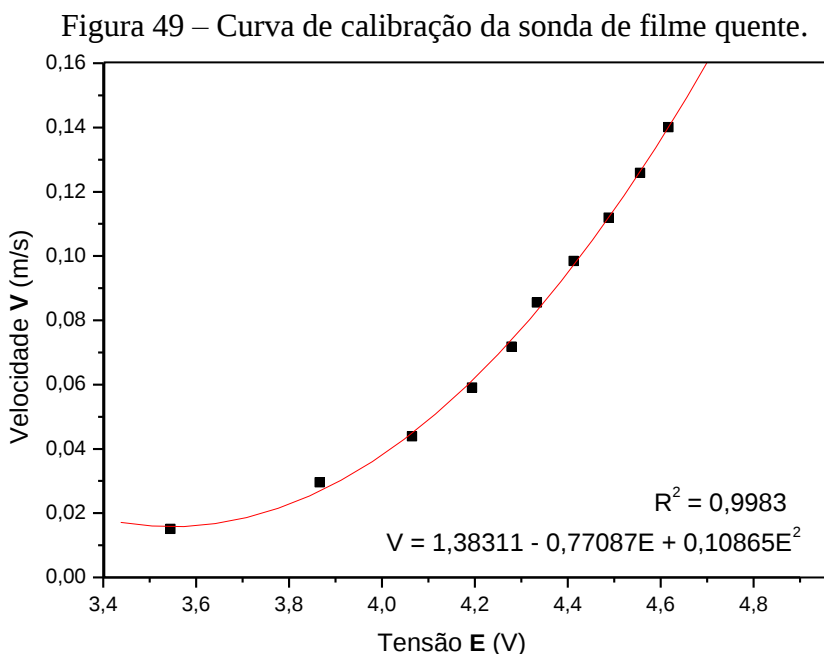
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 48 – Perfil de velocidade de um jato livre.



Fonte: Del Rio (2012).

A curva de calibração com os dados de tensão de saída do sistema de anemometria medida em Volts e as correspondentes velocidades do escoamento é mostrada na Figura 49, apresentando um coeficiente de determinação igual a 0,9983. Com a equação apresentada no gráfico pode-se calcular os valores de velocidade do escoamento a partir da tensão de saída medida em Volts.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

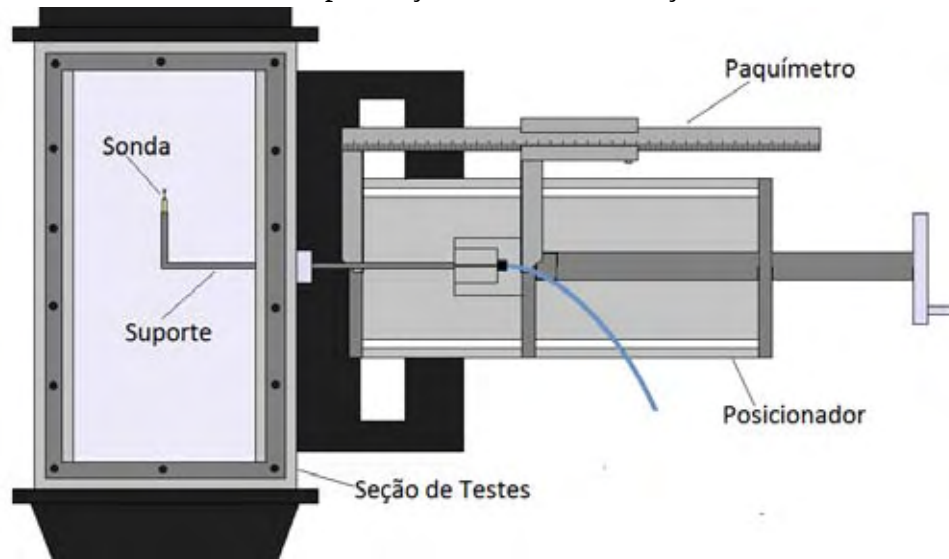
A.2 Perfil de velocidade e intensidade turbulenta

Após a devida calibração, a sonda foi instalada na seção de testes do túnel hidrodinâmico acoplada a um suporte do tipo “L” que, por sua vez, foi fixado em um posicionador. Este dispositivo, de operação manual, foi construído no próprio laboratório e possui 250 mm de curso para efetuar a medição da posição da sonda de filme quente no interior da seção de testes. O conjunto de equipamentos está representado na Figura 50.

As medições anemométricas foram realizadas variando a posição da sonda ao longo do eixo horizontal da seção de testes, desde uma janela lateral até a outra. A variação da posição da sonda para os pontos próximos às janelas laterais foi de 1 mm enquanto que, para as demais posições, essa variação foi de 5 mm.

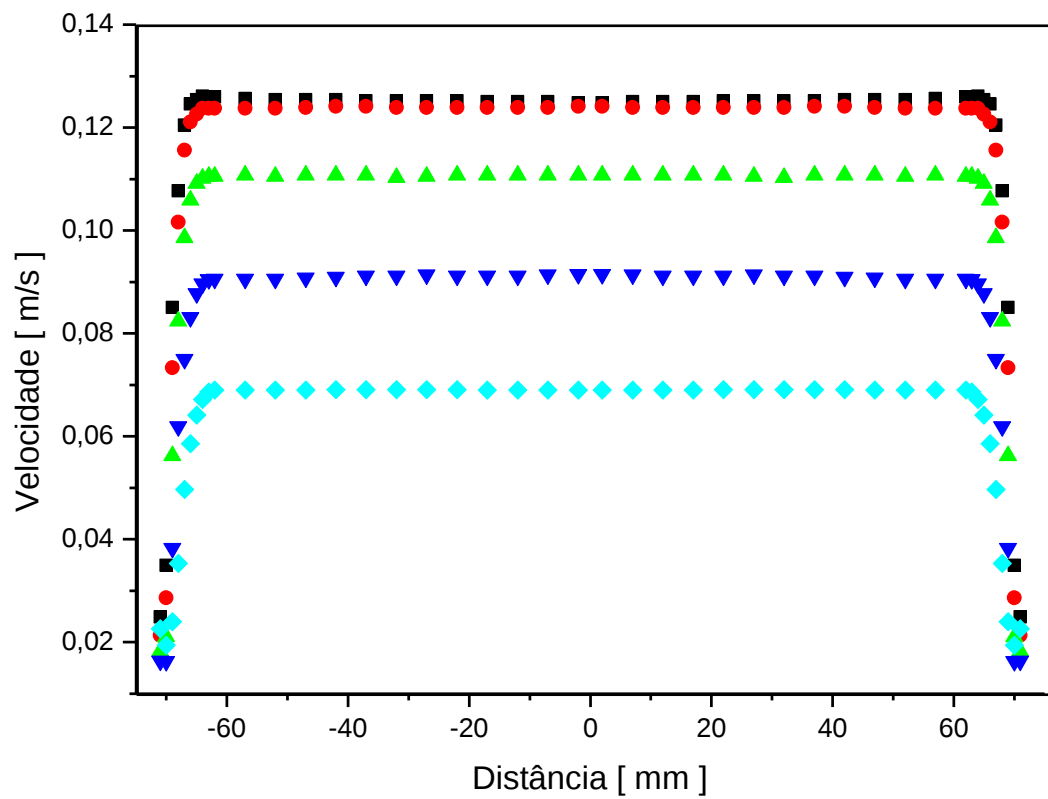
Após a conversão dos sinais de tensão para velocidade, utilizando a equação de calibração, construiu-se o perfil de velocidade da seção de testes do túnel hidrodinâmico, como pode ser observado na Figura 51.

Figura 50 – Esquema da sonda com o suporte “L” e o posicionador utilizados para a aquisição de dados sem a presença de modelos na seção de testes.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 51 – Perfil de velocidade do túnel hidrodinâmico operando em regime permanente para diferentes velocidades médias.

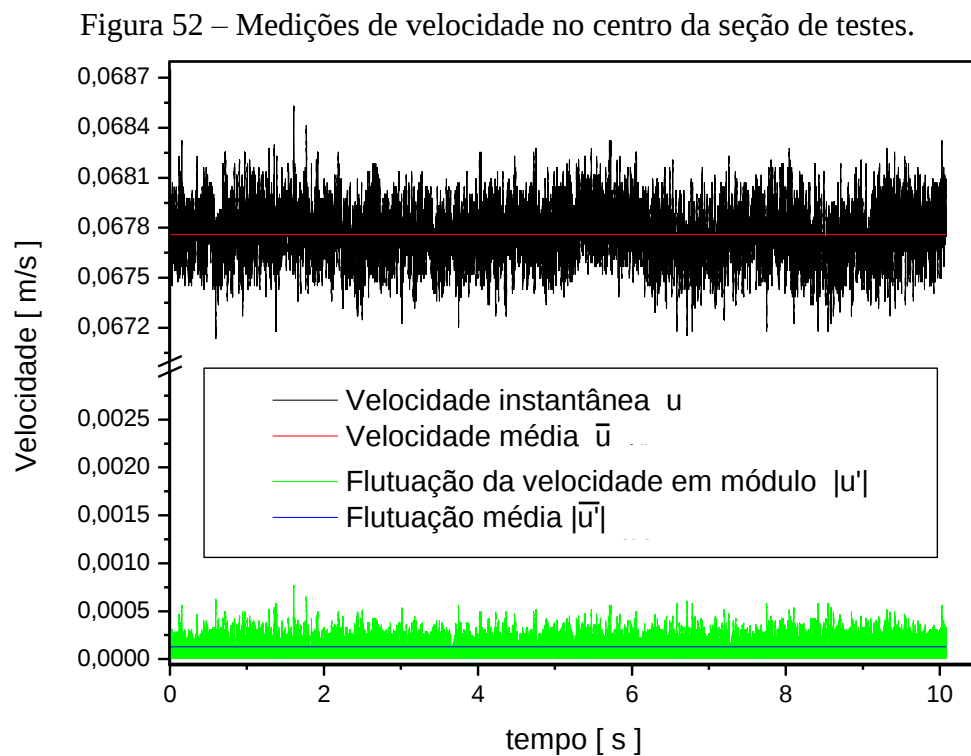


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

O perfil de velocidades do túnel hidrodinâmico utilizado neste trabalho revela uma camada limite de pequena espessura e variações de velocidade insignificantes na região de escoamento desenvolvido, podendo, então, ser considerado como perfil retangular de velocidade.

Os dados adquiridos para o cálculo da intensidade turbulenta foram coletados com o túnel operando em regime contínuo e com a sonda posicionada no centro da seção de testes em relação ao plano horizontal.

O gráfico da Figura 52 representa a velocidade instantânea da corrente livre não perturbada com sua respectiva média temporal. Adicionalmente, na parte inferior do gráfico, o módulo das flutuações de velocidade e sua média são também apresentados.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A intensidade turbulenta I do túnel hidrodinâmico, dada em porcentagem, pode ser calculada pela Equação 8:

$$I = \frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{u}} \times 100 \quad (8)$$

onde u' é a flutuação da velocidade instantânea e $\bar{u}$ é a velocidade média do escoamento no centro da seção de testes. Com os dados obtidos através da anemometria de filme quente, a

intensidade turbulenta calculada foi menor que 0,24%, ou seja, o túnel apresenta flutuações de velocidade relativamente pequenas viabilizando o estudo de escoamentos turbulentos, mesmo operando em regime permanente. Para a operação em regime intermitente (*blow down*), esperam-se níveis de turbulência significativamente inferiores devido à diminuição no grau de perturbações provenientes do fluxo constante de líquido no reservatório superior do túnel.

A.3 Medições realizadas nos corpos de prova

Os dados referentes aos corpos de provas (cilindros elípticos) apresentadas na Tabela 4 são, na realidade, médias relativas aos valores mensurados ao longo da envergadura de cada cilindro. A Tabela 8 apresenta todos os valores medidos, com as respectivas médias e os valores das razões entre eixos de cada cilindro.

Tabela 8 – Medições ao longo da envergadura dos corpos de prova.

Cilindro	1	2		3		4		5	
Medida	D	M	m	M	m	M	m	M	m
1	8,71	13,34	8,87	17,71	8,84	22,25	8,97	26,59	8,96
2	8,71	13,31	8,86	17,7	8,84	22,18	8,94	26,58	8,93
3	8,69	13,38	8,86	17,7	8,85	22,17	8,92	26,59	8,93
4	8,71	13,24	8,86	17,69	8,86	22,15	8,92	26,59	8,89
5	8,67	13,23	8,79	17,72	8,84	22,15	8,9	26,61	8,85
6	8,7	13,25	8,82	17,73	8,85	22,17	8,94	26,58	8,93
7	8,72	13,26	8,86	17,69	8,86	22,16	8,95	26,6	8,93
8	8,71	13,27	8,84	17,69	8,85	22,18	8,94	26,65	8,91
9	8,6	13,27	8,85	17,68	8,86	22,16	8,95	26,61	8,84
10	8,67	13,25	8,84	17,69	8,75	22,15	8,89	26,57	8,84
11	8,72	13,28	8,85	17,54	8,65	22,14	8,92	26,56	8,87
12	8,71	13,23	8,87	17,57	8,81	22,15	8,96	26,59	8,93
13	8,72	13,21	8,85	17,69	8,85	22,15	8,96	26,61	8,95
14	8,69	13,25	8,87	17,68	8,85	22,14	8,87	26,69	8,95
15	8,7	13,25	8,86	17,72	8,86	22,14	8,93	26,65	8,97
Média	8,695	13,268	8,850	17,680	8,828	22,163	8,931	26,605	8,912
AR	1	0,667		0,499		0,403		0,335	

D – Diâmetro; M – Maior eixo da elipse; m – Menor eixo da elipse.

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

APÊNDICE B – ANÁLISE DE INCERTEZAS

Medição é o ato de associar um valor a alguma variável física. Na medição ideal, o valor estabelecido pela medição deve ser o valor verdadeiro da variável física que se pretende medir. Entretanto, erros de medições trazem uma incerteza na exatidão do valor resultante da medição. Para dar alguma medida de confiança ao valor medido, os erros de medição devem ser identificados e seus prováveis efeitos sobre os resultados devem ser estimados. Incerteza é simplesmente uma estimativa de um possível valor para o erro nos resultados reportados na medição. A análise de incertezas fornece um quadro estruturado e racional de avaliação do significado de dispersão (erros de precisão) e de tendência (potencialmente associado com erros de propensão) nos dados.

B.1 Erros e incertezas

Pode-se considerar que os erros são compostos por dois elementos: um componente de precisão e um componente de tendência. O erro de precisão é o erro randômico e terá um valor diferente para cada medição. Os erros de tendência são os erros fixos, sistemáticos ou constantes. O grau de inexatidão ou erro total da medição é a diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro. Um valor preciso é aquele com pequenos erros de tendência e de precisão.

Apenas em raras circunstâncias o verdadeiro valor de uma variável é conhecido. Por exemplo, os valores verdadeiros de grandezas de medidas padrões (massa, comprimento, tempo, volts, etc.) residem em laboratórios de padrão nacional. Em geral, cada sistema de medida que é usado para medir o valor de uma variável individual é influenciado por um grande número de fontes elementares de erro. O erro total é a combinação desses erros. Desse modo, é imprescindível estimar os erros de precisão (denominados limite de precisão) e os erros de tendência (denominados limite de tendência). A incerteza em uma dada medida de uma grandeza física X é a estimativa para o erro total δ_x obtido com uma média ponderada dos limites de tendência e de precisão para cada resultado relatado. A estimativa da incerteza é feita com uma confiança de $C\%$. A melhor estimativa do valor verdadeiro buscado na medição é fornecido pelo valor médio da amostra e pela incerteza daquele valor (estimado com uma confiança de $C\%$).

$$X = \bar{X} \pm \delta_x \quad (9)$$

Em geral, a incerteza de uma medida é uma função do valor desta grandeza. Entretanto, é comum citar o mesmo valor de incerteza para uma faixa de valores da variável, ou seja, uma porcentagem do fundo de escala de um instrumento.

B.2 Incertezas teóricas e experimentais

Na ciência tenta-se validar ou descartar um hipótese comparando sua predição com resultados de um experimento. Para determinar se a hipótese é consistente com um experimento, deve-se estabelecer (a) a faixa de resultados que é consistente com uma medição experimental específica e (b) a faixa de predições que é consistente com a hipótese. O primeiro se refere às incertezas experimentais enquanto a segunda se refere às incertezas teóricas.

As incertezas experimentais surgem com as imperfeições nos equipamentos de medição e nos sentidos humanos, o que permite que uma faixa de resultados esteja consistente com uma única medida. A incerteza experimental não é equivalente à discrepância entre a medição e a predição teórica. As discrepâncias podem ser maiores que a incerteza experimental (devido à incerteza teórica ou erro) ou menores (devido à coincidência).

As incertezas teóricas aparecem porque o mundo físico em que se realizam os experimentos é sempre mais complexo que o mundo idealizado em que se calculam resultados assumindo-se hipóteses simplificadoras.

B.3 Propagação de incertezas

Na ciência tem-se o interesse em comparar os resultados experimentais com as predições teóricas. Geralmente se comparam grandezas que são calculadas a partir de outras variáveis. Portanto, para se interpretar os resultados experimentais deve-se, em geral, calcular a incerteza de alguma variável que depende de outras incertezas de vários dados de entrada.

Por suposição, seja $S(A,B,C)$ um resultado que depende das variáveis medidas A , B e C . Considerando a situação onde a medida de A carrega alguma incerteza δA e todas as outras

medições são exatas, então S tem alguma incerteza δS_A devido à sua dependência de A . Quando $\delta A \ll A$, tem-se:

$$\delta S_A \cong \frac{dS}{dA} \delta A \quad (10)$$

Similarmente, pode-se calcular a incerteza em S quando apenas B ou apenas C são incertos. Assumindo $\delta B \ll B$ e $\delta C \ll C$, tem-se:

$$\delta S_B \cong \frac{dS}{dB} \delta B \quad e \quad \delta S_C \cong \frac{dS}{dC} \delta C \quad (11)$$

Agora pode-se calcular a incerteza em S quando A , B e C possuem todas incertezas. Se δA , δB e δC representam os limites superiores de incerteza nas suas medições, então δS representa um limite superior para a incerteza em S . Entretanto, é mais conveniente tomar δA , δB e δC como sendo os desvios padrões de suas medições e calcular o desvio padrão de S . Quando δA , δB e δC variam randomicamente um em relação ao outro, é dado:

$$\delta S \cong \sqrt{\delta S_A^2 + \delta S_B^2 + \delta S_C^2} \quad (12)$$

onde todas as quantidades são entendidas como desvios padrões.

O método de calcular a incerteza em um resultado que depende de muitas variáveis, cada qual com sua própria incerteza, é chamado de propagação de incertezas ou, casualmente, propagação de erros.

Se as incertezas são completamente independentes, a possibilidade de compensação existe. Por outro lado, para incertezas completamente dependentes, deve-se levar em consideração o fato de que as incertezas estão sempre correlacionadas.

A teoria da análise de erros fornece uma equação geral para as incertezas quando um resultado é encontrado pelo cálculo de várias medidas. A equação é baseada na ideia de uma série de expansão de Taylor de primeira ordem de uma função de várias variáveis. Ela é válida quando as várias incertezas δ_i de i diferentes variáveis são pequenas comparadas aos

valores das variáveis e as incertezas não estão correlacionadas entre si. Especificamente, se o resultado desejado é uma função bem comportada $f(x,y,z,...)$ de variáveis físicas $x,y,z,...$ que têm incertezas $\delta_x, \delta_y, \delta_z, \dots$, então a incerteza do valor do resultado δ_f é dado pela expressão:

$$\delta_f^2 = \delta_x^2 \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \delta_y^2 \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 + \delta_z^2 \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right)^2 + \dots \quad (13)$$

onde as derivadas parciais são todas avaliadas dos valores conhecidos de $x,y,z,\dots$

A Tabela 9 mostra algumas expressões comuns utilizadas para o cálculo da propagação de incertezas. Estas equações podem ser combinadas nos casos de expressões mais complexas ou pode-se recorrer à Equação (B.5).

Tabela 9 – Expressões comuns para propagação de incertezas.

Forma funcional	Equação	Equação da incerteza
Produto ou quociente	$f = xy$ ou $f = x/y$	$\epsilon_f = \sqrt{\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2}$
Soma ou diferença	$f = x + y$ ou $f = x - y$	$\delta_f = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2}$
Produto de fatores elevados à potência	$f = x^m y^n$	$\epsilon_f = \sqrt{m^2 \epsilon_x^2 + n^2 \epsilon_y^2}$
Multiplicadores constantes	$f = Kx$ ($K = \text{constante}$)	$\delta_f = K \delta_x$
Funções logarítmicas	$f = \log_e(x)$	$\delta_f = \epsilon_x$
	$f = \log_{10}(x)$	$\delta_f = \log_{10}(e) \epsilon_x = 0,4343 \epsilon_x$
Funções exponenciais	$f = e^x$	$\epsilon_x = \delta_f$
	$f = 10^x$	$\epsilon_f = \log_e(10) \delta_x = 0,2303 \delta_x$

Obs.: $\epsilon_x = \frac{\delta_x}{x}$

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

As expressões da Tabela 9 não são apenas matemáticas; podem-se observar alguns aspectos físicos em suas formas. Por exemplo, no caso multiplicadores constantes, ao multiplicar cada dado pontual por uma constante, então a incerteza do valor médio também deverá ser multiplicada proporcionalmente. Mais interessante, se fora medida a área de um quadrado por duas medições independentes de comprimento x e largura y , deveria ser utilizada a expressão do produto ou do quociente para propagar a incerteza, tal que $A = xy$.

Neste caso, os erros nas duas medições podem ser opostos, levando a um melhor resultado final. Mas se for utilizado apenas o comprimento medido x , e assumindo-se que a largura y seja a mesma que o comprimento, então a possibilidade dos dois erros de medição trabalharem um contra o outro será perdida e deve-se, então, utilizar a expressão $A = x^2$. Neste caso, a mesma medida exata é usada duas vezes, portanto, os erros de comprimento *versus* largura não podem ser cancelados. Para propagar a incerteza deve-se utilizar a expressão do produto dos fatores elevados à potência, que fornece uma incerteza final maior que no caso anterior.

Experimentos em mecânica dos fluidos e em transferência de calor são tratados como amostragem simples pelo fato dos dados serem obtidos por uma única medição ou o processo de medição ser repetida algumas poucas vezes. O tratamento para amostragem simples pode ser encontrada no trabalho de Moffat (1988).

B.4 Análise de incerteza das variáveis de interesse

B.4.1 Comprimento

As dimensões da seção de testes foram medidas com o auxílio de um paquímetro *Mitutoyo* 0,01 – 150mm. A incerteza associada às medições realizadas por meio deste instrumento é de $\delta_x = 0,05$ mm ou $\epsilon_x = 0,03\%$.

B.4.2 Temperatura

A temperatura da água é um parâmetro que exerce grande influência sobre as suas propriedades, tais como a viscosidade e a densidade. A temperatura foi medida com o auxílio de um termômetro digital *Minipa*, modelo MT-401A. Esse termômetro utiliza como elemento sensor um termopar do tipo *K*, e mede temperaturas na faixa de -50°C a 750°C , com incerteza de 0,75% do valor da leitura + 1°C .

B.4.3 Área

A área transversal da seção de testes é dada pela seguinte expressão:

$$A = B \cdot C \quad (14)$$

onde B é a largura e C é o comprimento da seção de testes, cujos valores são ambos iguais a 0,146m. A incerteza associada ao cálculo da área pode ser estimada por:

$$\frac{\delta A}{A} = \left[\left(\frac{\delta B}{B} \right)^2 + \left(\frac{\delta C}{C} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

portanto a incerteza relativa da área da seção de testes é de 0,05%.

B.4.4 Viscosidade Cinemática

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

$$\nu(T) = \frac{\mu(T)}{\rho(T)} \quad (16)$$

Na literatura existem 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 10.

Tabela 10 - Correlações para o cálculo da viscosidade cinemática da água.

Propriedade	Correlação	Fonte	Incerteza*
$\mu(T)$ [kg.m-1.s-1]	$\ln\left(\frac{\mu}{\mu_0}\right) = -1,704 - 5,306 Z + 7,003 Z^2$ com $Z = 273/T(K)$ e $\mu_0 = 1,788 \times 10^{-3}$	White (1986)	$\pm 0,2\%$
$\rho(T)$ [kg.m-3]	$\rho = 1000 - 0,0178 (T(^{\circ}C) - 4)^{1,7}$		

*Incerteza de ajuste da curva

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

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

$$\frac{\delta \nu}{\nu} = \left[\left(\frac{\delta \mu}{\mu} \right)^2 + \left(\frac{\delta \rho}{\rho} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

Para faixas de temperatura na qual foram realizados os ensaios, entre 20°C e 30°C, a incerteza relativa da viscosidade cinemática da água calculada foi de $\pm 0,35\%$.

B.4.5 Frequência

A frequência de emissão dos vórtices, ou frequência de Strouhal, foi determinada aplicando-se a transformada discreta de Fourier ao sinal temporal da velocidade, adquirido num determinado ponto do escoamento. A incerteza na determinação da frequência de Strouhal pode ser estimada com base no valor da resolução da frequência, como exposto por Carvalho (2003):

$$\delta f = \frac{F}{N} \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad (18)$$

sendo que F é a frequência de amostragem e N é a quantidade de amostras do sinal adquirido. Nos ensaios de anemometria conduzidos para a determinação da frequência de emissão dos vórtices, o sinal de velocidade foi adquirido num bloco com 131 072 pontos, a uma taxa de 6,6 kHz. Assim, sua incerteza pode ser estimada como $\delta f = 0,05 \text{ s}^{-1}$ ou $\epsilon_f = 7,5 \times 10^{-4}\%$.

B.4.6 Vazão

A vazão do escoamento no canal hidrodinâmico foi medida com o auxílio de um medidor de vazão eletromagnético *Yokogawa*, modelo AXF100G. Segundo a especificação do fabricante, este instrumento possui uma incerteza na medição de vazão de 0,35%. Porém, ao longo dos experimentos, a leitura da vazão indicada pelo medidor era incerta devido à variação do valor sinalizado pelo instrumento. Essa variação se dava em torno de 50 litros por hora ou em unidades do Sistema Internacional, $1,4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

Para medir vazões relativamente baixas (números de Reynolds inferiores a 100) foram utilizados uma proveta de 2 litros e um cronômetro digital. A incerteza da proveta é de $\pm 10 \text{ ml}$

e a incerteza do cronômetro é de 0,01 segundos. O erro associado ao manuseio do cronômetro foi calculado com o operador executando várias medidas em um intervalo de tempo de 5 segundos. Assim, a incerteza total (incerteza do instrumento e erro do operador) associada ao cronômetro foi de $\pm 0,2$ segundos.

A Tabela 11 apresenta as incertezas associadas à vazão para diferentes casos ensaiados.

Tabela 11 - Valores típicos da incerteza da vazão.

<i>Re</i>	<i>Q (m³/h)</i>	<i>δQ/ Q</i>
4,77	0,03	0,51 %
45,48	0,31	0,99 %
91,21	0,61	1,76 %
113,08	0,77	6,55 %
521,33	3,55	1,42 %
1014,95	6,75	0,75 %
2049,44	13,63	0,37 %

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

B.4.7 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,

$$V_{\infty} = \frac{Q}{A} \quad (19)$$

onde Q é a vazão volumétrica indicada pelo medidor de vazão e A é a área transversal da seção de testes. A incerteza associada ao cálculo da velocidade da corrente livre é estimada por Carvalho (2003):

$$\frac{\delta V_{\infty}}{V_{\infty}} = \left[\left(\frac{\delta Q}{Q} \right)^2 + \left(-\frac{\delta A}{A} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (20)$$

A Tabela 12 apresenta valores típicos das incertezas das velocidades da corrente livre para diferentes vazões.

Tabela 12 - Valores típicos da incerteza da velocidade da corrente livre.

<i>Re</i>	<i>Q (m³/h)</i>	<i>V_∞(m/s)</i>	<i>δV_∞/ V_∞</i>
4,77	0,03	4,96.10 ⁻⁴	0,51 %
45,48	0,31	4,72.10 ⁻³	1,00 %
91,21	0,61	9,26.10 ⁻³	1,76 %
113,08	0,77	0,01	6,55 %
521,33	3,55	0,05	1,42 %
1014,95	6,75	0,1	0,75 %
2049,44	13,63	0,21	0,37 %

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

B.4.8 Número de Reynolds

O número de Reynolds do escoamento em torno de um cilindro elíptico é definido pela seguinte expressão:

$$Re = \frac{V_{\infty} \cdot D}{\nu} \quad (21)$$

onde D é o menor diâmetro da elipse ou o diâmetro da circunferência, cujos valores são apresentados na Tabela 4.

A incerteza do número de Reynolds pode ser calculada, conforme Carvalho (2003), como:

$$\delta Re = \left[\left(\frac{D}{\nu} \delta V_{\infty} \right)^2 + \left(\frac{V_{\infty}}{\nu} \delta D \right)^2 + \left(-\frac{V_{\infty} D}{\nu^2} \delta \nu \right)^2 \right]^{1/2} \quad (22)$$

A Tabela 13 apresenta valores das incertezas dos números de Reynolds para diferentes valores de velocidades.

Tabela 13 – Valores típicos da incerteza do número de Reynolds.

$V_{\infty}(m/s)$	Re	$\delta Re/Re$
$4,96 \cdot 10^{-4}$	4,77	0,83 %
$4,72 \cdot 10^{-3}$	45,48	1,19 %
$9,26 \cdot 10^{-3}$	91,21	1,83 %
0,01	113,08	6,58 %
0,05	521,33	1,56 %
0,1	1014,95	0,97 %
0,21	2049,44	0,74 %

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

B.4.9 Número de Strouhal

O número de Strouhal representa a frequência adimensional de emissão de vórtices no escoamento e pode ser escrito como:

$$St = \frac{f \cdot D}{V_{\infty}} \quad (23)$$

Na qual f é a frequência de emissão de vórtices, D é o comprimento característico e V é a velocidade da corrente livre. A incerteza associada ao cálculo do número de Strouhal pode então ser estimada por:

$$\delta St = \left[\left(\frac{D}{V_{\infty}} \delta f \right)^2 + \left(\frac{f}{V_{\infty}} \delta D \right)^2 + \left(\frac{-fD}{V_{\infty}^2} \delta V_{\infty} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

Para o mesmo caso apresentado anteriormente, são mostrados valores típicos da incerteza do número de Strouhal, resumidos da Tabela 14.

Tabela 14 – Valores típicos da incerteza do número de Strouhal.

<i>Re</i>	<i>St</i>	$\delta St / St$
146,12	0,18	17,17 %
258,46	0,21	8,33 %
402,38	0,22	5,31 %
585,94	0,25	3,24 %
1007,41	0,30	1,72 %
1497,89	0,32	1,16 %
1998,66	0,34	0,93 %

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

B.4.10 Número de Roshko

O número adimensional de Roshko é uma forma de relacionar a velocidade do escoamento com a frequência de emissão e vórtices e pode ser expresso como:

$$Ro = St \cdot Re = \frac{f D^2}{\nu} \quad (25)$$

Dessa forma, a incerteza associada ao número de Roshko pode ser calculada da seguinte forma:

$$\delta Ro = \left[\left(\frac{2fD}{\nu} \delta D \right)^2 + \left(\frac{D^2}{\nu} \delta f \right)^2 + \left(-\frac{fD^2}{\nu^2} \delta \nu \right)^2 \right]^{1/2} \quad (26)$$

Para os casos apresentados anteriormente, as incertezas relativas ao número de Roshko estão expostas na Tabela 15.

Tabela 15 – Valores típicos da incerteza do número de Roshko.

<i>Re</i>	<i>Ro</i>	<i>δRo/ Ro</i>
146,12	26,42	16,43 %
258,46	55,52	7,89 %
402,38	87,48	5,09 %
585,94	148,01	3,15 %
1007,41	298,60	1,86 %
1497,89	486,36	1,47 %
1998,66	671,35	1,33 %

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

B.5 Coeficiente de determinação

O coeficiente de determinação (R^2) mede quão bem uma curva de regressão linear ou não linear se ajusta aos dados. É uma medida da proporção da variância de um resultado previsto. Com um valor de 0 a 1, o coeficiente de determinação é calculado como o quadrado do coeficiente de correlação (R) entre os valores observados e os dados previstos por um modelo. O seu valor representa a percentagem de variação que pode ser explicado pela equação do modelo. O coeficiente de determinação também é usado para mostrar com que precisão um modelo pode prever resultados futuros. Ele pode ser calculado da seguinte forma:

$$R^2 = \frac{\text{variação explicada}}{\text{variação total}} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{est} - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2} \quad (27)$$

onde y é o valor observado, $\bar{y}$ é a média das observações e y_{est} é o valor estimado de y pelo modelo.