

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO  
EM CAVIDADES RETANGULARES: PADRÕES  
DE ESCOAMENTO E INSTABILIDADES  
HIDRODINÂMICAS NA CAMADA  
CISALHANTE**

**Emileni Luzia Buainain Rosim**

**Orientador:** Prof. Dr. Sérgio Said Mansur

**Co-orientador:** Prof. Dr. Edson Del Rio Vieira

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  
Setembro/2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação

R819e

Rosim, Emileni Luzia Buainain.

Estudo experimental do escoamento em cavidades retangulares: padrões de escoamento e instabilidades hidrodinâmicas na camada cisalhante / Emileni Luzia Buainain Rosim. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2012

118 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Térmicas , 2012

Orientador: Sérgio Said Mansur

Co-orientador: Edson Del Rio Vieira

Inclui bibliografia

1. Cavidade retangular. 2. Visualização de escoamentos. 3. Anemometria de filme quente. 4. Camada cisalhante. 5. Número de Strouhal.



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

**- CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** Estudo experimental do escoamento em cavidades retangulares: padrões de escoamento e instabilidades hidrodinâmicas na camada cisalhante

**AUTORA:** EMILENI LUZIA BUAINAIN ROSIM

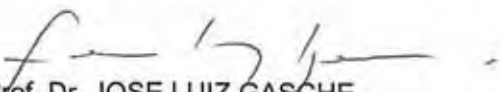
**ORIENTADOR:** Prof. Dr. SERGIO SAID MANSUR

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

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



Prof. Dr. SERGIO SAID MANSUR  
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. JOSE LUIZ GASCHE  
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. ALUISIO VIAIS PANTALEAO  
EMBRAER

Data da realização: 10 de setembro de 2012.

A Deus.

A meus pais, Emilio e Elizabeth, pelo amor e dedicação incondicional.

A minha irmã, pelo amor e amizade.

# *Agradecimentos*

A realização deste trabalho não teria ocorrido sem a colaboração e o empenho de diversas pessoas e instituições. Gostaria de manifestar minha gratidão a todos aqueles que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para que ele fosse levado a bom termo. A todos, meus sinceros agradecimentos.

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre estar presente em minha vida e, assim, abençoar mais uma etapa realizada.

A meu pai e à minha mãe, pelo apoio incondicional e pela sólida formação dada até minha juventude, proporcionando-me a continuidade de meus estudos até o mestrado. À minha irmã, pelo convívio, afeto e força nos momentos mais difíceis.

Em especial, ao meu orientador Prof. Dr. Sérgio Said Mansur, sou grata pela paciência, pelas valiosas orientações e ensinamentos, os quais me ajudaram na vida acadêmica.

Ao Prof. Dr. Edson Del Rio Vieira, pela importante co-orientação.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Mecânica, pelos auxílios prestados e, em especial, ao Reginaldo Cordeiro da Silva, não só pela preciosa ajuda na reconstrução do aparato e na montagem da instalação experimental, mas, acima de tudo, pelos ensinamentos profissionais e pela amizade.

Aos alunos da pós-graduação e, em especial, ao amigo Cássio Thomé de Faria, pela valiosa orientação e colaboração nos testes de vibração do aparato experimental.

Aos alunos de iniciação científica do Laboratório de Visualização de Escoamentos, Arthur Marques Figueira de Mello, Luis Eduardo Zampar Filho, Isabella Caroline Silva e Renato de Souza Sagae, pela contribuição na obtenção dos resultados experimentais.

Aos amigos, que sempre tiveram ao meu lado durante esta caminhada.

Agradeço à UNESP Ilha Solteira, pela formação que me proporcionou e pela oportunidade de utilização de seus laboratórios na realização deste trabalho.

À CAPES, pela bolsa concedida, e à FAPESP, pelo financiamento concedido ao projeto de pesquisa dentro do qual se insere esta dissertação.

Aos membros da banca examinadora, pelas sugestões e comentários.

# *Sumário*

**Lista de Figuras**

**Lista de Tabelas**

**Lista de Símbolos**

**Resumo**

**Abstract**

**Preâmbulo**

<b>Capítulo 1: Introdução</b>	<b>1</b>
1.1. Motivação	1
1.2. Aspectos fenomenológicos	3
1.3. Objetivos	7
<b>Capítulo 2: Revisão bibliográfica</b>	<b>8</b>
<b>Capítulo 3: Dispositivo e Procedimentos Experimentais</b>	<b>13</b>
3.1. Dispositivo experimental	13
a) Sistema Propulsor (PR)	14
b) Válvula reguladora de vazão (VA)	14
c) Difusor (DF)	15
d) Seção de estabilização (SE)	15
e) Contração (CT)	16
f) Reservatório de descarga (RD)	16
g) Tubulação (TB)	16
h) Seção de teste (ST)	17
3.2. Instrumentos de medição	18
a) Velocidade média na entrada da seção de teste	18
b) Velocidade local	18

3.3. Visualização de escoamento	20
3.3.1. Visualização em meio líquido	20
a) Injeção de corantes	20
b) Traçadores sólidos	22
c) Traçadores gasosos	22
3.3.2. Iluminação	24
a) Corante líquido	24
b) Traçadores sólidos e gasosos	25
3.3.3. Captura de imagens	26
3.4. Frequência de emissão de vórtices	26
a) Anemômetro de filme quente	27
b) Contagem de vórtices	27
<b>Capítulo 4: Resultados e Discussão</b>	<b>28</b>
4.1. Visualização de escoamentos	28
4.1.1. Injeção de corante líquido	28
4.1.2. Bolhas de hidrogênio	33
4.1.3. Partículas sólidas	35
4.1.4. Comparação entre as técnicas de visualização	43
4.2. Frequência de emissão de vórtices	45
<b>Capítulo 5: Conclusão e recomendações para trabalhos futuros</b>	<b>50</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>53</b>
<b>Apêndice A: Análise de Vibração</b>	<b>57</b>
<b>Apêndice B: Intensidade Turbulenta</b>	<b>71</b>
<b>Apêndice C: Configuração da seção de estabilização</b>	<b>73</b>
<b>Apêndice D: Estimativa de incertezas experimentais</b>	<b>76</b>
<b>Apêndice E: Resultados das medições anemométricas</b>	<b>83</b>

# *Lista de Figuras*

Figura 1.1 -	Aeronave em voo.	1
Figura 1.2 -	Aneurisma cerebral.	2
Figura 1.3 -	<i>Canyons</i> urbano.	2
Figura 1.4 -	Caminhões de competição em disputa de posição.	3
Figure 1.5 -	Cavidade retangular: parâmetros geométricos e nomenclatura.	4
Figure 1.6 -	Classificação do escoamento em cavidades.	4
Figura 1.7 -	Escoamento ressonante em cavidade rasa e profunda. Cannon (2003).	5
Figura 1.8 -	Fenomenologia do escoamento em cavidade retangular. Mega (2009).	6
Figura 1.9 -	Fenomenologia do escoamento em cavidade retangular. Rockwell e Naudascher (1979).	6
Figura 3.1 -	Canal de superfície livre com recirculação de água.	14
Figura 3.2 -	Componentes do canal de superfície livre.	15
Figura 3.3 -	Seção de testes.	17
Figura 3.4 -	Medidor de vazão eletromagnético Yokogawa, modelo ADMAG AE208MG.	18
Figura 3.5 -	Anemômetro de fio/filme quente Dantec, modelo Streamline 90N10.	19
Figura 3.6 -	Esquema funcional de um anemômetro de fio/filme quente do tipo CTA.	20
Figura 3.7 -	Sistema de injeção de corante.	21
Figura 3.8 -	Sistema de geração de bolhas de hidrogênio.	24
Figura 3.9 -	Iluminação difusa, em contraluz.	25
Figura 3.10 -	Iluminação por plano de luz laser.	26
Figura 3.11 -	Obtenção da frequência de oscilação da camada cisalhante a partir do sinal anemométrico de velocidade.	27
Figura 4.1 -	Visualização por injeção de corante líquido do escoamento na camada cisalhante de uma cavidade com razão de aspecto $\zeta = 4$ e $Re \approx 5000$ .	29
Figura 4.2 -	Escoamento em uma cavidade com $\zeta = 1/2$ , para diferentes números de Reynolds. Visualização por injeção de corante líquido.	29
Figura 4.3 -	Escoamento em uma cavidade com $\zeta = 1$ , para diferentes números de Reynolds. Visualização por injeção de corante líquido.	30

Figura 4.4 -	Escoamento em uma cavidade com $\zeta = 4$ , para diferentes números de Reynolds. Visualização por injeção de corante líquido.	31
Figura 4.5 -	Escoamento em uma cavidade com $\zeta = 10$ , para diferentes números de Reynolds. Visualização por injeção de corante líquido.	32
Figura 4.6 -	Escoamento em uma cavidade com $\zeta = 2$ , para dois diferentes números de Reynolds. Visualização com bolhas de hidrogênio geradas com fios de platina de $75\mu\text{m}$ e iluminação por plano de luz laser.	33
Figura 4.7 -	Escoamento na camada cisalhante de uma cavidade com $\zeta = 2$ , para $Re \approx 1200$ . Visualização em dois diferentes instantes, realizada com bolhas de hidrogênio geradas com fios de platina de $25\mu\text{m}$ e iluminação por plano de luz laser.	34
Figura 4.8 -	Escoamento no interior de uma cavidade com $\zeta = 2$ , para dois diferentes números de Reynolds. Visualização com bolhas de hidrogênio geradas com fios de platina de $25\mu\text{m}$ e iluminação por plano de luz laser.	35
Figura 4.9 -	Escoamento no interior de uma cavidade com $\zeta = \frac{1}{2}$ , para diferentes números de Reynolds. Visualização com partículas sólidas e iluminação por plano de luz laser.	36
Figura 4.10 -	Escoamento no interior de uma cavidade com $\zeta = \frac{1}{2}$ : comparação com resultados de outros autores.	37
Figura 4.11 -	Escoamento no interior de uma cavidade com $\zeta = 1$ , para diferentes números de Reynolds. Visualização com partículas sólidas e iluminação por plano de luz laser.	38
Figura 4.12 -	Escoamento no interior de uma cavidade com $\zeta = 1$ : comparação com resultados de outros autores.	39
Figura 4.13 -	Escoamento no interior de uma cavidade com $\zeta = 2$ , para diferentes números de Reynolds. Visualização com partículas sólidas e iluminação por plano de luz laser.	40
Figura 4.14 -	Escoamento no interior de uma cavidade com $\zeta = 1$ : comparação com resultados de outros autores.	40
Figura 4.15 -	Escoamento no interior de uma cavidade com $\zeta = 3$ , para $Re \approx 1475$ . Visualização realizada em diferentes instantes, utilizando-se partículas sólidas e iluminação por plano de luz laser.	41

Figura 4.16 - Escoamento no interior de uma cavidade com $\zeta = 3$ , para $Re \approx 280$ . Visualização realizada em diferentes instantes, por Manovski et al. (2005).	42
Figura 4.17 - Escoamento no interior de uma cavidade com $\zeta = 3$ , para $Re \approx 1475$ , classificada como semiaberta.	43
Figura 4.18 - Escoamento no interior de uma cavidade com $\zeta = 1/2$ . Comparação entre resultados obtidos com injeção de corante líquido e sementeira de partículas sólidas.	43
Figura 4.19 - Escoamento no interior de uma cavidade com $\zeta = 1$ . Comparação entre resultados obtidos com injeção de corante líquido e sementeira de partículas sólidas.	44
Figura 4.20 - Escoamento no interior de uma cavidade com $\zeta = 2$ . Comparação entre resultados obtidos com bolhas de hidrogênio e sementeira de partículas sólidas.	45
Figura 4.21 - Curvas Strouhal versus Reynolds para cavidades com diferentes razões de aspecto. Resultados obtidos por anemometria de filme quente.	46
Figura 4.22 - Comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds para diferentes cavidades.	47
Figura 4.23 - Curvas Strouhal versus Reynolds para cavidades com diferentes razões de aspecto. Comparação entre resultados obtidos por anemometria de filme quente e contagem de vórtices.	48
Figura A.1 - Construção de um novo difusor.	58
Figura A.2 - Substituição de mangueiras sanfonadas por mangotes flexíveis.	58
Figura A.3 - Substituição de conexão em T por Y.	58
Figura A.4 - Estrutura individual para a sustentação o novo difusor.	59
Figura A.5 - Reforços metálicos para travamento da estrutura de sustentação.	59
Figura A.6 - Junta de borracha entre o difusor e a seção de estabilização.	60
Figura A.7 - Posicionamento dos acelerômetros e eixos de referência.	61
Figura A.8 - Local dos impactos com martelo instrumentado, nas direções X, Y e Z.	62
Figura A.9 - Níveis de água adotados durante os testes.	62
Figura A.10 - Comportamento vibratório do canal, em função da vazão e do nível da superfície livre na seção de testes, capturada pelos acelerômetros A1, A2, A3 e A4.	64

Figura A.11 - Sinais dos acelerômetros no domínio da frequência.	65
Figura A.12 - Sinais dos acelerômetros no domínio da frequência.	66
Figura A.13 - Ajustes realizados no projeto.	68
Figura A.14 - Sinal típico de aceleração adquirido ao longo do tempo pelos acelerômetros A1, A2, A3 e A4.	69
Figura C.1 - Retificação do escoamento na passagem por colmeias e telas. Retirado de Mega (2009).	73
Figura C.2 - Intensidade turbulenta versus número de Reynolds.	75

# *Lista de Tabelas*

Tabela A.1 - Valores RMS das acelerações para diferentes níveis e vazões no canal de superfície livre.	63
Tabela A.2 - Frequências naturais da estrutura analisada, para cada acelerômetro (em negrito as frequências mais marcantes para cada situação).	65
Tabela A.3 - Valores das correlações	67
Tabela A.4 - Correlações entre os sinais do acelerômetro A1 e os demais para diferentes vazões.	70
Tabela C.1 - Intensidade turbulenta em função da configuração da seção de estabilização e do número de Reynolds.	74
Tabela D.1 - Correlações para o cálculo da viscosidade cinemática da água.	79
Tabela D.2 - Valores típicos da incerteza da velocidade da corrente livre.	81
Tabela D.3 - Valores típicos da incerteza do número de Reynolds.	82
Tabela D.4 - Valores das incertezas do cálculo da razão de aspecto.	82

# *Lista de Símbolos*

$A$	Área transversal da seção de teste [m <sup>2</sup> ]
$b$	Comprimento da cavidade [m]
$F$	Frequência de aquisição ou taxa de amostragem dos dados [s <sup>-1</sup> ]
$h$	Altura da cavidade [m]
$I$	Intensidade turbulenta
$N$	Número de amostras adquiridas
$Q$	Vazão volumétrica do escoamento [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$Re$	Número de Reynolds
$St$	Número de Strouhal
$S$	Desvio padrão da amostra
$T'$	Intervalo de tempo
$T$	Temperatura do fluido [°C]
$u'$	Flutuação de velocidade [m.s <sup>-1</sup> ]
$\bar{u}'_{RMS}$	Média quadrática das flutuações aleatórias de velocidade [m.s <sup>-1</sup> ]
$U_0$	Velocidade d corrente livre [m.s <sup>-1</sup> ]
$U$	Velocidade instantânea medida [m.s <sup>-1</sup> ]
$\bar{U}$	Valor médio temporal [m.s <sup>-1</sup> ]
$V_\infty$	Velocidade da corrente livre [m.s <sup>-1</sup> ]
$X_i$	Variável genérica, medida pelo sistema de medição
$x, y, z$	Coordenadas cartesianas [m]
$\zeta$	Razão de aspecto
$\nu$	Viscosidade cinemática do fluido [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$\delta$	Incerteza associada à medição de uma variável
$\sigma$	Desvio padrão da população
$\mu$	Viscosidade dinâmica ou absoluta do fluido [kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$\mu_0$	Viscosidade da água a 273 K [kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$\nu$	Viscosidade cinemática do fluido [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$\rho$	Densidade ou massa específica do fluido [kg.m <sup>-3</sup> ]

## **Abreviações**

*ADV Acoustic Doppler Velocimeter*

*CFD Computational Fluid Dynamics*

*CTA Constant Temperature Anemometer*

*FFT Fast Fourier Transform*

PVA Polivinil acrílico

TGL Vórtices do tipo Taylor-Görtler

# Resumo

Este trabalho traz uma investigação experimental do escoamento em cavidades retangulares com razões de aspectos de  $\frac{1}{2}$  a 10 para números de Reynolds na faixa de  $10^3$  a  $10^4$ . Os experimentos foram conduzidos em um canal de superfície livre em circuito fechado, projetado e construído no âmbito de um trabalho anterior, inserido dentro desta mesma linha de pesquisa. Antes do início da presente campanha experimental, este aparato foi inteiramente reestruturado, efetuando-se os ajustes e reparos necessários à correção dos problemas de funcionamento identificados no trabalho precedente. Após esta etapa, testes preliminares foram executados, incluindo o levantamento do envelope operacional do aparato e a medição dos níveis de vibração na seção de testes, com o propósito de qualificação do equipamento para a realização deste estudo. No que concerne aos ensaios das cavidades, visualizações de escoamento foram efetuadas, utilizando-se três diferentes tipos de traçadores: corante líquido, bolhas de hidrogênio e partículas sólidas. Com o auxílio de uma iluminação adequada, todas as técnicas se mostraram capazes de fornecer elementos importantes para a observação das mudanças nos padrões de escoamento produzidas por alterações nos parâmetros que governam este tipo de escoamento – o número de Reynolds e a razão de aspecto. Especial atenção foi dada à obtenção de informações quantitativas e qualitativas do escoamento na camada cisalhante das cavidades, cujas características intrínsecas favorecem a formação e a propagação de instabilidades de Kelvin-Helmholtz. Medições de velocidade por anemometria de filme quente também foram efetuadas, visando a obtenção do comportamento característico  $St \times Re$  para cada cavidade ensaiada. Curvas do tipo  $St = A Re^{-b}$ , onde  $A$  e  $b$  são constantes para cada caso analisado, foram ajustadas aos dados experimentais, com o propósito de representar as correlações existentes entre estas duas variáveis. Alguns dos resultados foram comparados com dados experimentais e numéricos da literatura, mostrando excelente concordância. Os resultados aqui apresentados constituem uma base importante de dados para a validação de programas de simulação numérica de escoamentos.

# *Abstract*

This work is concerned with an experimental investigation of the flow in rectangular cavities with aspect ratios from  $\frac{1}{2}$  to 10, for Reynolds number between  $10^3$  and  $10^4$ . Experiments have been conducted in a free surface water channel developed in a previous work inserted in the same field of research. Before beginning the experimental runs, that apparatus has been fully redesigned. Adjustments and repairs have been performed in order to correct some operation problems previously identified. After that phase, preliminary tests have been done to obtain the operating envelope and qualify the apparatus in terms of vibration level. With regard to tests of cavities, different methods of flow visualization have been employed – liquid dye injection, hydrogen bubbles generation, and seeding of solid particles. By using a proper lighting, all these techniques have allowed to observe flow patterns changes as a function of aspect ratio and Reynolds number. Particular attention has been dispensed to obtain quantitative and qualitative information about the periodic behavior of the shear layer, where Kelvin-Helmholtz instabilities are produced. Hot film measurements have also been performed to obtain  $St \times Re$  curves for each cavity tested. Correlations of the form  $St = A Re^{-b}$  have been fitted to experimental data, where  $A$  and  $b$  are constants for each case investigated. As possible, results have been compared with numerical and experimental data from the literature and a good agreement has been reached. The results presented here constitute an important data basis to validate in-house CFD codes.

# *Preâmbulo*

Os estudos envolvendo o escoamento em cavidades abertas foram iniciados no Laboratório de Visualização de Escoamentos (LVE), em 2005, a partir do trabalho de iniciação científica do então aluno de graduação Eduardo Augusto Florêncio Mega, desenvolvido com bolsa da FAPESP (Proc. 04/15995-9). Naquela ocasião, um canal de superfície livre piloto, com uma seção de testes de apenas 600x150x190 mm (comprimento x largura x profundidade máxima), foi projetado e construído, especificamente para dar suporte a esta atividade.

Ainda que as técnicas de visualização e iluminação inicialmente empregadas fossem bastante artesanais, os resultados obtidos pelo aluno foram interessantes e promissores, motivando a equipe do LVE a elaborar e submeter um projeto de pesquisa à FAPESP (Proc. 07/07044-2), para a construção de um canal de proporções maiores, com seção de testes de 1200x200x300 mm, para dar continuidade às investigações sobre este tipo de escoamento.

Este equipamento foi inteiramente construído nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica, com a participação de técnicos, alunos de graduação, estagiários e bolsistas TT2 mantidos pela FAPESP. Depois de submetido a uma exaustiva campanha de qualificação, o equipamento foi empregado no trabalho de mestrado do aluno Eduardo Mega, defendido em fevereiro de 2009, permitindo a identificação de padrões típicos de escoamento encontrados em cavidades abertas com diferentes razões de aspecto.

Logo após a defesa da dissertação do aluno Eduardo Mega, o canal foi desmontado para que fosse efetuada a correção de alguns problemas operacionais identificados durante o funcionamento do aparato. Em particular, a redução dos níveis de vibração na seção de testes foi considerada como o principal ponto a ser atacado para melhorar a qualidade do escoamento na zona de interesse. Dentro deste contexto, a primeira fase do trabalho de dissertação aqui apresentado foi dedicada quase que exclusivamente à realização de reparos no dispositivo experimental, que incluíram, entre outras operações, a aplicação de novas camadas de fibra de vidro sobre peças já existentes, a colocação de reforços na estrutura de

sustentação do canal, a ampliação da seção de estabilização, a confecção de um novo difusor mais longo e com um ângulo de divergência inferior ao precedente, além da inclusão de mangotes e juntas elásticas em diferentes pontos da instalação, para neutralizar as vibrações oriundas do conjunto moto-bomba. Tais modificações foram introduzidas de maneira intercalada com corridas de ensaios de vibração, para que se pudesse avaliar a eficácia de cada medida adotada.

Com base no exposto, pode-se dizer que a contribuição deste trabalho apresenta duas vertentes distintas. Do ponto de vista científico, este projeto de dissertação foi concebido com o propósito de permitir a continuidade dos estudos iniciados por Eduardo Mega no LVE, abordando aspectos ainda não explorados nos ensaios por ele realizados. Do ponto de vista institucional, a execução deste trabalho resultou no aprimoramento de um dispositivo experimental de grande versatilidade, capaz de oferecer apoio a uma ampla gama de atividades do LVE.

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. MOTIVAÇÃO

O escoamento no interior de cavidades constitui um problema clássico da mecânica dos fluidos, de grande interesse científico e tecnológico, com aplicação em diferentes áreas do conhecimento humano. Na geofísica e nas ciências atmosféricas, por exemplo, este tipo de escoamento frequentemente ocorre em vales, crateras e depressões naturais. Na arquitetura e na engenharia civil, o escoamento do ar em estádios, em cortes de rodovias e em conjuntos de edifícios formando *canyons* urbanos apresenta, muitas vezes, características tipicamente encontradas do escoamento sobre cavidades. Nas aplicações da engenharia mecânica e afins, o escoamento em cavidades aparece nos campos automobilístico, naval e aeronáutico, como, por exemplo, sobre a carroceria de veículos terrestres, em cascos de embarcações ou sobre asas e fuselagens de aeronaves. A título de ilustração, as Figuras 1.1, 1.2 e 1.3 apresentam alguns exemplos práticos do escoamento em cavidades com formas e dimensões variadas.



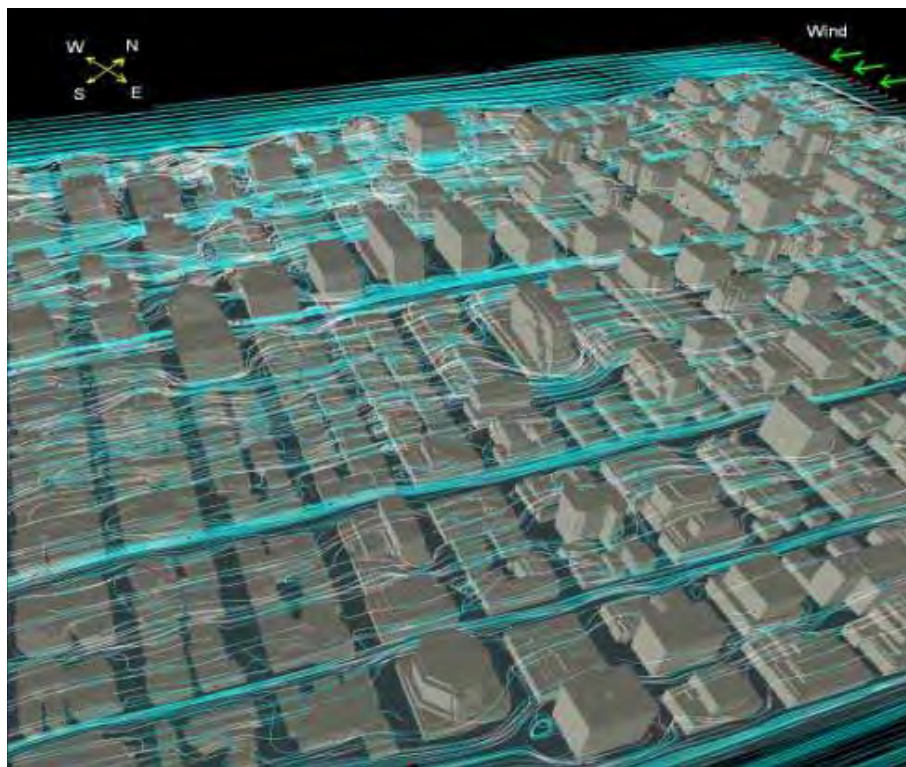
Fonte: <http://www.aereo.jor.br>

Figura 1.1 – Aeronave em voo.



Fonte: <http://www.rhconnect.com.br>

Figura 1.2 – Aneurisma cerebral.



Fonte: <http://fungsiangtai.wordpress.com>

Figura 1.3 – Canyons urbanos.

Outro exemplo particularmente interessante acontece em corridas de Fórmula *Truck*, quando um competidor entra na chamada zona de vácuo do caminhão que segue à sua frente, para tentar ultrapassá-lo. Nesta situação, ilustrada na Figura 1.4, o movimento irregular do ar no espaço entre os dois caminhões afeta principalmente o arrasto aerodinâmico e as condições de dirigibilidade dos veículos. Alterações na forma da cabine e do assoalho da carroceria podem minimizar estes inconvenientes.



Fonte: <http://autoracing.virgula.uol.com.br>

Figura 1.4 – Caminhões de competição em disputa de posição.

No presente trabalho, o escoamento incompressível em cavidades retangulares com razões de aspecto entre 0,5 e 10 é estudado experimentalmente para números de Reynolds inferiores a  $10^4$ . Visualizações de escoamento e medições de velocidade por anemometria de filme quente são efetuadas, visando a caracterização do escoamento interno e na camada cisalhante que separa os escoamentos interno e externo.

## 1.2. ASPECTOS FENOMENOLÓGICOS

A Figura 1.5 ilustra a geometria do problema, o qual é governado, ao mesmo tempo, pelo número de Reynolds ( $Re$ ) e pela razão de aspecto da cavidade ( $\zeta$ ), definidos, respectivamente, como:

$$Re = \frac{U_0 h}{\nu} \quad (1.1)$$

$$\zeta = \frac{b}{h} \quad (1.2)$$

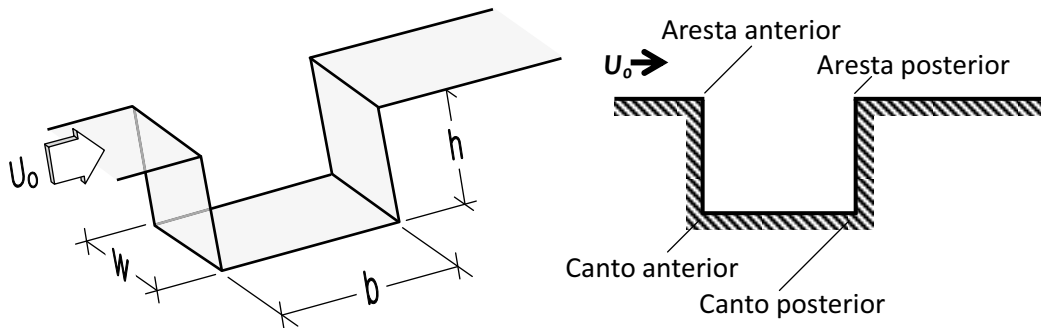


Figure 1.5 – Cavidade retangular: parâmetros geométricos e nomenclatura.

Quando o escoamento atinge a aresta anterior, a camada limite desenvolvida a montante da cavidade se descola, dando origem a fenômenos de alta complexidade e à formação de uma camada cisalhante dividindo os escoamentos interno e externo. Dependendo dos valores assumidos por  $Re$  e  $\zeta$ , a camada cisalhante pode ou não tocar o fundo da cavidade. Segundo Ashcroft e Zang (2005) e Esteve *et al.* (2000), se o recolamento não acontece, a cavidade é dita aberta. Caso contrário, ela pode ser classificada como fechada ou semiaberta. Estas três situações são indicadas na Figura 1.6.

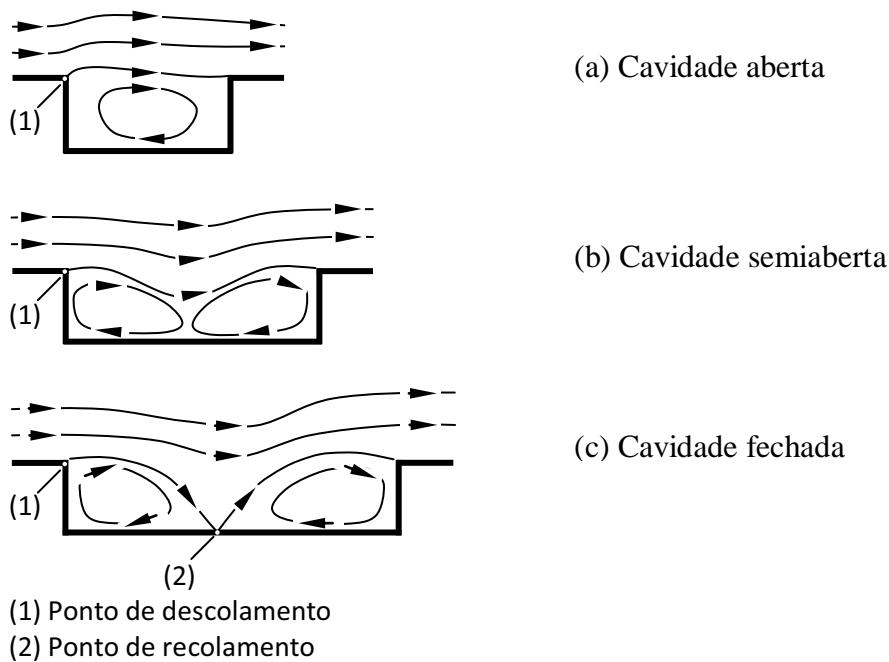


Figure 1.6 – Classificação do escoamento em cavidades.

Se os efeitos de compressibilidade são importantes, o escoamento é, quase sempre, caracterizado por intensas flutuações de velocidade e de pressão, ocasionando a geração e a propagação de ondas acústicas, responsáveis pelo aumento nos níveis de ruído de máquinas e equipamentos. Como descrito por Cannon (2003), este fenômeno decorre da interação da camada cisalhante com a aresta posterior da cavidade e a forma como isto acontece depende da razão de aspecto da cavidade. Como mostrado na Figura 1.7, em cavidades rasas, a ressonância é dominada pelos modos oscilatórios longitudinais, enquanto em cavidades profundas prevalecem os modos transversais.

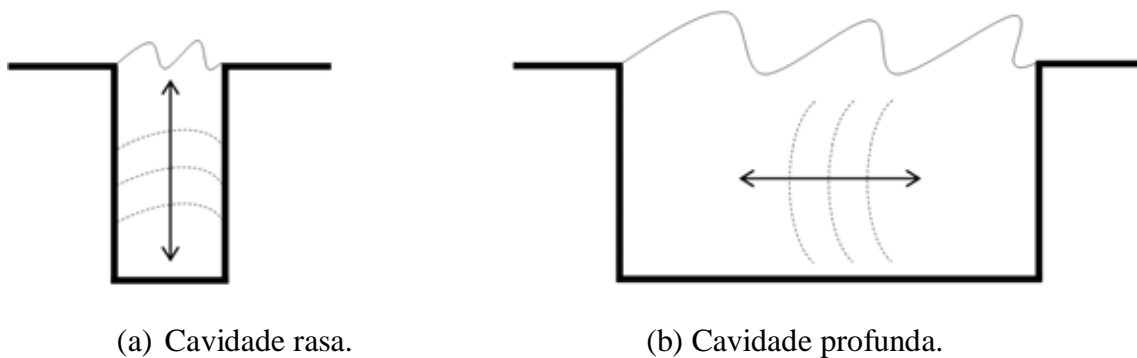


Figura 1.7 – Escoamento ressonante em cavidade rasa e profunda. Cannon (2003).

No caso de escoamentos incompressíveis, o movimento do fluido não é menos complexo. Como ilustrado na Figura 1.8, da mesma forma que no caso compressível, o escoamento também é caracterizado pela presença de estruturas turbilhonares de diferentes formas e dimensões, que interagem continuamente entre si e com as paredes da cavidade. O perfil inflexional de velocidade na região da camada cisalhante favorece o desprendimento periódico de instabilidades do tipo Kelvin-Helmholtz, que são geradas na aresta anterior e advectadas em direção à aresta posterior, onde se chocam com a superfície sólida. Como discutido por Rockwell e Naudascher (1979), após o choque, três situações podem ocorrer, como mostra a Figura 1.9. Na primeira delas, a estrutura turbilhonar penetra quase que inteiramente na cavidade, modificando substancialmente o escoamento interno. Na segunda, a penetração é apenas parcial, ou seja, uma parcela deste núcleo de vorticidade invade a cavidade, enquanto outra porção segue seu caminho no leito externo. Na terceira possibilidade, a estrutura turbilhonar sofre apenas um desvio, perturbando o escoamento interno, mas sem penetração expressiva na cavidade.

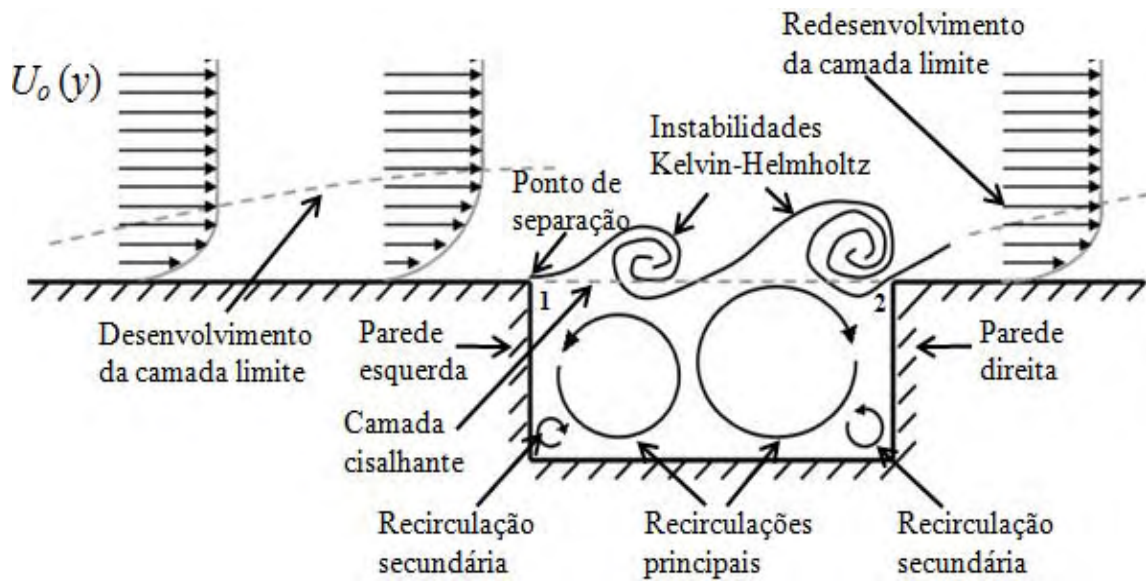
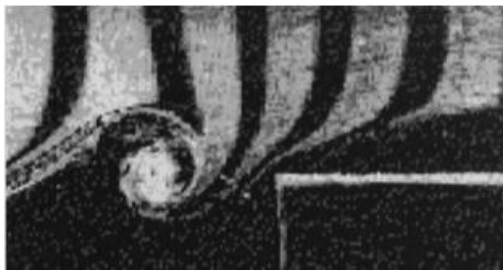
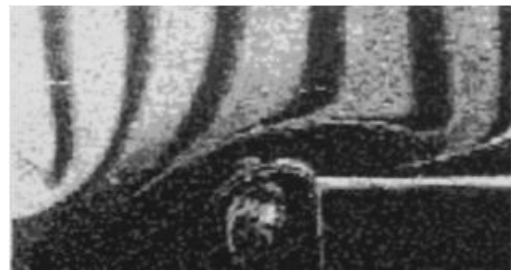


Figura 1.8 – Fenomenologia do escoamento em cavidade retangular. Mega (2009).



(a) Aproximação.



(b) Penetração completa.



(c) Penetração parcial.



(d) Escape.

Figura 1.9 – Fenomenologia do escoamento em cavidade retangular. Rockwell e Naudascher (1979).

Com relação à estrutura do escoamento no interior da cavidade, grandes recirculações ocupam a região central, ao mesmo tempo em que vórtices secundários aparecem estacionários junto aos dois cantos inferiores. Com o aumento do número de Reynolds, ocorre a tridimensionalização do escoamento e a formação dos chamados

vórtices do tipo Taylor-Görtler. Estas estruturas longitudinais contrarrotativas, se justapõem na direção da envergadura da cavidade e desempenham um papel importante no processo de transição à turbulência.

### **1.3. OBJETIVOS**

Embora já tenha sido objeto de um grande número de investigações numéricas e experimentais, o escoamento em cavidades retangulares apresenta, ainda hoje, vários aspectos que merecem ser exploradas com atenção. Dentre eles se destacam os mecanismos de produção e desprendimento de instabilidades hidrodinâmicas na camada cisalhante, responsáveis por flutuações de pressão que induzem a geração de ruído. Nota-se, também, que, apesar da simplicidade geométrica do problema, a dinâmica deste tipo de escoamento é bastante complexa, tornando-o um desafio interessante para a simulação numérica por programas de CFD. Diante disso, os objetivos principais desta dissertação podem ser assim explicitados:

- a) Ampliar os resultados obtidos por Mega (2009), refinando o estudo dos padrões de escoamento em cavidades com razões de aspecto ( $\zeta$ ) entre 0,5 e 10 e números de Reynolds inferiores a  $10^4$ ;
- b) Estudar o comportamento periódico da camada cisalhante que separa os escoamentos interno e externo à cavidade;
- c) Obter dados que possam ser empregados na validação de programas de simulação numérica.

# Capítulo 2

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um levantamento da literatura mostra que o escoamento em cavidades tem sido investigado por vários pesquisadores há mais de meio século. Entretanto, a maioria dos trabalhos sobre o assunto está direcionada ao estudo de escoamentos compressíveis, visando, principalmente, o controle de instabilidades ressonantes e a supressão de ruídos induzidos por oscilações de pressão. Colonius *et al.* (1999a,b), Henderson *et al.* (2001), Ludovic *et al.* (2002), Gloerfelt *et al.* (2002), Gloerfelt *et al.* (2003a,b), Hamed *et al.* (2003), Samimy *et al.* (2003) e Rowley e Williams (2006) entre outros, são apenas alguns exemplos de investigações realizadas dentro deste contexto.

Por outro lado, trabalhos envolvendo a análise do escoamento incompressível em cavidades são bem menos frequentes. Alguns dos principais artigos considerando este enfoque são citados e comentados na sequência deste capítulo, uma vez que o principal interesse desta pesquisa se concentra nesta forma de abordagem.

Um dos principais estudos de escoamento em cavidades foi desenvolvido por Sarohia (1977), tornando-se referência para muitos trabalhos posteriores. Seu experimento foi conduzido em um túnel aerodinâmico, com números de Reynolds moderados. Visualizações do escoamento foram feitas por injeção de fumaça e os perfis de velocidade foram obtidos por anemometria de fio quente. Investigando a camada cisalhante, o autor constatou que, dependendo do comprimento da cavidade e da velocidade da corrente livre, oscilações poderiam ou não ocorrer a jusante do ponto de separação. Nos casos com oscilações, instabilidades hidrodinâmicas são geradas na aresta anterior, se propagam e se amplificam ao longo da cavidade e, próximo à aresta posterior induzem uma ejeção periódica de vórtices, que ocorre na mesma frequência de oscilação da camada cisalhante.

Num excelente trabalho experimental, Sinha *et al.* (1982) ofereceram uma importante contribuição para o entendimento do escoamento laminar em cavidades. Usando fumaça como agente de visualização, os autores identificaram, em um túnel

aerodinâmico de baixa velocidade, as características topológicas do escoamento em oito cavidades distintas, com razões de aspecto variando de 0,035 a 2,5 e para números de Reynolds de 662, 1342 e 2648. A distribuição de pressão ao longo das paredes das cavidades também foi obtida. Perfis médios de velocidade, em diferentes seções do escoamento, foram determinados com o auxílio de um anemômetro de fio quente. Ainda que a confiabilidade de medições de velocidade em regiões parietais com sondas de fio quente não possa ser assegurada, os resultados quantitativos de Sinha *et al.* (1982) têm sido empregados por vários autores na validação de códigos numéricos.

Em um trabalho experimental, Esteve *et al.* (2000) estudaram o escoamento em cavidades retangulares com razão de aspecto igual a 10, para dois valores do número de Reynolds, 38000 e 64000. Para as condições em que foram realizados os testes, os autores não observaram recolamento da camada cisalhante sobre o piso da cavidade.

Ashcroft e Zhang (2005) investigaram, em um túnel de vento, a dinâmica e a estrutura do escoamento em cavidades retangulares com razão de aspecto 3 e 4, percorridas por um escoamento turbulento com números de Reynolds de 110000, 130000 e 140000, calculados com base na profundidade da cavidade ( $h$ ). Os autores estudaram a dinâmica e as estruturas do escoamento turbulento na camada cisalhante e o efeito que a geometria da cavidade e a velocidade de escoamento produzem sobre essas estruturas. Neste estudo, observou-se a existência de três regiões distintas ao longo da abertura da cavidade. Na primeira delas, localizada próxima à aresta anterior, o crescimento transversal da camada cisalhante é exponencial. Na região seguinte, este crescimento se torna linear e, na última região, próxima à aresta posterior, o crescimento é praticamente nulo.

Taneda (1979) desenvolveu estudos voltados para a compreensão de diferentes tipos de escoamento a números de Reynolds extremamente baixos. Experimentos de visualização foram conduzidos em um tanque de glicerina, utilizando pó de alumínio como traçador sólido, iluminado por folha de luz. Cavidades com razões de aspecto iguais a  $1/2$ , 1, 2 e 3 foram ensaiadas para número de Reynolds em torno de 0,01, mostrando que os pontos de separação e de recolamento da camada limite ocorrem sobre as paredes verticais das cavidades e sobre as arestas. O trabalho de Taneda (1979) comprovou os resultados de Takematsu (1966), que utilizou a aproximação de Stokes para resolver analiticamente as equações do movimento.

Utilizando as condições de contorno impostas por Taneda (1979), Shen e Floryan (1985) realizaram uma investigação numérica bidimensional, obtendo

resultados similares. Neste trabalho, além de mostrar a estabilidade do escoamento, os autores observaram que o ponto de separação da camada limite se aproxima da aresta anterior, na medida em que diminui a razão de aspecto da cavidade. Os resultados revelaram, ainda, que, independentemente da razão de aspecto, pequenas zonas de recirculação se fazem presentes junto aos cantos inferiores das cavidades. Tais resultados estão em absoluta consonância com o descrito por Moffat (1964).

Com o objetivo de estudar o escoamento em cavidades com razão de aspecto iguais a  $1/2$ , 1, 2 e números de Reynolds de 1000, 2648 e 5000, Mega (2009) realizou uma extensa campanha experimental, associando visualizações de escoamento e medições experimentais realizadas em um canal de superfície livre. As visualizações foram feitas com o auxílio de duas técnicas distintas: a injeção de corante líquido e a sementeira de partículas sólidas iluminadas por folha de luz. Sinais de velocidade local e variáveis turbulentas foram obtidos por uma sonda acústica ADV. Além de identificar interessantes aspectos topológicos do escoamento interno às cavidades, o autor observou a formação de instabilidades do tipo Kelvin-Helmholtz no topo da cavidade, geradas pelo perfil inflexional de velocidade presente naquela região. O autor observou, também, a presença dos vórtices de Moffat nos cantos inferiores da cavidade, e de outras estruturas turbilhonares secundárias que aparecem em outros pontos da cavidade.

Em um trabalho experimental, Faure *et al.* (2007) investigaram o escoamento no interior da cavidade para números de Reynolds na faixa entre 1150 e 10670 e razões de aspecto de  $1/2$  até 2. Visualizações do escoamento foram feitas em três planos mutuamente perpendiculares, a fim de explorar os mecanismos responsáveis pela tridimensionalização do escoamento pela transição à turbulência. Imagens obtidas através de um corte vertical na direção do escoamento mostraram que as instabilidades de Kelvin-Helmoltz, ao se chocarem com a aresta posterior da cavidade, alimentam a grande recirculação interna que se mantém estacionária próxima a esta aresta, atribuindo-lhe o aspecto de uma planetária. Os cortes transversais, por sua vez, mostraram a presença de vórtices do tipo Taylor-Görtler (TGL). Estes dois mecanismos já haviam sido identificados nas simulações numéricas tridimensionais apresentadas na dissertação de Frigo (2004).

Kim *et al.* (2001), interessados em aplicações relacionadas à dispersão de poluentes em *canyons* urbanos, investigaram numericamente o escoamento bidimensional ao redor de obstáculos formados por combinações de montanha e edifícios dispostos em linha (*tandem*). Usando um programa baseado no método dos

volumes finitos, cálculos bidimensionais de escoamentos foram realizados, com o auxílio de um modelo do tipo  $k-\varepsilon$  para o fechamento das equações médias de Reynolds. Os resultados obtidos para dois edifícios em linha formando uma cavidade retangular, demonstraram que, com o aumento da altura dos edifícios, diminui a concentração de poluentes no espaço entre os prédios. Neste caso, porém, as recirculações se tornam cada vez maiores, além de formarem outra recirculação a montante do primeiro prédio, modificando os esforços que atuam sobre esta edificação. Os resultados mostram, ainda, que, em frente ao primeiro edifício e sobre a região da cavidade, o nível médio de poluição pode se tornar mais elevado que nas demais regiões. Além disso, os autores observaram, também, que a concentração média de poluentes entre os prédios decresce com o aumento da altura dos edifícios.

Com o propósito de investigar o escoamento sobre uma placa de coletor solar, Zdanski (2001) simulou numericamente o escoamento incompressível ao longo de cavidades com razões de aspecto de 6 a 28 e números de Reynolds iguais a 147 e 662, na faixa laminar, e 11765 a 28235, em regimes turbulentos. O trabalho foi conduzido para identificar condições de operação capazes de minimizar os efeitos convectivos ao longo do piso da cavidade. Os resultados obtidos mostraram que, tanto no regime laminar como no turbulento, não é necessário que se tenha uma única bolha de recirculação no interior da cavidade para que o escoamento reverso se estabeleça sobre todo o comprimento da parede inferior. O autor observou também que, no regime turbulento, o escoamento pode apresentar um ponto de recolamento no piso da cavidade.

Visando um controle da chamada oscilação autossustentável, Yoshida *et al.* (2006) desenvolveram um estudo numérico do escoamento em cavidade aberta. Para isto, as equações de Navier-Stokes incompressíveis foram resolvidas com o auxílio do método das diferenças finitas. O número de Reynolds utilizado foi de 6000 e a razão de aspecto igual a 2. Os autores perceberam que as oscilações autossustentáveis podem ser controladas empregando-se uma parede móvel no fundo da cavidade. Os resultados obtidos mostraram que o movimento da parede, tanto em velocidades positivas como negativas, modifica as características do escoamento recirculante interno, alterando, assim, as oscilações na camada cisalhante. Este estudo revelou também que, para velocidades positivas 19% maiores do que as velocidades da corrente livre, duas recirculações estacionárias se fazem presentes no interior da cavidade, uma na parte superior e a outra na metade inferior da cavidade, suprimindo as oscilações

autossustentáveis. Além disso, quando a velocidade da parede do fundo é negativa, inferior a 10% da velocidade da corrente livre, não ocorrem perturbações a montante da cavidade, pois as duas recirculações contrarotativas internas se fundem, ocupando toda a extensão da cavidade, suprimindo as oscilações da camada cisalhante.

Muitos outros trabalhos sobre o escoamento incompressível em cavidades podem ser encontrados na literatura, enfocando diferentes aspectos deste tema. Uma rápida consulta a bases de dados informatizadas permite observar que, ao longo das últimas décadas, houve um aumento considerável na quantidade de trabalhos numéricos enfocando este assunto. Por outro lado, a maioria dos trabalhos experimentais sobre o tema está concentrada no estudo de escoamentos a números de Reynolds razoavelmente elevados. É nítida a escassez de artigos experimentais dedicados à investigação de escoamentos para números de Reynolds compreendidos entre 1000 e 10000. A disponibilidade de dados nesta faixa, entretanto, é de fundamental importância para a validação de programas de simulação numérica. É justamente dentro desta banda do número de Reynolds que se posiciona a presente investigação.

# Capítulo 3

## DISPOSITIVO E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### 3.1. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Geralmente, um canal de água é projetado para fornecer, na entrada da seção de testes, um perfil de velocidades com razoável uniformidade e baixa intensidade turbulenta, em toda a faixa coberta pelo seu envelope operacional. Em ambos os quesitos, o desempenho de túneis hidrodinâmicos e aerodinâmicos costuma ser superior ao apresentado pelos canais de água. Por outro lado, a seção de testes aberta dos canais de água facilita bastante a montagem de experimentos e a instalação de sondas e instrumentos, o que representa uma grande vantagem em relação aos túneis hidrodinâmicos, que operam com o mesmo fluido de trabalho. Em relação aos túneis aerodinâmicos, a vantagem dos canais de água está na sua maior adaptabilidade à realização de ensaios de visualização de escoamentos, quase sempre mais fáceis de serem implementados em meio líquido do que em meio gasoso.

A presente campanha experimental foi totalmente conduzida no canal de superfície livre com recirculação de água mostrado na Figura 3.1. Este dispositivo é composto de diversos elementos interligados, cada um dos quais com uma finalidade específica. Seu funcionamento é relativamente simples, podendo ser descrito da maneira como segue.

O sistema de propulsão (PR) retira água do reservatório de descarga (RD), impelindo-a até o difusor (DF), instalado na tubulação de recalque, a jusante da válvula controladora de vazão (VA). Seguindo seu trajeto, o fluido é conduzido à seção de estabilização (SE), onde passa por grades, colmeias e telas (TC). Ao atravessar a contração (CT), o fluido é acelerado para entrar na seção de testes (ST), de onde é reconduzido ao reservatório de descarga (RD), fechando o ciclo. Em termos

construtivos, o difusor, a seção de estabilização, a contração e o reservatório de descarga foram confeccionados em material composto de fibra de vidro e resina de poliéster, com reforços internos de aço carbono. Durante o desenvolvimento deste trabalho, o difusor e a seção de estabilização foram reprojatadas e reconstruídas, como parte das operações de reparo e adaptação do aparato experimental para reduzir os níveis de vibração na seção de testes. Os ensaios de qualificação do canal em termos de seu comportamento vibratório são abordados no Apêndice A. Na sequência, as principais peças que compõem o canal de superfície livre, apresentadas individualmente na Figura 3.2, são descritas e comentadas.

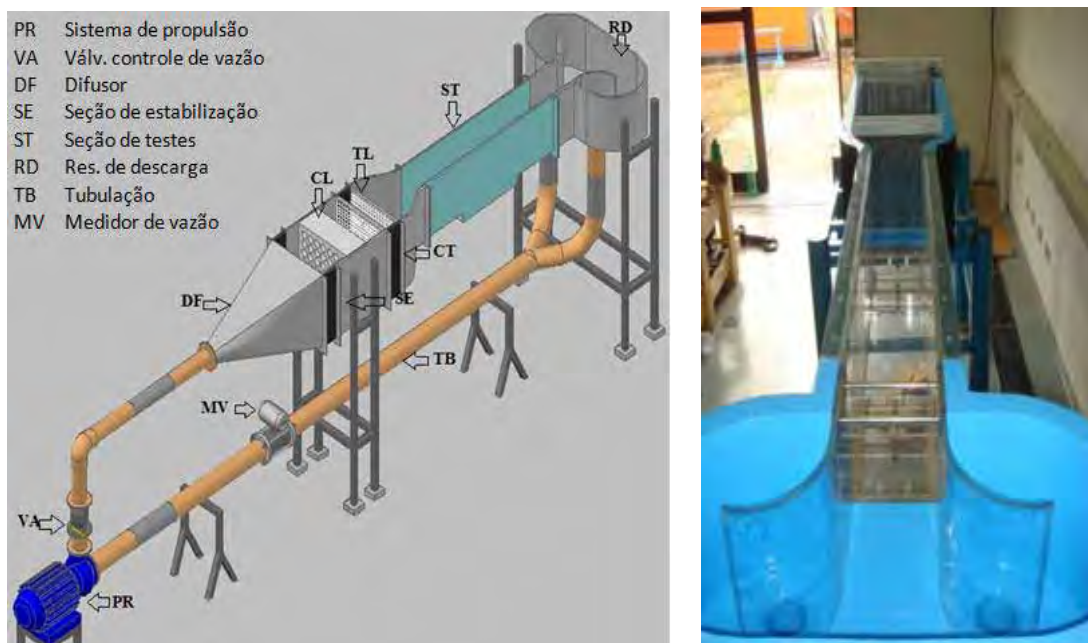


Figura 3.1 – Canal de superfície livre com recirculação de água.

#### a) Sistema propulsor (PR)

Responsável pela movimentação do fluido em circuito fechado, o sistema de propulsão mostrado na Figura 3.2(a) é composto por uma bomba centrífuga marca KSB, modelo Megachem 32-200, fabricada em aço inox, com rotor de 209 mm de diâmetro, acionada por um motor elétrico de 3 hp, com rotação nominal de 1750 rpm.

#### b) Válvula reguladora de vazão (VA)

O controle da vazão é efetuada por uma válvula de esfera manual com 3” de diâmetro nominal, Figura 3.2(b), na saída do sistema de propulsão.

### c) Difusor (DF)

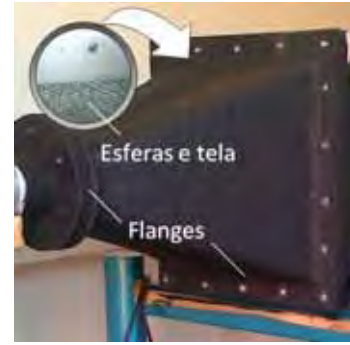
O difusor mostrado na Figura 3.2(c) é responsável pela transição entre a tubulação de recalque e a seção de estabilização do aparato. Com a finalidade adicional de pré-homogeneizar o escoamento, este elemento é inteiramente preenchido com esferas de plástico de 18 mm retidas por telas em suas duas extremidades.



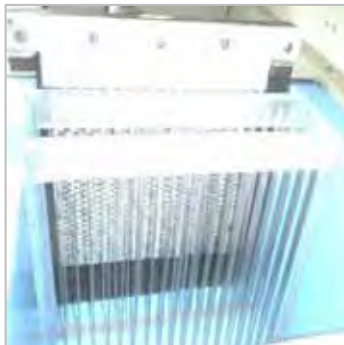
(a) Sistema de Propulsão.



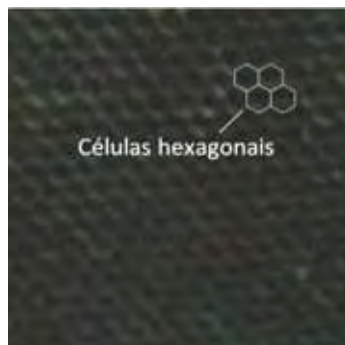
(b) Controle de vazão.



(c) Difusor.



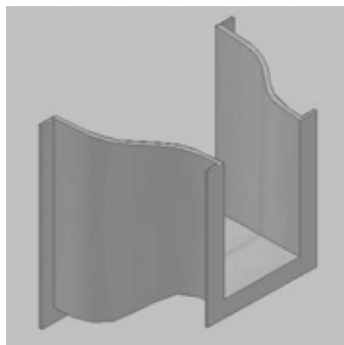
(d) Grade vertical.



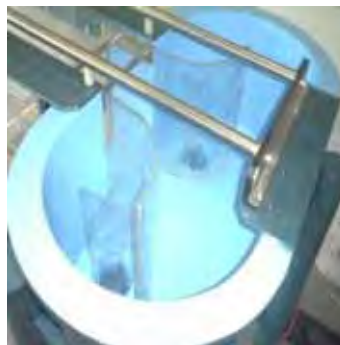
(e) Colmeia hexagonal.



(f) Telas de inox.



(g) Contração.



(h) Reserv. de descarga.



(i) Conexão.

Figura 3.2 – Componentes do canal de superfície livre.

### d) Seção de estabilização (SE)

A seção de estabilização tem a função de condicionar o escoamento, eliminando grandes estruturas turbilhonares e corrigindo distorções no perfil de velocidade. Seu

projeto adequado é, portanto, fundamental para que o escoamento chegue à seção de testes apresentando boa uniformidade no perfil de velocidades e, ao mesmo tempo, intensidade turbulenta relativamente baixa. Esta última variável é calculada como discutido no Apêndice B. Para evitar a propagação de vibrações provenientes do sistema de propulsão, uma junta de borracha faz a conexão entre o difusor e a seção de estabilização. No interior deste elemento, são dispostos duas grades metálicas verticais separadas por uma distância de 75 mm, Figura 3.2(d), uma colmeia de alumínio com 140 mm de espessura e células hexagonais com dimensão característica média de 7 mm, Figura 3.2(e), e duas telas de aço inox distantes 90 mm uma da outra, com malha de aproximadamente 0,6 mm e fios de 0,25 mm, Figura 3.2(f). Outros arranjos foram testados, mas, como mostram os dados apresentados no Apêndice C, esta foi a configuração que produziu os melhores resultados.

#### e) Contração (CT)

A contração é o elemento de união entre as seções de estabilização e de testes e tem por finalidade acelerar o escoamento, sem deteriorar a qualidade do perfil de velocidades. Como representado na Figura 3.2(g), o canal de água utilizado neste trabalho é equipado com uma contração tridimensional, com razão de contração 3:2, quando o nível da água dentro da seção de testes é mantido em 200 mm. Como apresentado em detalhes por MEGA (2009), seu traçado obedece a uma equação do 3º grau, com derivadas nulas nas extremidades e ponto de inflexão na metade de seu comprimento.

#### f) Reservatório de descarga (RD)

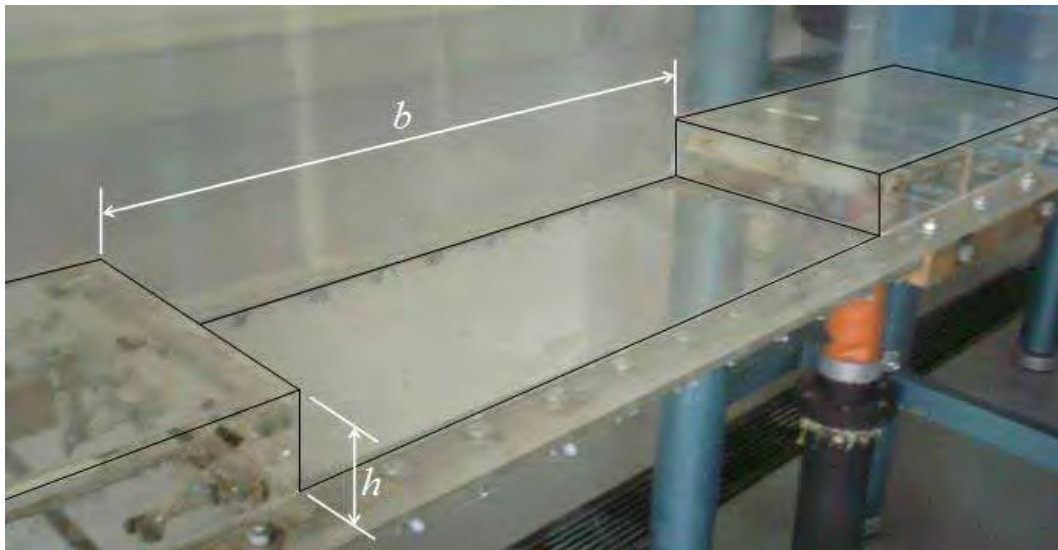
Responsável por receber o escoamento vindo da seção de testes e conduzi-lo até a tubulação que alimenta o sistema propulsor, o reservatório de descarga mostrado na Figura 3.2(h) apresenta duas saídas de 3" posicionadas simetricamente em relação ao eixo longitudinal da seção de testes.

#### g) Tubulação (TB)

Uma tubulação de 3" leva o fluido de trabalho do reservatório de descarga até a entrada da bomba centrífuga que compõe o sistema propulsor. A conexão entre as saídas do reservatório e a tubulação, propriamente dita, é feita com o auxílio de um isolador flexível e um acessório em Y, mostrados na Figura 3.2(i), ambos fabricados no âmbito deste trabalho e incorporados ao aparato para melhorar seu desempenho hidrodinâmico, diminuindo as vibrações induzidas pelo escoamento.

#### h) Seção de testes (ST)

A Figura 3.3 mostra a seção de testes empregada nos presentes ensaios experimentais, medindo 1200 mm de comprimento, 200 mm de largura e 300 mm de altura total, embora, em todos os ensaios tenha se usado uma lâmina d'água com 200 mm de altura. Para permitir bom acesso visual ao escoamento, esta seção foi totalmente confeccionada em acrílico transparente de boa qualidade ótica. Como representado na Figura 3.3(a), na parede inferior da seção de testes a 350 mm da entrada, existe uma cavidade de dimensões fixas com  $b = 500$  mm e  $h = 50$  mm, permitindo o ensaio de cavidades com razão de aspecto  $\zeta = 10$ . Cavidades com razões de aspecto inferiores a esta podem ser ensaiadas introduzindo-se adaptadores intercambiáveis, como aquele mostrado na Figura 3.3(b).



(a) Sem adaptador.



(b) Com adaptador.

Figura 3.3 – Seção de testes.

## 3.2. INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

### a) Velocidade média na entrada da seção de testes

O canal de água é equipado com um medidor de vazão eletromagnético, marca Yokogawa, modelo ADMAG AE208MG, instalado na tubulação de sucção, próximo à entrada da bomba centrífuga. A velocidade média do escoamento livre à montante da cavidade é obtida dividindo-se a vazão medida por este instrumento pela área transversal da seção, dada pelo produto da largura do canal e a altura da lâmina d'água. A partir do valor assim obtido, pode-se determinar o número de Reynolds. Este instrumento é mostrado na Figura 3.4.



Figura 3.4 – Medidor de vazão eletromagnético Yokogawa, modelo ADMAG AE208MG.

### b) Velocidade local

Séries temporais de velocidade local no interior da seção de testes foram realizadas utilizando-se um anemômetro de fio/filme quente CTA (*Constant Temperature Anemometer*), marca Dantec, modelo Streamline 90N10, apresentado na Figura 3.5. Esse tipo de instrumento é particularmente adequado para aplicação em laboratórios de dinâmica dos fluidos e turbulência, sendo capaz de realizar medições com alta resolução espacial e temporal, podendo ser usado no escoamento de líquidos e gases.

Como descrito por Carvalho (2003), seu princípio de funcionamento é baseado na transferência de calor por convecção entre um pequeno elemento metálico aquecido eletricamente e o fluido circundante.



Figura 3.5 – Anemômetro de fio/filme quente Dantec, modelo Streamline 90N10.

De modo geral, um anemômetro do tipo CTA é composto por duas partes fundamentais, as quais podem ser identificadas na Figura 3.6. A primeira delas é composta por uma sonda com seus cabos de ligação e respectivo suporte. Essa sonda possui um elemento sensor, que pode ser um fio ou filme de tungstênio, níquel ou platina, com cerca de 3 mm de comprimento e alguns microns de espessura. A segunda parte é formada pelo circuito controlador, ou seja, um circuito eletrônico composto por uma ponte de Wheatstone, sendo a sonda de fio/filme quente um dos resistores da ponte. Quando exposto a variações na velocidade do fluido à sua volta, o sensor tende a se aquecer ou resfriar, dependendo da direção em que se dá a alteração de velocidade. Com isso, sua resistência elétrica se altera, causando o desbalanceamento da ponte. Isso faz com que o controlador do circuito seja imediatamente acionado, para restituir a temperatura inicialmente ajustada do elemento sensor e reestabelecer o equilíbrio da ponte. Então, 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 a conversão do sinal elétrico em velocidade, mediante um processo de calibração. Vale ressaltar que, nos casos em que se deseja obter apenas a frequência de oscilação do sinal de velocidade, o processo de calibração pode ser dispensado.

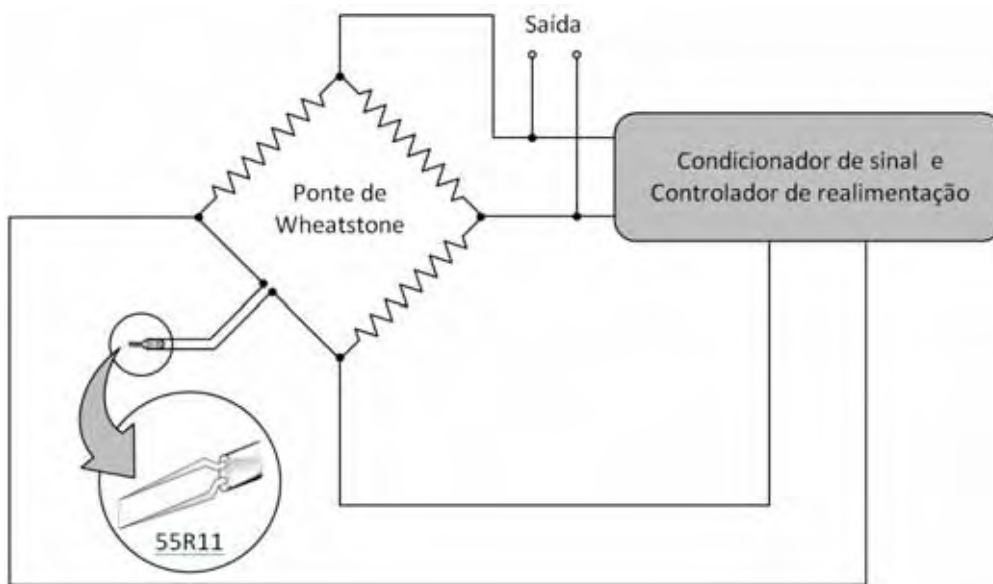


Figura 3.6 – Esquema funcional de um anemômetro de fio/filme quente do tipo CTA.

No presente trabalho, uma sonda de filme quente Dantec 55R11 foi empregada na aquisição dos sinais de velocidade, acoplada a um suporte de sonda reto 55H21.

### 3.3. VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS

#### 3.3.1. Visualização em meio líquido

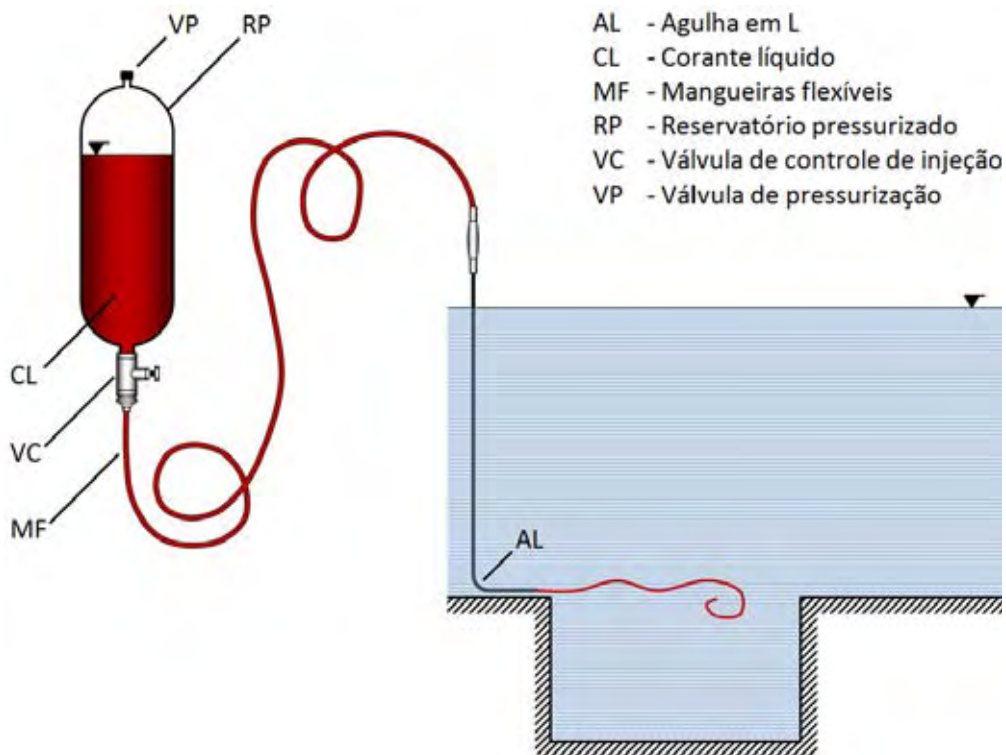
A visualização de escoamentos é uma ferramenta importante para o entendimento dos mecanismos associados ao movimento dos fluidos. Em última análise, a técnica consiste em transformar propriedades ou grandezas físicas de um escoamento em imagens. Na literatura, várias técnicas de visualização de escoamento em meio hidrodinâmico podem ser encontradas. Três dessas técnicas – injeção de corantes líquidos, semeadura de partículas sólidas e geração de bolhas de hidrogênio – foram exaustivamente empregadas no decorrer deste trabalho, as quais são descritas a seguir.

##### a) Injeção de corantes

Devido ao seu baixo custo e facilidade de implementação, esta técnica é uma das mais utilizadas em túneis hidrodinâmicos e canais de água. Para a visualização do escoamento em cavidades, a injeção de corante tanto pode ser feita através de agulhas posicionadas a montante da região de observação ou, alternativamente, através de

orifícios posicionados nas paredes da própria seção de testes. Em ambos os casos, a injeção deve ser feita com máximo cuidado possível, a fim de evitar que perturbações indesejáveis sejam introduzidas no escoamento. Assim, para que o filamento de corante se mantenha nítido e estável, a pressão e a velocidade de injeção devem ser mantidas o mais próximo possível daquelas encontradas no escoamento.

Como mostram as Figura 3.7(a) e (b), o sistema de injeção empregado neste trabalho é constituído, basicamente, por um reservatório pressurizado, ligado, por



(a) Representação esquemática.



(b) Vista de conjunto.



(c) Orifícios parietais.

Figura 3.7 – Sistema de injeção de corante.

intermédio de uma mangueira flexível, a uma longa agulha dobrada em L. Uma válvula manual do tipo agulha controla a injeção de corante. A Figura 3.7(c) permite observar pequenos orifícios existentes na parede inferior da seção de testes, que podem servir como pontos de tomada de pressão ou de injeção de corante. A injeção parietal, entretanto, não foi empregada na presente campanha experimental.

Os mais variados tipos de líquidos podem ser empregados como traçador, incluindo leite, corantes alimentícios, e soluções aquosas de permanganato de potássio ou azul de metileno. Neste trabalho, utilizou-se uma mistura de água, álcool etílico e corante à base de PVA foi empregado.

## b) Traçadores sólidos

Como discutido por Mega (2009), a utilização de traçadores sólidos teve grande avanço nos anos 1980, devido, principalmente, à disseminação da técnica de velocimetria por imagem de partículas (PIV), que, segundo Vieira (1997), emprega partículas com diâmetro inferior a 50  $\mu\text{m}$ . A técnica, entretanto, é bem mais antiga e tem sido extensamente utilizada, proporcionando grande contribuição ao estudo da mecânica dos fluidos.

De acordo com Winter *et al.* (1956), os traçadores sólidos mais utilizados são o pó de alumino, o pó de serra tratado, o minério de ferro e a baquelite. A boa implementação da técnica, contudo, pressupõe a utilização de traçadores cuja densidade não seja muito distante daquela apresentada pelo fluido de trabalho. Se este cuidado não for tomado, as partículas podem não se movimentar como um escalar passivo, distorcendo a observação do movimento do fluido. Alguns polímeros, como o polietileno, o poliestireno e o polisobutileno, são bons traçadores sólidos, quando apresentados na forma de pequenas partículas esféricas.

Neste trabalho, foram utilizadas partículas de Pliolite, um copolímero acrílico desenvolvido pela Goodyear, com dimensões características da ordem de 100-125  $\mu\text{m}$ . Tais partículas, além de possuírem densidade próxima à da água, apresentam alto poder de reflexão, adequando-se perfeitamente à técnica de visualização.

## c) Traçadores gasosos

Pequenas bolhas de gás dispersas no fluido de trabalho podem constituir um excelente traçador para a visualização de escoamentos. Dentre os diferentes métodos de visualização que empregam traçadores gasosos, destaca-se a técnica de geração de bolhas

de hidrogênio, que teve início durante a década de 1950 e foi empregada ou aprimorada por diversos autores, dentre os quais se destacam Clutter e Smith (1961), Criminale Jr. e Nowell (1965), Schraub *et al.* (1965), Davis e Fox (1967) e Merzkirch (1987).

Bolhas de hidrogênio podem ser geradas introduzindo-se, a montante da região de observação, um fio metálico ligado a um circuito elétrico de corrente contínua, de maneira a exercer o papel de cátodo (eletrodo negativo). O ânodo (eletrodo positivo) pode ser facilmente obtido posicionando-se um objeto metálico a jusante da zona de observação. Se a distância entre o cátodo e o ânodo não for demasiadamente grande e a tensão elétrica aplicada entre eles for suficiente, ocorrerá a hidrólise da água, com a formação de bolhas de hidrogênio no cátodo e de oxigênio no ânodo.

Segundo Merzkirch (1987), o tamanho das bolhas de hidrogênio pode ser considerado da ordem de grandeza do diâmetro do fio empregado, embora a condutividade elétrica do fluido, a velocidade do escoamento e a intensidade da corrente elétrica também interfiram sobre este parâmetro. Evidentemente, o empuxo faz com que as bolhas tendam a subir, com velocidade de ascensão proporcional ao diâmetro. Assim, as bolhas produzidas devem ser suficientemente pequenas, a fim de restringir a distorção das linhas de emissão a níveis aceitáveis. Para isto, o fio de cátodo deve ser tão fino quanto possível, de forma a produzir bolhas com pequeno diâmetro.

No presente trabalho, os ensaios com bolhas de hidrogênio foram realizados utilizando-se a montagem experimental apresentada na Figura 3.8. No ânodo, são geradas bolhas de oxigênio, bem menores em número e muito maiores em tamanho que as bolhas de hidrogênio e, por isso, não se prestam à visualização de escoamentos. Desta forma, pode-se usar, como ânodo, uma peça metálica de dimensões razoavelmente grandes, como a mostrada na Figura 3.8(d). Como cátodo, utilizaram-se fios de tungstênio de 25  $\mu\text{m}$  e de 75  $\mu\text{m}$  de diâmetro, fixados a uma das hastes em forma de garfo mostradas na Figura 3.8(e), a qual, por sua vez, é presa ao suporte da Figura 3.8(f). Este fio é conectado à fonte de corrente contínua mostrada na Figura 3.8(a), que permite regular a tensão ou a corrente elétrica que percorre o fio, causando a hidrólise da água e a formação das bolhas de hidrogênio no cátodo.

É interessante observar que este tipo de traçador possui uma baixa refletividade, exigindo alguns cuidados para a obtenção de imagens de boa qualidade, como a utilização de um fundo contrastante e um sistema de iluminação adequado.

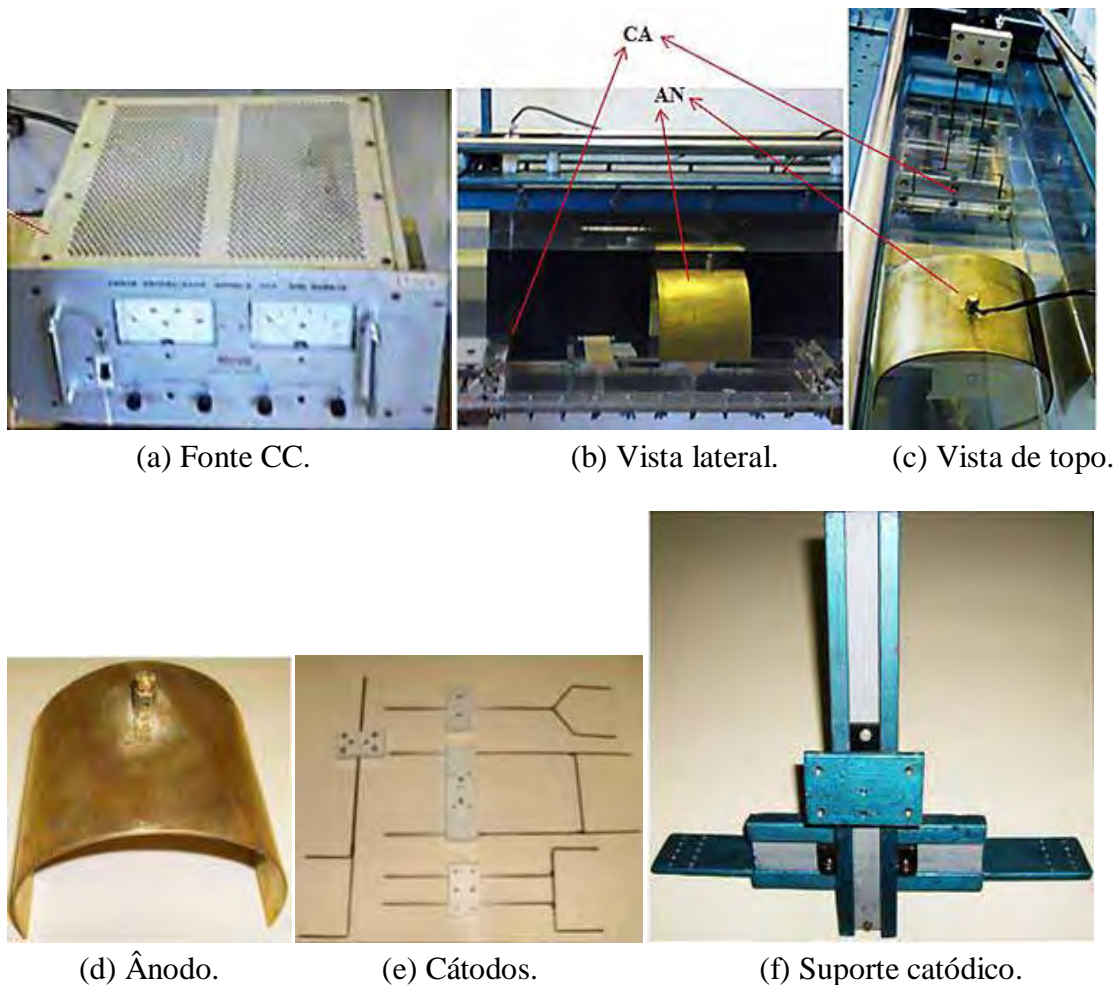


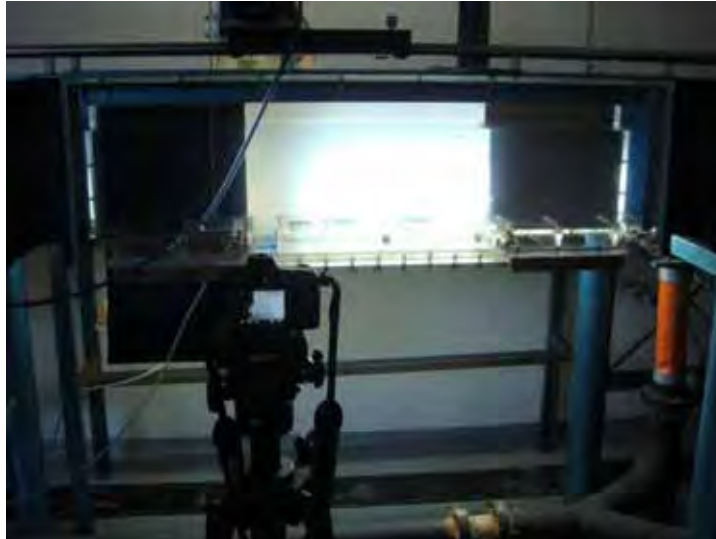
Figura 3.8 – Sistema de geração de bolhas de hidrogênio.

### 3.3.2. Iluminação

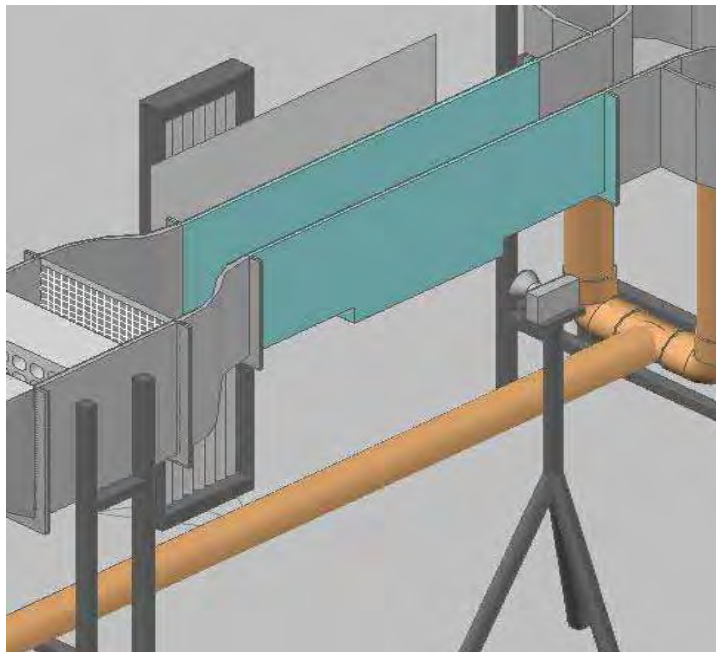
É bem sabido que sem uma iluminação adequada não se pode capturar imagens de boa qualidade. Assim, para cada técnica de visualização empregada, necessita-se de um tipo de iluminação específica, como abordado a seguir.

#### a) Corantes líquidos

Em todas as visualizações realizadas com corante líquido, empregou-se uma iluminação difusa e em contraluz, feita com o auxílio de um arranjo de oito lâmpadas fluorescente de 40W cada uma. Como mostrado na Figura 3.9, um anteparo translúcido foi posicionado entre a face posterior da secção de teste e a fonte luminosa. A câmera fotográfica, por sua vez, foi cuidadosamente posicionada em frente à face anterior da secção de teste, com o foco ajustado manualmente.



(a) Montagem experimental.



(b) Representação esquemática.

Figura 3.9 – Iluminação difusa, em contraluz.

#### b) Traçadores sólidos e gasosos

Nos ensaios de visualização com partículas sólidas e bolhas de hidrogênio empregou-se uma iluminação por folha de luz, realizada com o auxílio de uma fonte laser verde, com 532 nm de comprimento de onda e potência variável na faixa 0-450 mW. Quando submetidos a este tipo de iluminação, traçadores sólidos e gasosos promovem o espalhamento da luz, oferecendo condições propícias à visualização do escoamento.

Neste trabalho, um dispositivo que permite ao feixe de luz laser incidir sobre uma lente bicilíndrica foi projetado e construído, permitindo a obtenção do plano luminoso. Este conjunto é mostrado na Figura 3.10.



Figura 3.10 – Iluminação por plano de luz laser.

### 3.3.3. Captura de imagens

Todas as imagens e vídeos referentes aos escoamentos investigados neste trabalho foram capturados com o auxílio de uma câmera digital Nikon D60 SLR (Single Lens Reflex), equipada com uma objetiva Nikkor AF Micro 60 mm de distância focal. Para cada condição de teste, o tempo de exposição e a abertura ideal do obturador, capazes de fornecer as melhores imagens, foram obtidos empiricamente, através de tentativas sucessivas.

## 3.4. FREQUÊNCIA DE EMISSÃO DE VÓRTICES

Boa parte dos ensaios realizados no âmbito deste trabalho foi dedicada ao estudo do escoamento na camada cisalhante das cavidades. Para a determinação da frequência de desprendimento de instabilidades de Kelvin-Helmholtz naquela região, necessária ao cálculo do número de Strouhal, dois procedimentos distintos foram empregados, a anemometria de filme quente e a contagem de vórtices.

### a) Anemometria de filme quente

Como sugere o exemplo da Figura 3.11, a frequência de oscilação da camada cisalhante pode ser obtida pela aplicação de uma FFT (*Fast Fourier Transform*) à série temporal da velocidade obtida por anemometria de filme quente. Para o correto posicionamento da sonda anemométrica na camada cisalhante, ensaios de visualização foram realizados para cada cavidade testada. Antes do início de cada corrida experimental, ensaios preliminares também foram executados para a determinação dos tempos de aquisição de sinal, que variou de 4 a 9 minutos. Em todos os casos, manteve-se a configuração padrão do condicionador, sem submeter o sinal a qualquer processo de filtragem.

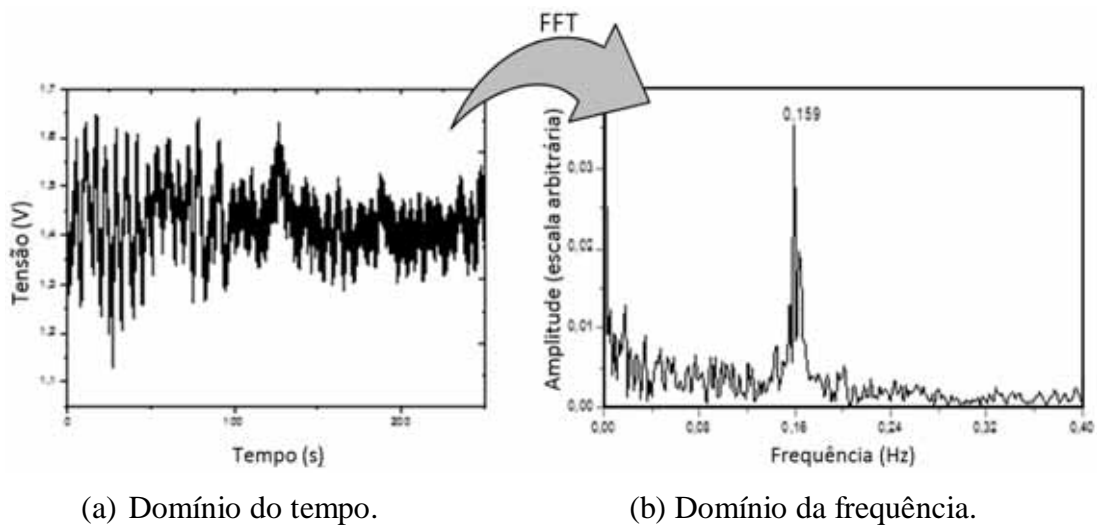


Figura 3.11 – Obtenção da frequência de oscilação da camada cisalhante a partir do sinal anemométrico de velocidade.

### b) Contagem de vórtices

Alternativamente, a frequência de oscilação da camada cisalhante foi obtida, também, por contagem de vórtices. Este método é bastante simples, baseando-se exclusivamente na interpretação das imagens dinâmicas do escoamento preliminarmente registrado em formato de vídeo. A frequência de Strouhal é, então, obtida computando-se o número de estruturas turbilhonares que passam em um determinado ponto da camada cisalhante por unidade de tempo. Neste caso, a técnica de injeção de corante líquido foi empregada para permitir a visualização do escoamento.

# Capítulo 4

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os resultados aqui apresentados foram gerados no canal de água recirculante apresentado no capítulo anterior. Cavidades retangulares com razão de aspecto  $\zeta = \frac{1}{2}, 1, 2, 3, 4, 8$  e  $10$  foram ensaiadas dentro de uma faixa do número de Reynolds compreendida entre  $1100$  a  $10000$ .

Este capítulo está dividido em duas partes. Na primeira delas, apresentam-se imagens qualitativas do escoamento, obtidas por injeção de corante líquido, traçadores sólidos e bolhas de hidrogênio, as quais permitiram identificar as mudanças produzidas nos padrões de escoamento pelas variações de  $\zeta$  e  $Re$ . Na segunda parte, são discutidos resultados quantitativos referentes à determinação da frequência de emissão de vórtices por anemometria de filme quente e pela técnica de contagem de vórtices. A estimativa das incertezas associadas aos processos de medição é apresentada no Apêndice D.

### 4.1. VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS

#### 4.1.1. Injeção de corante líquido

Segundo Mega (2009) a injeção de corante se mostra bastante eficaz para a visualização do escoamento na camada cisalhante, permitindo observar, com nitidez e clareza, a geração, o desprendimento periódico e a propagação de instabilidades de Kelvin-Helmoltz naquela região. Com o uso de corante líquido pode-se observar, ainda, o comportamento e o movimento destas estruturas turbilhonares nas proximidades da aresta posterior. A título de ilustração, a Figura 4.1 mostra uma estrutura turbilhonar formando-se na aresta anterior e movendo-se na camada cisalhante de uma cavidade retangular.



Figura 4.1 – Visualização por injeção de corante líquido do escoamento na camada cisalhante de uma cavidade com razão de aspecto  $\zeta = 4$  e  $Re \approx 5000$ .

A Figura 4.2 apresenta, para diferentes números de Reynolds, imagens do escoamento em uma cavidade retangular com razão de aspecto  $\zeta = 1/2$ . Pode-se observar que uma recirculação aparece na parte superior da cavidade, enquanto que na metade inferior o movimento do fluido é quase imperceptível. Em algumas imagens, nota-se claramente que o ajuste na densidade do corante não foi feito adequadamente, motivo pelo qual existe a deposição do traçador no fundo da cavidade. Se o movimento do fluido na parte inferior fosse mais rápido, a deposição certamente não ocorreria com a mesma intensidade. De fato, a partir de Reynolds próximo de 3770, com o crescimento da

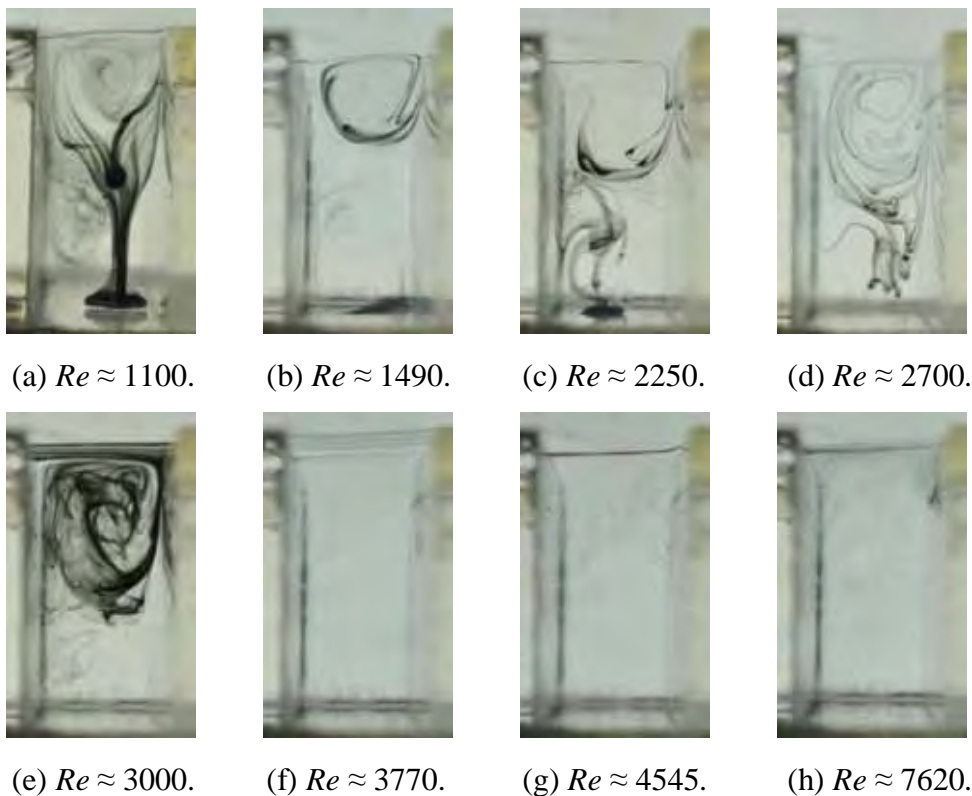


Figura 4.2 – Escoamento em uma cavidade com  $\zeta = 1/2$ , para diferentes números de Reynolds. Visualização por injeção de corante líquido.

velocidade da corrente livre, o movimento do fluido no interior da cavidade também é intensificado, o que favorece a rápida dispersão do corante. Nesta nova situação, apenas a identificação da camada cisalhante no topo da cavidade é possível.

A Figura 4.3 apresenta imagens do escoamento em uma cavidade quadrada, razão de aspecto  $\zeta = 1$ , para diferentes números de Reynolds. Observa-se que, para Reynolds até aproximadamente 1450, uma recirculação de forma aproximadamente triangular pode ser vista na parte superior da cavidade. A partir de  $Re \approx 2500$ , pode-se notar que uma grande recirculação passa a ocupar todo o interior da cavidade.

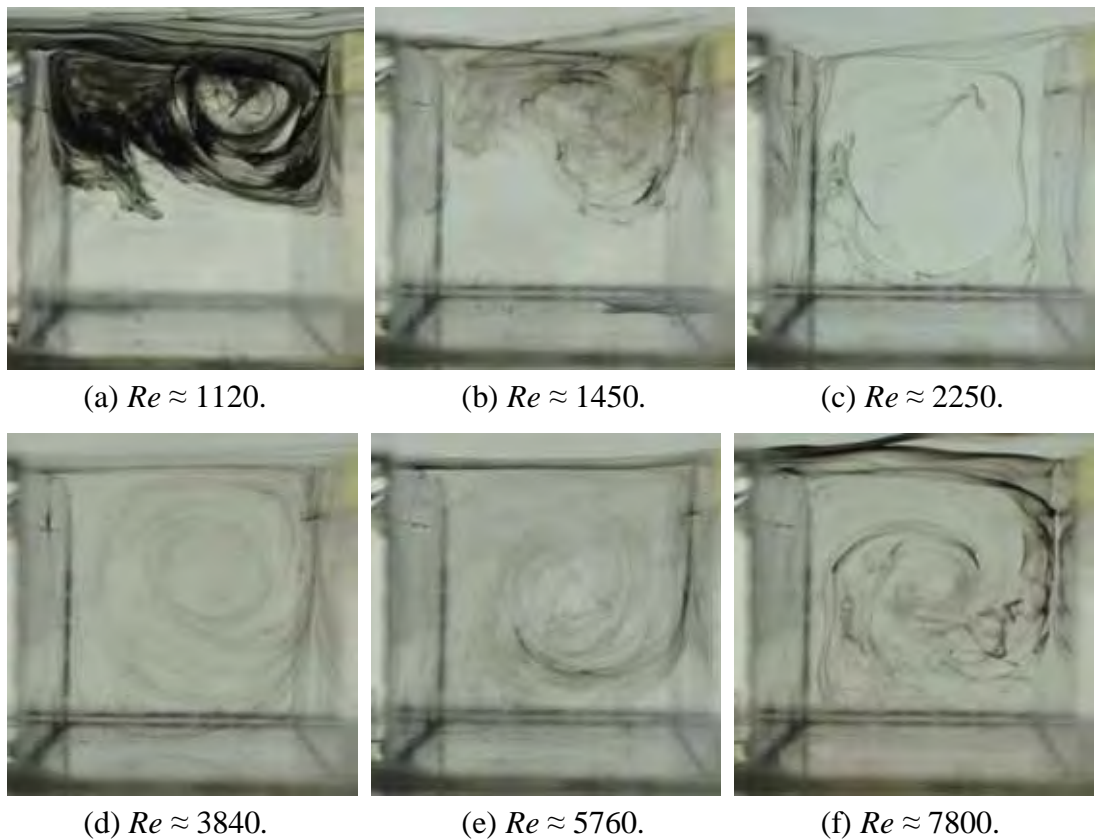


Figura 4.3 – Escoamento em uma cavidade com  $\zeta = 1$ , para diferentes números de Reynolds. Visualização por injeção de corante líquido.

A Figura 4.4 apresenta o escoamento em uma cavidade retangular com razão de aspecto  $\zeta = 4$ , para números de Reynolds variando de 1120 a 7440. Como nos demais casos, a injeção de corante é feita por uma longa agulha dobrada em L, posicionada a montante da cavidade, junto à parede inferior da seção de testes. No presente caso, percebe-se que a técnica de visualização empregada só permite identificar com mais clareza a dinâmica do movimento da camada cisalhante. O exame destas imagens

mostra que, ao se descolar na aresta anterior, a camada cisalhante oscila verticalmente. Em seguida, estas oscilações são amplificadas, propiciando o desenvolvimento espacial de instabilidades de Kelvin-Helmoltz.



(a)  $Re \approx 1120$ .



(b)  $Re \approx 1650$ .



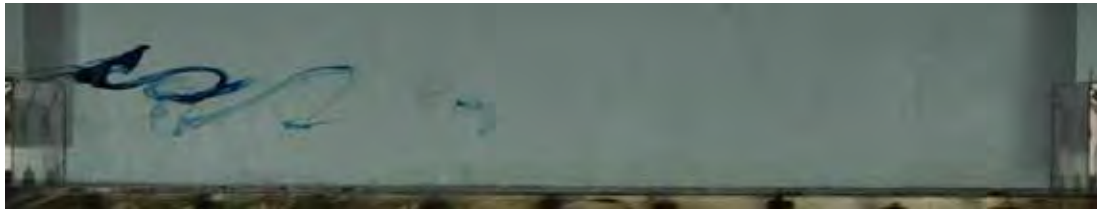
(c)  $Re \approx 4900$ .



(d)  $Re \approx 7440$ .

Figura 4.4 – Escoamento em uma cavidade com  $\zeta = 4$ , para diferentes números de Reynolds. Visualização por injeção de corante líquido.

A Figura 4.5 apresenta imagens do escoamento em uma cavidade alongada, com razão de aspecto  $\zeta = 10$ , para números de Reynolds entre 1180 e 8140. Assim como para as cavidades com  $\zeta = 4$ , aqui também, o emprego desta técnica de visualização só permitiu o acompanhamento do movimento do fluido na camada cisalhante da cavidade. Assim mesmo, a presença de instabilidades de Kelvin-Helmholtz só é percebida com clareza na metade anterior da cavidade.



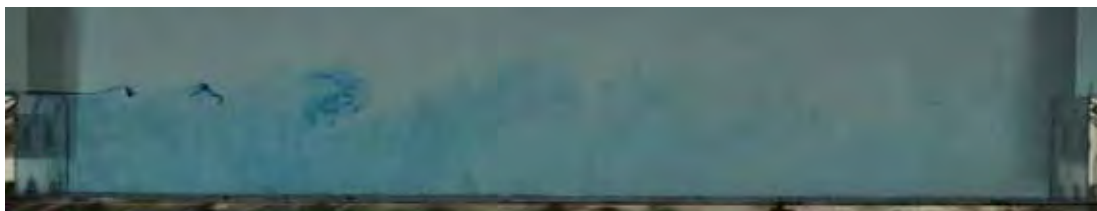
(a)  $Re \approx 1180$



(b)  $Re \approx 1740$



(c)  $Re \approx 3330$



(d)  $Re \approx 8140$

Figura 4.5 – Escoamento em uma cavidade com  $\zeta = 10$ , para diferentes números de Reynolds. Visualização por injeção de corante líquido.

Os resultados obtidos nestes ensaios permitiram constatar a boa adaptabilidade desta técnica de visualização para a observação da evolução temporal de instabilidades hidrodinâmicas convectadas pelo campo de escoamento, tal como ocorre na camada cisalhante da cavidade.

### 4.1.2 Bolhas de hidrogênio

A técnica de geração de bolhas de hidrogênio ainda não havia sido utilizada no presente canal de superfície livre, tendo sido implementada no âmbito deste trabalho. Em vista disso, uma série de tentativas teve que ser realizada, antes que resultados de qualidade aceitável pudessem ser atingidos. Dentre as principais constatações feitas durante a implementação da técnica, merecem destaque as alterações produzidas nas imagens do escoamento, quando o diâmetro do cátodo passa de 75  $\mu\text{m}$  para 25  $\mu\text{m}$ .

A Figura 4.6 mostra os resultados obtidos com o cátodo de 75  $\mu\text{m}$ , para o escoamento em dois diferentes números de Reynolds, 1200 e 2000, em uma cavidade com  $\zeta = 2$ . Nestes ensaios, o cátodo encontra-se posicionado paralelamente à aresta anterior. A taxa de geração de bolhas é controlada ajustando-se a tensão fornecida pela fonte de corrente contínua, enquanto que o diâmetro das bolhas é proporcional à espessura do fio catódico. Nos dois casos analisados, pode-se notar que as bolhas, ao invés de serem arrastadas pelo campo de escoamento como um escalar passivo, apresentam um movimento ascensional importante, ocasionado pelo empuxo. Nota-se, ainda, que este efeito diminui à medida que o número de Reynolds aumenta. De fato, é fácil observar que, para  $Re \approx 2000$ , o traçador gasoso consegue penetrar na cavidade, dando a indicação da presença de uma grande recirculação em seu interior. No caso de  $Re \approx 1200$ , as bolhas, assim que geradas junto à aresta anterior, deslocam-se rapidamente na direção vertical, ao mesmo tempo em que são arrastadas horizontalmente pelo campo escoamento, sem, ao menos, entrar na cavidade.



(a)  $Re \approx 1200$ .

(b)  $Re \approx 2000$ .

Figura 4.6 – Escoamento em uma cavidade com  $\zeta = 2$ , para dois diferentes números de Reynolds. Visualização com bolhas de hidrogênio geradas com fios de platina de 75 $\mu\text{m}$  e iluminação por plano de luz laser.



algumas informações interessantes possam ser extraídas sobre a física deste tipo de escoamento.

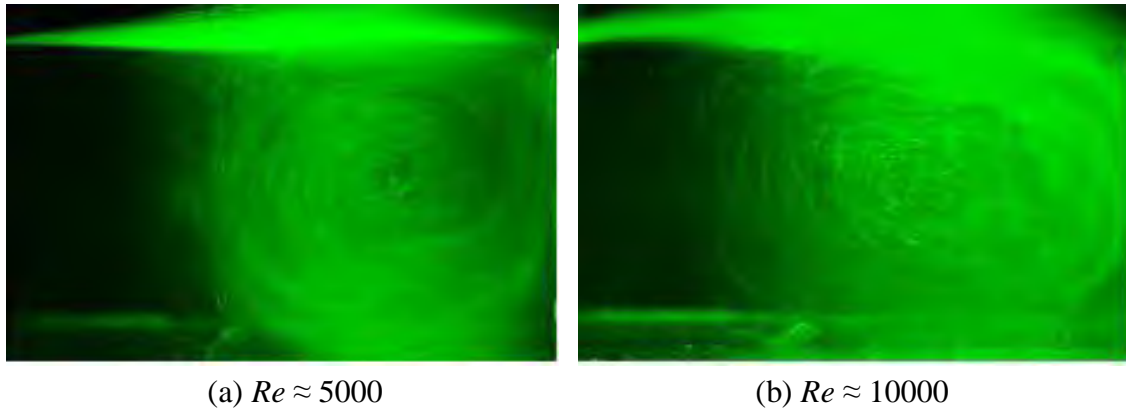


Figura 4.8 – Escoamento no interior de uma cavidade com  $\zeta = 2$ , para dois diferentes números de Reynolds. Visualização com bolhas de hidrogênio geradas com fios de platina de  $25\mu\text{m}$  e iluminação por plano de luz laser.

### 4.1.3. Partículas sólidas

Na Figura 4.9, mostram-se, com a ajuda de partículas sólidas dispersas no fluido de trabalho e iluminação por folha de luz, o escoamento em uma cavidade com  $\zeta = 1/2$ , para diferentes números de Reynolds. Nestas imagens, pode-se observar que, a partir de  $Re \approx 550$ , uma recirculação triangular começa a se formar no topo da cavidade, com centro deslocado em direção à parede vertical direita. Este núcleo de vorticidade cresce com o número de Reynolds, atingindo seu diâmetro máximo em  $Re \approx 2650$ , quando passa a ocupar praticamente a metade da altura da cavidade. Configuração semelhante foi identificada também nos trabalhos de Taneda (1979) e Shen e Floryan (1985), como mostra a Figura 4.10. Contudo, de maneira surpreendente, em ambos os trabalhos, esta configuração foi encontrada pelos autores para números de Reynolds bastante baixos, da ordem de  $10^{-2}$ , o que deveria caracterizar um escoamento do tipo reptante (*creeping flow*).

A partir de  $Re \approx 4150$ , nota-se que a estrutura turbilhonar que gira no sentido horário na metade superior da cavidade começa a induzir o movimento do fluido que ocupa a parte inferior. A partir de  $Re \approx 5000$ , a configuração do escoamento passa a ser caracterizada pela presença de duas grandes recirculações contrarrotativas, dispostas uma sobre a outra.

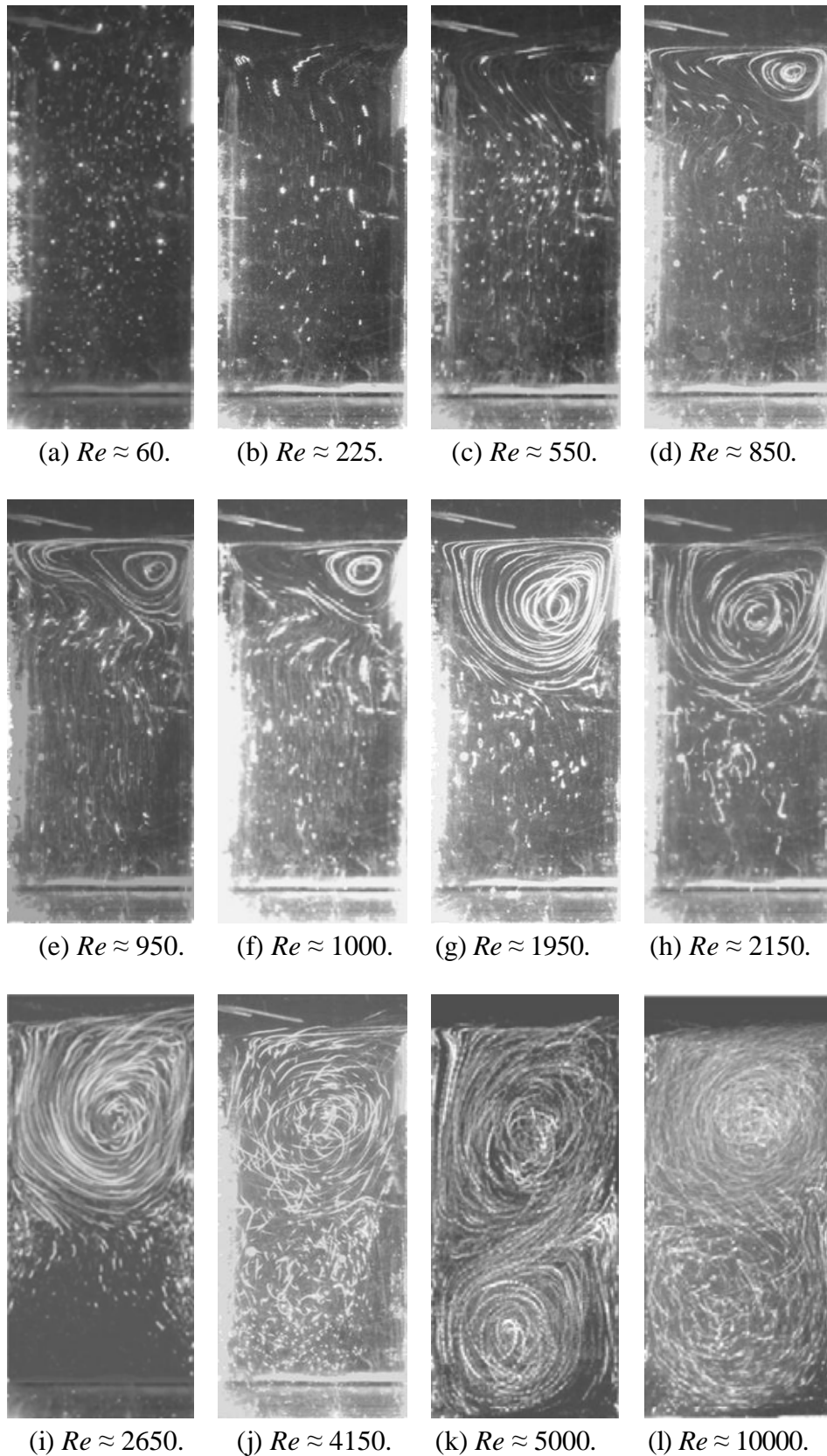


Figura 4.9 – escoamento no interior de uma cavidade com  $\zeta = \frac{1}{2}$ , para diferentes números de Reynolds. Visualização com partículas sólidas e iluminação por plano de luz laser.

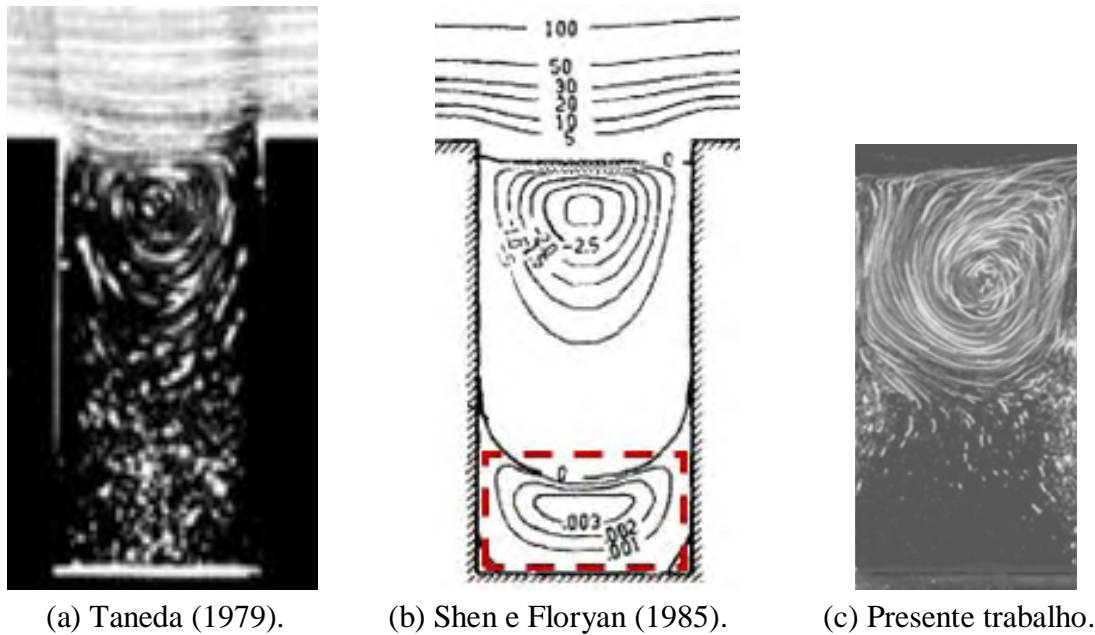


Figura 4.10 – escoamento no interior de uma cavidade com  $\zeta = 1/2$ : comparação com resultados de outros autores.

Na Figura 4.11, são mostrados os resultados referentes aos ensaios com cavidades  $\zeta = 1$ . Da mesma forma que na cavidade com  $\zeta = 1/2$ , para baixos números de Reynolds, nenhum padrão nítido de escoamento se estabelece no interior da cavidade. Porém, para  $Re \approx 1000$ , nota-se, também aqui, a presença de uma recirculação triangular que se posiciona na parte superior da cavidade, com seu núcleo deslocado na direção da parede lateral direita.

Em  $Re \approx 2300$ , pode-se observar que esta estrutura turbilhonar torna-se mais arredondada e já toca o fundo da cavidade quadrada. A partir de  $Re \approx 2650$ , um grande vórtice domina toda a região central da cavidade, enquanto duas pequenas recirculações se estabelecem junto aos cantos inferiores. Estas estruturas secundárias foram identificadas pioneiramente por Moffat (1964) e são, hoje, conhecidas com o nome do autor.

Finalmente, pode-se observar que o escoamento ascendente sobre a parede vertical esquerda se descola próximo à aresta anterior, fazendo com que surja, naquela região, outra pequena estrutura turbilhonar, a qual gira no sentido anti-horário. Nesta sequência de imagens, esta nova estrutura parece surgir em  $Re \approx 2650$  e pode ser nitidamente identificada em  $Re \approx 10000$ . Como mostra a Figura 4.12, o resultado obtido no presente trabalho para  $Re \approx 2650$  concorda qualitativamente muito bem com a visualização feita por Faure *et al.* (2007) em túnel de vento, para  $Re = 2300$ , e com a simulação numérica bidimensional de Frigo (2004), para  $Re = 2648$ .

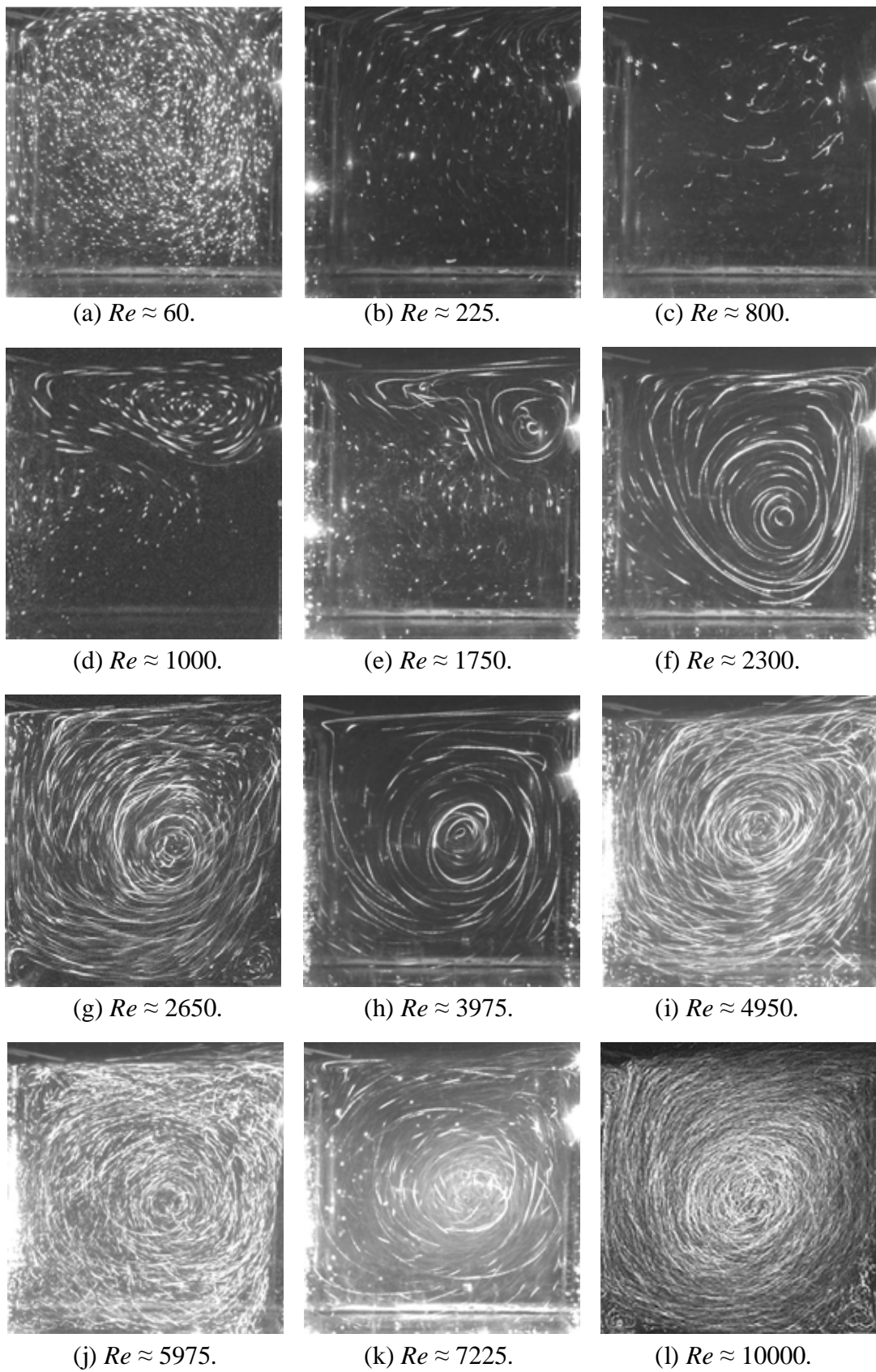
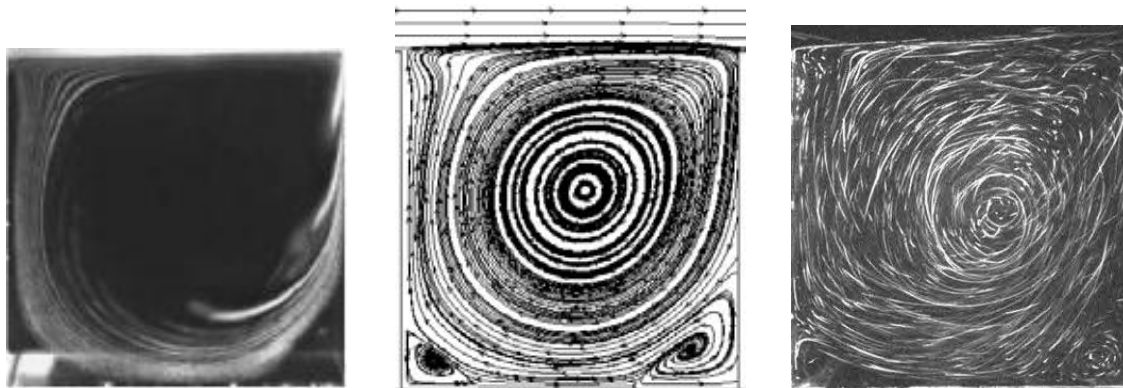


Figura 4.11 – escoamento no interior de uma cavidade com  $\zeta = 1$ , para diferentes números de Reynolds. Visualização com partículas sólidas e iluminação por plano de luz laser.



(a) Faure *et al.* (2004),  
 $Re \approx 2300$ .

(b) Frigo (2004),  
 $Re \approx 2648$ .

(c) Presente trabalho,  
 $Re \approx 2650$ .

Figura 4.12 – escoamento no interior de uma cavidade com  $\zeta = 1$ : comparação com resultados de outros autores.

Na Figura 4.13, apresentam-se imagens do escoamento em cavidade retangular alongada, com razão de aspecto  $\zeta = 2$ , para números de Reynolds na faixa de 60 a 10000. Da mesma forma que nos casos anteriores, para baixos números de Reynolds, o movimento do fluido no interior da cavidade é quase imperceptível. Neste caso, entretanto, pode-se observar, para  $Re \approx 225$ , a curvatura da linha de corrente em forma de catenária, que divide os escoamentos interno e externo, interligando as arestas anterior e posterior.

Quando o número de Reynolds se aproxima de 1000, percebe-se, mais uma vez, a formação da mesma estrutura turbilhonar triangular identificada nos demais casos. Pode-se observar, ainda, que, a partir de  $Re \approx 1200$ , o movimento do fluido que ocupa a porção direita da cavidade já pode ser percebido. Quando o número de Reynolds se aproxima de 2650, uma segunda estrutura turbilhonar contrarrotativa, que até então se achava em formação, passa a ocupar toda a metade esquerda da cavidade. A partir deste ponto, observa-se que a estrutura turbilhonar da direita cresce com o aumento do número de Reynolds, enquanto estrutura da esquerda perde seu espaço.

Da mesma forma que nos casos precedentes, estes resultados também concordam bem com os fornecidos por outros autores. Na Figura 4.14 compara-se o resultado obtido para  $Re \approx 2650$ , com a visualização feita por Mega (2009) neste mesmo canal, usando a técnica de injeção de corante líquido. Este resultado é confrontado, ainda, com a simulação numérica bidimensional de Frigo (2004), feita para o mesmo valor do número de Reynolds. Em todos os casos, existe uma ótima concordância entre os resultados.

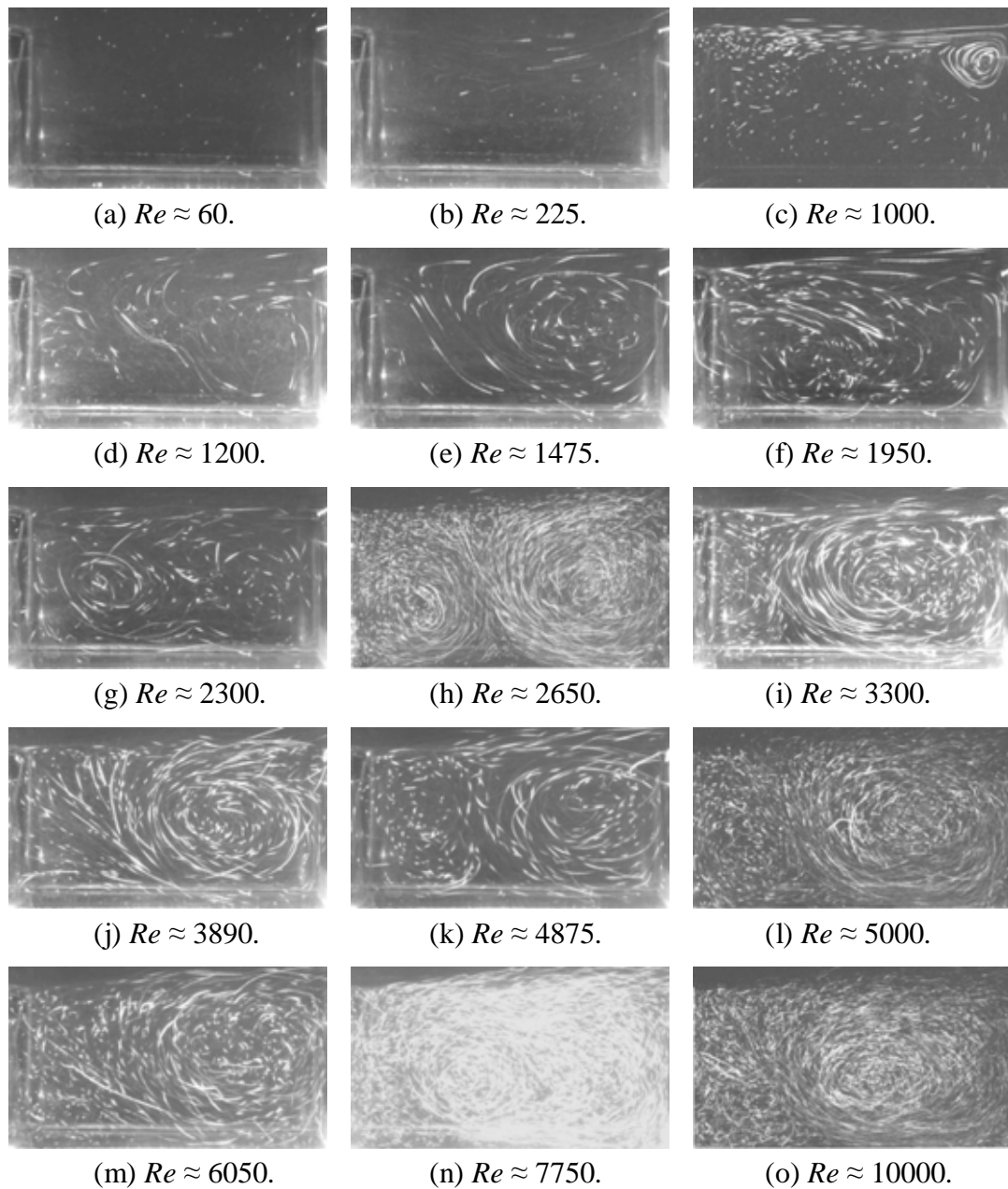


Figura 4.13 – escoamento no interior de uma cavidade com  $\zeta = 2$ , para diferentes números de Reynolds. Visualização com partículas sólidas e iluminação por plano de luz laser.

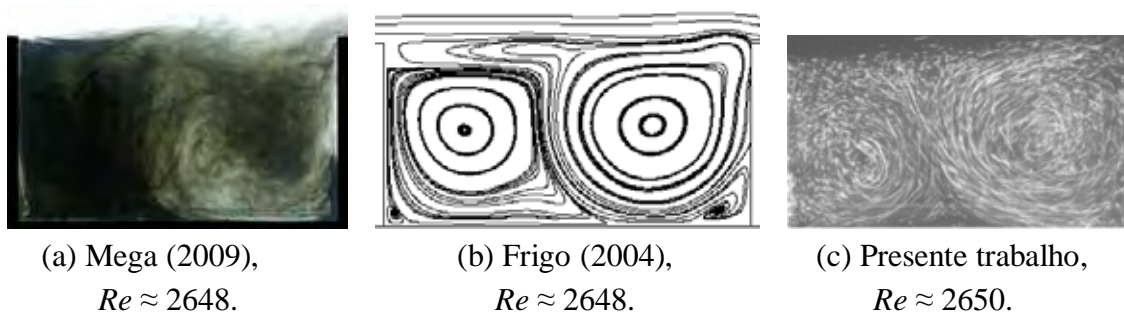


Figura 4.14 – escoamento no interior de uma cavidade com  $\zeta = 1$ : comparação com resultados de outros autores.

Para cavidades com razão de aspecto maior que 2, observa-se que o escoamento interno não apresenta a mesma estabilidade anteriormente encontrada. Nesta nova situação, os vórtices estacionários que antes caracterizavam os padrões de escoamento dentro das cavidades, são substituídos por várias estruturas turbilhonares que interagem entre si, alterando continuamente sua forma e dimensão. A sequência temporal mostrada na Figura 4.15, obtida para  $Re \approx 1475$  em uma cavidade com  $\zeta = 3$ , ilustra esta situação.

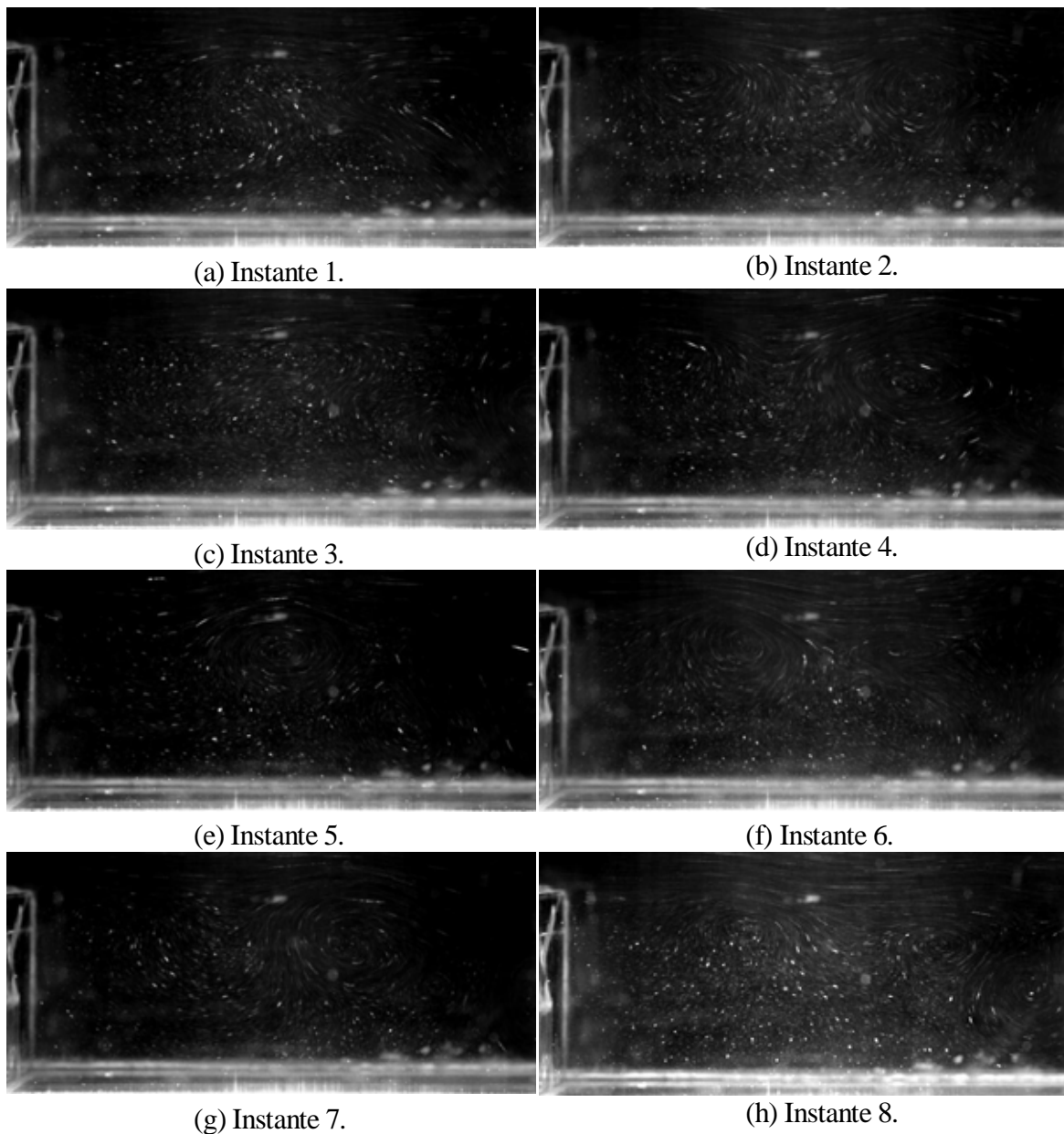


Figura 4.15 – Escoamento no interior de uma cavidade com  $\zeta = 3$ , para  $Re \approx 1475$ .

Visualização realizada em diferentes instantes, utilizando-se partículas sólidas e iluminação por plano de luz laser.

A presença de múltiplas estruturas turbilhonares e a dinâmica complexa da interação entre elas foi, também, observada nos estudos de Manovski *et al.* (2005). A Figura 4.16 mostra que, apesar da diferença existente entre o número de Reynolds dos experimentos daqueles autores e os do presente trabalho, existe uma boa concordância qualitativa entre os resultados.

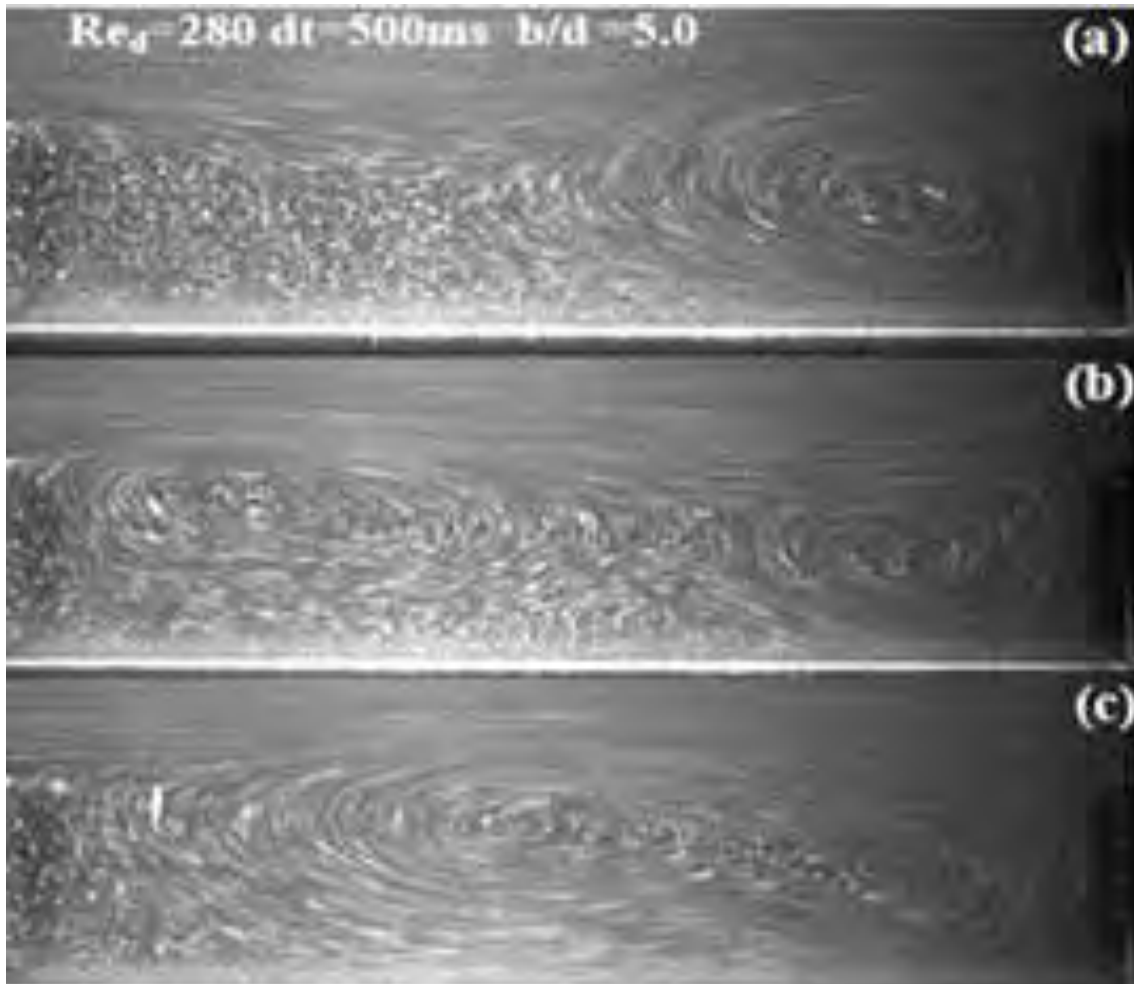


Figura 4.16 – Escoamento no interior de uma cavidade com  $\zeta = 3$ , para  $Re \approx 280$ .  
Visualização realizada em diferentes instantes, por Manovski *et al.* (2005).

Por último, é interessante notar que, seguindo a classificação adotada por Ashcroft e Zang (2005) e Esteve *et al.* (2000), a cavidade com razão de aspecto  $\zeta = 3$ , deve ser considerada como semiaberta, uma vez que a camada cisalhante sofre uma deflexão para baixo, mas não sofre recolamento no fundo da cavidade. Isto pode ser visto claramente no resultado apresentado na Figura 4.17, que corresponde à imagem ampliada da Figura 4.15(d).

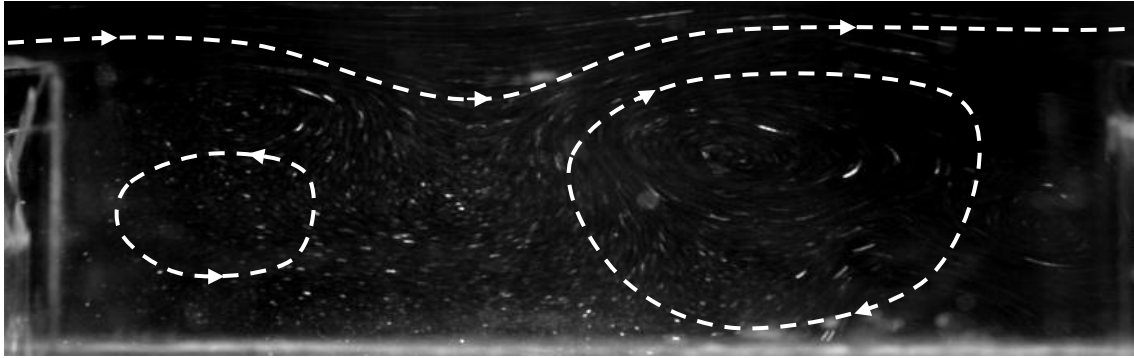


Figura 4.17 – escoamento no interior de uma cavidade com  $\zeta = 3$ , para  $Re \approx 1475$ , classificada como semiaberta.

#### 4.1.4. Comparação entre as técnicas de visualização

A Figura 4.18 permite comparar resultados referentes ao escoamento em uma cavidade com  $\zeta = 1/2$ , obtidos por técnicas de visualização distintas – injeção de corante líquido e partículas sólidas. Pode-se observar, nas Figuras 4.18(a) e (b), que, para número de Reynolds de 2200, ambas as técnicas permitem observar a presença de uma recirculação estacionária ocupando a metade superior da cavidade. Porém, quando esse número de Reynolds cresce acima de 4500, Figuras 4.18(c) e (d), a técnica de injeção de corante só possibilita a identificação do escoamento na camada cisalhante da cavidade, enquanto a sementeira de partículas sólidas mostra nitidamente a estrutura do escoamento dentro da cavidade.

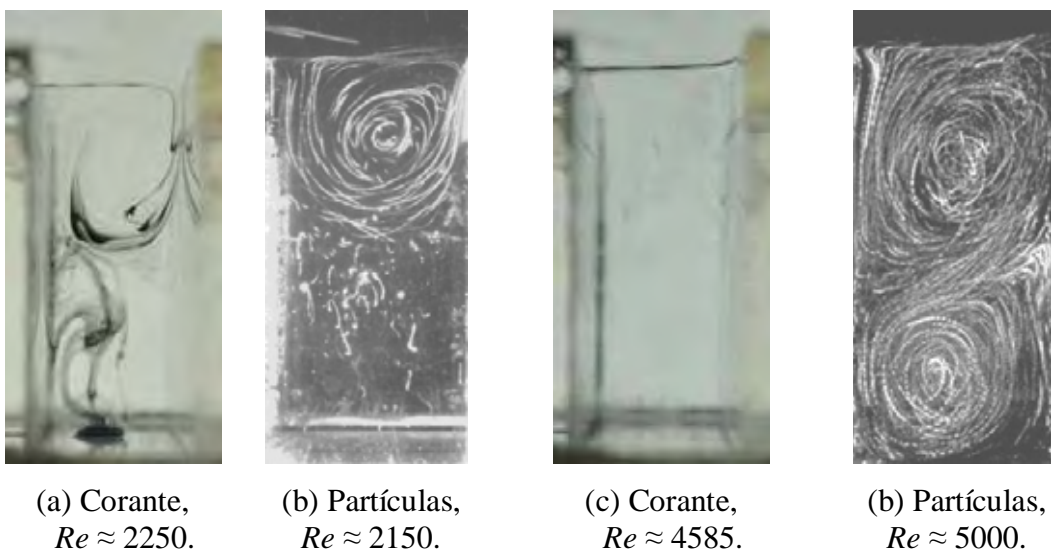
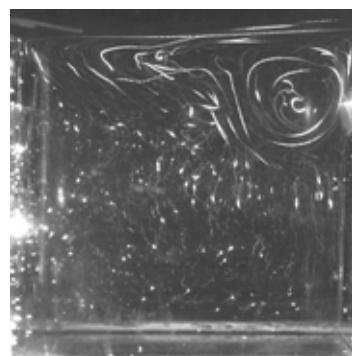


Figura 4.18 – escoamento no interior de uma cavidade com  $\zeta = 1/2$ . Comparação entre resultados obtidos com injeção de corante líquido e sementeira de partículas sólidas.

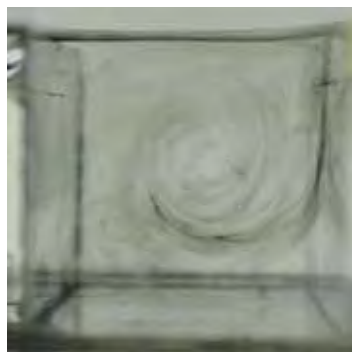
Da mesma forma, nas Figuras 4.19(a) e (b), verifica-se que, para  $\zeta = 1$  e número de Reynolds da ordem de 1500, as duas técnicas mostram uma recirculação de forma aproximadamente triangular estacionada na parte superior da cavidade. Contudo, as Figuras 4.19(c) e (d) mostram que, com o aumento do número de Reynolds, somente a sementeira de partículas sólidas é capaz de mostrar, com detalhes, o padrão topológico assumido pelo escoamento no interior da cavidade, que se caracteriza pela presença de uma grande estrutura central ocupando quase toda a cavidade, bem como a existência de pequenas bolhas de recirculação posicionadas nos dois cantos inferiores.



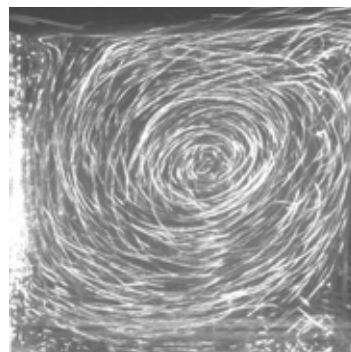
(a) Corante,  $Re \approx 1450$ .



(b) Partículas,  $Re \approx 1750$ .



(c) Corante,  $Re \approx 5760$ .

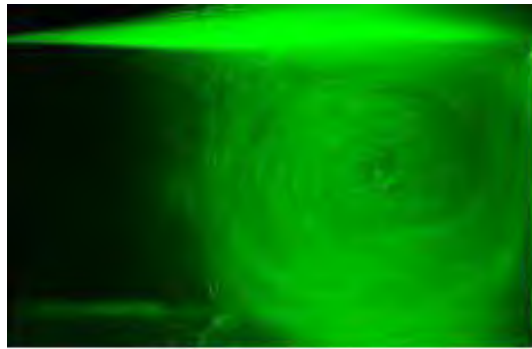


(d) Partículas,  $Re \approx 4950$ .

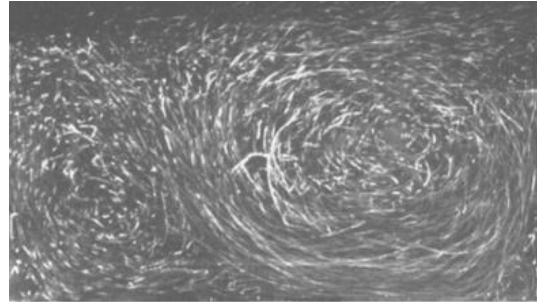
Figura 4.19 – Escoamento no interior de uma cavidade com  $\zeta = 1$ . Comparação entre resultados obtidos com injeção de corante líquido e sementeira de partículas sólidas.

Na Figura 4.20, são comparadas as técnicas de visualização por geração de bolhas de hidrogênio e por sementeira de partículas sólidas, considerando-se o escoamento sobre uma cavidade com  $\zeta = 2$  e números de Reynolds de 5000 e 10000. Neste caso, os dois métodos mostram a presença de uma grande recirculação do lado direito da cavidade. Ambos os métodos mostram, também, que esta estrutura turbilhonar

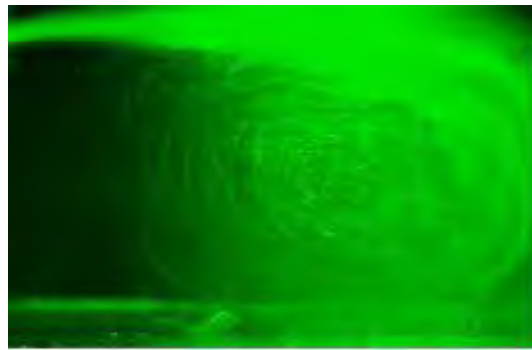
crece com o aumento do número de Reynolds. Entretanto, apenas com a utilização do traçador sólido pode-se observar o que acontece com o fluido na parte esquerda da cavidade.



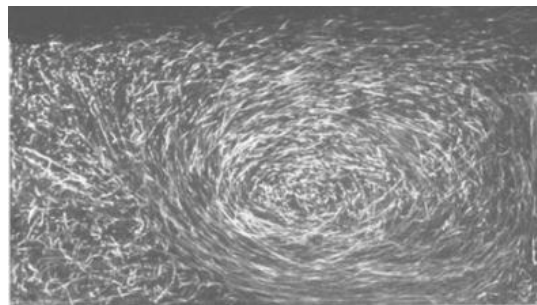
(a) Bolhas,  $Re \approx 5000$ .



(b) Partículas,  $Re \approx 5000$ .



(c) Bolhas,  $Re \approx 10000$ .



(d) Partículas,  $Re \approx 10000$ .

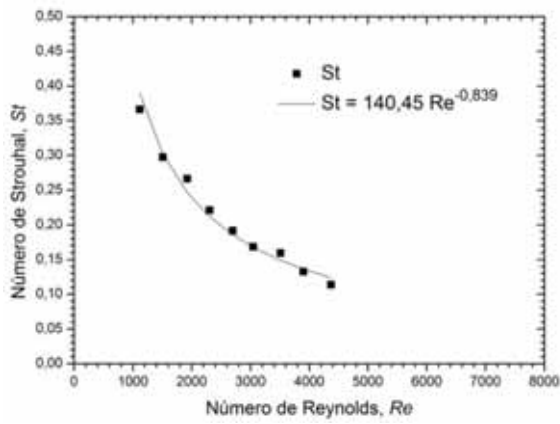
Figura 4.20 – Escoamento no interior de uma cavidade com  $\zeta = 2$ . Comparação entre resultados obtidos com bolhas de hidrogênio e sementeira de partículas sólidas.

## 4.2. FREQUÊNCIA DE EMISSÃO DE VÓRTICES

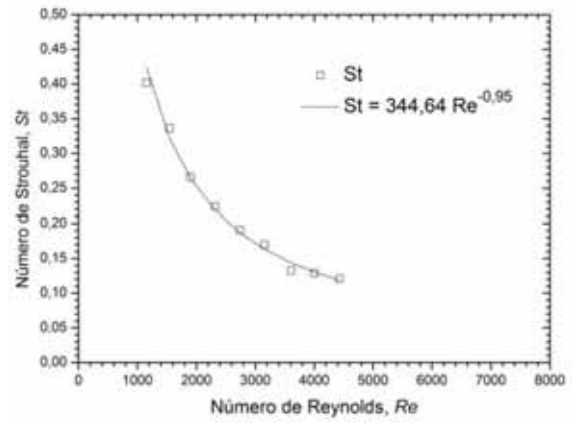
Utilizando-se a anemometria de filme quente como instrumento de medição, aquisições do sinal de velocidade ao longo do tempo foram realizadas na camada cisalhante, para todas as cavidades estudadas. Aplicando-se o tratamento descrito no capítulo anterior aos dados obtidos experimentalmente, foram determinadas as frequências de oscilação da camada cisalhante, necessárias ao cálculo do número de Strouhal.

No Apêndice E, são apresentados todos os resultados adquiridos durante esta etapa do trabalho, bem como os dados referentes às frequências de aquisição do sinal utilizadas em cada caso. Na Figura 4.21 são apresentadas as curvas obtidas para o

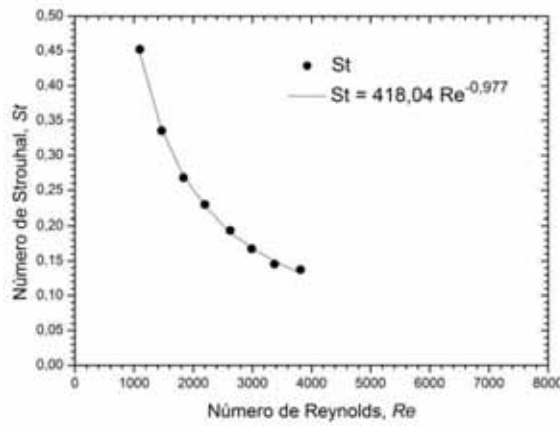
comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds, para as cavidades com  $\zeta = 1/2, 1, 2, 4, 8$  e  $10$ .



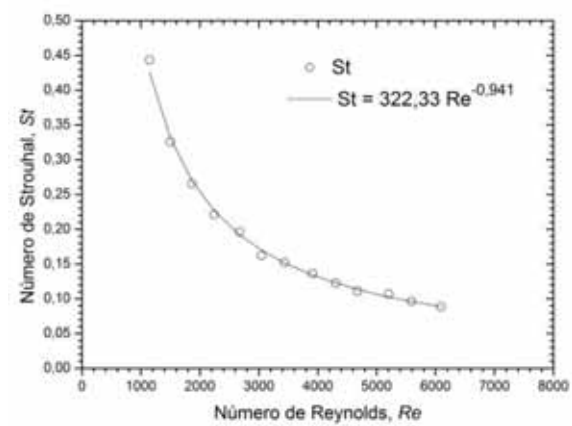
(a)  $\zeta = 1/2$ .



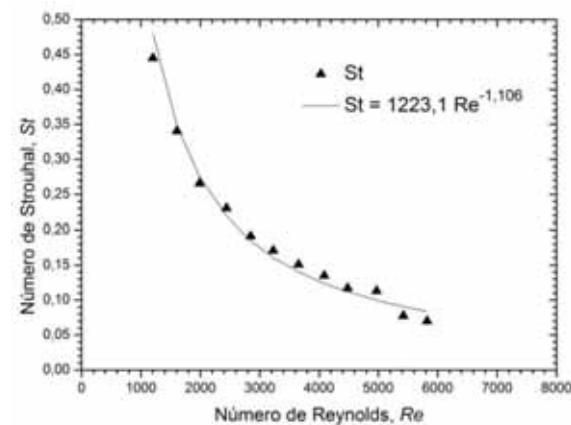
(b)  $\zeta = 1$ .



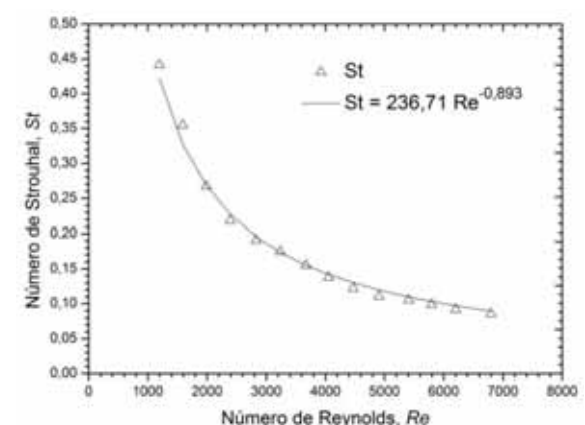
(c)  $\zeta = 2$ .



(d)  $\zeta = 4$ .



(e)  $\zeta = 8$ .



(f)  $\zeta = 10$ .

Figura 4.21 – Curvas Strouhal *versus* Reynolds para cavidades com diferentes razões de aspecto. Resultados obtidos por anemometria de filme quente.

A análise comparativa destes resultados permite observar que, em todos os casos, os pontos experimentais indicam um decréscimo monotônico do número de Strouhal com o aumento do número de Reynolds. Pode-se observar, ainda, que, para  $\zeta = \frac{1}{2}$  e 1, o número de Strouhal máximo para Reynolds aproximadamente 1100, é inferior a 0,4, enquanto para as demais razões de aspectos ela se mantém em torno de 0,45. Nota-se, também, que os pontos experimentais obtidos apresentam, para todas as cavidades ensaiadas, a mesma tendência qualitativa, sugerindo o ajuste de curvas da forma:

$$St = A Re^{-b} \quad (4.1)$$

onde  $A$  e  $b$  são coeficientes ajustados pelo método dos mínimos quadrados a cada uma das séries de dados experimentais e cujos valores são explicitados nos próprios gráficos da Figura 4.21.

A Figura 4.22 reúne, em um só gráfico, todos os pontos experimentais apresentados nos seis gráficos da Figura 4.21. A proximidade dos resultados para as diferentes cavidades permite a proposição de uma única curva, com a mesma forma da Eq. (4.1), para representá-los todos simultaneamente. A equação obtida, neste caso, é dada por:

$$St = 236,71 Re^{-0,893} \quad (4.2)$$

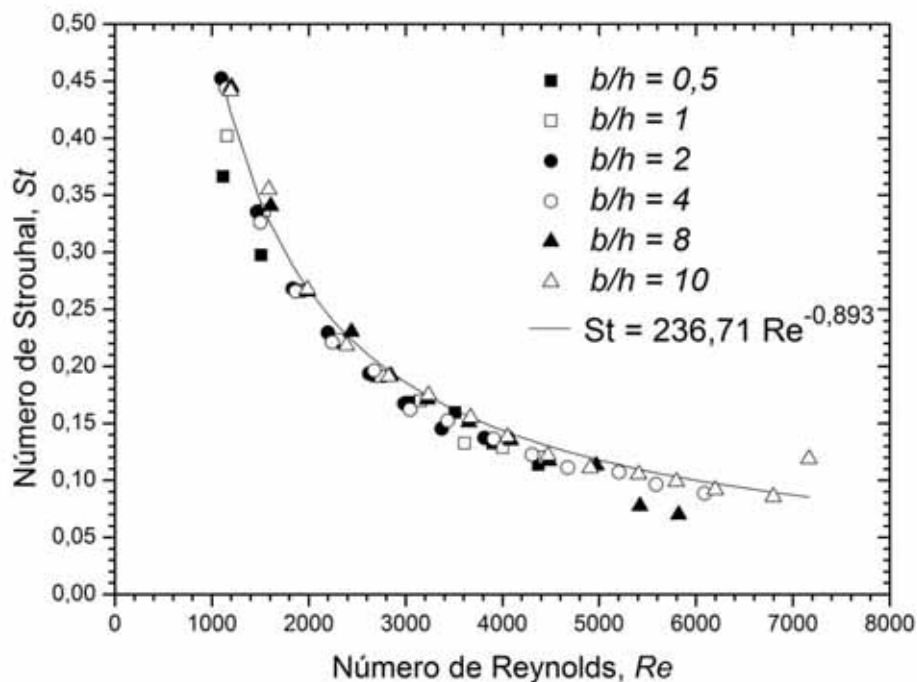
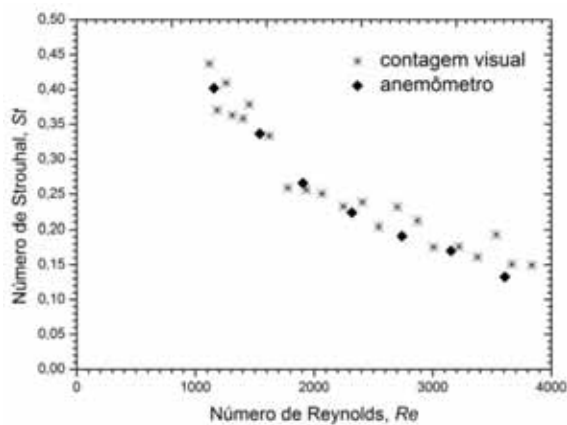


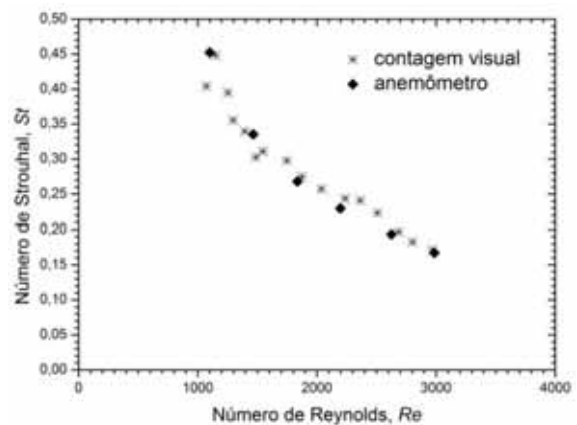
Figura 4.22 – Comportamento do número de Strouhal em função do número de Reynolds para diferentes cavidades.

A técnica de contagem de vórtices também foi empregada na obtenção da frequência de oscilação da camada cisalhante e, por conseguinte, no cálculo do número de Strouhal. Entretanto, o fenômeno de geração e desprendimento de instabilidades de Kelvin-Helmholtz em cavidades retangulares não é, para algumas razões de aspecto e dentro de algumas faixas do número de Reynolds, tão bem comportado quanto na esteira de um cilindro, por exemplo, o que atribui imprecisão ao método. Ainda assim, a comparação entre os resultados obtidos com esta técnica e aqueles provenientes da anemometria de fio quente é bastante interessante e serve ao propósito de oferecer maior confiabilidade aos dados deste trabalho.

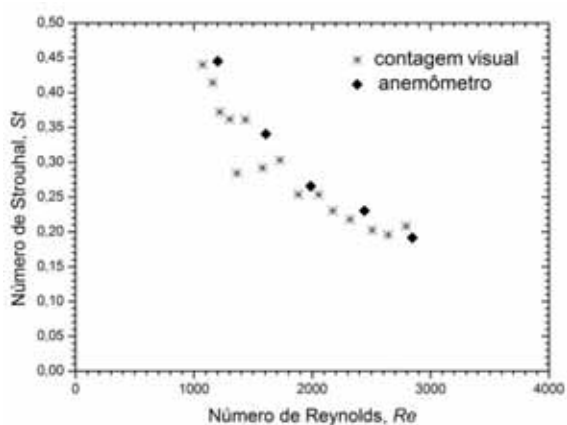
A Figura 4.23 permite comparar os pontos experimentais obtidos pelas duas técnicas de determinação do número de Strouhal, para quatro cavidades distintas,



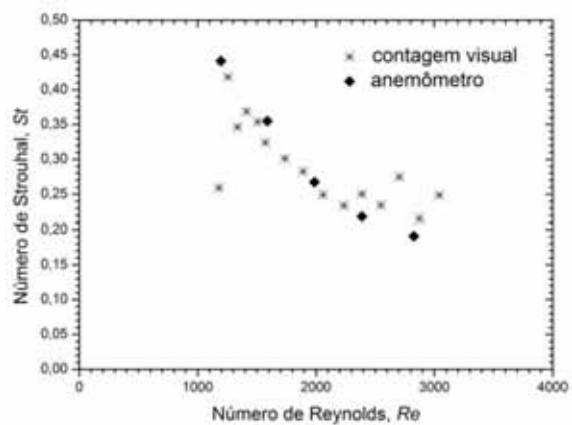
(a)  $\zeta = 1$ .



(b)  $\zeta = 2$ .



(c)  $\zeta = 8$ .



(d)  $\zeta = 10$ .

Figura 4.23 – Curvas Strouhal *versus* Reynolds para cavidades com diferentes razões de aspecto. Comparação entre resultados obtidos por anemometria de filme quente e contagem de vórtices.

com  $\zeta = 1, 2, 8$  e  $10$  e números de Reynolds inferiores a  $4000$ . Nesse caso, pode-se observar que, para razões de aspectos inferiores a  $\zeta = 2$ , a concordância entre os dois conjuntos de dados é muito boa. Para razões de aspectos acima de  $2$ , entretanto, o escoamento na camada cisalhante torna-se bem mais complexo, dificultando a identificação precisa da passagem de instabilidades hidrodinâmicas. De qualquer forma, estes resultados servem para validar o procedimento experimental aqui empregado na obtenção do número de Strouhal.

# Capítulo 5

## CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

O escoamento no interior de cavidade apresenta grande complexidade e constitui um problema recorrente da mecânica dos fluidos. Apesar do considerável volume de material publicado sobre o assunto, ao longo de várias décadas, muitos aspectos relacionados à física do movimento do fluido nesta geometria permanecem, até hoje, pouco compreendidos.

A campanha experimental que produziu os resultados apresentados neste trabalho foi totalmente conduzida em um canal de superfície livre com recirculação de água. Visualizações do escoamento e medições de velocidade por anemometria de filme quente foram realizadas para cavidades com razão de aspecto ( $\zeta$ ) de  $\frac{1}{2}$  a 10 e números de Reynolds ( $Re$ ) inferiores a  $10^4$ .

Para que este estudo pudesse ser empreendido, um grande esforço prévio teve que ser feito para corrigir os problemas operacionais apresentados pelo canal, relacionados, sobretudo, aos níveis de vibração relativamente elevados observados na seção de testes. Após a execução desta tarefa, ensaios de qualificação foram realizados, demonstrando que as soluções adotadas foram suficientemente eficazes.

Três técnicas clássicas foram empregadas nos ensaios de visualização de escoamentos: a injeção de corante líquido, a geração de bolhas de hidrogênio e a sementeira de partículas sólidas. Nas etapas de obtenção e tratamento de resultados, pôde-se constatar que a técnica de injeção de corante é bastante adequada para a identificação da geração, do desprendimento e da propagação de instabilidades hidrodinâmicas na camada cisalhante das cavidades. A utilização de partículas sólidas, por sua vez, permitiu identificar com bastante clareza os padrões apresentados pelo escoamento no interior das cavidades. Por último, a técnica de geração de bolhas de hidrogênio mostrou-se capaz de revelar aspectos dos escoamentos interno e externo à

cavidade, principalmente quando um fio de 25  $\mu\text{m}$  de diâmetro é empregado como cátodo. Contudo, sua implementação não é trivial, requerendo que um tempo considerável seja despendido com o ajuste do aparato, até que resultados exploráveis possam ser obtidos. Além disso, a qualidade das imagens obtidas na camada cisalhante é inferior àquela conseguida com a técnica de injeção de corante líquido, ao mesmo tempo em que, para a observação dos padrões de escoamento dentro das cavidades, os melhores resultados foram produzidos com a semeadura de partículas sólidas. Conclui-se, então, que, quando comparada com as outras duas metodologias empregadas, a geração de bolhas de hidrogênio é a técnica que apresenta relação custo/benefício desfavorável. Alterações no sistema, entretanto, podem contribuir para amenizar os problemas encontrados.

A aplicação de FFT (*Fast Fourier Transform*) às séries temporais dos sinais de velocidade obtidas por anemometria de filme quente na região da camada cisalhante permitiu a obtenção, para cada caso estudado, das frequências de despreendimento de instabilidades de Kelvin-Helmholtz, necessárias ao cálculo do número de Strouhal. Com isto, comportamento oscilatório apresentado pela camada cisalhante de diferentes cavidades foi levantado em termos da curva  $St \times Re$  e equações empíricas foram ajustadas sobre os pontos experimentais. Resultados deste tipo são escassos na literatura, o que, de certa forma, realça a contribuição oferecida pelo presente trabalho.

Durante as várias etapas que compuseram a presente investigação, surgiram idéias para futuros trabalhos, que poderiam ser implementadas como uma extensão dos estudos aqui desenvolvidos. As principais delas são relacionadas a seguir:

- Aprofundar o estudo do escoamento em cavidades com razão de aspectos  $\zeta > 3$ , no interior das quais mecanismos complexos de interação entre estruturas turbilhonares parecem estar presentes;
- Realizar medições com duas ou mais sondas anemométricas instaladas simultaneamente na camada cisalhante de uma mesma cavidade, de modo a verificar a eventual existência de correlação entre os sinais de velocidade adquiridos;
- Aprimorar o sistema de geração de bolhas de hidrogênio, de maneira a produzir bolhas de menores dimensões, que possam ser arrastadas pelo campo de escoamento, sem que o empuxo influencie de maneira importante o seu movimento;

- Estudar o escoamento através de cavidades sucessivas, uma vez que esta configuração aparece frequentemente em aplicações de engenharia, notadamente em problemas envolvendo troca de calor.

# *Referências Bibliográficas*

- ASHCROFT, G., ZHANG, X., Vortical structures over rectangular cavities at low speed, **Physics of Fluids**, New York, v.17, paper 015104, pp.1-8, 2005.
- CANNON, R. M., An experimental investigation of cavity flow, PhD Thesis, University of Glasgow, Glasgow, 2003.
- CARVALHO, G.B., Estudo experimental do escoamento em torno de cilindros circulares em movimento de rotação, Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.
- CLUTTER, D.W., SMITH, A.M., Flow visualization by electrolysis of water. **Aerospace engineering**, Easton, v.20, pp.24-27, 1961.
- COLONIUS, T.; BASU, A. J.; ROWLEY, C. W., Numerical investigation of the flow past a cavity, In: Proc. 5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Washington, 1999.
- CRIMINALE JR, W.O., NOWELL, R.W., An extended use of the hydrogen bubble flow visualization method, **AIAA Journal**, New York, v.3, pp.1203, 1965.
- DAVIS, W., FOX, R.W., An evaluation of the hydrogen bubble technique for the quantitative determination of fluid velocities within clear tubes, **Journal of Basic Engineering**, New York, v.89, pp.771-781, 1967.
- ESTEVE, M. J., REULET, P., MILLAN, P., Flow field characterization within a rectangular cavity. In: Proc. 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisboa, 2000.
- FAURE, T. M., ADRIANOS, P., LUSSEYRAN, F., PASTUR, L., Visualization of the flow inside an open cavity at medium range Reynolds number, **Experiments in Fluids**, Berlin, v.42, pp.169-184, 2007.

- FRIGO, L. M., Simulação numérica de escoamentos incompressíveis tridimensionais turbulentos e em transição, Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.
- GLOERFELT, X., BAILLY, C., JUVÉ, D., Simulation des grandes échelles du champ acoustique produit par un écoulement affleurant une cavité, In: Proc. 6ème Congrès Français d'Acoustique, pp.133-136, Lille, 2002.
- GLOERFELT, X., BAILLY, C., JUVÉ, D., Direct computation of the noise radiated by a subsonic cavity flow and application of integral methods, **Journal of Sound and Vibration**, London, v.266, pp.119-146, 2003a.
- GLOERFELT, X., BOGEY, C., BAILLY, C., Numerical of mode switching in the flow-induced oscillations by a cavity, **Journal of Aeroacoustics**, v.2, pp.99-124, 2003b.
- HAMED, A., BASU, D., and DAS, K., Detached eddy simulations of supersonic flow over cavity, In: Proc. 41st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, 2003.
- HENDERSON, J., BADCOCK, K.J., RICHARDS, B.E., Understanding subsonic and transonic cavity flows, **The Aeronautical Journal**, London, v.105, pp.77-84, 2001.
- KIM, J.J., BAIK, J.J., CHUN, H.Y., Two-dimensional numerical modeling of flow and dispersion in the presence of hill and buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v.89, pp.947–966, 2001.
- KLINE, S.J., MCCLINTOCK, F.A., Describing uncertainties in single-sample experiments, **Mechanical Engineering**, New York, v.59, pp.3-8, 1953.
- LUDOVIC, B., ORKWIS, P., Turner, M., Modeling unsteady cavity flows with translating walls, In: Proc. 32nd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, St. Louis, 2002.
- MANOVSKI, P., HONNERY, D. R., SORIA, J., Investigation of flow past a cavity using PLIF and MCCDPV, In: Proc. 4th Australian Conference on Laser Diagnostics in Fluid Mechanics and Combustion, pp.93-96, Adelaide, 2005.

- MEGA, E.A., Estudo experimental do escoamento em cavidades abertas utilizando um canal de superfície livre, Dissertação, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.
- MERZKIRCH, W., Flow visualization, ed.2, Academic Press, Orlando, 1987.
- MOFFATT, H. K., Viscous and resistive eddies near a sharp corner, *Journal of Fluid Mechanics*, v.18, pp.1-18, Cambridge, 1964.
- MOFFAT, R.J., Contributions to the theory of single-sample uncertainty analysis, **Journal of Fluids Engineering**, New York, v.104, pp.250-260, 1982.
- MOFFAT, R.J., Using uncertainty analysis in the planning of an experiment, **Journal of Fluids Engineering**, New York, v.107, pp.173-178, 1985.
- MOFFAT, R.J., Describing the uncertainties in experimental results, **Experimental Thermal and Fluid Science**, New York, v.22, pp.3-17, 1988.
- ROCKWELL, D., NAUDASHER, E., Review-Self Sustaining Oscillations of Flow Past Cavities, **ASME Journal of Fluids Engineering**, New York, v.100, pp.152-165, 1979.
- ROWLEY, C.W., WILLIAMS, D.R., Dynamics and control of high-Reynolds-number flow over open cavities, **Annual Review Fluid Mechanics**, Palo Alto, v.38, pp.251-76, 2006.
- SAMIMY, M., DEBIASI, M., CARABALLO, E., ÖZBAY, H., EFE, M.Ö., YUAN, X., DEBONIS, J., MYATT, J.H., Development of closed-loop control for cavity flows, In: Proc. 33rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Orlando, 2003.
- SAROHIA, V., Experimental investigation of oscillations in flows over shallow cavities. **AIAA Journal**, California, v.15, pp.984-991, 1977.
- SCHRAUB, F.A., KLINE, S.J., HENRY, J., RUNSTADLER JR., P.W., LITTELL, A., Use of hydrogen bubbles for quantitative determination of time-dependent velocity fields in low-speed water flows, **Journal of Basic Engineering**, New York, v.87, pp.429-444, 1965.

- SHEN, C., FLORYAN, L. M., Low Reynolds number flow over cavities, **Physics of Fluids**, London, v.28, pp.3191-3202, 1985.
- SINHA, S. N., GUPTA, A. K., OBERAI, M. M., Laminar separating flow over backsteps and cavities – Part II: Cavities, **AIAA Journal**, New York, v.20, pp.370-375, 1982.
- TANEDA, S., Visualization of separating stokes flows. **Journal of the Physical Society of Japan**, Fukuoka, v.46, pp.1935-1942, 1979.
- TAKEMATSU, M., Slow viscous flow past a cavity. **Journal of the Physical Society of Japan**, Tokyo, v.21, pp.1816-1821, 1966.
- VIEIRA, E.D.R., Estudo qualitativo e quantitativo de escoamentos ao redor de corpos não-aerodinâmicos utilizando-se técnicas de visualização em meio hidrodinâmico, Tese, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1997.
- YOSHIDA, T., WATANABE, T., IKEDA, T., IIO, S., Numerical analysis of control of flow oscillations in open cavities using moving bottom wall, **JSME International Journal - Series B**, Shinshu, v.49, n.4, pp.1098-1104, 2006.
- ZDANSKI, P. S. B., Análise numérica do escoamento incompressível sobre cavidades rasas. São José dos Campos, 2001, Dissertação, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2001.
- WINTER, E.F., DETERDING, J.H., Apparatus and techniques for the application of a water flow system to the study of aerodynamic systems, **British Journal of Applied Physics**, London, v.7, pp.247-260, 1956.

# *Apêndice A*

## **ANÁLISE DE VIBRAÇÃO**

Embora já estivesse sendo amplamente utilizado, o canal de superfície livre apresentava níveis de vibração considerados inadequados à obtenção de resultados com a qualidade pretendida. As causas deste problema foram identificadas e modificações foram propostas para solucioná-lo. Em seguida, ensaios de vibração foram realizados, visando avaliar a eficácia das medidas adotadas, como descrito no presente apêndice.

### **A.1. MODIFICAÇÕES REALIZADAS**

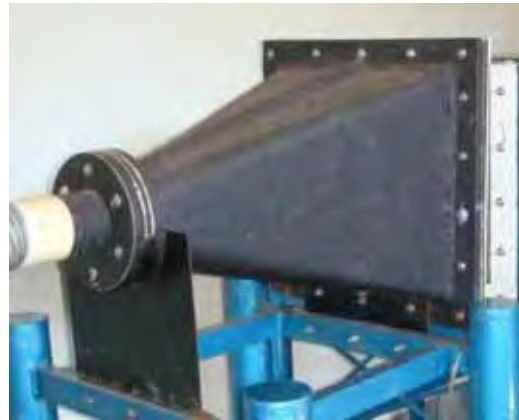
Como providências iniciais, as seguintes operações corretivas foram executadas:

- Desmontagem dos componentes e aplicação de novas camadas externas de fibra de vidro na seção de estabilização, na contração e no reservatório de descarga;
- Confecção de um novo difusor mais longo;
- Substituição de mangueiras sanfonadas por mangotes de plástico flexível reforçado nas seguintes junções: tubulação de sucção – sistema propulsor, tubulação de descarga – sistema propulsor e reservatório de descarga – tubulação de sucção;
- Substituição da conexão em T por uma em Y, para interligar as saídas do reservatório de descarga à tubulação de sucção.
- Confecção de uma estrutura individual para a sustentação o novo difusor;
- Instalação de uma junta de borracha entre o difusor e a seção de estabilização;
- Instalação de reforços metálicos para travamento da estrutura de sustentação;
- Mangueira sanfonada retorna na saída do conjunto moto bomba;
- Instalação de travas metálicas horizontais para ancoragem da tubulação de descarga às paredes lateral e posterior do laboratório.

As Figuras A.1, A.2, A.3, A.4, A.5 e A.6 mostram as principais alterações efetuadas no aparato experimental.



(a) Antes.



(b) Depois.

Figura A.1 – Construção de um novo difusor.



(a) Antes.



(b) Depois.

Figura A.2 – Substituição de mangueiras sanfonadas por mangotes flexíveis.



(a) Antes.



(b) Depois.

Figura A.3 – Substituição de conexão em T por Y.



Figura A.4 – Estrutura individual para a sustentação o novo difusor.

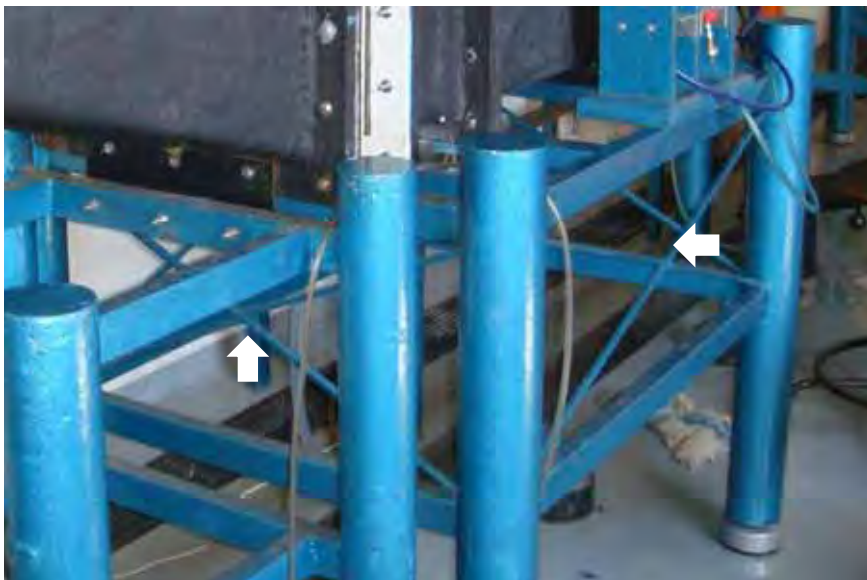


Figura A.5 - Reforços metálicos para travamento da estrutura de sustentação.

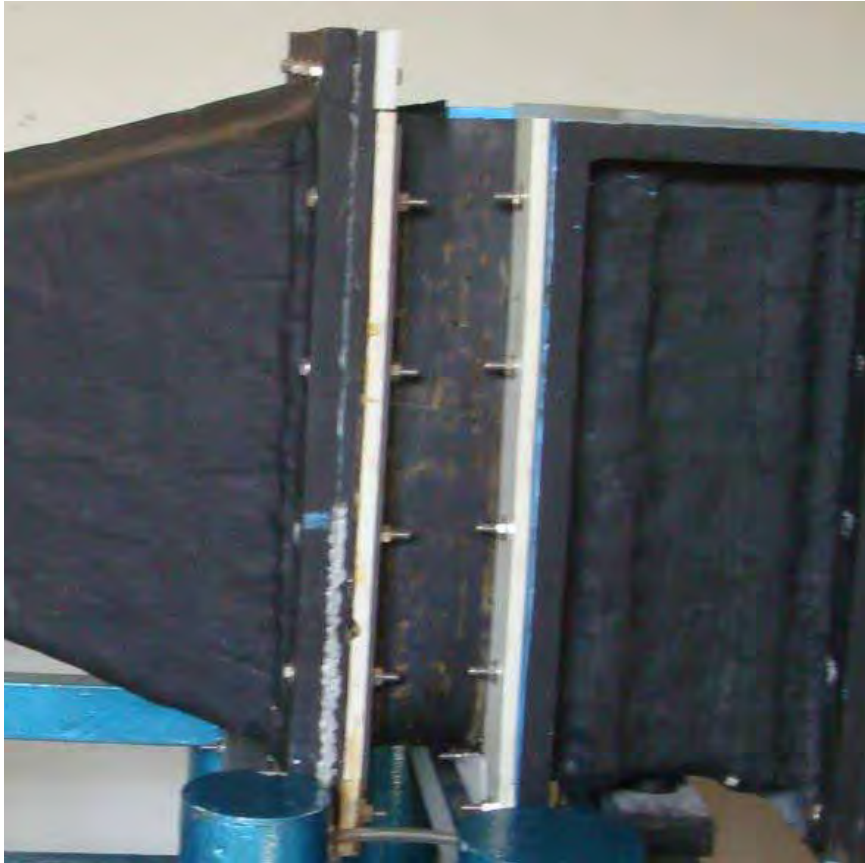


Figura A.6 - Junta de borracha entre o difusor e a seção de estabilização.

## **A.2. ENSAIOS DE QUALIFICAÇÃO**

A fim de analisar os níveis de vibração do canal, ensaios de qualificação foram realizados após ajustes iniciais executados no canal.

A investigação das condições vibratórias do canal de superfície livre foi realizada para dez valores diferentes de vazão, de 3 m<sup>3</sup>/h à vazão máxima, superior a 32 m<sup>3</sup>/h. No total, foram realizadas 31 medições, sendo que, para cada uma delas, foram salvos 4 sinais de acelerômetros simultaneamente. Os testes foram efetuados utilizando-se uma placa de aquisição de dados dSOACE 1103, um microcomputador Pentium IV com sistema operacional Windows XP, quatro acelerômetros PCB Piezotronics, um martelo de impacto de transdutor piezelétrico PCB e três condicionadores de sinais. A frequência de amostragem de captação dos sinais foi fixada em 50 kHz e as aquisições foram feitas por um tempo de um segundo.

Como mostrado na Figura A.7, os 4 acelerômetros foram posicionados da seguinte forma:

- Acelerômetro 1 (A1): no centro da seção de testes (direção X);
- Acelerômetro 2 (A2): no topo da seção de testes (direção Y);
- Acelerômetro 3 (A3): na tubulação de recalque do propulsor, imediatamente antes da mangueira flexível (direção Z);
- Acelerômetro 4 (A4): na flange de entrada do difusor (direção Z).

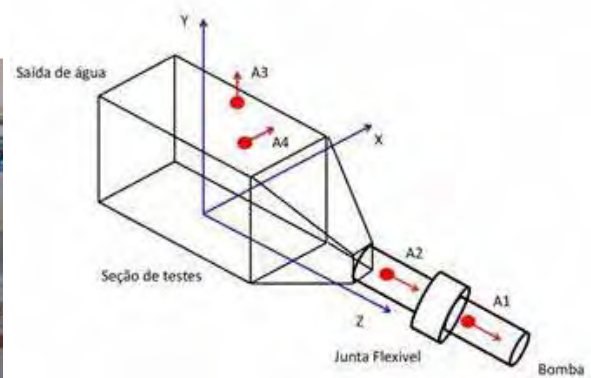
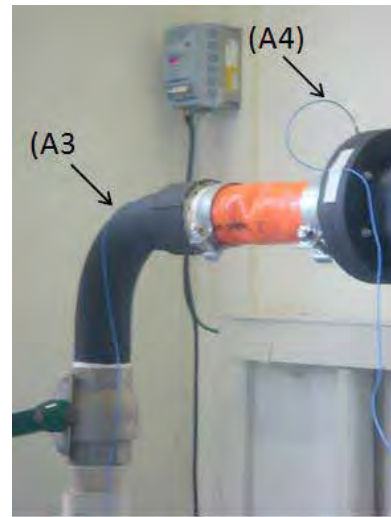
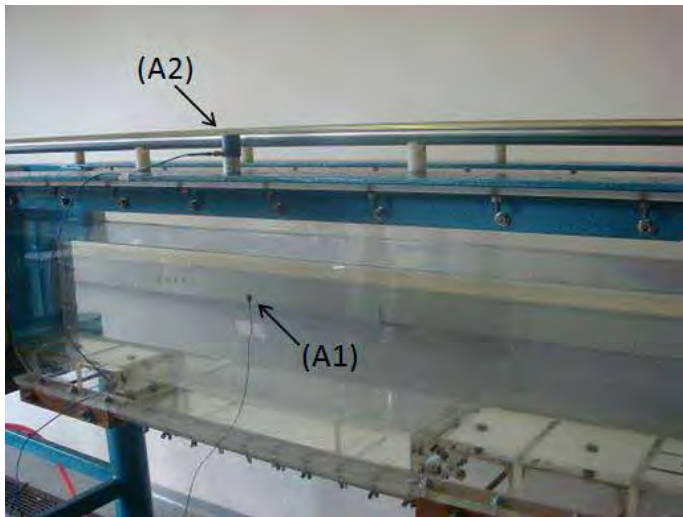


Figura A.7 – Posicionamento dos acelerômetros e eixos de referência.

Para a validação dos sinais, dados preliminares foram coletados com o auxílio de um martelo conectado ao condicionador de sinais. A Figura A.8 mostra os pontos de impacto adotados nas direções X, Y e Z. Este procedimento permitiu conhecer o ruído próprio dos acelerômetros e, além disso, obter a referência necessária para interpretar os sinais adquiridos com o canal em operação, realizados logo em seguida. As medições foram feitas com o canal preenchido com três níveis diferentes de água, como indicado na Figura A.9.



Figura A.8 – Local dos impactos com martelo instrumentado, nas direções X, Y e Z.

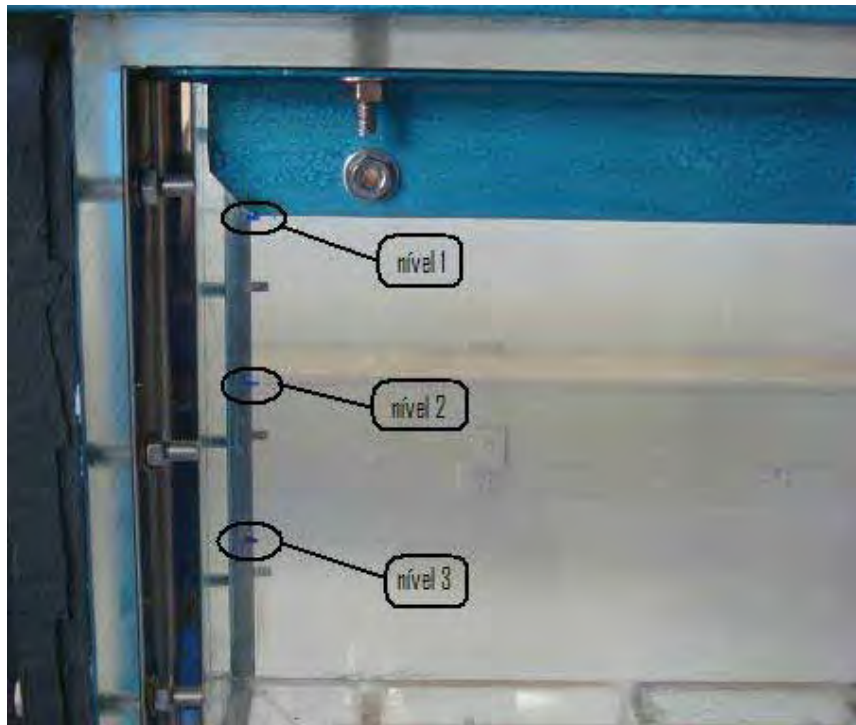


Figura A.9 – Níveis de água adotados durante os testes.

Com o canal em funcionamento, foram adquiridos os sinais dos acelerômetros para todas as vazões previamente escolhidas e, sobre os sinais brutos adquiridos, aplicou-se um filtro digital de segunda ordem, do tipo Butterworth, com frequência de corte de 0.04 da frequência de amostragem, para eliminar os ruídos de alta frequência do sinal medido. Em seguida, a análise dos dados foi realizada utilizando-se o *software* MatLab. As funções de resposta em frequência foram obtidas aplicando-se a FFT (Fast

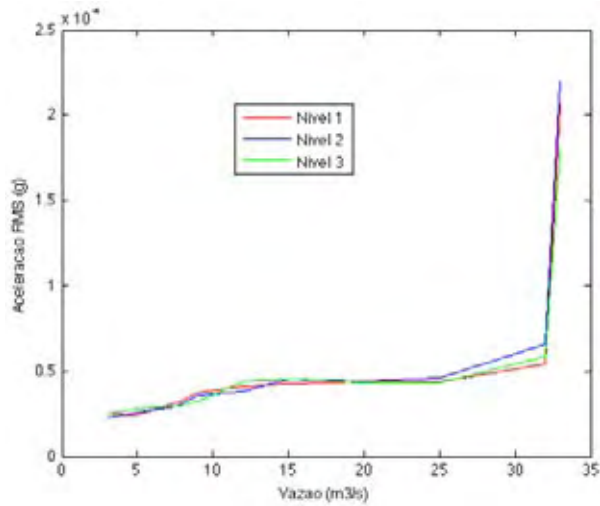
Fourier Transform) ao sinal previamente tratado. A coerência do sinal foi determinada com a ajuda da função CORRCOEF do MatLab®. Foram coletadas séries de três dados para cada uma das vazões e os resultados obtidos não apresentaram nenhuma anomalia entre os sinais. A Tabela A.1 mostra aos valores RMS das acelerações para os três diferentes níveis da superfície livre e as diferentes vazões ensaiadas.

Tabela A.1 – Valores RMS das acelerações para diferentes níveis de água na seção de testes e vazões no canal de superfície livre.

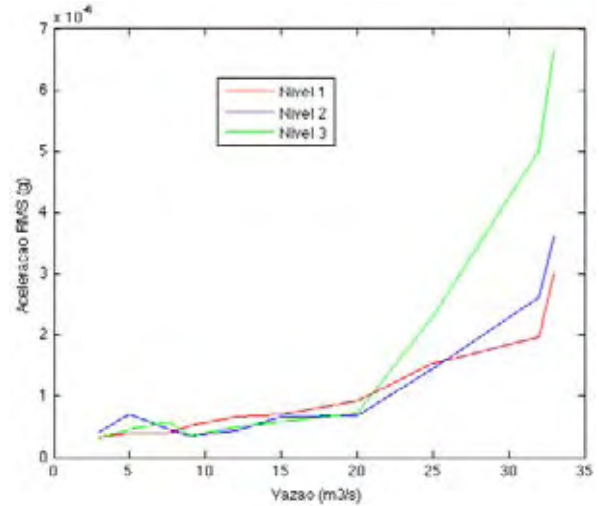
VAZÃO (m <sup>3</sup> /h)	NÍVEL 1				NÍVEL 2				NÍVEL 3			
	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
<b>3</b>	2.53e-5	3.3e-7	2.74e-9	9.92e-7	2.28e-5	4.27e-7	2.20e-9	1.38e-6	2.52e-5	3.18e-7	1.73e-9	1.17e-6
<b>5</b>	2.45e-5	3.95e-7	2.91e-9	9.98e-7	2.58e-5	6.92e-7	2.22e-9	1.91e-6	2.77e-5	4.63e-7	1.77e-9	1.27e-6
<b>7.6</b>	3.16e-5	3.87e-7	3.26e-9	1.01e-6	2.92e-5	4.67e-7	3.04e-9	1.60e-6	2.91e-5	5.76e-7	2.35e-9	1.11e-6
<b>9</b>	3.74e-5	5.09e-7	3.53e-9	1.01e-6	3.57e-5	3.58e-7	3.59e-9	1.33e-6	3.23e-5	3.58e-7	2.07e-9	9.99e-7
<b>12</b>	4.11e-5	6.60e-7	4.33e-9	9.16e-7	3.84e-5	4.47e-7	3.93e-9	1.77e-6	4.42e-5	4.98e-7	2.56e-9	1.20e-6
<b>15</b>	4.26e-5	7.04e-7	4.93e-9	9.61e-7	4.53e-5	6.69e-7	4.78e-9	1.28e-6	4.57e-5	5.72e-7	3.53e-9	1.20e-6
<b>20</b>	4.40e-5	9.18e-7	5.45e-9	9.76e-7	4.43e-5	6.86e-7	5.34e-9	1.00e-6	4.34e-5	7.32e-7	4.91e-9	1.02e-6
<b>25</b>	4.38e-5	1.53e-6	6.14e-9	9.68e-7	4.62e-5	1.46e-6	5.66e-9	1.28e-6	4.35e-5	2.31e-6	6.73e-9	9.08e-7
<b>32</b>	5.40e-5	1.97e-6	8.21e-9	9.65e-7	6.61e-5	2.62e-6	7.33e-9	1.22e-6	5.82e-5	5.02e-6	8.19e-9	1.01e-6
<b>Máxima</b>	2.07e-4	3.00e-6	1.60e-8	9.51e-7	2.20e-4	3.61e-6	1.63e-8	1.02e-6	1.80e-4	6.64e-6	1.83e-8	1.48e-6

A Figura A.10 mostra a evolução da aceleração RMS em função da vazão, em cada um dos pontos de medição e para cada um dos níveis de água ajustados na seção de testes. Pode-se observar que, em quase todos os casos, os níveis de vibração RMS cresceram com o aumento da vazão. Observa-se, ainda, um crescimento abrupto das curvas quando as vazões se aproximam de 30 m<sup>3</sup>/s. Isto pode ser atribuído ao início do fenômeno da cavitação na bomba e em outros elementos do circuito. Deve-se, portanto, evitar a realização de ensaios com o canal operando nestas condições.

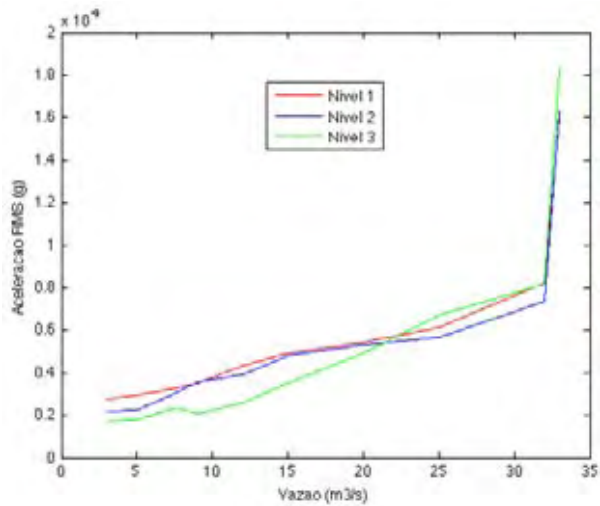
Para as três condições de impacto, os resultados da resposta das FFT são apresentados na Figura A.11, apenas para o nível 1 de água no canal de superfície livre, já que os demais níveis apresentam frequências características semelhantes.



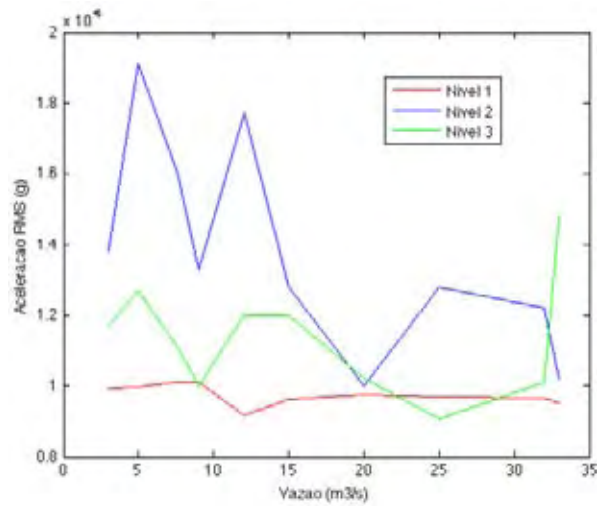
(a) Acelerômetro A<sub>1</sub>



(b) Acelerômetro A<sub>2</sub>



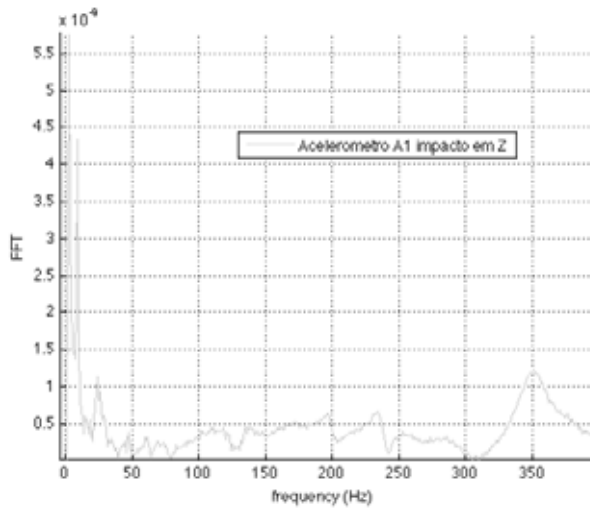
(a) Acelerômetro A<sub>3</sub>



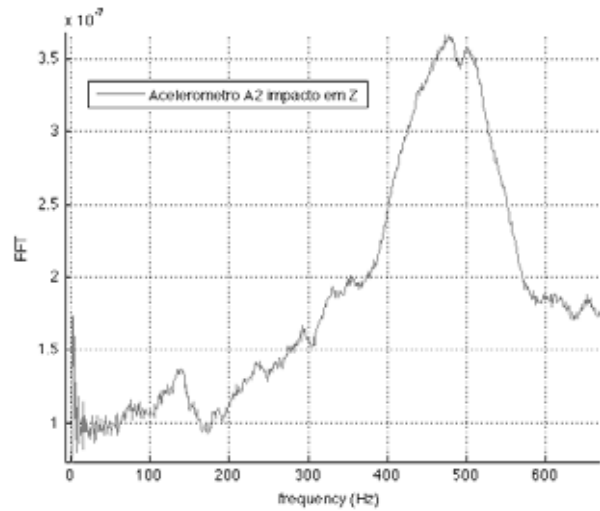
(b) Acelerômetro A<sub>4</sub>

Figura A.10 – Comportamento vibratório do canal, em função da vazão e do nível da superfície livre na seção de testes, capturada pelos acelerômetros A1, A2, A3 e A4.

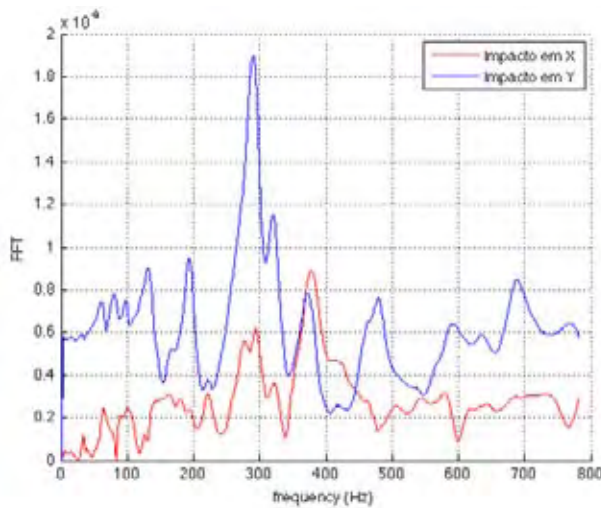
Na Figura A.11 são observados picos relevantes nas curvas obtidas no domínio da frequência, podendo-se, portanto, estimar um modelo dinâmico equivalente, que apresente os mesmos parâmetros dinâmicos (frequência natural) da estrutura em questão. A Tabela A.2 apresenta os valores dos picos de frequência para cada acelerômetro.



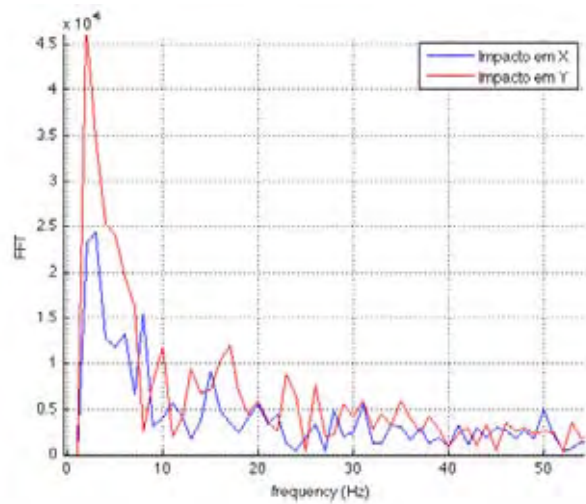
(a) Acelerômetro A<sub>1</sub>



(b) Acelerômetro A<sub>2</sub>



(c) Acelerômetro A<sub>3</sub>



(d) Acelerômetro A<sub>4</sub>

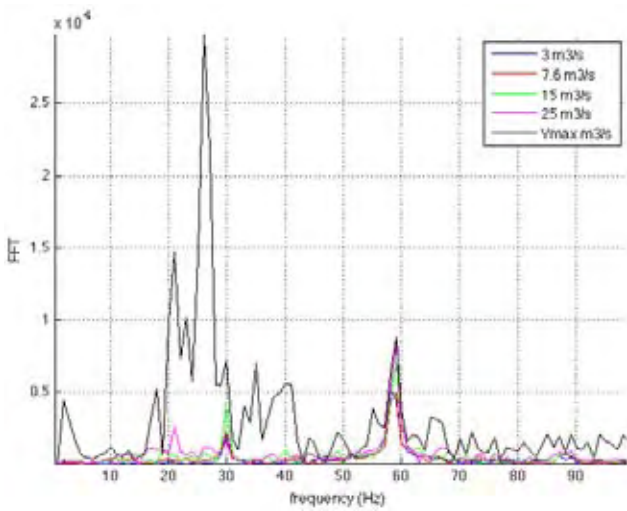
Figura A.11 – Sinais dos acelerômetros no domínio da frequência.

Tabela A.2 – Frequências naturais da estrutura analisada, para cada acelerômetro (em negrito as frequências mais marcantes para cada situação).

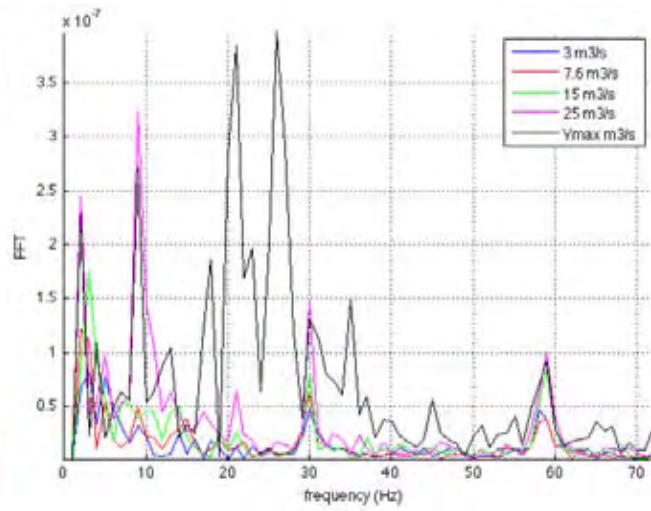
Freq.	A1	A2	A3	A4
w <sub>1</sub>	<b>2 Hz</b>	<b>2Hz</b>	60Hz	<b>2Hz</b>
w <sub>2</sub>	<b>9 Hz</b>	5Hz	91Hz	8Hz
w <sub>3</sub>	24Hz	9Hz	193Hz	13Hz
w <sub>3</sub>	350 Hz	138Hz	<b>290Hz</b>	20Hz

A Figura A.12 representa as FFT durante a operação do canal de superfície livre para todos os acelerômetros, com algumas vazões da bomba, tomando como base o

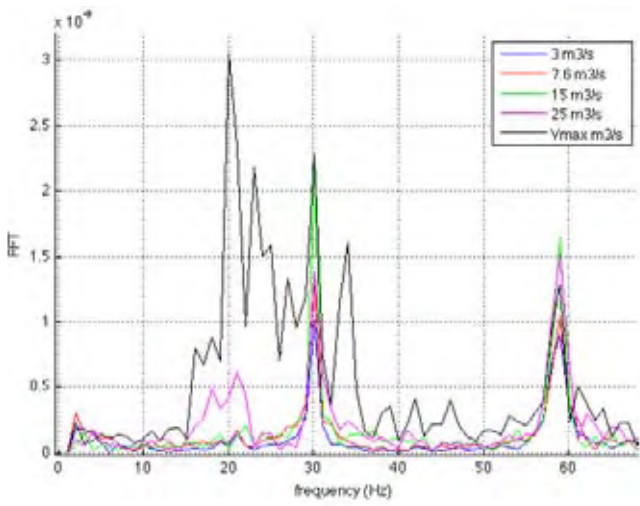
primeiro nível de água. Pode-se notar com clareza em todos os acelerômetros, para as diferentes vazões (exceto para o Acelerômetro A4), as frequências de 30 e 60 Hz.



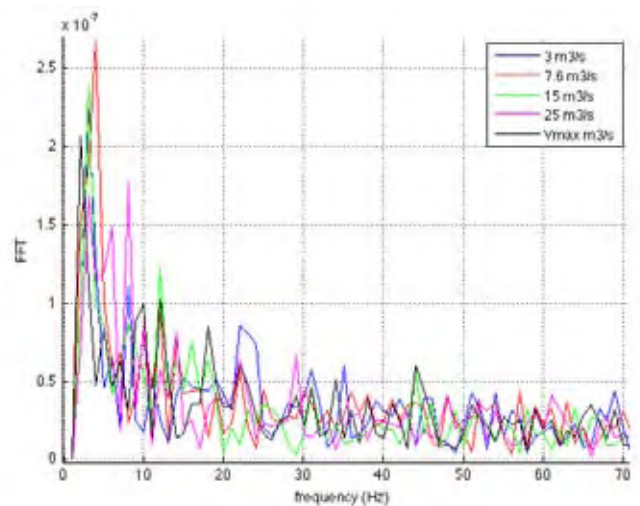
(a) Acelerômetro A1.



(b) Acelerômetro 2.



(c) Acelerômetro A3.



(d) Acelerômetro 4.

Figura A.12 – Sinais dos acelerômetros no domínio da frequência.

A Tabela A.3 mostra-se os valores das correlações entre o sinal de entrada (valor medido pelo acelerômetro A1) e os demais sinais, para os diferentes valores de vazão (nível 1 de água no túnel).

Assim, pode-se observar, inicialmente, que as propriedades dos acelerômetros e do sistema de aquisição de sinais foram verificadas, e a frequência de amostragem se apresentou muito alta para os acelerômetros utilizados.

Tabela A.3 – Valores das correlações.

Vazão (m <sup>3</sup> /s)	A2	A3	A4
3	0.1808	-0.2047	0.0109
5	0.1620	0.2484	0.0486
7.6	0.1677	0.1634	-0.0093
9	0.1574	0.1406	-0.0045
12	0.1228	-0.0523	-0.0215
15	0.1534	-0.0509	-0.0007
20	0.0995	-0.1020	0.0023
25	0.1202	0.2228	-0.0085
32	0.0018	-0.0537	0.0103
<b>Máxima</b>	0.1918	0.0378	-0.0326

Baseando-se na resposta ao impacto (Figura A.11) nas diferentes direções é possível perceber a baixa rigidez do sistema nas direções X e Z, uma vez que a frequência natural nesta direção (Tabela A.2) são mais baixas do que na direção Y, por exemplo.

Pode-se observar na Figura A.12, acelerômetros 1 e 2, uma frequência harmônica, mesmo com diferentes vazões. A frequência está em torno de 30 Hz (existe também uma frequência múltipla, cerca de 60Hz), esta deve estar associada a rotação da bomba, uma vez que esta foi mantida constante.

Assim, para reduzir os níveis de vibração dos sistemas, foram realizados ajustes finais no projeto a fim de aumentar a rigidez da estrutura na direção Z, uma vez que a direção mais rígida apresenta-se na direção Y, no acelerômetro A3, ou seja, este acelerômetro apresentou as menores amplitudes, conforme demonstrado na Tabela A.1.

A Figura A.13 mostra modificações realizadas no canal, como a fixação da de uma barra na direção Z unindo a tubulação de descarga à estrutura de alvenaria do laboratório. Também foi construída uma estrutura de sustentação para o difusor, a fim de isolá-lo da seção de estabilização. Para unir esses dois componentes, foi confeccionada uma junta de borracha.

Como anteriormente realizado, análise de vibração foram efetuadas, visando avaliar a eficácia das medidas adotadas. Assim, varias medições foram realizadas para diferentes condições de operação do canal. Os ensaios foram realizados com três níveis distintos de água na seção de testes. Para cada um destes níveis, foram realizadas medições para nove vazões diferentes, quais sejam: 3, 5, 7,6, 9, 12, 15, 20, 25,

32 (m<sup>3</sup>/h). Em cada medição, os sinais dos quatro acelerômetros foram adquiridos simultaneamente.

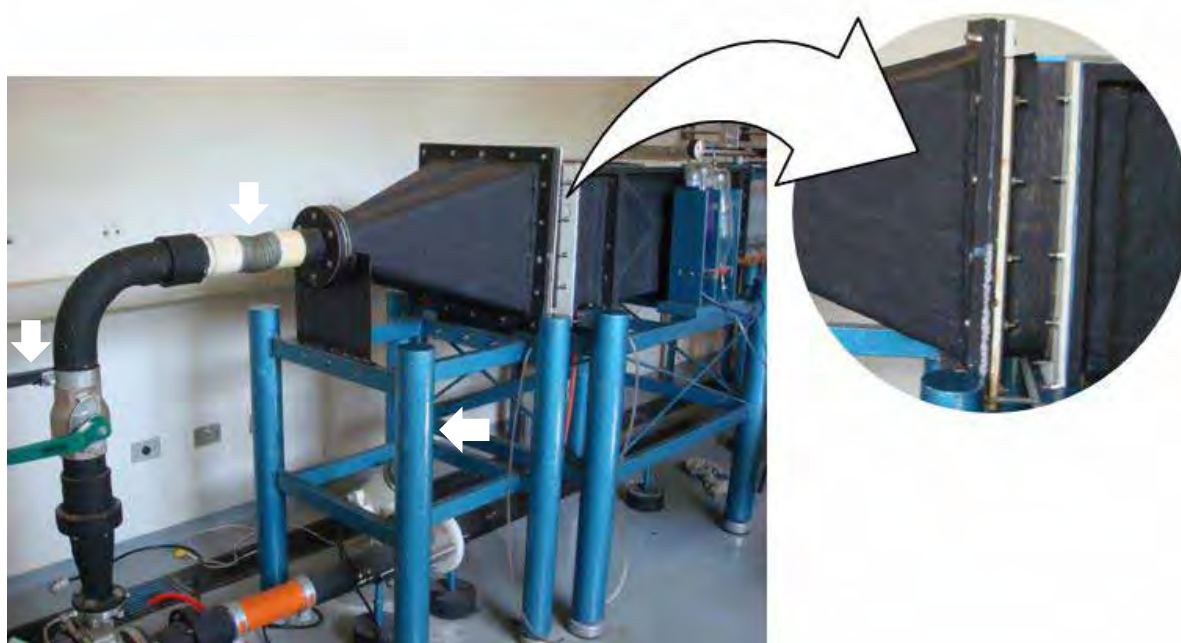
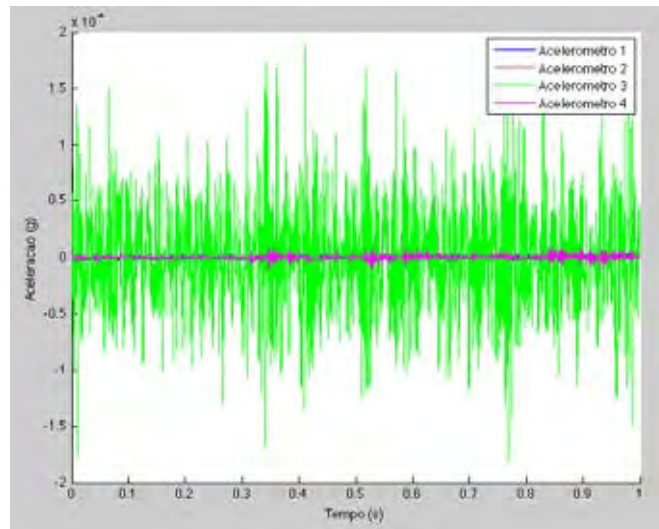


Figura A.13 – Ajustes realizados no projeto.

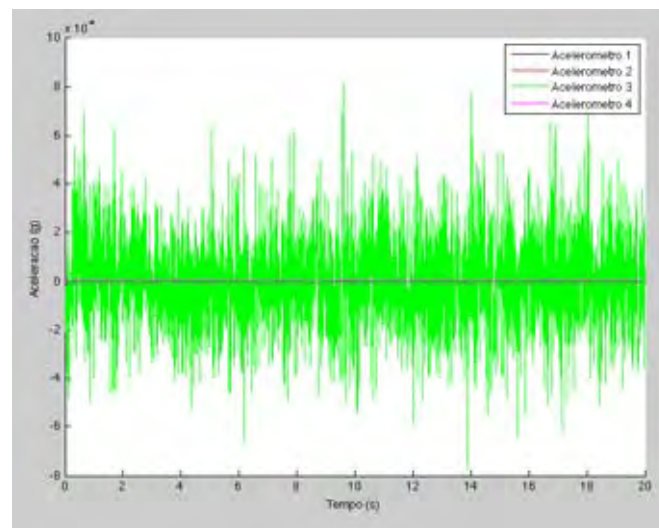
Num primeiro momento, os testes foram realizados com uma frequência de amostragem de 50 kHz e um tempo de aquisição de um segundo. Estes parâmetros se revelaram inadequados à obtenção dos resultados e, nos testes definitivos, a frequência de amostragem foi reduzida para 10 kHz e o tempo de aquisição foi estendido para 20 segundos. A título de ilustração, dois resultados típicos, obtidos para os acelerômetros A1, A2, A3 e A4, são apresentados na Figura A.14, para os testes iniciais e para os testes definitivos.

A análise dos sinais foi efetuada em ambiente MatLab®. Antes de cada análise um filtro digital de segunda ordem do tipo Butterworth foi aplicado com frequência de corte de 0.04 da frequência de amostragem. Esta operação foi executada com o objetivo de eliminar os ruídos de alta frequência do sinal medido. As funções de resposta em frequência foram obtidas através da transformada rápida de Fourier. A coerência entre os sinais foi avaliada com o auxílio da função CORRCOEF do MatLab®.

Em todas as aquisições, três séries de dados foram coletadas e todos os resultados obtidos foram analisados para a identificação de eventuais incompatibilidades. Nenhuma anomalia de forma entre os sinais foi notada.



(a) Ensaio preliminar.



(b) Ensaio definitivo.

Figura A.14 – Sinal típico de aceleração adquirido ao longo do tempo pelos acelerômetros A1, A2, A3 e A4.

Os resultados destes ensaios forneceram elementos importantes para orientar modificações na configuração do canal. As principais delas são listadas abaixo:

- Analisando-se a resposta ao impacto da estrutura nas diferentes direções, pôde-se perceber a baixa rigidez do sistema nas direções X e Z, em relação à direção Y. Reforços estruturais foram empregados para a correção do problema. Os ensaios realizados após a implementação desta medida mostraram melhora considerável no resultado;
- De maneira geral, os níveis de vibração RMS crescem com aumento da vazão, mas apresentam elevação substancial para vazões acima de 20 m<sup>3</sup>/h, quando passa a

ocorrer cavitação na válvula reguladora de vazão. O problema foi amenizado com a substituição da válvula globo que antes equipava o canal por uma de esfera. Ainda que a válvula de esfera não seja a mais indicada para utilização como elemento de controle de vazão, os níveis de cavitação nesta válvula se mostraram bastante inferiores aos apresentados pela válvula globo utilizada, reduzindo os problemas de vibração;

- A correlação entre os sinais adquiridos com o acelerômetro A1 (instalado na tubulação de recalque da bomba, a jusante do mangote de união) e todos os demais acelerômetros é considerada fraca, como mostra a Tabela A.4. Assim, pode-se considerar que as vibrações observadas na seção de testes não são, em sua maior parte, provenientes do funcionamento da bomba ou das mudanças de área e direção que o fluido sofre na tubulação de recalque. Ao que tudo indica, estas vibrações decorrem do impacto do fluido de trabalho com as esferas que ocupam o interior do difusor. Para solucionar o problema, este elemento foi isolado da seção de estabilização por intermédio de uma junta elástica.

Tabela A.4 – Correlações entre os sinais do acelerômetro A1 e os demais acelerômetros, para diferentes vazões.

<b>Vazão (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	<b>A4</b>
<b>3</b>	0.1808	-0.2047	0.0109
<b>5</b>	0.1620	0.2484	0.0486
<b>7.6</b>	0.1677	0.1634	-0.0093
<b>9</b>	0.1574	0.1406	-0.0045
<b>12</b>	0.1228	-0.0523	-0.0215
<b>15</b>	0.1534	-0.0509	-0.0007
<b>20</b>	0.0995	-0.1020	0.0023
<b>25</b>	0.1202	0.2228	-0.0085
<b>32</b>	0.0018	-0.0537	0.0103

# Apêndice B

## INTENSIDADE TURBULENTA

Uma das características marcantes da turbulência é a aleatoriedade que caracteriza as flutuações das propriedades de um escoamento, tais como a velocidade, a pressão, a temperatura ou a massa específica. Esta sua natureza estocástica, permite estabelecer que, em um escoamento turbulento estatisticamente permanente, a velocidade em um ponto é dada pela velocidade média temporal acrescida da flutuação instantânea da velocidade em relação à média, ou seja:

$$U(\vec{x}, t) = \bar{U}(\vec{x}) + u'(x, t) \quad (\text{B.1})$$

onde,  $\vec{x}$  representa as coordenadas temporais,  $U$  é a velocidade instantânea medida pelo anemômetro,  $u'$  é a flutuação de velocidade e  $\bar{U}$  seu valor médio temporal, dado por:

$$\bar{U}(x) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T'} U(x, t) dt \quad (\text{B.2})$$

onde  $T'$  é o intervalo de tempo considerado no cálculo da média.

No caso de um sinal anemométrico discreto, a Equação B.2 pode ser escrita na forma:

$$\bar{U}(x) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U^n(x, t) \quad (\text{B.3})$$

onde  $N$  é o número de pontos contidos no intervalo de tempo  $T'$  e  $n$  é o instante de tempo.

A intensidade turbulenta ( $I$ ) é definida como:

$$I = \frac{\bar{u}'_{RMS}}{\bar{U}} \quad (\text{B.4})$$

onde  $\bar{u}'_{RMS}$  é a média quadrática das flutuações aleatórias de velocidade, que, no caso de um sinal discreto, pode ser calculada como:

$$\bar{u}'_{RMS} = \left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [u'^n(x,t)]^2 \right)^{1/2} \quad (\text{B.5})$$

# Apêndice C

## CONFIGURAÇÃO DA SEÇÃO DE ESTABILIZAÇÃO

A seção de estabilização do canal é equipada com uma série de elementos, que têm por finalidade corrigir eventuais distorções no perfil de velocidade e diminuir a intensidade turbulenta na entrada da contração.

Como discutido por Mega (2009) e ilustrado na Figura C.1, as colmeias têm a função de reduzir as componentes transversais da velocidade, enquanto as telas reduzem os gradientes transversais de velocidade, homogeneizando o perfil.

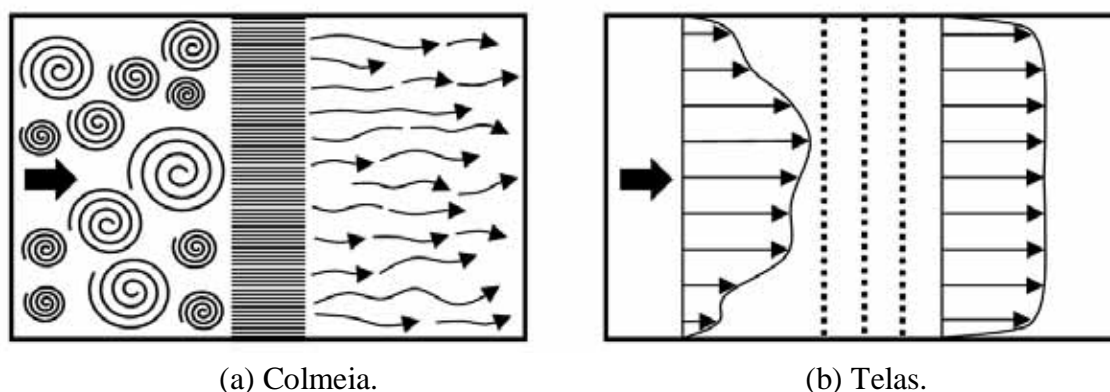


Figura C.1 - Retificação do escoamento na passagem por colmeias e telas. Retirado de Mega (2009)

Para obter uma boa qualidade do escoamento na seção de testes, três configurações de seção de estabilização foram testadas: sem colmeia, com uma única colmeia ou com duas colmeias posicionadas em série.

Aquisições do sinal de velocidade foram feitas por anemometria de filme quente, em uma faixa de vazão entre 1 e 10 m<sup>3</sup>/h. Em cada medição, mais de 131000 pontos foram coletados, com uma taxa de aquisição de 30 kHz, durante 5 segundos. De posse

destes dados, as correspondentes intensidades turbulentas foram calculadas e utilizadas como critério de escolha da configuração adotada.

A Tabela C.1 e a Figura C.2 mostram que o uso de nenhuma, uma ou duas coleias pouco afeta a intensidade turbulenta na entrada da seção de testes. Provavelmente, isto ocorre porque o uso de esferas dentro difusor e grades na entrada da seção de estabilização pré-condicionam o escoamento, diminuindo a importância das colmeias como elementos de retificação. De qualquer forma, como os resultados obtidos com uma só colmeia foram ligeiramente melhores que os demais, sobretudo para  $Re > 3000$ , esta configuração foi adotada em toda a campanha de ensaios.

Tabela C.1 – Intensidade turbulenta em função da configuração da seção de estabilização e do número de Reynolds.

SEM COLMÉIA		UMA COLMÉIA		DUAS COLMÉIAS	
<i>Re</i>	<i>I (%)</i>	<i>Re</i>	<i>I (%)</i>	<i>Re</i>	<i>I (%)</i>
788	0.83	831	0.71	680	0.36
1071	0.24	1257	0.96	741	0.51
1523	0.77	1474	0.42	1200	0.66
1959	0.56	1870	0.72	1631	0.72
2298	0.40	2292	0.27	2209	0.31
2542	0.22	2541	0.27	2488	0.23
2873	0.74	2914	0.33	2911	0.25
3238	0.35	3186	0.38	3382	0.22
3460	0.19	3365	0.18	3826	0.19
3956	0.23	3817	0.15	4088	0.22
4300	0.35	4069	0.16	4578	0.19
4683	0.24	4322	0.12	4870	0.16
5179	0.24	4670	0.18	5262	0.18
5825	0.18	4718	0.14	5792	0.16
6474	0.12	4950	0.10	6119	0.16
6968	0.12	4966	0.14	6423	0.16
7465	0.14	5406	0.14	6672	0.16
7830	0.21	5776	0.09	6908	0.16
		6032	0.11	7453	0.16
		6229	0.10	7893	0.16
		6985	0.10		
		7281	0.001		

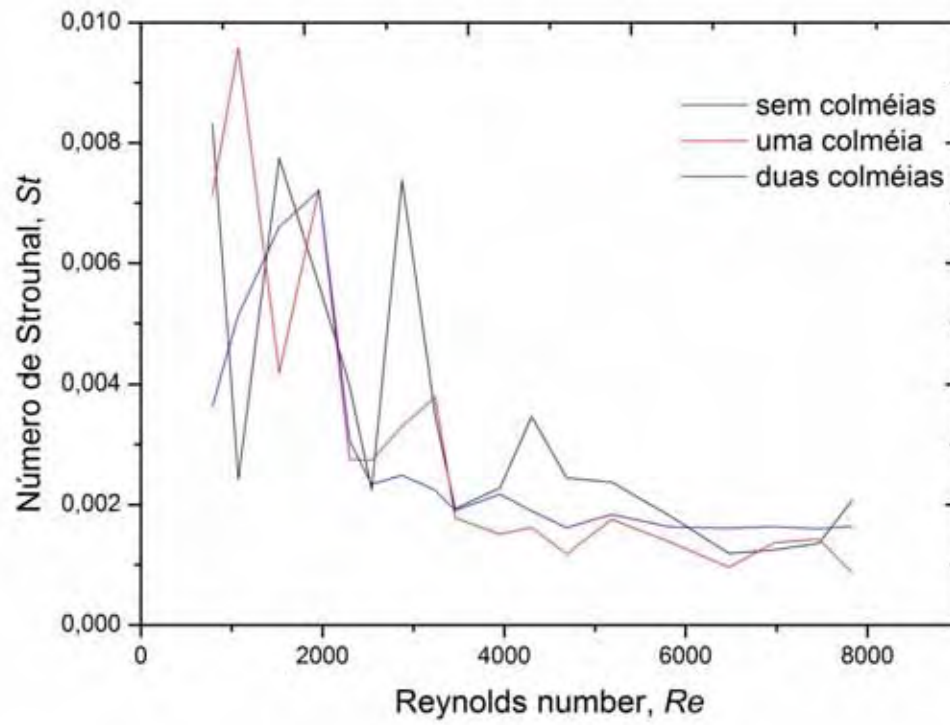


Figura C.2 – Intensidade turbulenta *versus* número de Reynolds.

# Apêndice D

## ESTIMATIVA DE INCERTEZAS EXPERIMENTAIS

A técnica de projetar o intervalo de incerteza associado a um resultado experimental, baseando-se em observações da dispersão dos dados utilizados no cálculo deste resultado, é chamada análise de incerteza. A incerteza no cálculo dos parâmetros utilizados neste trabalho foi estimada com base no método sugerido por Kline e McClintock (1953) e Moffat (1982, 1985 e 1988).

### D.1. ANÁLISE DE INCERTEZA PARA AMOSTRAGEM SIMPLES

Os experimentos de amostragem simples são aqueles que cada ponto experimental é testado somente uma vez, ou no máximo poucas vezes. Pesquisas experimentais em mecânica dos fluidos e transferência de calor são, geralmente, experimentos de amostragem simples, caracterizado por dados distribuídos ao longo de uma ampla faixa do parâmetro.

Considere-se uma variável  $X_i$  que possui uma incerteza conhecida  $\delta X_i$ . A maneira de representar a variável e sua incerteza são:

$$X_i = X_i(\text{medido}) \pm \delta X_i \quad (\text{D.1})$$

onde  $X_i(\text{medido})$  representa a leitura realizada e  $\delta X_i$  representa  $2\sigma$ , sendo  $\sigma$  o desvio padrão da população de possíveis medidas das quais a única amostra  $X_i$  foi tirada.

Esta representação deve ser interpretada no seguinte sentido:

- A melhor estimativa de  $X_i$  é  $X_i(\text{medido})$ ;
- Existe uma incerteza em  $X_i$  que pode ser tão grande quanto  $\pm \delta X_i$ ;

- As chances da incerteza de  $X_i$  ser menor do que  $\pm \delta X_i$  são de 95%.

Em casos de experimentos com amostragem simples, a determinação de  $\sigma$  exige a realização de um experimento auxiliar para estimar a componente aleatória da incerteza. Este experimento auxiliar geralmente consiste na obtenção de um conjunto de observações independentes do processo numa condição de ensaio representativa, geralmente um conjunto de 30 observações. O desvio padrão da população  $\sigma$  pode, então, ser calculado a partir do desvio padrão da amostra  $S$  obtido do experimento auxiliar, utilizando a distribuição de Student.

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

$$R = R(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N) \quad (D.2)$$

O efeito da incerteza de uma única variável sobre o resultado calculado é dada por:

$$\delta R_{X_i} = \frac{\partial R}{\partial X_i} \delta X_i \quad (D.3)$$

A derivada parcial de  $R$  em relação à  $X_i$  é conhecida como coeficiente de sensibilidade do resultado  $R$  em relação à variável  $X_i$ . Quando diversas variáveis independentes são utilizadas no cálculo do resultado, os termos individuais são combinados formando a equação básica da análise das incertezas, representada por:

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

Cada termo representa a contribuição feita pela incerteza de uma variável ( $\delta X_i$ ) para a incerteza global do resultado ( $\delta R$ ). Todos os termos possuem a mesma forma: a derivada parcial de  $R$  em relação à  $X_i$ , multiplicada pela incerteza desta variável. A Equação (D.4) é válida quando as seguintes condições são observadas:

- Cada uma das medições é independente das demais;
- A incerteza de cada variável é expressa com a mesma probabilidade;
- Se fossem realizadas repetidas medições de cada variável, sua dispersão apresentaria

dispersão Gaussiana.

Na maioria das situações, a incerteza global de um resultado é dominada por apenas alguns de seus termos. Os termos da Equação (D.4) que são menores do que o maior termo por um fator de 3 ou mais, geralmente, podem ser ignorados.

Em muitas aplicações, deseja-se que a incerteza de um resultado seja expressa como uma fração deste. Quando a expressão do resultado pode ser escrita na forma de um produto, tal como a Equação (D.5), a incerteza relativa pode ser encontrada diretamente. Isto é, se:

$$R = X_1^a X_2^b X_3^c \dots X_N^m \quad (D.5)$$

então,

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

Esta é a forma natural e conveniente de calcular a incerteza relativa do resultado, quando se conhece a incerteza relativa das variáveis envolvidas. Neste caso, os expoentes de  $X_i$  são os coeficientes de sensibilidade dos termos da Equação (D.6).

## D.2. ANÁLISE DE INCERTEZA DAS VARIÁVEIS DE INTERESSE

### D.2.1 Comprimento

As dimensões da seção de testes foram medidas com o auxílio de uma régua milimetrada, exceto para a altura e o comprimento da cavidade, as quais foram medidas como auxílio de um paquímetro digital Mitutoyo Digimatic 0,01 – 150mm. As incertezas associadas às medições realizadas tanto com a régua, quanto com o paquímetro digital, é a metade da menor divisão do instrumento, ou seja, para a régua é  $\delta X = 0,5\text{mm}$  e para o paquímetro é  $\delta X = 0,005\text{mm}$ .

### D.2.2 Temperatura

A temperatura da água é um parâmetro que exerce uma grande influência sobre as suas propriedades, tais como a viscosidade e a densidade. A temperatura foi medida 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  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $750^{\circ}\text{C}$ , com incerteza de 0,75% do valor da leitura +  $1^{\circ}\text{C}$ .

### D.2.3 Área

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

$$A = B \cdot C \quad (\text{D.7})$$

onde  $B$  é a largura da seção de testes e  $C$  é a altura da lâmina d'água, cujo ambos os valores são 0,2m. A incerteza associada ao cálculo da área pode ser estimada por:

$$\frac{\delta A}{A} = \left[ \left( \frac{\delta B}{B} \right)^2 + \left( \frac{\delta C}{C} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{D.8})$$

portanto a incerteza relativa da área da seção de testes é de 0,35%.

### D.2.4 Viscosidade Cinemática

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

$$\nu(T) = \frac{\mu(T)}{\rho(T)} \quad (\text{D.9})$$

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 D.1.

Tabela D.1 - Correlações para o cálculo da viscosidade cinemática da água.

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

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

$$\frac{\delta v}{v} = \left[ \left( \frac{\delta \mu}{\mu} \right)^2 + \left( -\frac{\delta \rho}{\rho} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{D.10})$$

Para faixas de temperatura na qual foram realizados os ensaios, entre 28 e 36 °C, a incerteza relativa da viscosidade cinemática da água é de  $\pm 0,2\%$ .

### D.2.5. 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):

$$\delta f = \frac{F}{N} \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad (\text{D.11})$$

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 546 pontos, a uma taxa de 0,161 Hz. Assim, sua incerteza pode ser estimada como  $\delta f = 0,0003 \text{ s}^{-1}$ .

### D.2.6. Vazão

A vazão do escoamento no canal hidrodinâmico é medida com o auxílio de um medidor de vazão eletromagnético. Segundo a especificação do fabricante, este instrumento possui uma precisão de  $\pm 1\%$  do valor do fundo de escala, para vazões maiores do que 50% do fundo de escala, enquanto que para vazões menores do que 50% do fundo de escala, sua incerteza é de  $\pm 0,5\%$  do valor do fundo de escala. Por se tratar de um equipamento eletrônico, o fundo de escala pode ser ajustado de acordo com a faixa de valores da vazão dos ensaios programados. Ao longo do presente trabalho, o fundo de escala do medidor de vazão foi ajustado em 17 m<sup>3</sup>/h, que corresponde à máxima vazão utilizada. Assim, a incerteza da vazão pode ser estimada como  $\delta Q = 0,085 \text{ m}^3/\text{h}$ , para vazões inferiores a 8,5 m<sup>3</sup>/h, e  $\delta Q = 0,17 \text{ m}^3/\text{h}$ , para vazões superiores a 8,5 m<sup>3</sup>/h.

### D.2.7. 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,

$$V_{\infty} = \frac{Q}{A} \quad (\text{D.12})$$

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)

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

A Tabela D.2 apresenta valores típicos das incertezas das velocidades da corrente livre para diferentes vazões.

Tabela D.2 - Valores típicos da incerteza da velocidade da corrente livre.

$Re$	$Q(m^3/h)$	$V_{\infty}(m/s)$	$\delta V_{\infty}/V_{\infty}$
1100	2,36	0,016	3,6%
2200	4,78	0,034	1,8%
4800	10,00	0,071	1,7%
6100	12,60	0,089	1,3%
8300	16,80	0,119	1%

### D.2.8. Número de Reynolds

O número de Reynolds do escoamento no interior de uma cavidade é definido pela seguinte expressão:

$$Re = \frac{V_{\infty} \cdot h}{\nu} \quad (\text{D.14})$$

onde  $h$  é a dimensão da profundidade da cavidade, cujo o valor é 50mm.

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

$$\frac{\delta Re}{Re} = \left[ \left( \frac{\delta V_{\infty}}{V_{\infty}} \right)^2 + \left( \frac{\delta h}{h} \right)^2 + \left( -\frac{\delta \nu}{\nu} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{D.15})$$

a Tabela D.3 apresenta valores das incertezas dos números de Reynolds para diferentes valores de velocidades.

Tabela D.3 – Valores típicos da incerteza do número de Reynolds.

$V_{\infty} (m/s)$	$Re$	$\delta Re / Re$
0,016	1100	3,60%
0,034	2200	1,81%
0,071	4800	1,71%
0,089	6100	1,31%
0,119	8300	1%

### D.2.9. Razão de Aspecto

A razão de aspecto ( $\zeta$ ) de uma cavidade retangular é dada pela relação entre o seu comprimento e sua altura. Assim, tem-se que:

$$\zeta = \frac{b}{h} \quad (D.16)$$

onde  $b$  é o comprimento da cavidade e  $h$  é a sua altura. Assim, a incerteza associada a este parâmetro pode ser estimada por:

$$\frac{\delta \zeta}{\zeta} = \left[ \left( \frac{\delta b}{b} \right)^2 + \left( -\frac{\delta h}{h} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (D.17)$$

Os valores das incertezas das razões de aspecto podem ser encontrados na Tabela D.4.

Tabela D.4: Valores das incertezas do cálculo da razão de aspecto.

$\zeta$	$\delta \zeta / \zeta$
0,5	0,022%
1	0,014%
2	0,011%
4	0,017%
8	0,0025%
10	0

# Apêndice E

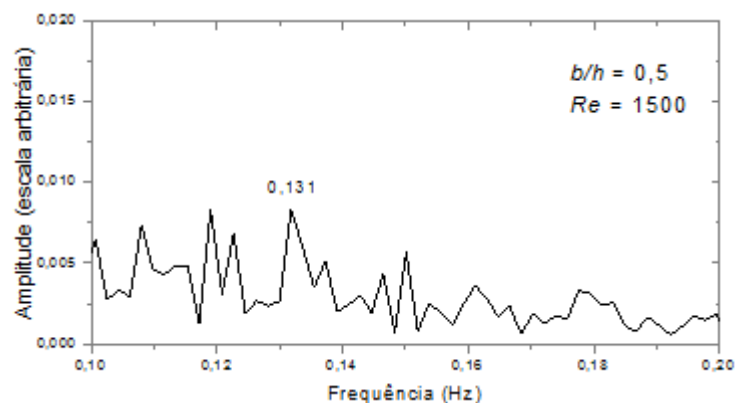
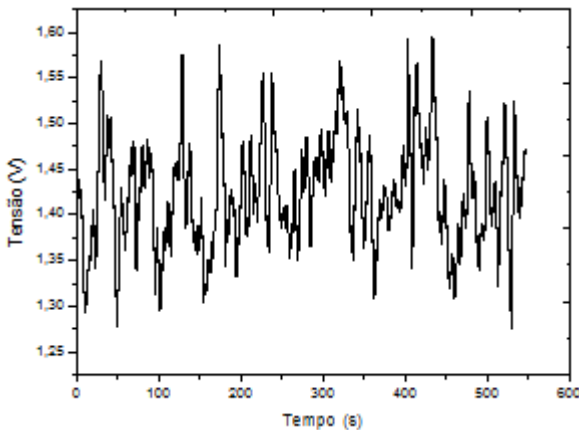
## RESULTADOS DAS MEDIÇÕES ANEMOMÉTRICAS

Neste apêndice, são apresentados todos os sinais anemométricos de velocidade colhidos na camada cisalhante e suas respectivas FFT (*Fast Fourier Transform*). Os ensaios foram realizados para cavidades com razão de aspecto  $\frac{1}{2}$ , 1, 2, 4, 8 e 10 e números de Reynolds compreendidos entre 1500 e 5500.

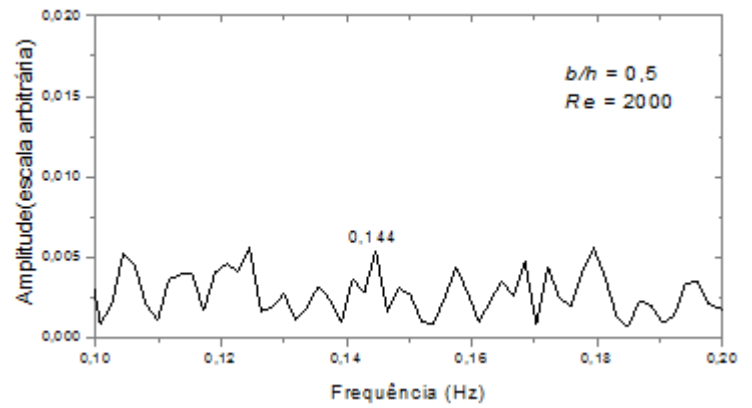
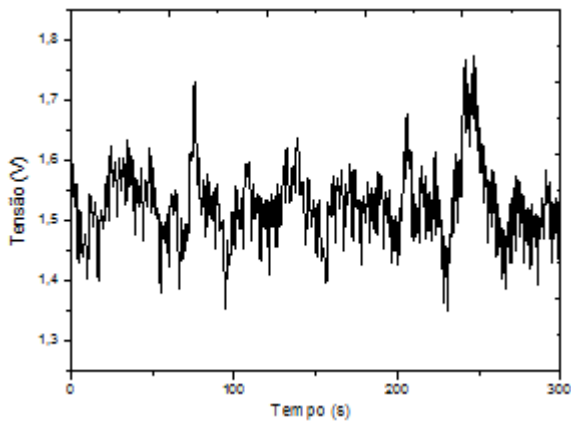
Em vários casos, a frequência de emissão de instabilidades hidrodinâmicas na camada cisalhante não pôde ser claramente identificada a partir da simples interpretação da FFT do sinal anemométrico adquirido, uma vez que outros picos de amplitude comparável também se fazem presentes no mesmo gráfico. Nestas situações, o método de contagem de emissão de vórtices, embora pouco preciso, foi de extrema utilidade, orientando a identificação da provável frequência correspondente à oscilação periódica da camada cisalhante.

### → Cavidade $\zeta = \frac{1}{2}$

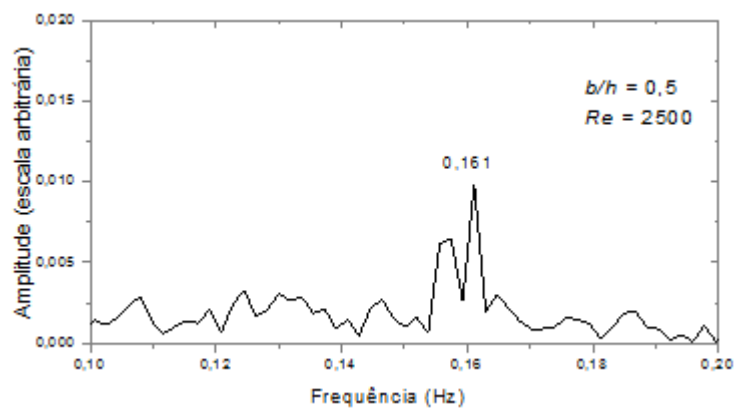
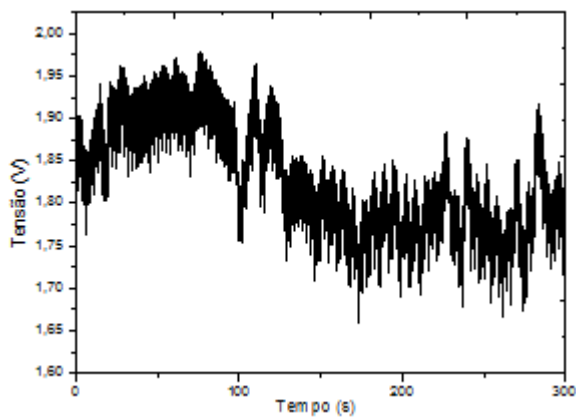
- $Re = 1500$



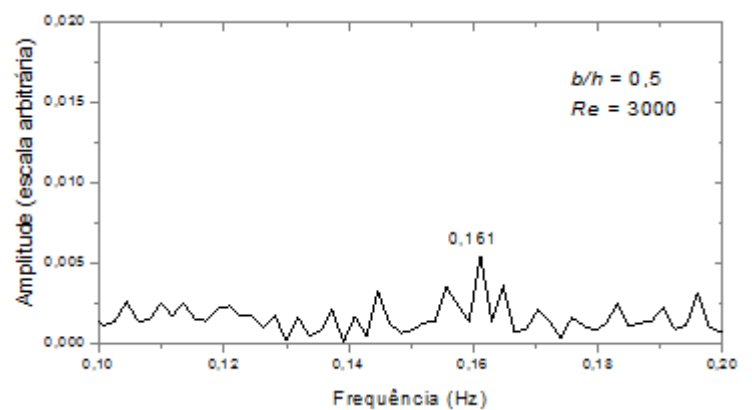
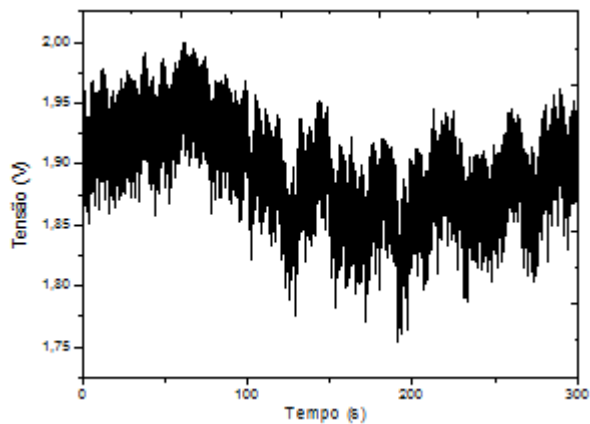
•  $Re = 2000$



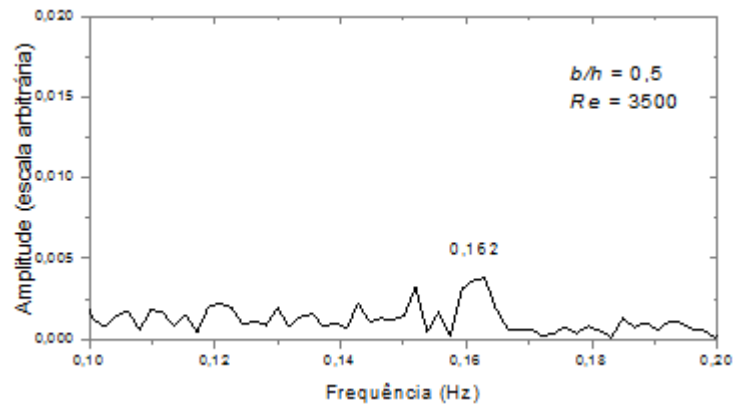
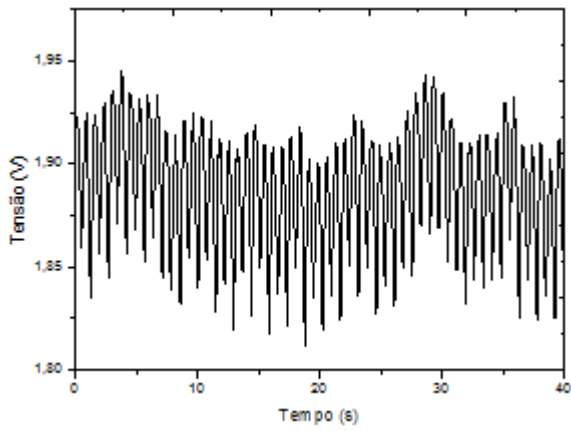
$Re = 2500$



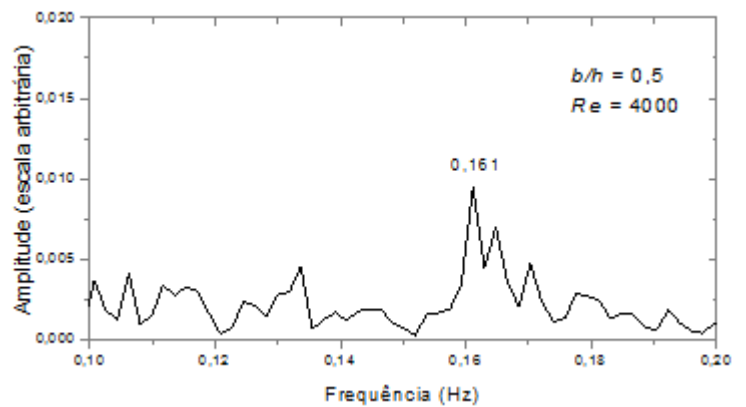
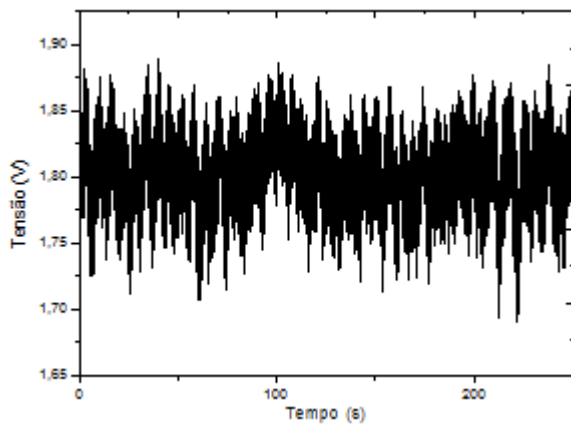
•  $Re = 3000$



- $Re = 3500$

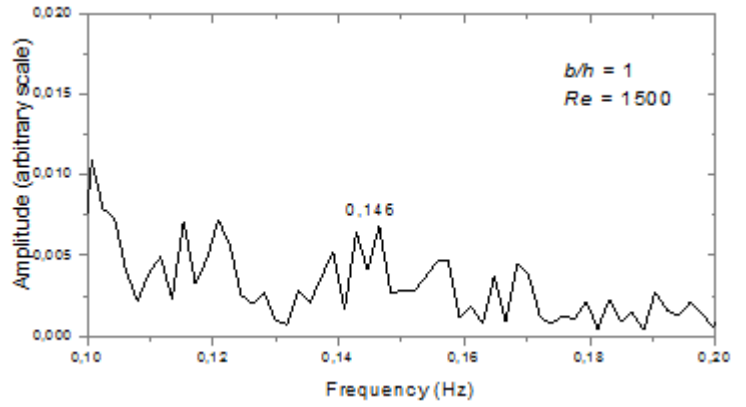
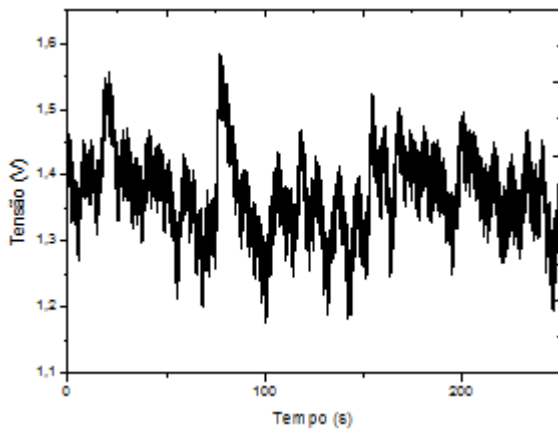


- $Re = 4000$

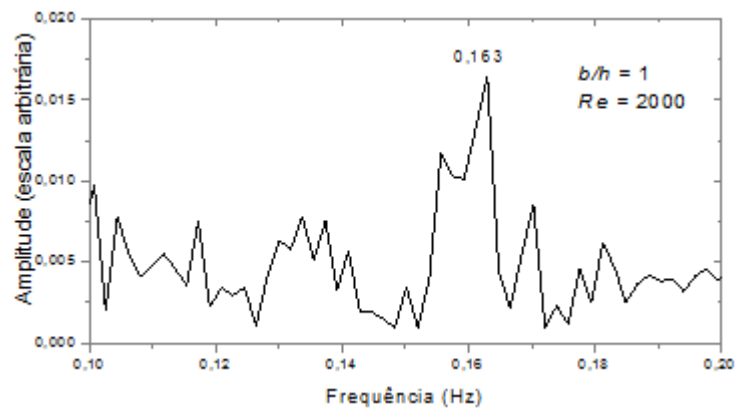
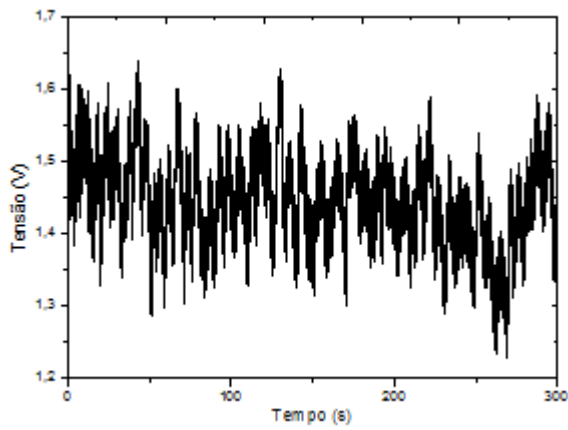


→ Cavidade  $\zeta = 1$

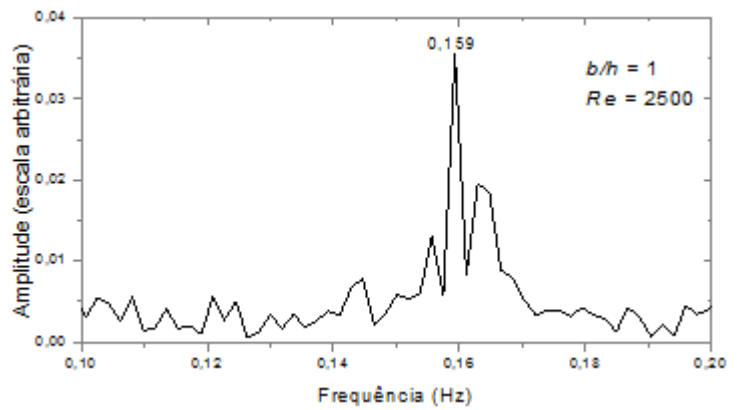
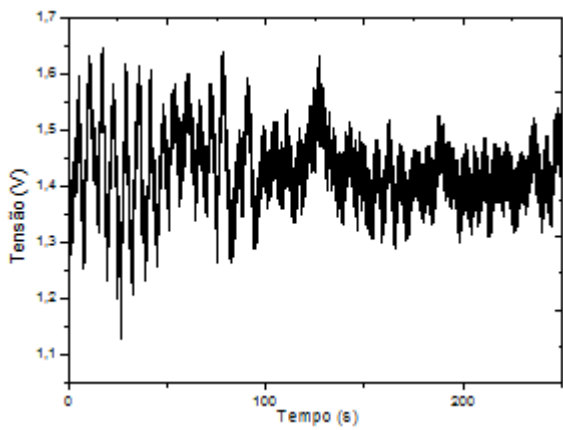
- $Re = 1500$



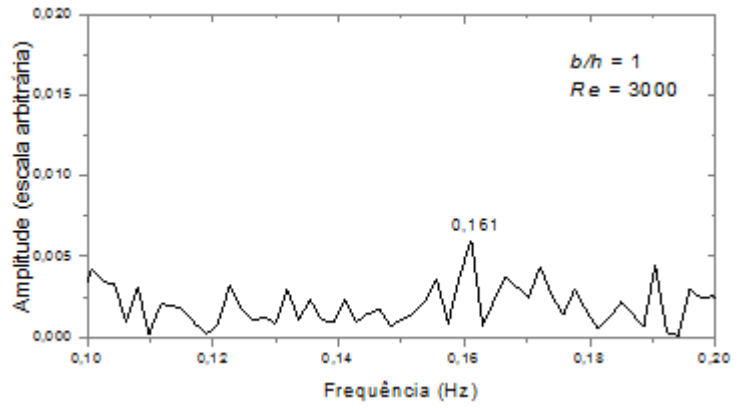
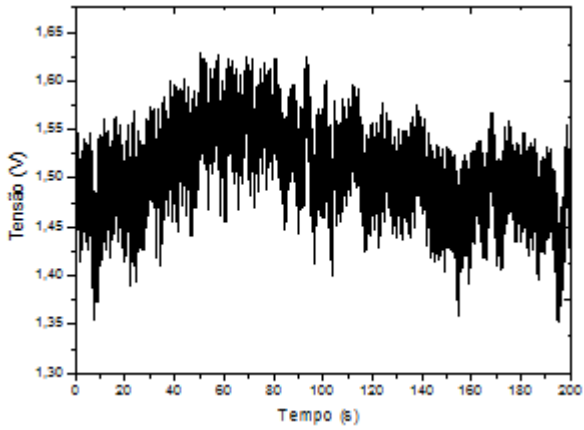
- $Re = 2000$



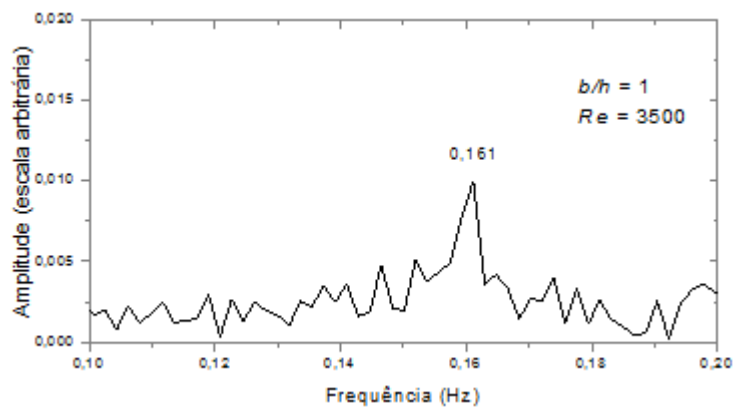
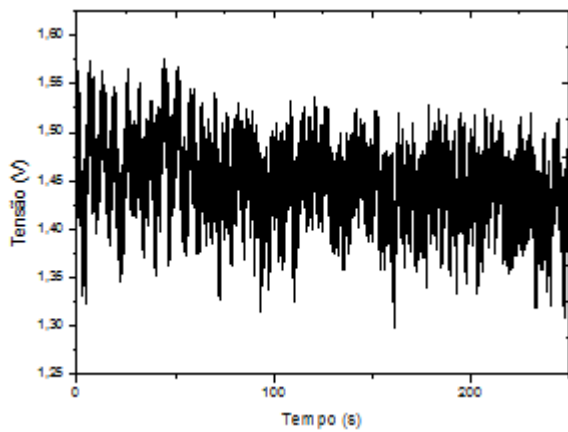
- $Re = 2500$



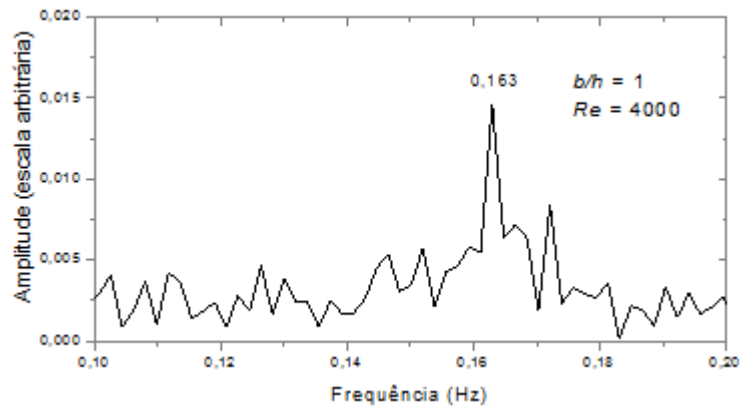
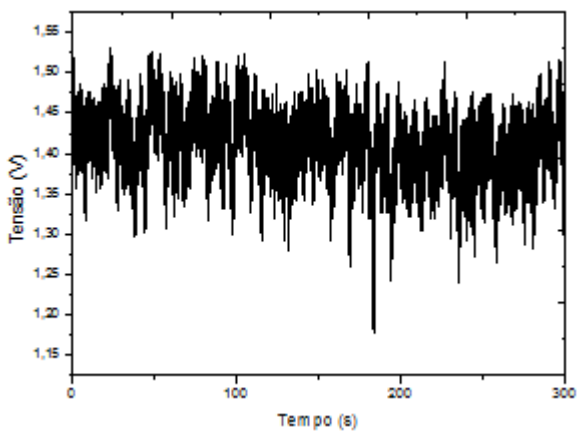
•  $Re = 3000$



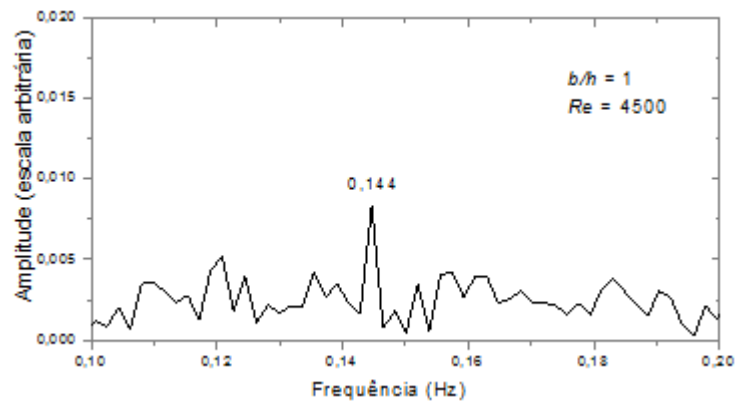
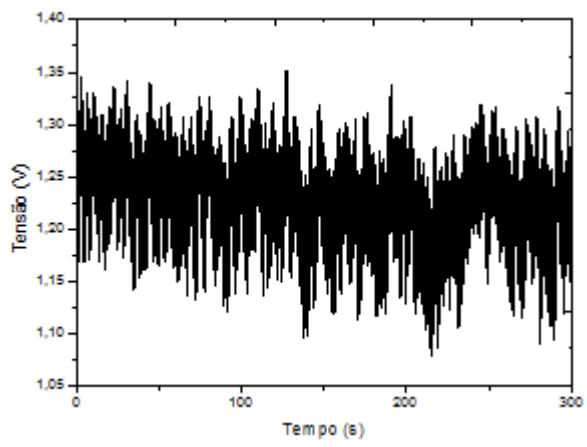
•  $Re = 3500$



•  $Re = 4000$

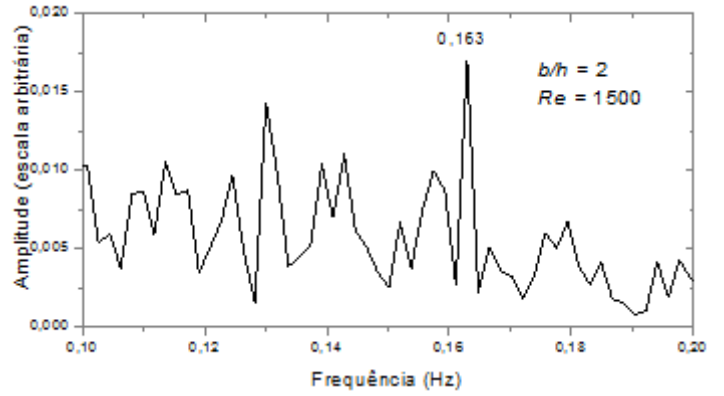
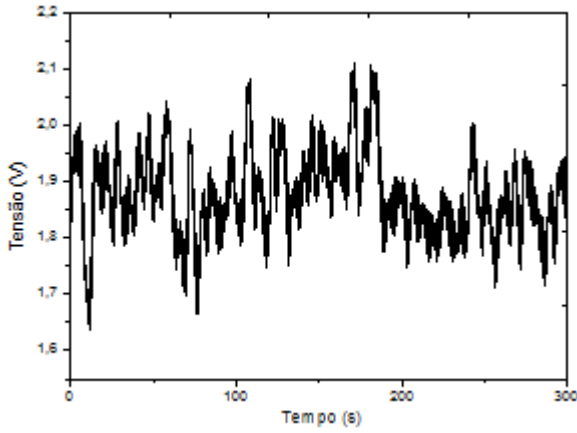


•  $Re = 4500$

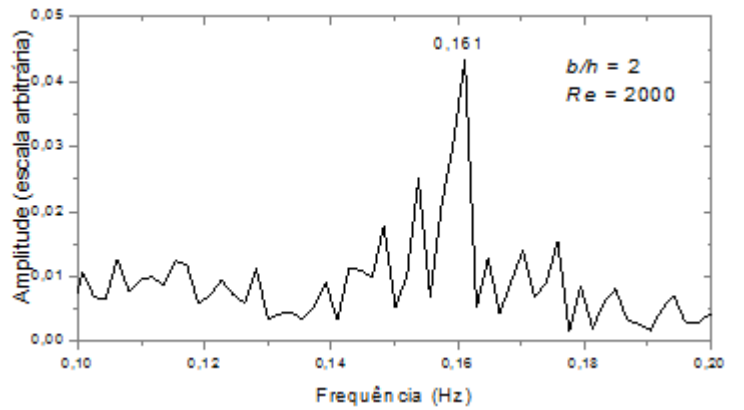
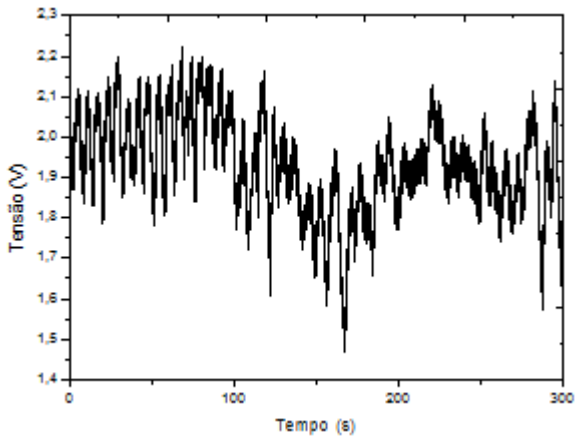


→ Cavidade  $\zeta = 2$

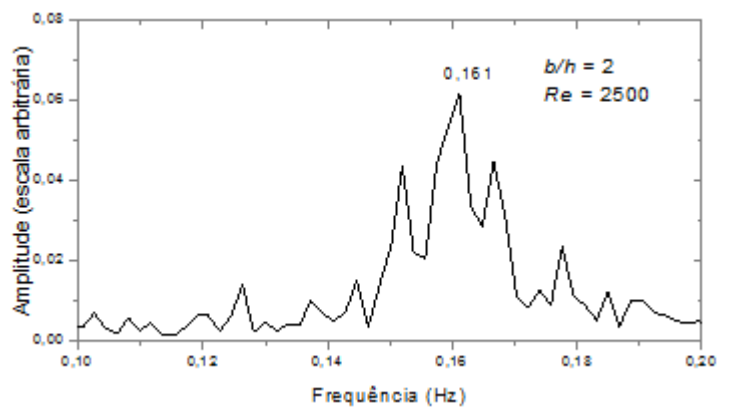
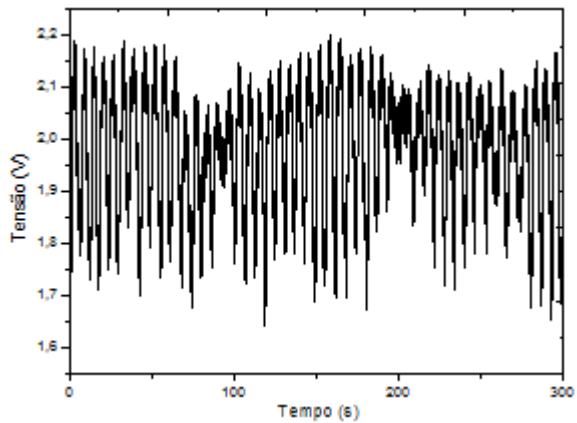
•  $Re = 1500$



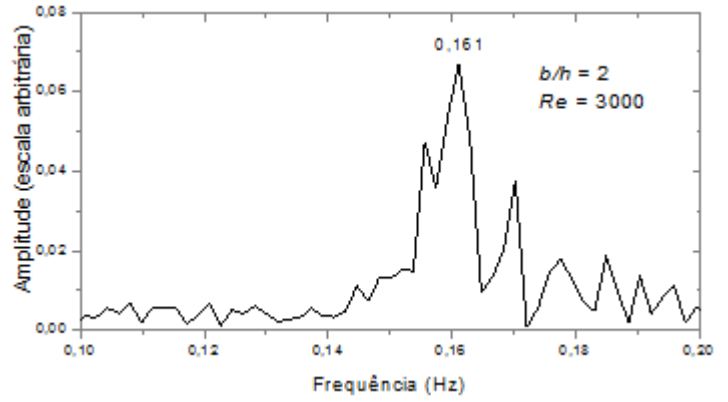
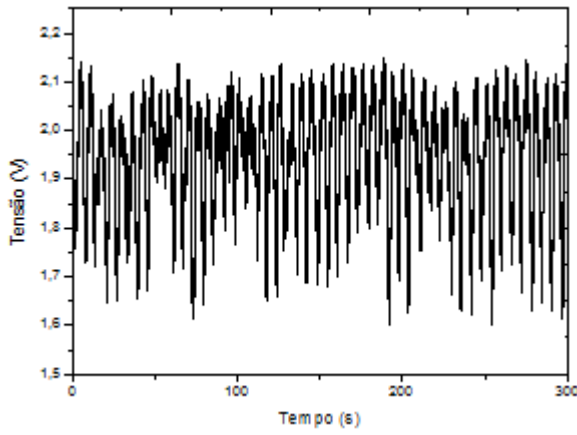
•  $Re = 2000$



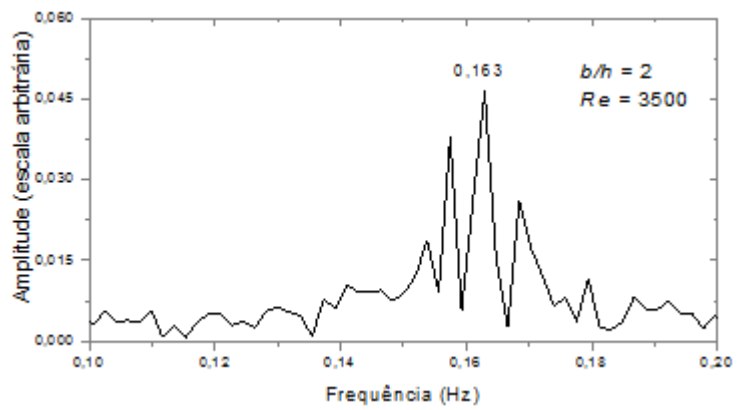
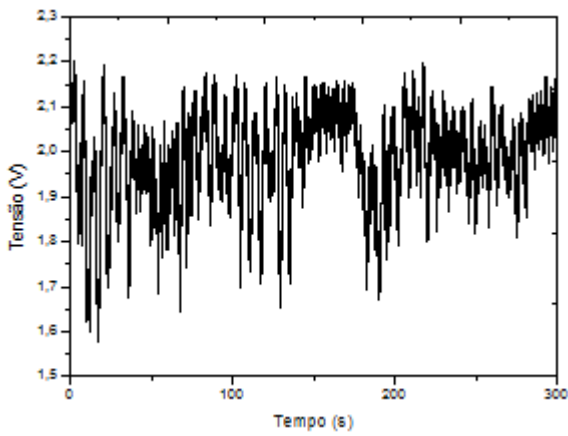
•  $Re = 2500$



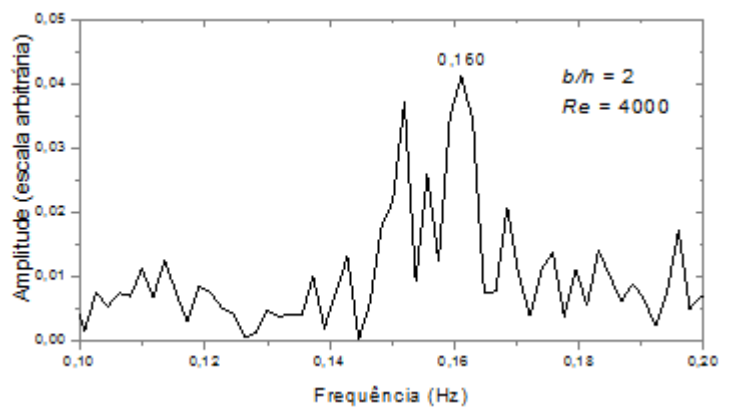
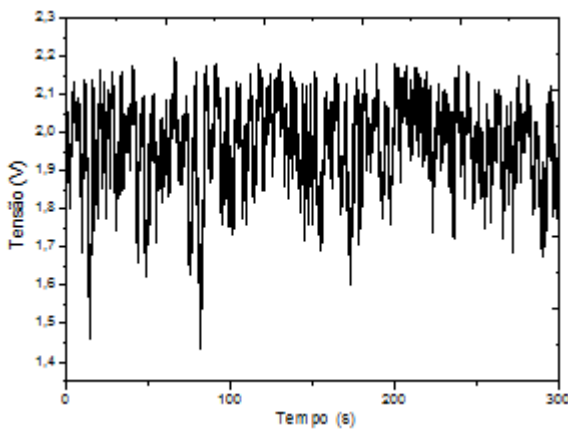
•  $Re = 3000$



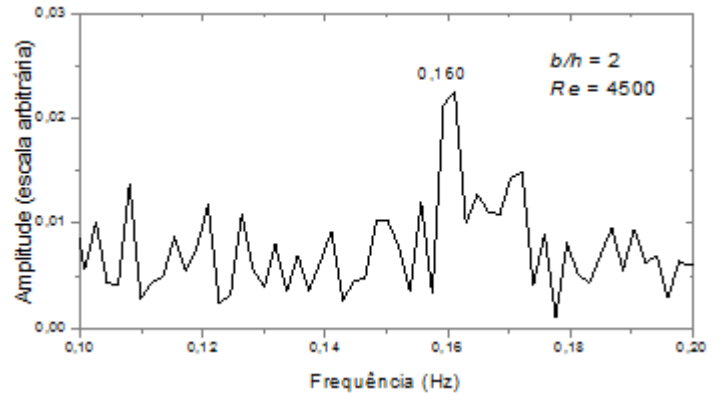
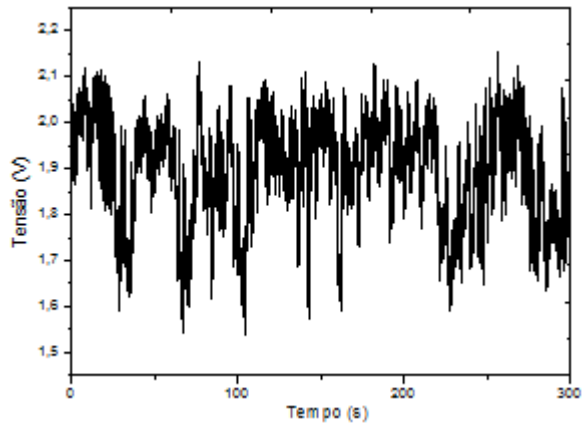
•  $Re = 3500$



•  $Re = 4000$

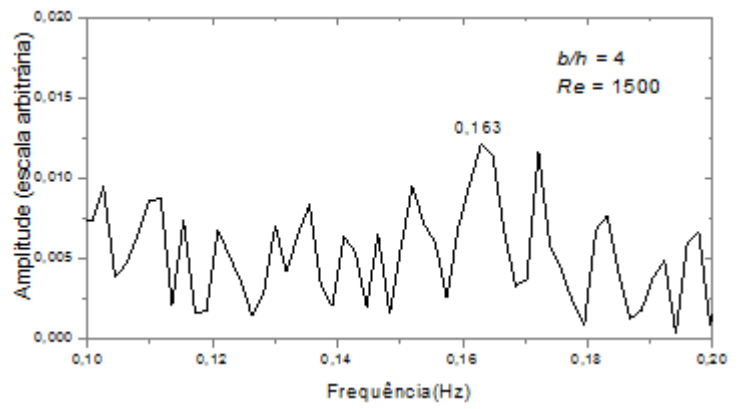
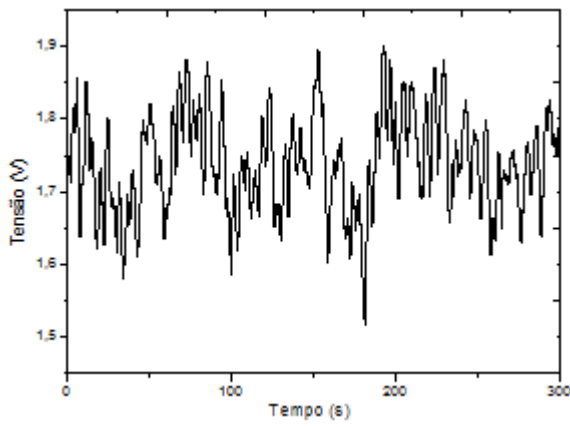


- $Re = 4500$

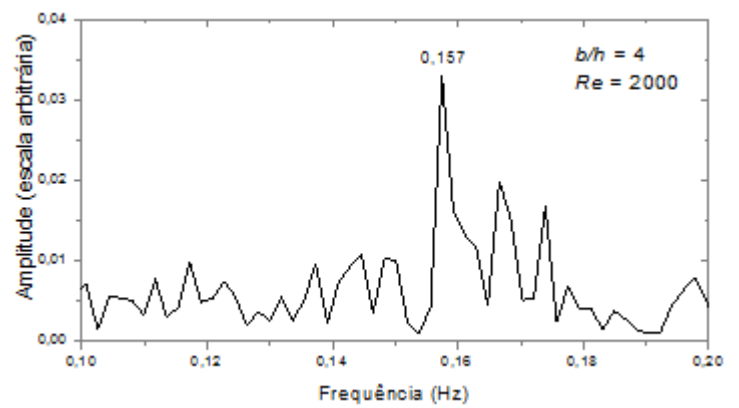
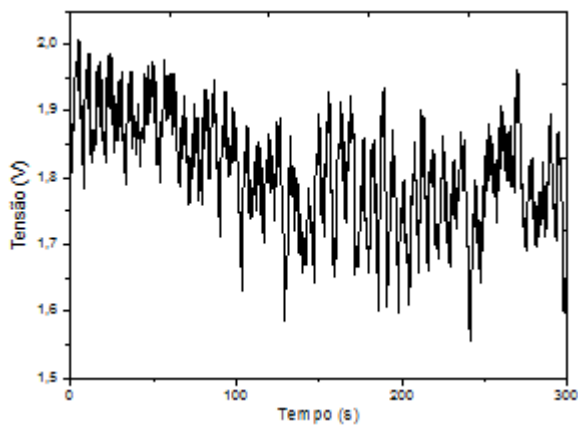


→ Cavidade  $\zeta = 4$

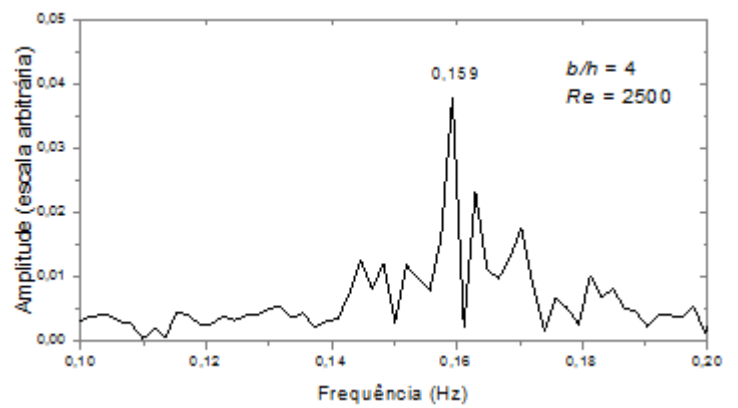
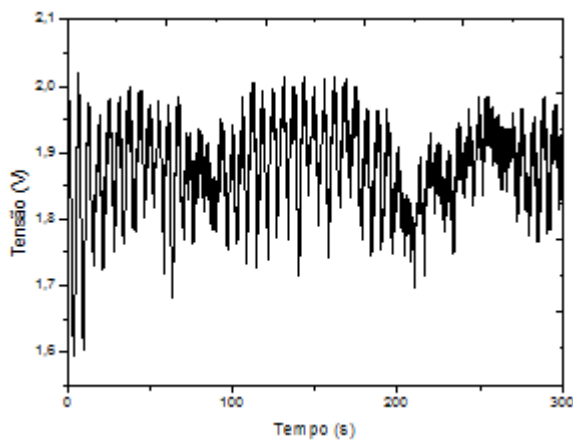
•  $Re = 1500$



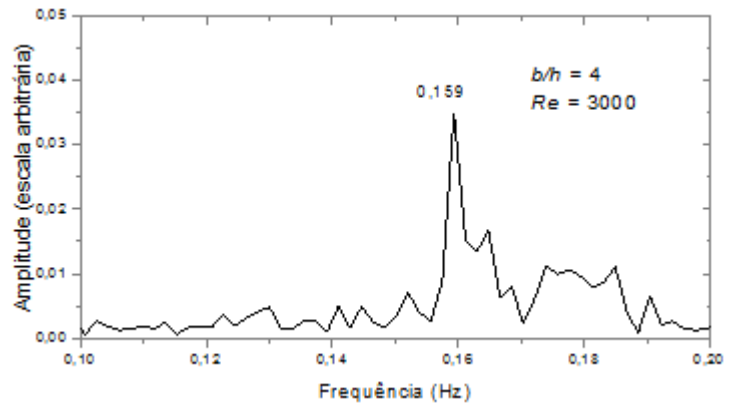
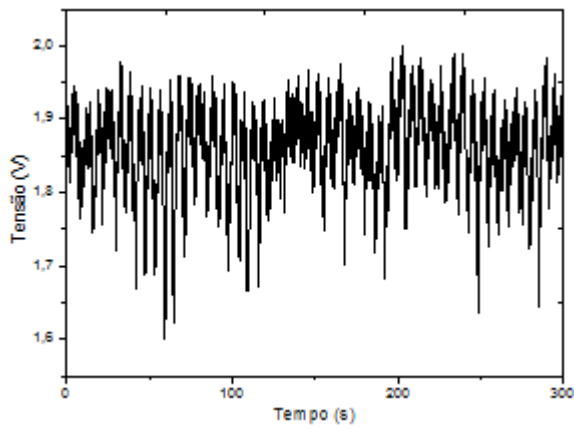
•  $Re = 2000$



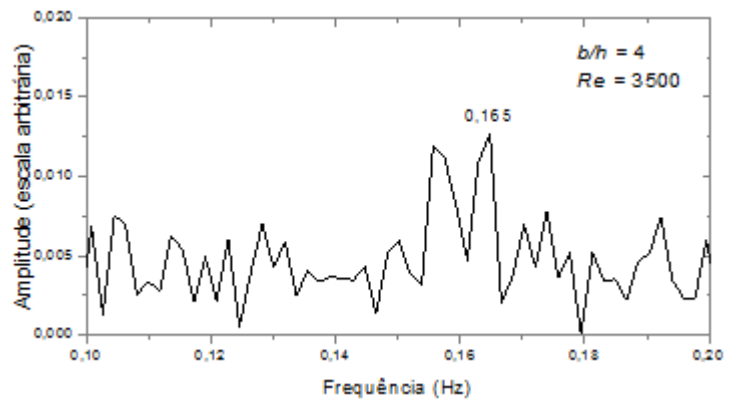
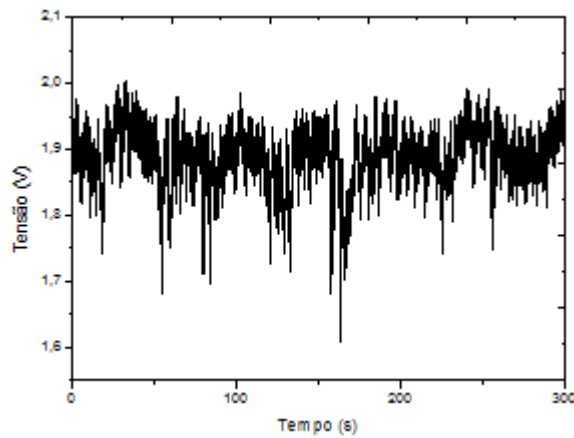
•  $Re = 2500$



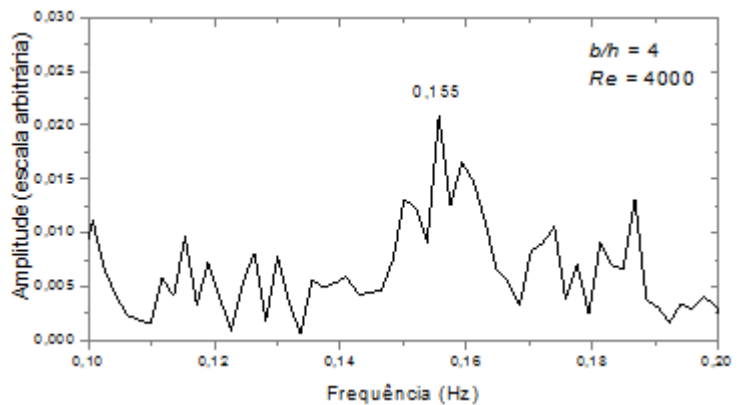
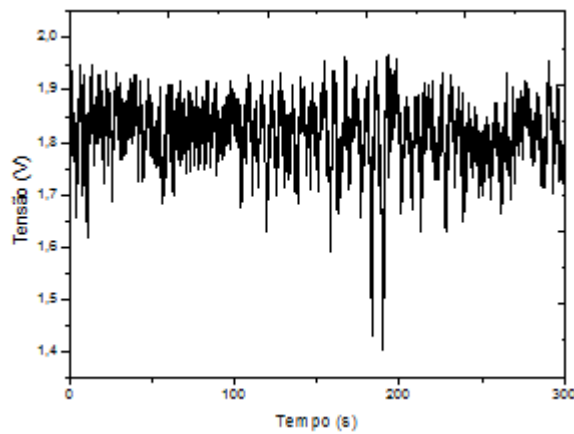
•  $Re = 3000$



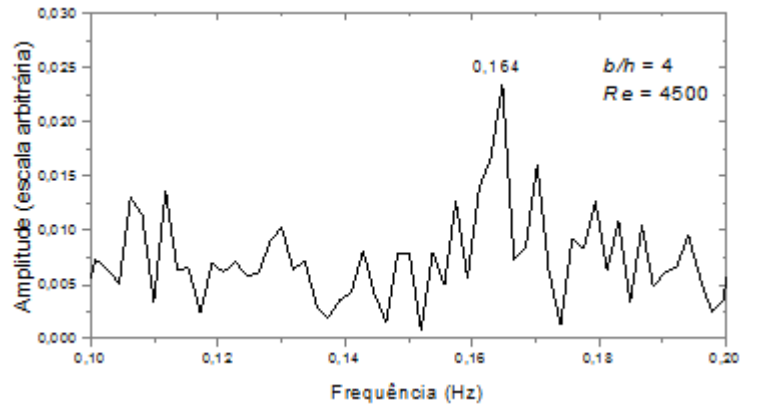
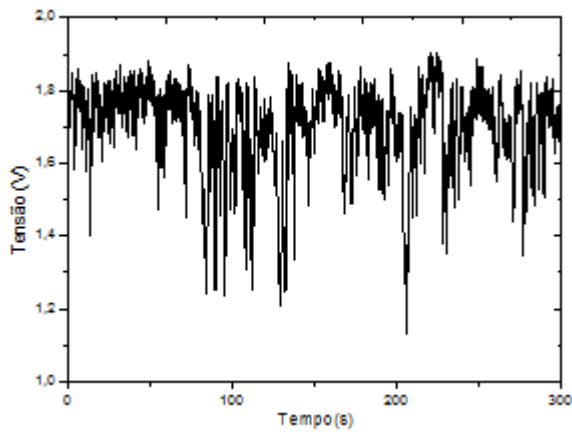
•  $Re = 3500$



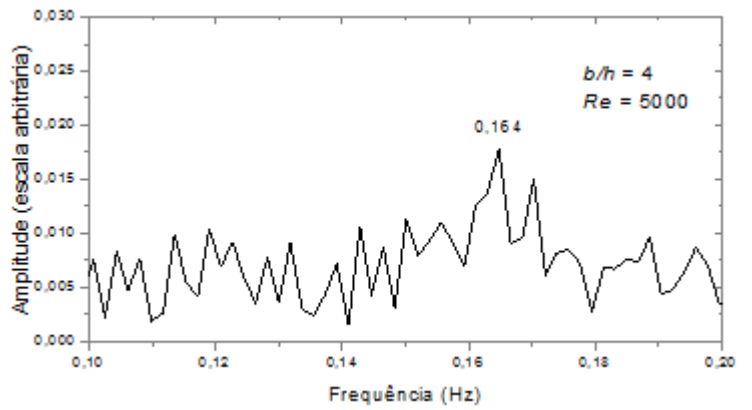
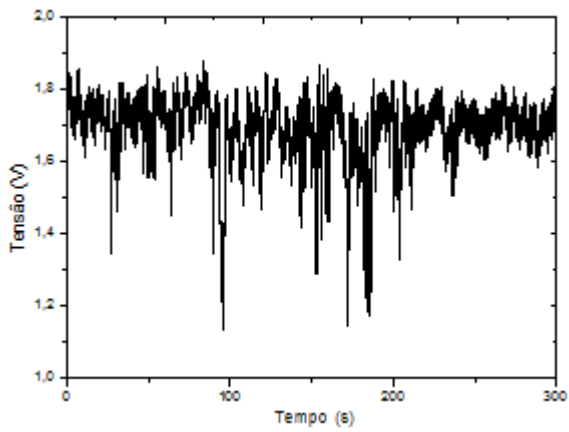
•  $Re = 4000$



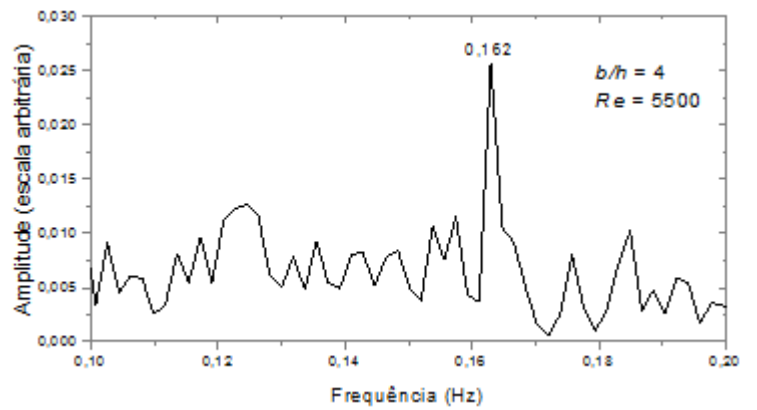
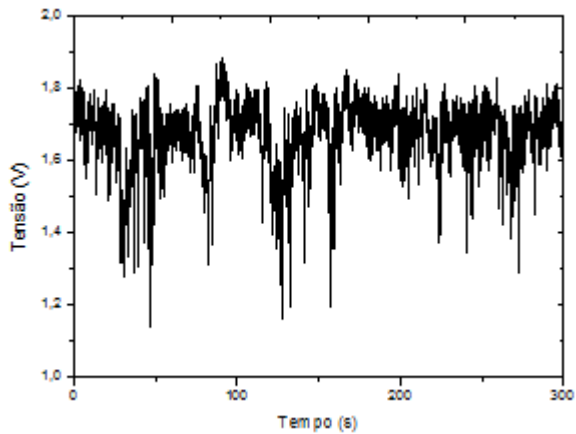
•  $Re = 4500$



•  $Re = 5000$

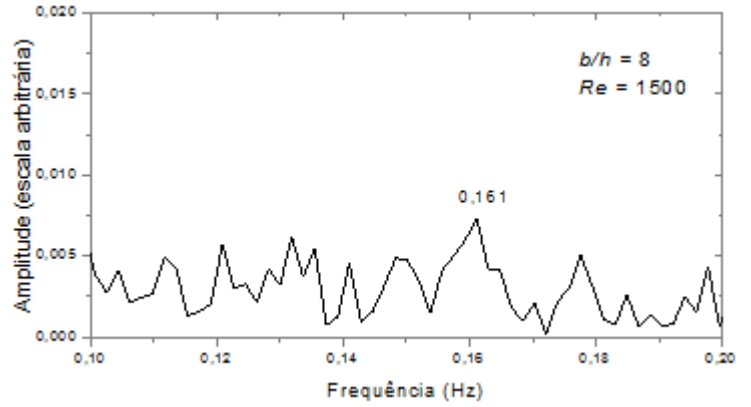
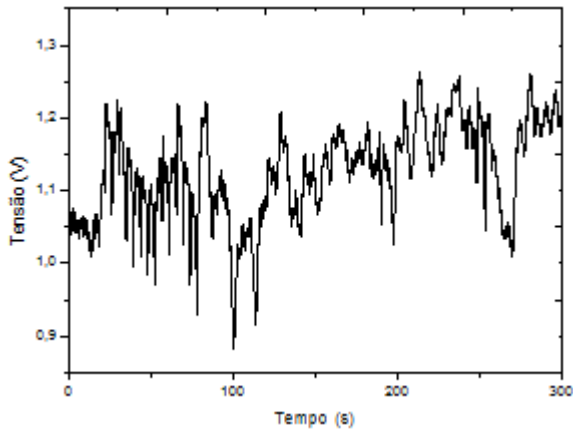


•  $Re = 5500$

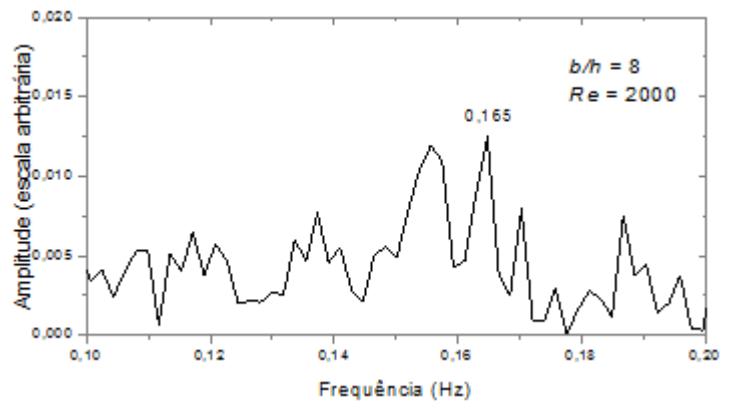
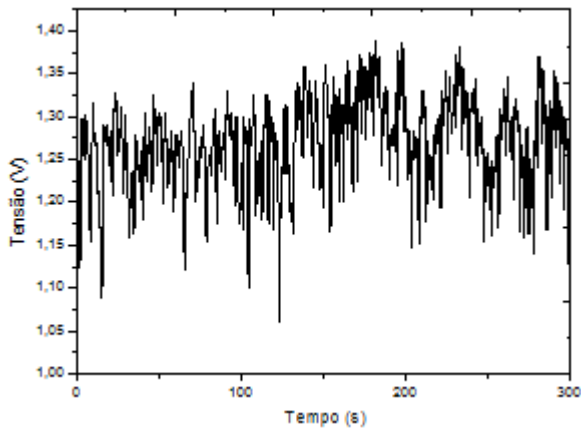


→ Cavidade  $\zeta = 8$

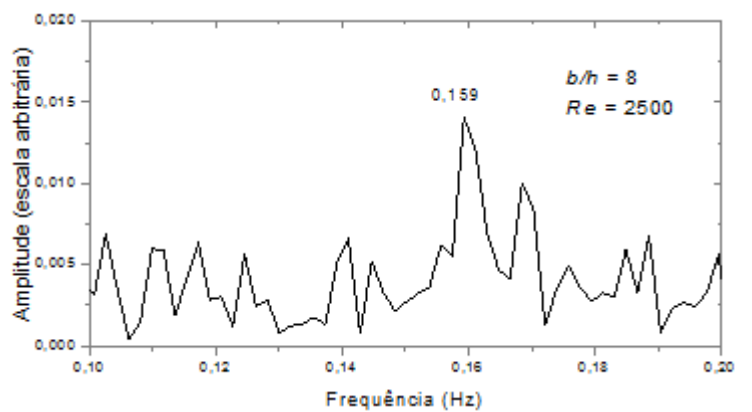
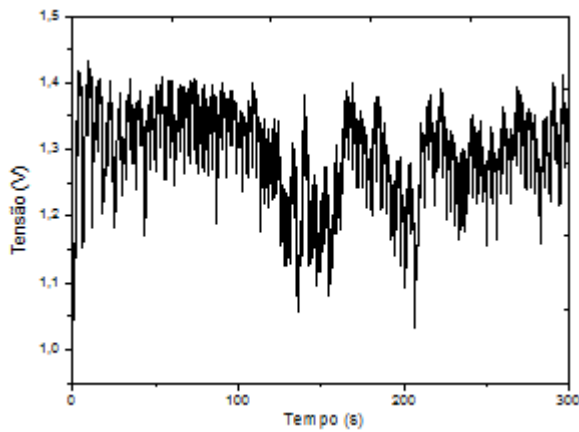
•  $Re = 1500$



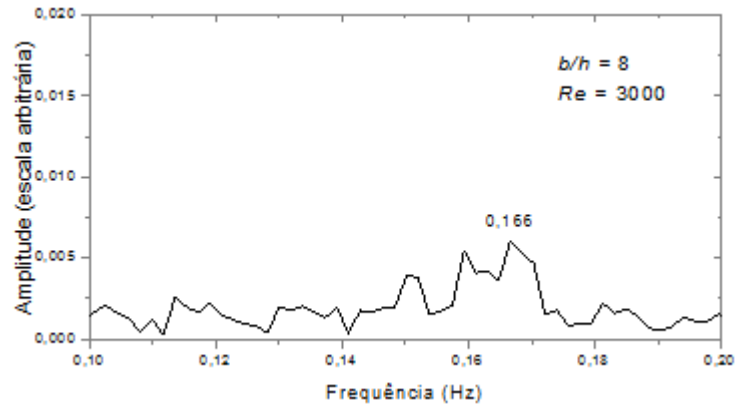
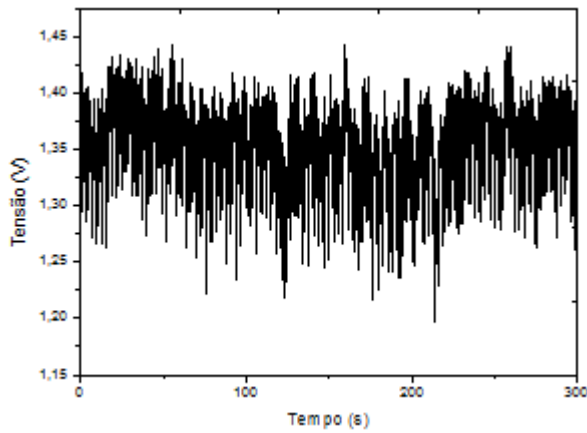
•  $Re = 2000$



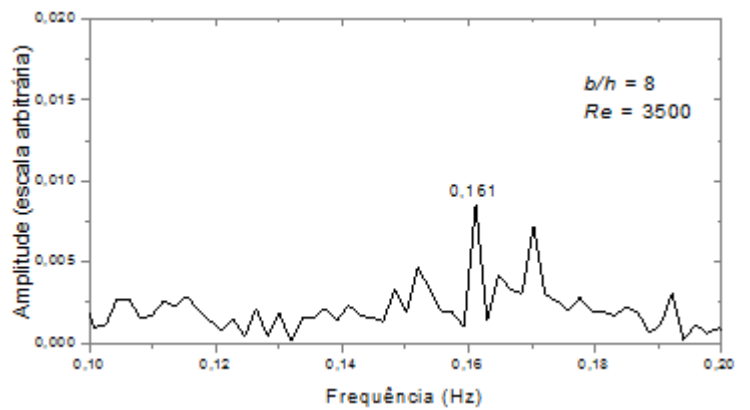
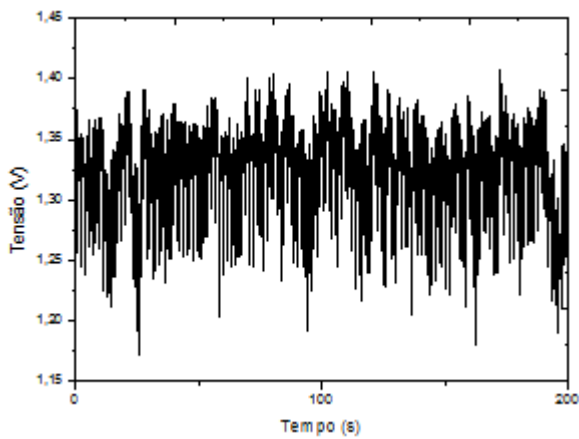
•  $Re = 2500$



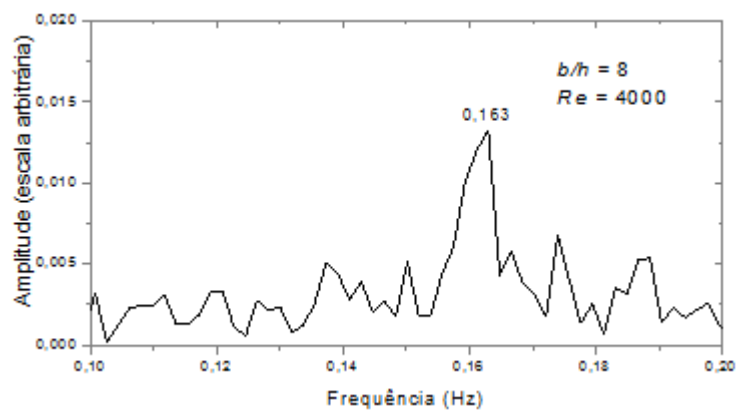
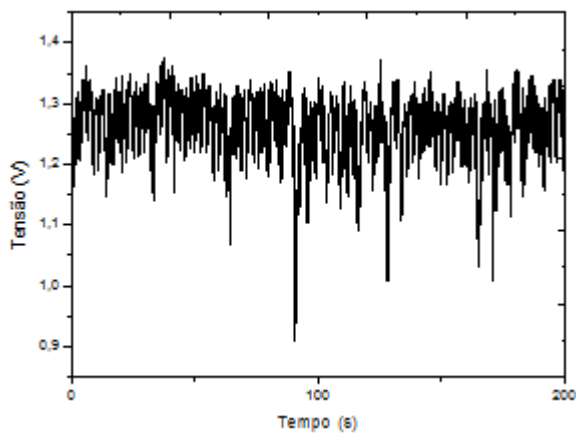
•  $Re = 3000$



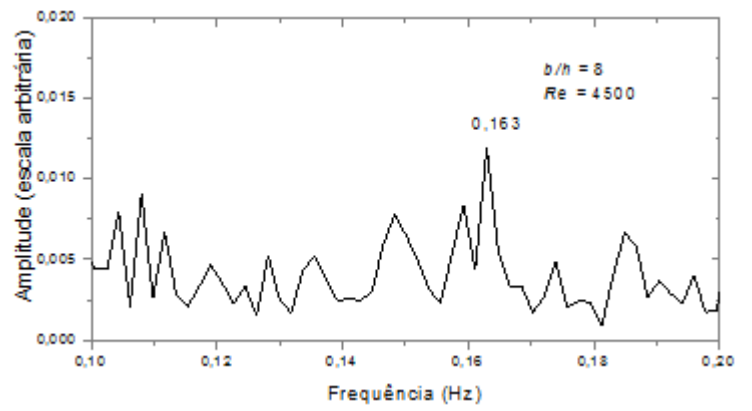
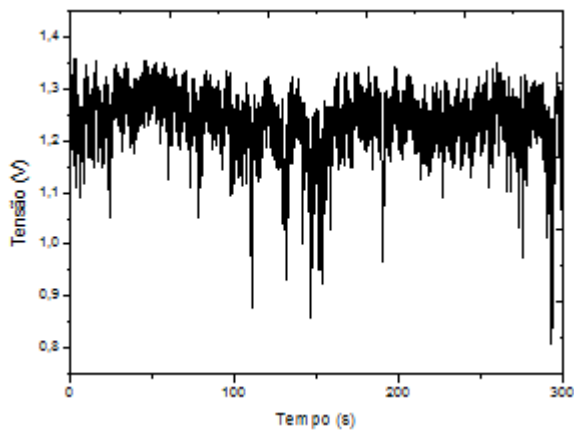
•  $Re = 3500$



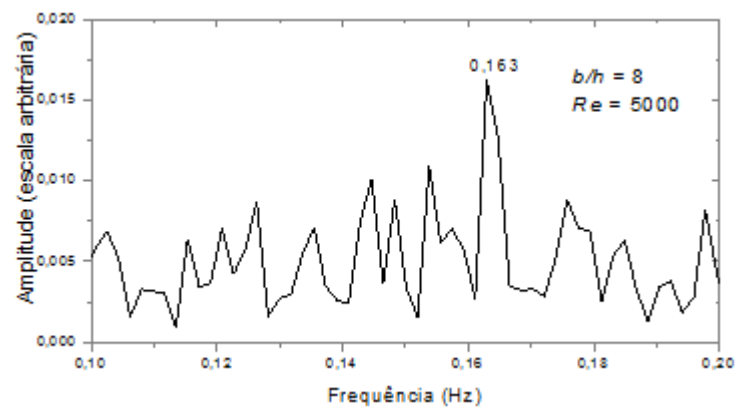
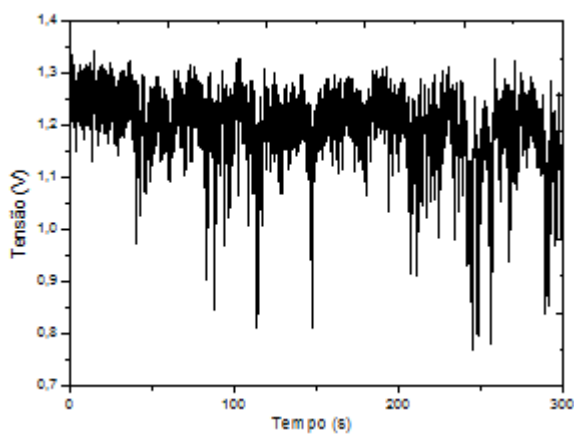
•  $Re = 4000$



•  $Re = 4500$

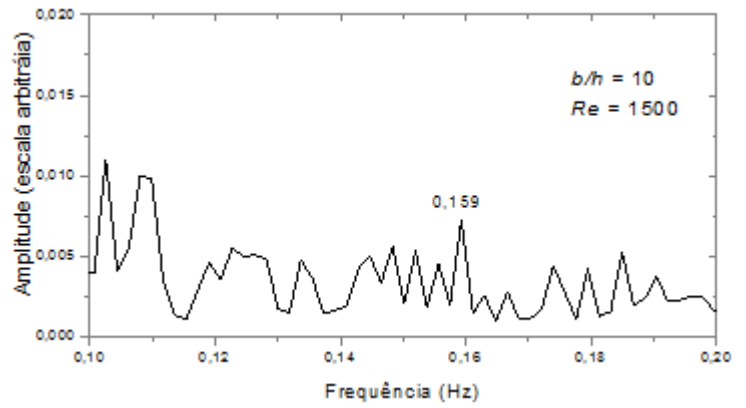
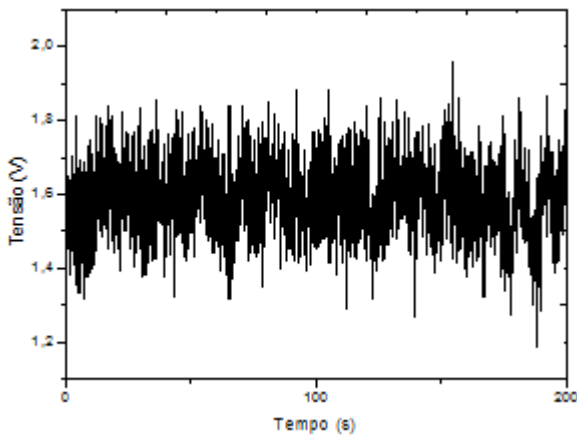


•  $Re = 5000$

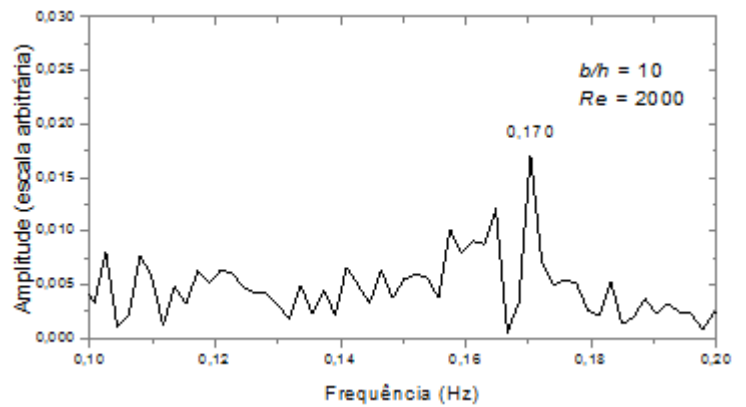
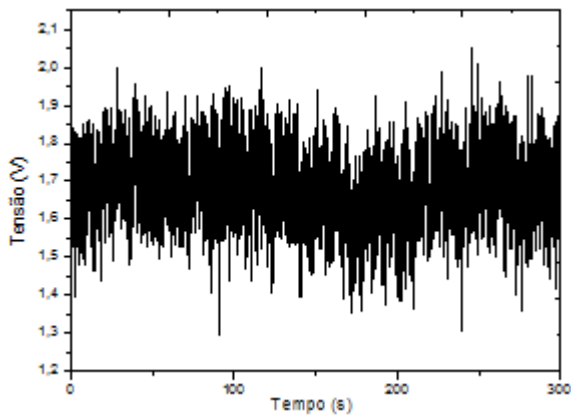


→ Cavidade  $\zeta = 10$

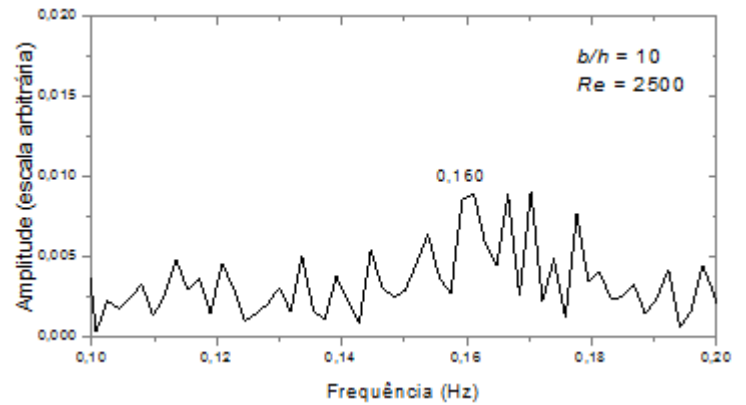
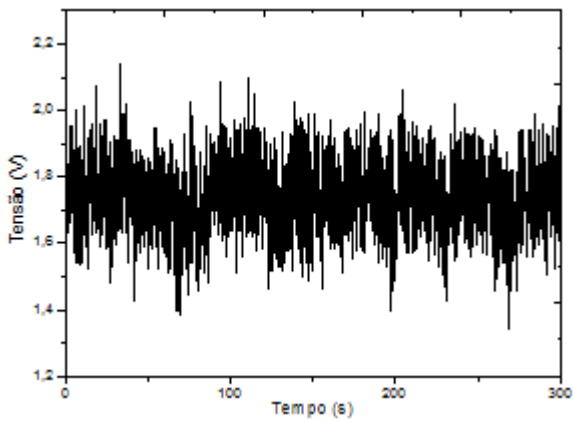
- $Re = 1500$



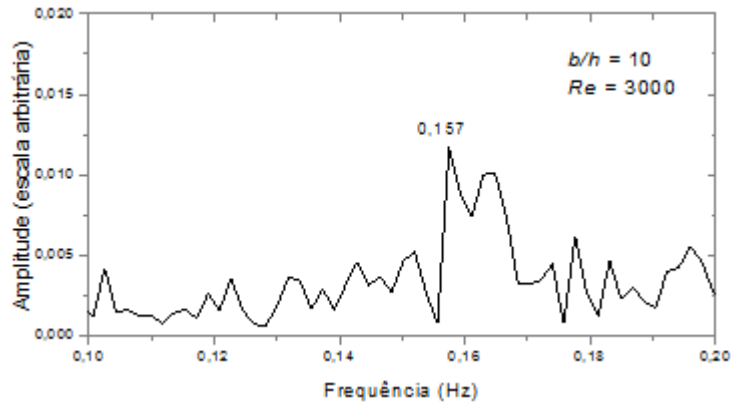
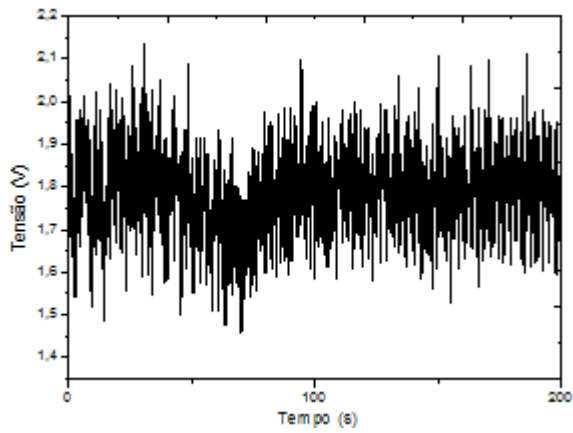
- $Re = 2000$



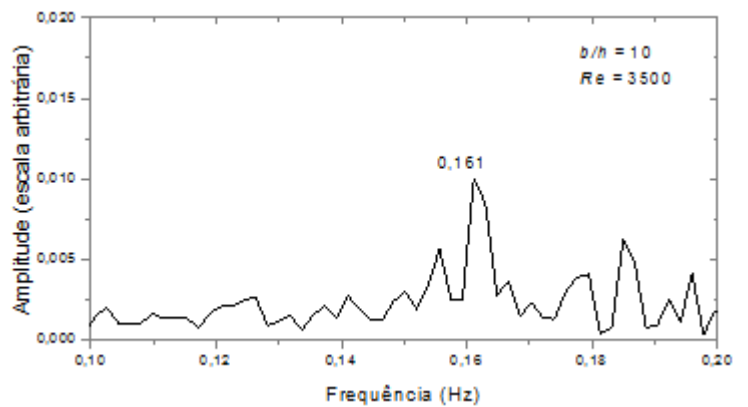
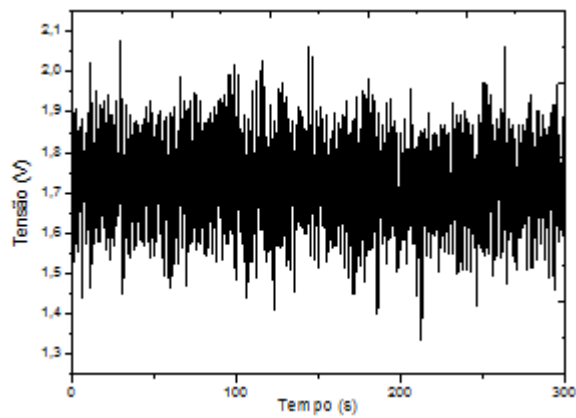
- $Re = 2500$



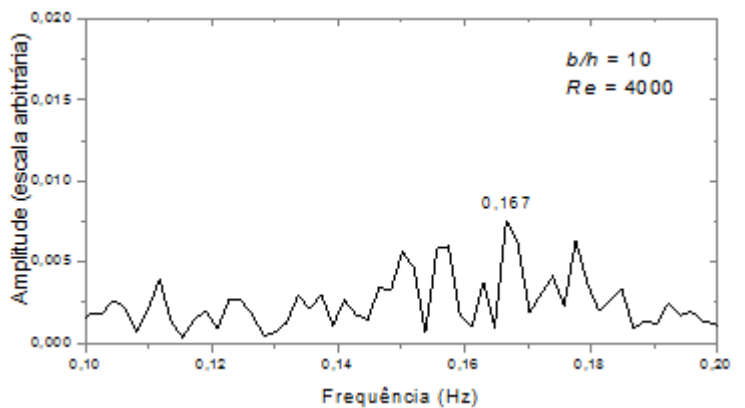
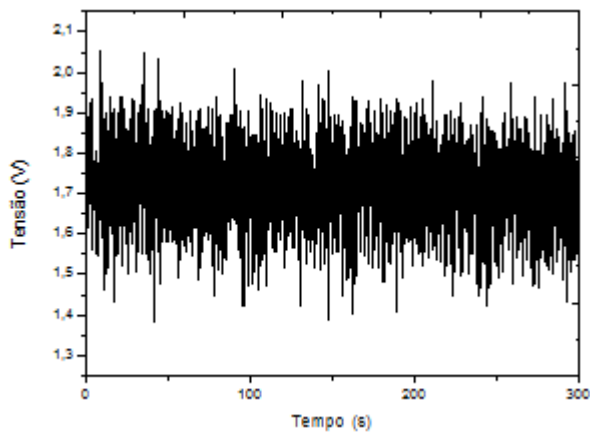
•  $Re = 3000$



•  $Re = 3500$



•  $Re = 4000$



•  $Re = 4500$

