



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Ilha Solteira

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

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO EM  
CAVIDADES ABERTAS UTILIZANDO UM CANAL  
DE SUPERFÍCIE LIVRE**

**Eduardo Augusto Florencio Mega**

**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  
Fevereiro/2009

## FICHA CATALOGRÁFICA

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

M496e Mega, Eduardo Augusto Florencio.  
Estudo experimental do escoamento em cavidades abertas utilizando um canal de superfície livre / Eduardo Augusto Florencio Mega. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2009.  
96 f. : il., fots.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Térmicas, 2009

Orientador: Sérgio Said Mansur  
Co-orientador: Edson Del Rio Vieira  
Bibliografia: p. 70-74

1. Escoamento transicional. 2. Cavidades abertas. 3. Visualização de escoamentos.  
4. Velocimetria Doppler acústica. 5. Canal de superfície livre.

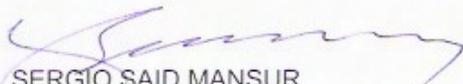


**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

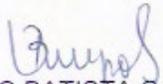
**TÍTULO:** Estudo experimental do escoamento em cavidades abertas utilizando um canal de superfície livre

**AUTOR:** EDUARDO AUGUSTO FLORENCIO MEGA  
**ORIENTADOR:** Prof. Dr. SERGIO SAID MANSUR

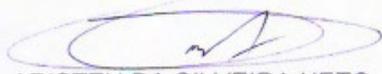
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA MECÂNICA, Área: CIÊNCIAS TÉRMICAS, pela Comissão Examinadora:



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



Prof. Dr. JOÃO BATISTA CAMPOS SILVA  
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. ARISTEU DA SILVEIRA NETO  
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia / Universidade Federal de Uberlândia

Data da realização: 27 de fevereiro de 2009.

*A Deus, pela saúde.*

*Aos meus pais, Dorival e Ilda, que,  
incondicionalmente, fazem das  
minhas conquistas as suas metas.*

*Aos meus irmãos, Douglas e Julia, e a  
todos meus amigos, pelo apoio  
moral e emocional.*

# Agradecimentos

---

Durante o desenrolar deste programa de mestrado, muitas pessoas contribuíram, direta ou indiretamente, para que este trabalho fosse levado a bom termo. Em especial, sou grato ao meu orientador, Prof. Dr. Sérgio Said Mansur, pelos valiosos ensinamentos, dedicação e amizade, que muito ajudaram na minha vida acadêmica, profissional e pessoal.

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

Ao Prof. Dr. Aristeu da Silveira Neto e ao Prof. Dr. João Campos Silva, que, na qualidade de membros da banca examinadora, aceitaram a incumbência de julgar este trabalho.

Aos meus pais, Dorival e Ilda, os maiores responsáveis por minhas realizações e pelo meu caráter. Aos meus irmãos, Douglas e Julia, pelo convívio e afeto.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica, em especial ao técnico de laboratório Reginaldo Cordeiro da Silva, pela prestimosa colaboração na construção do aparato e na realização dos ensaios experimentais.

Aos alunos de iniciação científica, Douglas Luciano Prux e Francisco Elpídio Vianna Barbosa Filho, pela contribuição oferecida no projeto e na construção do aparato experimental.

Aos amigos, Maria Adriana Tavares, Thiago Tayama, Ismael de Marchi Neto, Rafael Gustavo da Rocha Paulo, Fernando Vitoriano Fernandes e Daniel Fabiano Lago, que sempre estiveram ao meu lado durante esta caminhada.

À FAPESP e à FUNDUNESP, pelo apoio financeiro oferecido ao projeto de pesquisa que deu origem a este trabalho.

Ao CNPQ, pela bolsa de mestrado a mim concedida.

## Resumo

---

Neste trabalho, um estudo experimental do escoamento em cavidades abertas, para diferentes razões de aspecto e números de Reynolds, foi realizado. Para a condução da campanha de ensaios, um canal de superfície livre em circuito fechado foi projetado e construído. Testes de qualificação foram conduzidos, com o propósito de verificar as características vibratórias do aparato e a qualidade do escoamento na seção de testes. A partir dos dados coletados nessa etapa, modificações foram introduzidas no projeto, melhorando significativamente as condições de funcionamento do dispositivo. Em seguida, os ensaios das cavidades abertas, propriamente ditos, foram executados. Para a determinação qualitativa dos padrões de escoamento encontrados em cavidades rasas e profundas, visualizações de escoamento foram realizadas, utilizando-se, como traçadores, corante líquido e partículas sólidas em suspensão. Com uma iluminação adequada, as duas técnicas foram capazes de fornecer elementos importantes para a identificação topológica deste tipo de escoamento. Além disso, medições de velocidade local e instantânea foram realizadas, dentro e fora das cavidades, com o auxílio de uma sonda ADV (*acoustic Doppler velocimetry*). Os resultados obtidos foram analisados fisicamente e comparados com dados experimentais e numéricos da literatura, apresentando excelente concordância.

## Abstract

---

In this work, an experimental study of the flow inside open cavities, for different aspect ratios and Reynolds numbers, was performed. To carry out the experimental runs, a closed-circuit free-surface water channel has been designed and built. Qualification tests have been conducted to verify the vibrating characteristics of the device and the quality of the flow in the test section. From the data collected in this stage, constructive changes have been proposed and executed in the apparatus, improving significantly its operational conditions. Soon after the open cavities tests have been performed. For qualitative determination of the fluid motion inside deep and shallow cavities, flow visualizations techniques have been implemented using as tracers liquid dye and solid micro-particles in suspension. With the help of an adequate illumination system, both techniques were able to provide important information about the topological structure of the flow. Measurements of local instantaneous speed have also been performed within and outside the cavities by means of an ADV probe (*acoustic Doppler velocimetry*). The results have been physically analyzed and compared with available experimental and numerical data. An excellent agreement has been reached.

## Lista de Figuras

---

Figura 1.1:	Vórtices na natureza e motivos espirais na arte primitiva (3000 a.C.).	15
Figura 1.2:	Mapa dos mares nórdicos elaborado em 1539, por Olaus Magnus (1490-1557).	16
Figura 1.3:	Vórtices e turbulência numa queda d'água, segundo Leonardo da Vinci (1452-1519).	17
Figura 1.4:	Cavidades sobre a fuselagem de aeronaves e carrocerias de automóveis.	18
Figura 1.5:	Cavidade aberta tridimensional: definição de parâmetros físicos e geométricos.	19
Figura 1.6:	Caracterização do escoamento no interior de uma cavidade aberta.	20
Figura 1.7:	Canal de água estagnada, com seção de ensaios medindo $6,6 \times 4,5 \times 220$ m (largura, profundidade e comprimento), instalado no Laboratório de Hidrodinâmica do IPT, São Paulo.	21
Figura 1.8:	Canais de superfície livre com recirculação de água.	22
Figura 3.1:	Esquema do canal de água recirculante.	34
Figura 3.2:	Seção de testes e cavidades intercambiáveis: altura $h$ fixa e comprimento $b$ variável.	35
Figura 3.3:	Orifícios de injeção de corante / tomadas de pressão, instalados a montante da cavidade.	36
Figura 3.4:	Dispositivo de injeção de corantes líquidos.	37
Figura 3.5:	Esquema para a injeção de corante líquido.	38
Figura 3.6:	Esquema de iluminação.	40
Figura 3.7:	Aparato experimental e sistema gerador de uma folha de luz para a visualização de escoamentos utilizando-se traçadores sólidos.	41
Figura 3.8:	Sonda ADV para medição de velocidade local instantânea.	42
Figura 3.9:	Posicionador tridimensional de Sonda ADV.	43
Figura 3.10:	Posição do acelerômetro colado na seção de testes para a medição da vibração induzida pelo escoamento.	44
Figura 4.1:	Mangueiras sanfonadas nas tubulações de sucção e de recalque.	46
Figura 4.2:	Características vibratórias da seção de testes, antes e após as modificações realizadas.	47

Figura 4.3: Amplitude das vibrações do sistema de bombeamento e da seção de testes, antes e após as modificações propostas.	47
Figura 4.4: Localização das estações de medição de velocidade e dos volumes de medida.	48
Figura 4.5: Perfis de velocidade ao longo da seção de testes.	50
Figura 4.6: Intensidade turbulenta na estação 1.	51
Figura 4.7: Visualização do escoamento no interior de uma cavidade com $b/h = 1$ , para diferentes números de Reynolds, com a utilização de corante líquido.	52
Figura 4.8: Visualização do escoamento no interior de uma cavidade com $b/h = 1$ , para diferentes números de Reynolds, com o emprego de traçadores sólidos.	52
Figura 4.9: Comparação qualitativa entre resultados experimentais do presente trabalho ( $Re = 2648$ ) e da literatura ( $Re = 2300$ ), para $b/h = 1$ .	53
Figura 4.10: Comparação qualitativa entre resultados experimentais do presente trabalho ( $Re = 5000$ ) e da literatura ( $Re = 5330$ ), para $b/h = 1$ .	54
Figura 4.11: Comparação entre resultados experimentais do presente trabalho e numéricos de Frigo (2004), para $b/h = 1$ e $Re = 2648$ .	54
Figura 4.12: Comparação entre resultados experimentais do presente trabalho ( $Re = 10000$ , cavidade aberta) e numéricos da literatura ( $Re = 5000$ , cavidade com tampa deslizante), para $b/h = 1$ .	55
Figura 4.13: Perfis da componente $u$ da velocidade em diferentes posições $x$ , para $b/h = 1$ e $Re = 2648$ .	56
Figura 4.14: Perfil da componente $u$ da velocidade na posição $x_3 = 0,5 b$ , para $b/h = 1$ e diferentes números de Reynolds.	57
Figura 4.15: Escoamento no interior de cavidades com $b/h = 0,5$ , para diferentes números de Reynolds, visualizados pela técnica de injeção de corante líquido.	58
Figura 4.16: Escoamento no interior de cavidades com $b/h = 0,5$ , para diferentes números de Reynolds, visualizados com o emprego de traçadores sólidos.	58
Figura 4.17: Comparação entre resultados experimentais do presente trabalho e de Faure et al. (2007), para $b/h = 0,5$ e diferentes números de Reynolds.	60

Figura 4.18: Perfil da componente $u$ da velocidade na posição $x_l = 0,5 b$ , para $b/h = 0,5$ e diferentes números de Reynolds.	60
Figura 4.19: Visualização do escoamento no interior de uma cavidade com $b/h = 2$ , para diferentes números de Reynolds, com a utilização de corante líquido.	61
Figura 4.20: Visualização do escoamento no interior de uma cavidade com $b/h = 2$ , para diferentes números de Reynolds, com o emprego de traçadores sólidos.	62
Figura 4.21: Comparação entre resultados do presente trabalho com resultados experimentais de Faure et al. (2007) e numéricos de Frigo (2004), para $b/h = 2$ .	63
Figura 4.22: Perfis da componente $u$ da velocidade em diferentes posições $x$ , para $b/h = 2$ e $Re = 2648$ .	65
Figura 4.23: Perfil da componente $u$ da velocidade para $b/h = 2$ , em diferentes posições $x$ e diferentes números de Reynolds.	66
Figura 5.1: Nova configuração do canal de água, incorporando as modificações sugeridas.	68
Figura A1: Esquema do canal de água recirculante do NDF/EPUSP (Assi, 2005).	75
Figura A2: Canal de água recirculante (dimensões em mm).	76
Figura A3: Difusor (dimensões em mm).	77
Figura A4: Seção de estabilização (dimensões em mm).	77
Figura A5: Retificação do escoamento na passagem por colméias e telas.	78
Figura A6: Contração (dimensões em mm).	78
Figura A7: Seção de testes (dimensões em mm).	79
Figura A8: Reservatório de descarga (diensões em mm).	80
Figura A9: Curva característica da bomba centrífuga KSB MEGACHEM 32-200, para rotação de 1750 rpm.	80
Figura A10: Molde bipartido do reservatório de descarga (RD).	81
Figura A11: Processo de laminação de fibra de vidro.	82
Figura A12: Reforços de aço sobre peças de fibra de vidro.	82
Figura A13: Reforços de aço e madeira utilizados na seção de testes.	83
Figura A14: Canal de água montado.	83
Figura B1: Propagação de ondas sonoras emitidas por uma fonte estacionária.	84

Figura B2: Ilustração do efeito Doppler.	85
Figura B3: Princípio de operação da ADV para medição de velocidade por efeito Doppler.	86
Figura B4: Componentes da Sonda ADV.	87
Figura B5: Localização do Volume de Medida.	88

## Lista de Tabelas

---

Tabela 4.1: Posição das estações de medição em relação à origem da seção de testes.	48
Tabela C.1: Correlações para o cálculo da viscosidade cinemática da água.	94
Tabela C.2: Valores típicos da incerteza da velocidade da corrente livre.	95
Tabela C.3: Valores típicos da incerteza do número de Reynolds.	96
Tabela C.4: Valores das incertezas do cálculo da razão de aspecto.	96

## Lista de Símbolos

---

$Q$	Vazão volumétrica do escoamento [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$S$	Desvio padrão da amostra
$T$	Temperatura do fluido [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$X_i$	Variável genérica, medida pelo sistema de medição
$\delta$	Incerteza associada à medição de uma variável
$\mu$	Viscosidade dinâmica ou absoluta do fluido [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$\mu_0$	Viscosidade da água a 273 K [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$\nu$	Viscosidade cinemática do fluido [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$\rho$	Densidade ou massa específica do fluido [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
$\sigma$	Desvio padrão da população
$F_t$	Frequência do pulso emitido pelo transmissor sonoro [ $\text{s}^{-1}$ ]
$F_d$	Frequência Doppler [ $\text{s}^{-1}$ ]
$V$	Velocidade relativa entre a fonte (partículas) e o receptor [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$Re$	Número de Reynolds
$b$	Comprimento da cavidade [m]
$h$	Altura da cavidade [m]
$f(x)$	Geratriz correspondente a curva da contração
$u$	Perfil de velocidade [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$U_{\infty}$	velocidade de corrente livre do fluido [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$x, y, z$	coordenadas cartesianas [m]
$\bar{V}$	Velocidade média do sinal de velocidade [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$V'$	Valor RMS da velocidade [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$I$	Intensidade de turbulência
$V_i$	Valor da velocidade no $i$ -ésimo instante [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$N$	Número de amostras adquiridas

# Sumário

---

**Resumo**

**Abstract**

<b>1. Capítulo 1: Introdução</b>	<b>15</b>
1.1. Vórtices na história da humanidade e escopo do trabalho	15
1.2. O escoamento em cavidades abertas	17
1.3. Experimentação em mecânica dos fluidos	20
1.4. Objetivos e conteúdo do trabalho	22
<b>2. Capítulo 2: Revisão bibliográfica</b>	<b>24</b>
2.1. Qualificação de aparatos experimentais	24
2.2. Escoamento em cavidades abertas	27
<b>3. Capítulo 3: Dispositivo e procedimentos experimentais</b>	<b>33</b>
3.1. Dispositivo experimental	33
3.1.1. Fluido de trabalho e condições de ensaio	33
3.1.2. Descrição do aparato	34
3.1.3. Seção de testes	35
3.2. Visualização de escoamentos	36
3.2.1. Técnicas de visualização	36
3.2.2. Iluminação, captura e processamento de imagens	39
3.2.3. Captura e processamento de imagens	41
3.3. Medições experimentais	42
3.3.1. Vazão	42
3.3.2. Velocidade local instantânea e intensidade turbulenta	42
3.3.3. Vibrações mecânicas	44
<b>4. Capítulo 4: Resultados e discussão</b>	<b>45</b>
4.1. Qualificação do canal de água recirculante	45
4.1.1. Análise de vibração	45
4.1.2. Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência	48

4.2. Estudo do escoamento em cavidades abertas	51
4.2.1. Cavidade com razão de aspecto $b/h = 1$	52
4.2.2. Cavidade com razão de aspecto $b/h = 0,5$	57
4.2.3. Cavidade com razão de aspecto $b/h = 2$	61
<b>5. Capítulo 5: Conclusão e recomendações para trabalhos futuros</b>	<b>67</b>
<b>Referências bibliográficas</b>	<b>70</b>
<b>Apêndice A: Desenvolvimento do canal de superfície livre com água recirculante</b>	<b>75</b>
<b>Apêndice B: Princípio de operação da sonda de velocidade (ADV)</b>	<b>84</b>
<b>Apêndice C: Análise de incertezas</b>	<b>89</b>

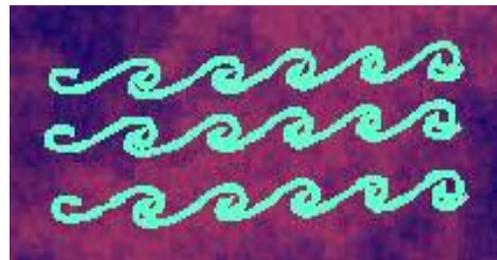
## INTRODUÇÃO

### 1.1. VÓRTICES NA HISTÓRIA DA HUMANIDADE E ESCOPO DO TRABALHO

Os escoamentos com vórtices sempre despertaram a curiosidade e o interesse do homem, desde os primórdios da humanidade. Pinturas primitivas com motivos espirais apresentam grande semelhança com estruturas turbilhonares observadas em escoamentos ambientais, indicando, talvez, a intenção de seus autores de representá-los. A título de ilustração, a Figura 1.1 compara gravuras encontradas em sítios arqueológicos da região adriática, datados de aproximadamente 3000 anos antes de Cristo, com alguns tipos de escoamentos cisalhantes livres. O desenho sobre a antiga cerâmica da Figura 1.1(a) reproduz, com perfeição, a esteira de von Kármán a jusante de uma ilha da Figura 1.1(b), enquanto que a seqüência de espirais entrelaçadas da Figura 1.1(c) muito se assemelha às instabilidades de Kelvin-Helmholtz da Figura 1.1(d), típicas de uma camada de mistura em desenvolvimento temporal.



(a) Esteira de von Kármán na arte primitiva.



(c) Camada de mistura na arte primitiva.



(b) Esteira de von Kármán na natureza



(d) Camada de mistura na natureza.

Figura 1.1: Vórtices na natureza e motivos espirais na arte primitiva (3000 a.C.).

Numa interessante discussão sobre este tema, Lugt (1983) faz um retrospecto da maneira como os vórtices foram encarados em diferentes períodos da história. Segundo o autor, o poder e o mistério associado aos vórtices sempre estimularam a fantasia e a superstição, dando origem a uma série de lendas e credences. Para algumas civilizações da Antiguidade e da Idade Média, a origem dos vórtices era associada à presença de forças sobrenaturais, provenientes de deuses, espíritos ou magos.

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



(a) Vista geral

(b) Vista de detalhe

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

Com o início da Renascença, importantes avanços foram conseguidos no entendimento do movimento dos fluidos. Por volta de 1500, o princípio de conservação da massa, para um escoamento unidimensional permanente, foi corretamente estabelecido por Leonardo da Vinci (1452-1519), cujo legado nesta área inclui vários outros feitos notáveis. Entre eles, vários desenhos e apontamentos atestam os esforços de da Vinci para compreender a distribuição de velocidades dentro de um vórtice. Na Figura 1.3, um interessante esboço retratando a presença de vórtices e turbulência numa pequena queda d'água.

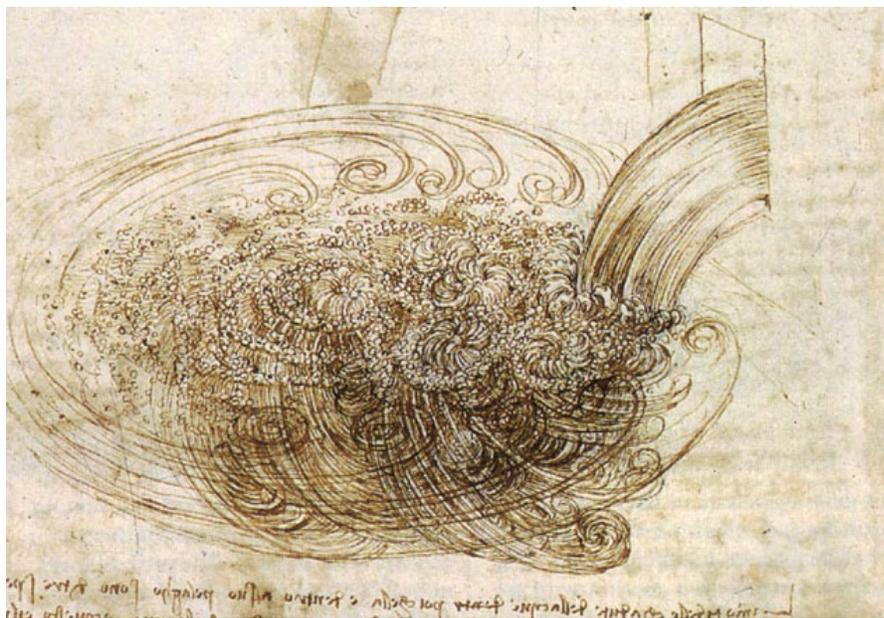


Figura 1.3: Vórtices e turbulência numa queda d'água, segundo Leonardo da Vinci (1452-1519).

Depois de da Vinci, vários filósofos, físicos, matemáticos e engenheiros se sucederam, formulando teorias para explicar os mecanismos de formação e o comportamento dinâmico dos vórtices. Sabe-se, hoje, que os vórtices nada têm de sobrenatural. Sabe-se, também, que eles não são apenas um capricho da natureza. Muito mais do que isto, os vórtices estão presentes na maioria dos escoamentos geofísicos e industriais, constituindo elementos fundamentais ao movimento da matéria e, até mesmo, à manutenção da vida no planeta.

A presente dissertação é consagrada ao estudo experimental de um tipo particular de escoamento, onde a presença de vórtices é invariavelmente observada. Trata-se do escoamento no interior de cavidades abertas, frequentemente encontrado na natureza e em aplicações tecnológicas. Mais especificamente, cavidades retangulares com diferentes proporções geométricas serão enfocadas. Para a condução da campanha de ensaios – que envolve medições e visualizações do campo de escoamento – um canal de superfície livre com recirculação de água foi inteiramente projetado, construído e testado. A apresentação detalhada deste aparato e dos ensaios que se prestaram à sua qualificação constitui parte integrante deste trabalho.

## 1.2. O ESCOAMENTO EM CAVIDADES ABERTAS

O escoamento no interior de cavidades abertas representa um problema clássico da mecânica dos fluidos, presente em diferentes situações práticas. Nas ciências atmosféricas,

por exemplo, este tipo de escoamento pode surgir sobre depressões, vales e crateras. Na engenharia, cavidades abertas aparecem em estádios, *canyons* urbanos, aberturas e frestas sobre a carroceria de veículos terrestres, sobre asas e fuselagem de aeronaves ou sobre cascos de embarcações. Cavidades abertas podem, ainda, ser identificadas em estruturas aéreas e aquáticas submetidas à ação do vento ou ao movimento das águas. A Figura 1.4 oferece alguns exemplos típicos de engenharia onde escoamentos sobre cavidades de diferentes formas e dimensões acontecem.

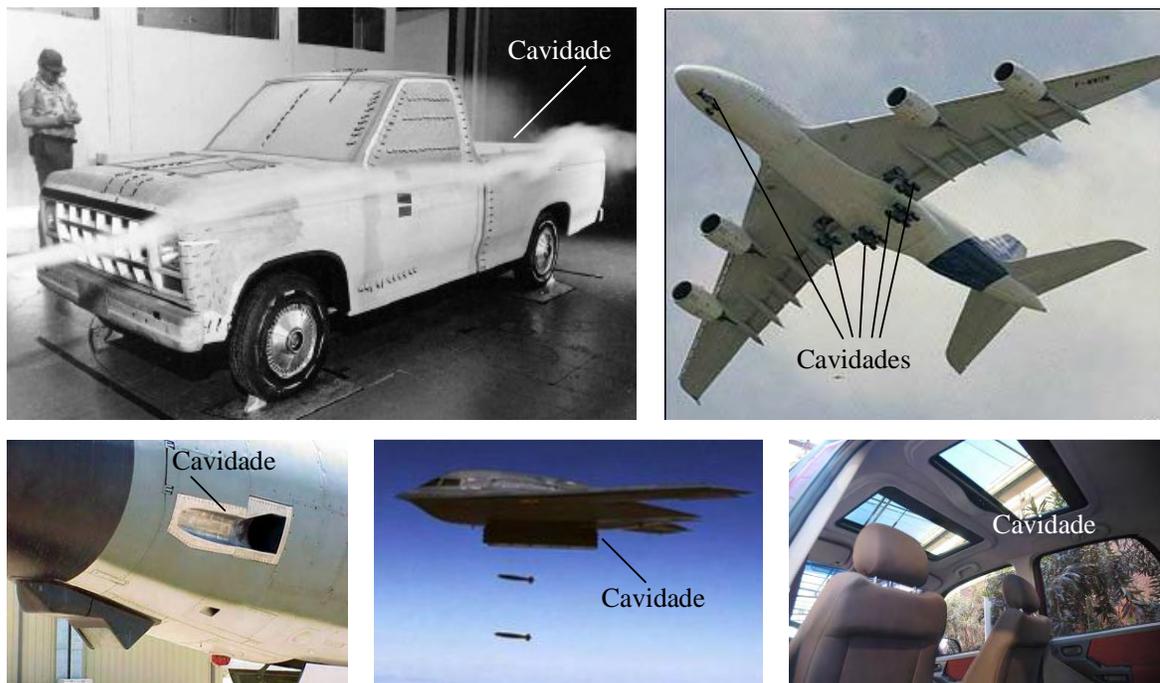


Figura 1.4: Cavidades sobre a fuselagem de aeronaves e carrocerias de automóveis.

O movimento do fluido dentro de uma cavidade aberta é bastante influenciado pela velocidade  $U_o$  da corrente livre, bem como pelas variáveis geométricas  $h$ ,  $b$ ,  $b_e$ ,  $b_s$ ,  $H$  e  $W$ , mostradas na Figura 1.5. Assim, se os parâmetros  $b_e$ ,  $b_s$ ,  $H$  e  $W$  forem fixados, as configurações assumidas pelo escoamento tornam-se dependentes apenas do número de Reynolds e da razão de aspecto da cavidade, definida pela relação  $b/h$ .

Apesar da simplicidade geométrica que caracteriza este problema, fenômenos bastante complexos acontecem em uma cavidade aberta. Como ilustrado na Figura 1.6, quando o escoamento atinge a região da cavidade (córner 1), ocorre o descolamento da camada limite que vinha se desenvolvendo a montante. Uma camada de mistura é então

formada na interface entre os escoamentos externo e interno à cavidade, favorecendo o surgimento de instabilidades hidrodinâmicas do tipo Kelvin-Helmholtz. Estas instabilidades são advectadas em direção à saída da cavidade, chocando-se com o córner 2. Neste processo, parte do fluido contido nestas estruturas turbilhonares é ejetada pra fora da cavidade, enquanto que uma outra parcela invade a cavidade, modificando a dinâmica do escoamento interno. Recirculações estacionárias se estabelecem dentro da cavidade, as quais interagem continuamente entre si, com as paredes sólidas que confinam o escoamento e com as estruturas turbilhonares secundárias localizadas nos córneres inferiores, acarretando a tridimensionalização do escoamento, com a formação de vórtices do tipo Taylor-Görtler (TGL). Este comportamento particularmente ativo do escoamento pode produzir oscilações de pressão na cavidade, induzindo vibrações indesejáveis, desgaste prematuro ou aumento no nível de ruído em estruturas, máquinas, equipamentos e veículos.

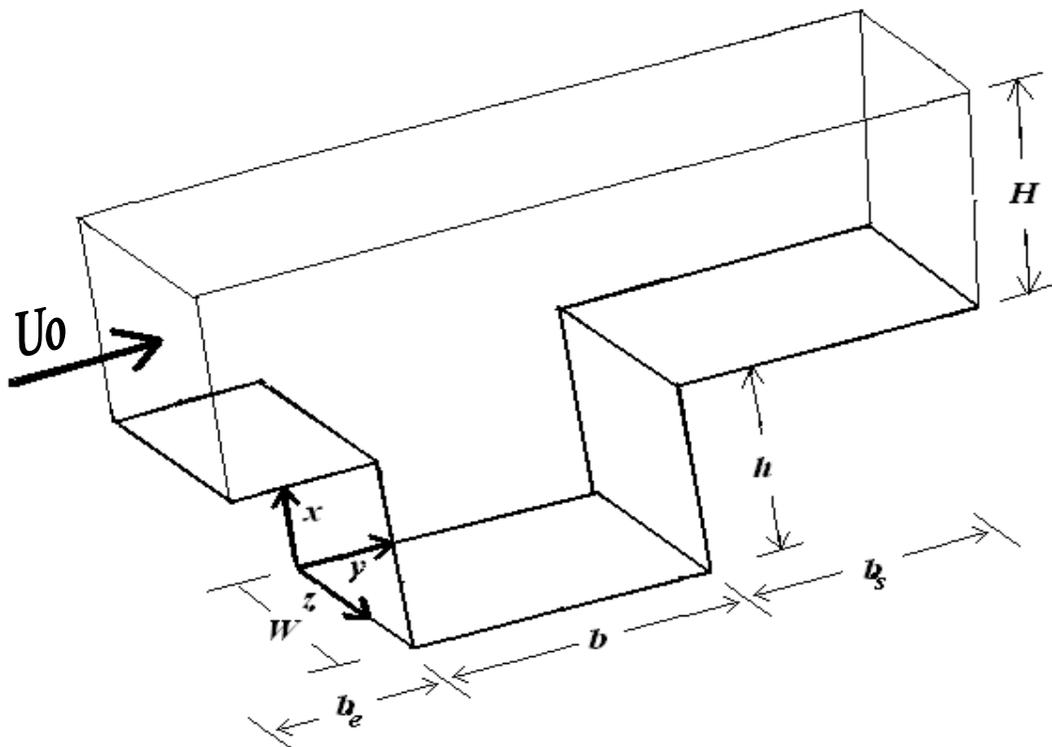


Figura 1.5: Cavidade aberta tridimensional: definição de parâmetros físicos e geométricos.

Além de todo o interesse prático envolvido no estudo deste tipo de problema, o escoamento no interior de cavidades abertas reúne uma série de características interessantes, que

fazem dele excelente *benchmark* para a validação de resultados numéricos, justificando a obtenção de dados experimentais que possam servir a esta finalidade.

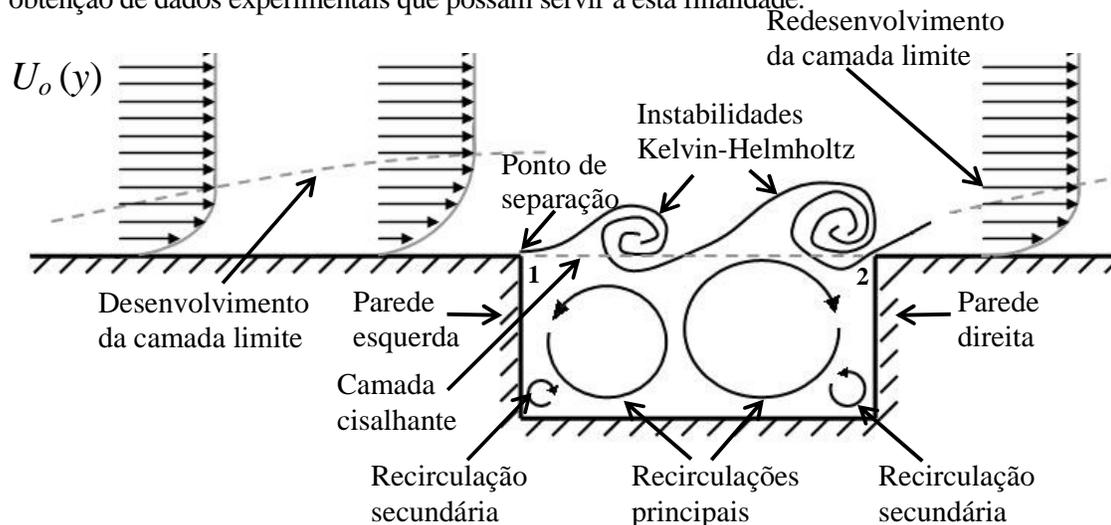


Figura 1.6: Caracterização do escoamento no interior de uma cavidade aberta.

### 1.3. EXPERIMENTAÇÃO EM MECÂNICA DOS FLUIDOS

Mesmo com toda a evolução das ferramentas computacionais direcionadas à simulação de escoamentos, a experimentação ainda desempenha um importante papel na análise do movimento dos fluidos, permitindo, inclusive, a obtenção de dados para o desenvolvimento e a validação de modelos matemáticos.

Diversos aparatos experimentais são empregados no estudo da mecânica dos fluidos, contribuindo para melhorar o nível de compreensão fenomenológica que se tem hoje nesta área do conhecimento. Muitos deles são dispositivos especiais, projetados com objetivos bem delimitados, para atender às necessidades de uma investigação específica. Outros, ao contrário, são instalações fixas e multifuncionais, capazes de abrigar uma ampla variedade de experimentos. Dentro desta última categoria, estão incluídos os túneis aerodinâmicos, os túneis hidrodinâmicos e os canais de água, que equipam inúmeros laboratórios ao redor do mundo.

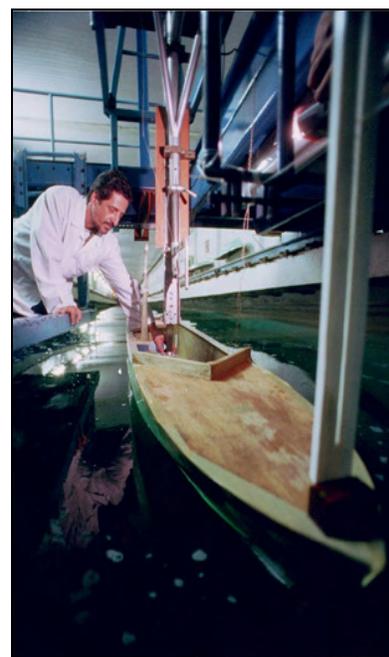
O desenvolvimento de um aparato deste gênero não representa uma tarefa trivial de engenharia, uma vez que seu projeto envolve um considerável número de tomadas de decisão e, além disso, não existem critérios explícitos de dimensionamento para a maioria de seus componentes. Assim sendo, o sucesso de um empreendimento desta natureza é fortemente determinado pela experiência da equipe envolvida, que quase sempre utiliza informações não

documentadas, adquiridas em projetos anteriores, e que integram a chamada cultura de laboratório.

Os canais de água, que apresentam maior interesse no contexto deste trabalho de pesquisa, possuem duas configurações bastante usuais. Na primeira delas, o fluido de trabalho permanece em repouso, enquanto o modelo de ensaio, que tanto pode ser um avião, um automóvel, um navio, um perfil aerodinâmico ou qualquer outro corpo de geometria arbitrária, é arrastado por um carrinho se deslocando sobre trilhos, como mostrado na Figura 1.7. Na segunda configuração, o modelo permanece estacionário no interior da seção de testes, enquanto o fluido se movimenta. Na Figura 1.8, são apresentados dois canais deste segundo tipo, com proporções bastante contrastantes entre si. Na Figura 1.8(a), um pequeno aparato de aplicação didática com seção de testes  $100 \times 120 \times 600$  mm e, na Figura 1.8(b), um canal com seção de testes de  $700 \times 900 \times 7500$  mm, descrito no trabalho de Ássi (2005).



(a) Vista geral do canal de água estagnada.



(b) Carrinho e modelo.

Figura 1.7: Canal de água estagnada, com seção de ensaios medindo  $6,6 \times 4,5 \times 220$  m (largura, profundidade e comprimento), instalado no Laboratório de Hidrodinâmica do IPT, São Paulo.

Uma das vertentes do presente trabalho está voltada para o projeto e a construção de um canal recirculante de superfície livre, com seção de testes  $200 \times 300 \times 1200$  mm, concebido para permitir a obtenção de dados quantitativos e qualitativos em cavidades com diferentes razões de aspecto.



(a) Canal recirculante de pequeno porte.



(b) Canal recirculante – Assi (2005).

Figura 1.8: Canais de superfície livre com recirculação de água.

#### 1.4. OBJETIVOS E CONTEÚDO DO TRABALHO

Os objetivos do presente trabalho contemplam duas vertentes principais: o desenvolvimento e teste de um canal de superfície livre com água recirculante, e o estudo experimental do escoamento em cavidades abertas com diferentes razões de aspecto.

Assim sendo, boa parte deste documento é consagrada à apresentação do projeto do canal e de seus detalhes construtivos, destacando-se as escolhas das dimensões e as formas de cada um de seus elementos, bem como as etapas de construção e os materiais utilizados.

Num primeiro momento, testes de qualificação foram realizados com o objetivo de identificar e corrigir defeitos de projeto e de montagem do aparato. Medições de velocidade com uma sonda acústica foram realizadas para analisar as características do campo de velocidades ao longo da seção de testes do canal, com ênfase na obtenção de dados referentes à evolução do perfil de velocidade e à intensidade turbulenta. Esta campanha de ensaios permitiu avaliar a adequação do canal construído para o estudo do escoamento em cavidades abertas, ressaltando suas virtudes e defeitos, fornecendo elementos de orientação para o aprimoramento do projeto.

Numa etapa posterior, foi realizado um estudo quantitativo e qualitativo do escoamento em cavidades abertas com razões de aspecto  $b/h = 0,5$ ,  $1$  e  $2$ , percorridas por um

escoamento com Reynolds na faixa de 1000 a 10000. Medições de velocidade e técnicas de visualização foram empregadas para a obtenção de resultados.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. QUALIFICAÇÃO DE APARATOS EXPERIMENTAIS

Túneis de vento e canais de água são equipamentos projetados para proporcionar um escoamento com características bem conhecidas e controladas no interior da seção de testes. Uma vez construído, um aparato deste tipo deve ser criteriosamente avaliado, mediante a realização de exaustivos testes de qualificação. Nesta etapa, não apenas as características do escoamento dentro da seção de testes devem ser investigadas, mas, também, a capacidade do equipamento em reproduzir as condições de ensaio para as quais foi concebido. A publicação de resultados de ensaios de qualificação de túneis e canais aparece com certa frequência na literatura, fornecendo importantes elementos para orientar o projeto de dispositivos similares.

Baseado nos dados experimentais e procedimentos relatados por Counihan (1972), Cook (1975) construiu e qualificou um túnel de vento de camada limite atmosférica, projetado para dar suporte ao estudo da aerodinâmica de construções urbanas e estruturas típicas da engenharia civil. Este equipamento, munido de um ventilador na saída da seção de testes, opera em circuito aberto de sucção, com velocidade máxima 20m/s. Segundo as recomendações de Counihan (1972), para simular o escoamento de camada limite atmosférica, se faz necessária uma seção de testes com comprimento em torno de cinco vezes maior do que sua altura, com a utilização de elementos rugosos e geradores de vórtices no piso da seção a montante do modelo a ser estudado. Seguindo esta orientação, o túnel de vento de Cook (1975) foi construído com uma seção de testes de 2 m de largura por 1 m de altura e 8 m de comprimento. Sondas para a medição das grandezas físicas características do escoamento podem ser introduzidas em diferentes pontos da seção de testes. Além disso, os últimos 2 m desta seção são equipados com paredes de vidro, para permitir ensaios de visualização do escoamento. Nesta última região, o piso é móvel, para facilitar a troca de modelos. Os resultados da qualificação foram obtidos com o auxílio de um anemômetro de fio quente e mostraram que, para uma velocidade de 11 m/s, o perfil de velocidade encontrado

manteve-se praticamente uniforme, com intensidade de turbulência de 0,4% na maior parte da área transversal da seção, aumentando para 1,2% nas proximidades das paredes. Ruídos indesejáveis surgiram na seção de testes, prejudicando a aquisição dos sinais de pressão. Para obter sinais de melhor qualidade, o autor testou a utilização de diferentes métodos de controle de ruídos.

Pouco tempo depois, Sykes (1977), tomando como base as informações fornecidas por Counihan (1972) e Cook (1975), construiu e qualificou um túnel de vento de camada limite atmosférica, com uma seção de testes de 3 m de largura por 1,5 m de altura e 8 m de comprimento. Diferentemente do túnel de Cook (1975), este aparato foi concebido para operar em circuito fechado, numa faixa de velocidade compreendida entre 4,3 e 26 m/s. O levantamento dos perfis de velocidade na seção de testes também foi realizado com o auxílio de um anemômetro de fio quente, que acusou uma intensidade de turbulência em torno de 3%, na região fora da camada limite, com valores maiores, próximo às paredes. A partir dos resultados destas medições, o autor traçou o espectro de turbulência da corrente livre, encontrando uma inclinação muito próxima à lei  $k^{-5/3}$ , preconizada pela teoria da turbulência homogênea e isotrópica de Kolmogorov.

A partir dos anos 1980, com o notável avanço da eletrônica e a disseminação dos computadores digitais, muitos túneis de vento passaram a operar com sistemas de controle automatizados, possibilitando a geração de escoamentos com características bastante próximas das encontradas nos escoamentos atmosféricos. Hansen e Sorensen (1985) construíram um novo túnel de vento para o Danish Maritime Institute, na Dinamarca, no qual todos os sistemas, incluindo ventiladores, anemômetros, sondas e mesas posicionadoras, eram controlados por um computador PDP 11/23, fabricado pela [Digital Equipment Corporation](#), permitindo a coleta e a análise de dados em tempo real. Este equipamento foi construído com seção de testes medindo 20,8 m de comprimento, 2,6 m de largura e 1,8 m de altura, equipada com três janelas de vidro para facilitar a instalação dos modelos e a visualização do escoamento. Através dos testes de qualificação, os autores observaram, sobre toda a linha de centro da seção de testes, um escoamento com boa uniformidade e baixa intensidade de turbulência – em torno de 0,5% e espessura da camada limite de 0,1 m, para uma velocidade de 24 m/s. O túnel foi equipado com elementos de atenuação acústica capazes de limitar o nível de ruídos nas proximidades dos ventiladores em 90 dB.

Wittwer e Möller (2000) ensaiaram o túnel de vento da Universidad Nacional del

Nordeste, na Argentina, com o intuito de verificar sua aplicabilidade em estudos de similaridade e em experimentos direcionados à análise de modelos estruturais posicionados na camada limite atmosférica. Este túnel é munido de duas mesas rotativas para a instalação dos modelos e possui seção de testes com 22,8 m de comprimento, 2,4 m de largura e 1,8 m de altura. Medições de velocidade efetuadas com o emprego de um anemômetro de fio quente permitiram a obtenção de perfis transversais de velocidade, intensidade turbulenta residual e espectro de turbulência. Os resultados revelaram um campo de velocidade com boa uniformidade e baixo nível de turbulência residual, em torno de 1% fora da camada limite, para uma velocidade de 27 m/s. Os espectros de turbulência apresentaram uma inclinação  $k^{-5/3}$ , além de reproduzirem com boa aproximação, o espectro de von Kármán. A análise da camada limite atmosférica, efetuada com o auxílio dos métodos propostos por Counihan (1969) e Standen (1972), permitiu que os autores confirmassem a adequação do aparato para simular a ação de ventos naturais.

Park, Cutbirt e Brewel (2003) avaliaram a performance do maior túnel hidrodinâmico do mundo, instalado na cidade de Memphis, no estado americano do Tennessee, com 72,8 m de comprimento, 19,8 m de altura, contendo 5300 m<sup>3</sup> de água. Este aparato, cuja velocidade máxima atinge 18 m/s, é equipado com uma seção de testes com área transversal de 3 x 3 m e 13,1 m de comprimento. Neste caso, medições de velocidade foram realizadas com o auxílio de um anemômetro a laser Doppler (LDA), enquanto que as características turbulentas do escoamento foram levantadas utilizando-se uma sonda de filme quente. O campo de velocidade se manteve aproximadamente uniforme na seção de testes, com uma intensidade de turbulência variando entre 0,2% e 0,5%, para uma faixa de velocidade de 3 à 16 m/s. Segundo os autores, esses níveis de turbulência situaram-se acima dos valores estabelecidos como meta de projeto. Ainda segundo os autores, o nível de turbulência está diretamente relacionado às características geométricas da contração empregada a montante da seção de testes, que possui razão de contração 6:1. Resultados melhores poderiam ser obtidos com razão de contração 9:1 ou superiores. Ainda assim, o escoamento gerado pelo túnel é de muito boa qualidade, possibilitando a obtenção de dados confiáveis para uma variedade bastante grande de investigações.

Mais recentemente, em seu trabalho de mestrado, Assi (2005) estudou os efeitos de interferência das vibrações induzidas pelo escoamento ao redor de cilindros rígidos engastados em um das extremidades. Para isso, o autor projetou e construiu um canal de superfície livre operado com água em circuito fechado, utilizando ferramentas CFD e o ensaio de protótipos em

escala reduzida para ajudar na definição geométrica e no dimensionamento de componentes. Este canal possui uma seção de testes com 7,5 m de comprimento, com 0,7 m de largura e 0,9 m de altura. Os ensaios de qualificação revelaram uma velocidade máxima na seção de testes próxima a 1 m/s. O mapeamento do campo de velocidade e dos níveis de turbulência, efetuado com um anemômetro do tipo CTA, mostrou boa uniformidade do perfil ao longo da seção de testes, com um nível de turbulência em torno de 2,2%, para velocidades médias na faixa entre 0,05m/s e 0,5 m/s, o que, segundo o autor, pode ser considerado baixo para canais com recirculação de água.

Muitos outros artigos na literatura apresentam resultados referentes à qualificação experimental de túneis e canais. Um problema recorrente em túneis de vento está no nível de ruído observado na seção de testes, que pode interferir na aquisição de sinais, dificultando a obtenção de resultados confiáveis. Já em canais de água, vibrações induzidas pelo escoamento na seção de testes podem, de maneira equivalente, prejudicar a medição de grandezas turbulentas e, ainda, dificultar a realização de ensaios de visualização. Assim, além da obtenção de perfis de velocidade e de grandezas turbulentas no interior da seção de testes, é importante que os ensaios de qualificação de um canal de água envolvam, também, avaliações de repetitividade experimental e medições dos níveis de vibração na seção de testes. Somente depois de completada esta importante etapa de qualificação, estudos experimentais confiáveis poderão ser realizados com o uso do aparato desenvolvido.

## **2.2. ESCOAMENTO EM CAVIDADES ABERTAS**

Quando comparado com o clássico problema da cavidade com tampa deslizante (*lid-driven cavity*), trabalhos abordando o escoamento no interior de cavidades abertas são bem menos abundantes na literatura, acarretando uma relativa escassez de dados, principalmente de natureza experimental. Além disso, a maioria dos artigos sobre o tema está voltada para o problema da cavidade percorrida por escoamentos compressíveis, com aplicações aeronáuticas. Neste caso, a camada cisalhante quase sempre apresenta fortes oscilações, provocando o aparecimento de instabilidades que se chocam violentamente contra os côrneres da cavidade, gerando ondas acústicas que se manifestam na forma de ruído. Além disso, observa-se, em diferentes tipos de situações de engenharia, que este tipo de fenômeno pode produzir aumento no arrasto aerodinâmico e em vibrações estruturais.

Vários pesquisadores, como Colonius, Basu e Rowley (1999), Rowley, Colonius e

Murray (2001), Rowle, Colonus e Basu (2002), Cattafesta et al. (2003), vêm estudando a aplicabilidade de métodos de controles ativos para atenuação de oscilações acústicas em cavidades. Todavia, a aplicação eficiente destas metodologias requer uma boa compreensão física do escoamento em cavidades abertas. Neste sentido, o estudo do escoamento incompressível a números de Reynolds moderados sobre este tipo de geometria tem oferecido contribuição efetiva, uma vez que muitos dos fenômenos ali observados também se fazem presentes no escoamento compressível.

Sarohia (1977) desenvolveu um dos principais estudos sobre o escoamento a números de Reynolds moderados em cavidades abertas, tornando-se referência para a maioria dos trabalhos desenvolvidos posteriormente. Experimentos foram conduzidos em um túnel aerodinâmico, permitindo a visualização do escoamento por injeção de fumaça e a obtenção dos perfis de velocidades na cavidade por anemometria de fio quente. O autor observou que, dependendo do comprimento da cavidade e da velocidade da corrente livre, as oscilações da camada cisalhante a jusante do ponto de separação podem ou não ocorrer. Quando ocorrem; estas oscilações são propagadas e amplificadas ao longo do comprimento da cavidade. Os resultados apontaram que, próximo ao córner 2, a camada cisalhante é defletida para dentro e para fora da cavidade, ocasionando numa ejeção periódica de vórtices, que ocorre na mesma frequência de oscilação da camada cisalhante.

Num estudo voltado para a compreensão de diferentes tipos de escoamento a baixos números de Reynolds, Taneda (1979) investigou o movimento do fluido no interior de cavidades retangulares, usando técnicas de visualização. Os experimentos foram conduzidos em um tanque de glicerina, empregando-se pó de alumínio como traçador sólido, iluminado por folha de luz. Cavidades com razões de aspecto variando de 0,5 a 3 foram ensaiadas, para número de Reynolds em torno de 0,01. Os resultados revelaram que os pontos de separação e de recolamento da camada limite não ocorrem nos córneres superiores da cavidade, mas sim em suas paredes verticais. Esta constatação serviu para comprovar os resultados de Takematsu (1966), que estudou analiticamente o escoamento em cavidades abertas usando a aproximação de Stokes.

Resultados similares foram, também, obtidos por Shen e Floryan (1985) em uma investigação numérica bidimensional, confirmando que, para essas condições, o escoamento é bidimensional e estável, além de revelar que o ponto de separação da camada limite se aproxima do córner 1 da cavidade, com o decréscimo da razão de aspecto. Além disso, os resultados numéricos de Shen e Floryan (1985) mostraram que a presença de bolhas de

recirculação nos côrneres inferiores da cavidade independe da razão de aspecto, em concordância com o preconizado por Moffat (1964).

Uma importante contribuição para o entendimento do escoamento laminar em cavidades retangulares foi dada por Sinha, Gupta e Oberai (1982). Utilizando um túnel de vento de baixa velocidade e usando fumaça como agente de visualização, os autores identificaram as características topológicas do escoamento em oito cavidades distintas, com razão 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 foi também 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, Gupta e Oberai (1982) têm sido empregados por vários autores na validação de códigos numéricos.

Depois de usar os dados de Sinha, Gupta e Oberai (1982) para a validação de seu programa computacional, Frigo (2004) investigou qualitativamente as estruturas turbilhonares presentes no interior de cavidades com razões de aspecto iguais a 1 e 2. Para a cavidade quadrada ( $b/h = 1$ ), as simulações revelaram a presença de uma recirculação principal, ocupando todo o interior da cavidade, acompanhada de duas pequenas bolhas de recirculação nos côrneres inferiores, conhecidas como vórtices de Moffat (1964). Já para a cavidade com razão de aspecto  $b/h = 2$ , interessantes estruturas aparecem no interior da cavidade. Uma recirculação maior se forma próxima à parede direita da cavidade, a partir de pequenas recirculações que invadem a cavidade devido ao choque do fluido com o côrner 2, atribuindo-lhe o aspecto de uma planetária ou de um mancal de rolamentos. A interação entre esse vórtice principal com o fluido que ocupa a porção esquerda da cavidade, gera um segundo vórtice contra-rotativo, cuja dimensão característica aproxima-se da altura  $h$  da cavidade.

A presença das estruturas turbilhonares identificadas no trabalho numérico de Frigo (2004) foi confirmada experimentalmente por Faure et al. (2007), através de visualizações do escoamento realizadas com fumaça, em ensaios conduzidos em túnel de vento. Neste artigo, Faure et al. (2007) investigaram o escoamento no interior de cavidades com razões de aspecto de 0,5 até 2, para uma faixa de Reynolds compreendida entre 1150 a 10670. Para aprofundar a compreensão sobre a dinâmica desse tipo de escoamento, os autores realizaram visualizações do escoamento também em um plano horizontal paralelo ao piso da cavidade. As imagens obtidas nesses ensaios evidenciaram a tridimensionalização do escoamento nas proximidades do côrner 1 da cavidade, evidenciada pelo movimento do fluido na direção da envergadura, devido

à interação da camada cisalhante com as recirculações contra-rotativas.

Embora o foco de interesse da maioria dos estudos se concentre no escoamento sobre cavidades curtas, cavidades longas também aparecem em muitas aplicações de engenharia. Zdanski (2001) investigou o escoamento sobre uma placa de coletor solar munida de protuberâncias retangulares esbeltas, que atuam como barreiras ao vento natural, dando origem a cavidades longas. Neste trabalho, o autor simulou numericamente cavidades com razões de aspecto de 6 a 28 e números de Reynolds iguais a 147 e 662, em regime laminar, e de 11765 a 28235, em regime turbulento. Do ponto de vista prático, os resultados foram explorados no sentido de identificar as condições de escoamento capazes de provocar escoamento reverso em toda parede do fundo da cavidade, com o objetivo de minimizar os efeitos convectivos. A partir dos dados obtidos, o autor constatou que, tanto no regime laminar quanto 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, ainda, que, no regime turbulento, o escoamento pode apresentar um ponto de recolamento no piso da cavidade.

Esteve, Reulet e Millan (2000) estudaram experimentalmente uma cavidade aberta com razão de aspecto igual a 10, percorrida por escoamentos turbulentos com números de Reynolds iguais a 38000 e 64000. Para as condições em que foram realizados os ensaios, os autores não observaram recolamento da camada cisalhante sobre o piso da cavidade. Isto se deve, talvez, ao fato de que a intensidade turbulenta da corrente livre foi de apenas 1%, o que provocou um comportamento interessante no escoamento, com a presença de uma subcamada com velocidade axial negativa no piso da cavidade, a qual barra o desenvolvimento da camada cisalhante e impede o recolamento.

Interessados em aplicações relacionadas à dispersão de poluentes em *canyons* urbanos, Kim, Baik e Chun (2001) investigaram numericamente o escoamento ao redor de dois edifícios dispostos lado-a-lado, configuração esta que muito se assemelha ao caso de uma cavidade aberta. Cálculos bidimensionais foram realizados com a ajuda de um programa de simulação de escoamentos, usando o método dos volumes finitos com malhas desencontradas. Um modelo de turbulência do tipo  $k$ - foi empregado para o fechamento das equações médias de Reynolds. Os resultados mostraram que, com o aumento da altura dos edifícios, as recirculações se tornam cada vez maiores. Além disso, uma outra recirculação importante é formada a montante do primeiro edifício, devido ao choque do fluido com a parede frontal do prédio. No que tange à dispersão de poluentes, os resultados obtidos pelos autores mostraram

que, em frente ao primeiro edifício e sobre a região do *canyon*, o nível médio da poluição pode se tornar mais elevado que nas demais regiões, enquanto a concentração de poluentes dentro do *canyon* decresce com o aumento da altura dos edifícios.

Manovski, Honnery e Soria (2005) apresentou um estudo experimental das oscilações da camada cisalhante para escoamentos com números de Reynolds de 90 a 730, em cavidades abertas com razões de aspecto de 3 a 6, usando técnicas qualitativas e quantitativas de visualização. Os ensaios foram conduzidos em um túnel hidrodinâmico e três diferentes metodologias foram empregadas – fluorescência induzida por laser (LIF), velocimetria por imagem de partículas (PIV) e visualização por folha de luz, com o emprego de traçadores sólidos. Segundo os resultados obtidos pelo autor, para  $Re = 90$ , o escoamento não apresenta oscilações da camada cisalhante. Com o aumento do número de Reynolds, na faixa de 180 a 460, já se observam oscilações, com desprendimentos de vórtices em intervalos regulares. Na faixa de Reynolds de 550 a 730, as oscilações se tornaram irregulares, atribuindo ao escoamento um caráter mais randômico. Nesta última condição, a presença de pequenos vórtices secundários é observada no interior da cavidade.

Yoshida et al. (2006) desenvolveram um estudo numérico do escoamento em cavidades abertas, visando o controle de oscilações auto-sustentáveis. As equações de Navier-Stokes incompressíveis foram resolvidas com o auxílio do método de diferenças finitas, utilizando-se o esquema *upwind* de terceira ordem para o tratamento dos termos advectivos e o esquema diferença central para os demais termos. Uma cavidade com razão de aspecto  $b/h = 2$  foi simulada para número de Reynolds igual a 6000. Neste trabalho, os autores observaram que as oscilações auto-sustentáveis podem ser controladas com a ajuda de uma parede móvel no fundo da cavidade. Os resultados mostraram que o movimento da parede, tanto para velocidades positivas quanto negativas, modifica as características do escoamento recirculante interno e que essa alteração provoca mudanças nas oscilações da camada cisalhante. Quando a velocidade da parede do fundo é negativa e inferior a 10% da velocidade da corrente não perturbada a montante da cavidade, as duas recirculações contra-rotativas internas se aglutinam, formando uma única recirculação, que ocupa toda a extensão da cavidade, suprimindo por completo as oscilações da camada cisalhante. Para velocidades parietais positivas 19% maiores do que a velocidade 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 auto-sustentáveis.

Realizando injeção e sucção simultâneas de massa, através das paredes esquerda e

direita da cavidade, respectivamente, Suponitsky, Avital e Gaster. (2005) obtiveram bons resultados no que tange ao controle das oscilações da camada cisalhante em cavidades abertas com razão de aspecto  $b/h = 4$  e  $Re = 5000$ . Como forma de quantificar as características de controle, um parâmetro adimensional  $Bc$  foi estabelecido pelos autores, que leva em consideração as velocidades e as áreas de injeção e de sucção. Os resultados obtidos mostraram que para valores de  $Bc$  entre 0,5 e 1, o método leva a uma rápida atenuação das oscilações do arrasto. Os autores observaram, ainda, que uma considerável atenuação também pode ser alcançada para valores de  $Bc$  da ordem de 0,375%, porém, neste caso, um tempo muito maior é requerido. Abaixo desse valor, o método se mostra ineficiente para controlar as oscilações auto-sustentáveis.

A guisa de conclusão, pode-se dizer que os estudos sobre a fenomenologia do escoamento em cavidades abertas já avançaram muito ao longo das últimas décadas. Com isto, diferentes métodos de controle ou supressão das oscilações da camada cisalhante têm sido propostos, com o objetivo de minimizar os níveis de ruídos decorrentes destas instabilidades. Por outro lado, vários desafios ainda restam no que concerne à compreensão dos mecanismos físicos associados ao escoamento no interior desta geometria. Neste sentido, todos os esforços que resultem na obtenção de dados experimentais para o desenvolvimento de modelos matemáticos, ou que sejam úteis para a validação de resultados numéricos, são plenamente justificáveis.

# DISPOSITIVO E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### 3.1. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

#### 3.1.1. Fluido de trabalho e condições de ensaio

A principal vantagem de se utilizar um líquido como fluido de trabalho está na maior facilidade para a aplicação de técnicas de visualização de escoamentos do que a encontrada quando se trabalha com meios gasosos. Vórtices, recirculações, jatos, esteiras e descolamentos podem se tornar visíveis, com grande nitidez e clareza, utilizando-se filetes de tinta injetados no escoamento, pequenas bolhas gasosas ou partículas sólidas em suspensão na corrente livre, convenientemente iluminadas. Assim, além da simplicidade construtiva e operacional que caracteriza os canais de água, a possibilidade da aquisição de imagens de escoamentos com boa definição torna este tipo de instalação um excelente instrumento de investigação científica ou de exploração didática de fenômenos relacionados ao movimento dos fluidos.

Deve-se assinalar, entretanto, que a velocidade máxima do escoamento produzido por um canal de água recirculante é bem menor do que a alcançada em túneis aerodinâmicos e, em geral, as dimensões da seção de testes também o são, restringindo o tamanho dos modelos a serem ensaiados. Estes dois fatores limitam os números de Reynolds tipicamente obtidos nos escoamentos em canais de água. Em contrapartida, a viscosidade cinemática da água é aproximadamente quinze vezes menor do que a do ar, compensando parcialmente esta limitação.

Os diferentes elementos que compõem o canal de água desenvolvido no contexto deste trabalho de pesquisa, juntamente com suas condições operacionais e as técnicas experimentais empregadas na qualificação do aparato e no estudo do escoamento no interior de cavidades abertas são apresentados a seguir.

### 3.1.2. Descrição do aparato

A Figura 3.1 mostra, em perspectiva, um desenho do canal de água recirculante de superfície livre. Suas principais peças foram confeccionadas em material composto de fibra de vidro e resina de poliéster isoftálica, com exceção da seção de testes, construída com acrílico transparente de boa qualidade ótica, para permitir a visualização do escoamento no interior das cavidades.

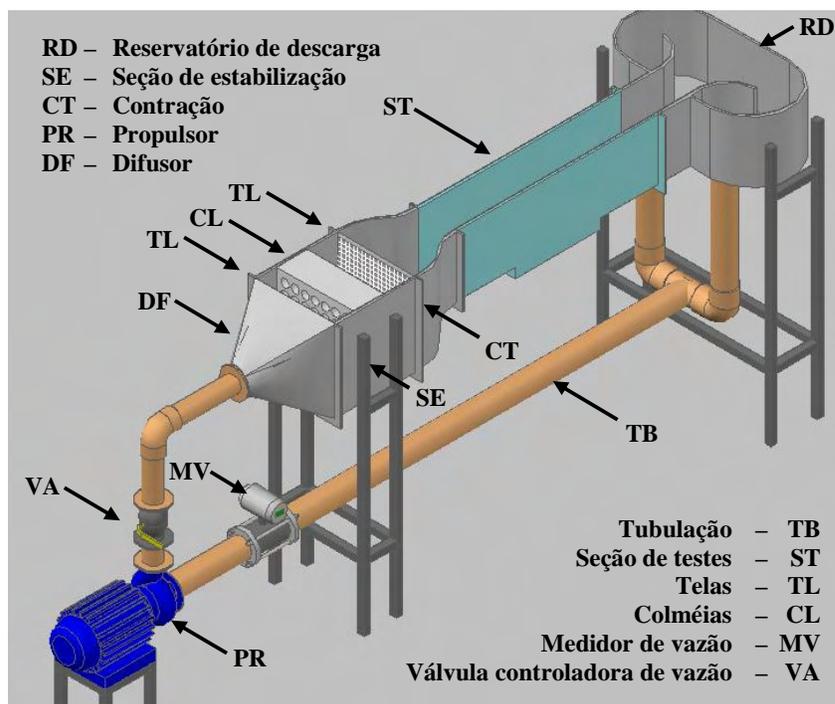


Figura 3.1: Esquema do canal de água recirculante.

O canal opera em circuito fechado e seu funcionamento é bastante simples, podendo ser descrito da maneira como segue. O sistema de propulsão (PR), formado por uma bomba centrífuga de 3 HP, que retira água do reservatório de descarga (RD), impelindo-a até o difusor (DF), instalado na tubulação de recalque, após a válvula controladora de vazão. No difusor, o escoamento sofre uma pré-homogeneização, passando através de um meio poroso formado por centenas de esferas plásticas de 29 mm de diâmetro, que preenchem todo o volume interno do difusor. Seguindo seu trajeto, o fluido é conduzido à seção de estabilização (SE), onde passa por telas e colméias (TC), que têm por finalidade retificar o escoamento, completando a homogeneização do perfil de velocidades e reduzindo os níveis de turbulência do escoamento. Ao passar pela 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.

A descrição detalhada dos diferentes elementos que compõem o canal é apresentada no Apêndice A, juntamente com os detalhes de dimensionamento e fabricação das peças. Apenas os principais aspectos geométricos e construtivos referentes à seção de testes e às cavidades ensaiadas serão discutidos a seguir.

### 3.1.3. Seção de testes

A seção de testes, com dimensões internas de 200 mm de largura, 300 mm de altura e 1200 mm de comprimento, foi quase que inteiramente confeccionada em acrílico, para permitir o acesso visual ao escoamento através de qualquer uma de suas faces. Como aparece na Figura 3.2, flanges em acrílico com reforços de aço foram colocados nos bordos superiores da seção, para aumentar a resistência mecânica de suas paredes laterais e, ao mesmo tempo, servir de suporte para o posicionamento de sondas de medição ou dispositivos de injeção de corantes. Outros reforços em aço, em madeira e mesmo em acrílico foram também instalados em pontos estratégicos da seção, como precaução para evitar deformações indesejadas ou danos permanentes. Uma grande cavidade, com profundidade  $h = 50$  mm e 500 mm de extensão, foi construída na parede inferior da seção. Três adaptadores intercambiáveis, de tamanhos diferentes, foram construídos para o ensaio de cavidades com razões de aspecto  $b/h = 0,5$ , 1 e 2. As dimensões dos adaptadores foram especificadas de forma a permitir que sua montagem no interior da seção pudesse ser feita sem a utilização de cola, facilitando a remoção e o manejo deste elemento. Uma janela localizada no fundo da cavidade, fixada com parafusos e vedada com um anel de borracha do tipo *o-ring*, permite a rápida substituição do adaptador.

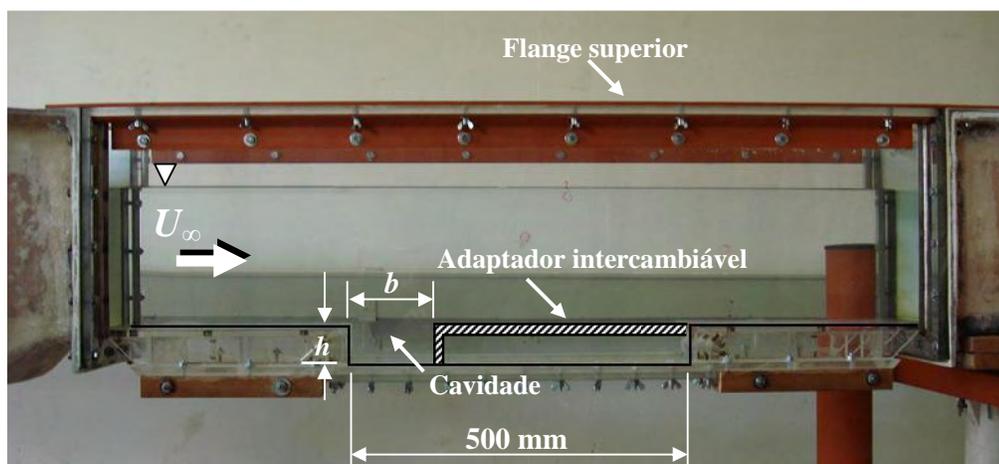


Figura 3.2: Seção de testes e cavidades intercambiáveis: altura  $h$  fixa e comprimento  $b$  variável.

Como mostra a Figura 3.3, vários orifícios foram feitos nas paredes do fundo da seção

de teses, que tanto podem servir para a injeção de corantes líquidos, quanto para a utilização como tomadas de pressão estática.

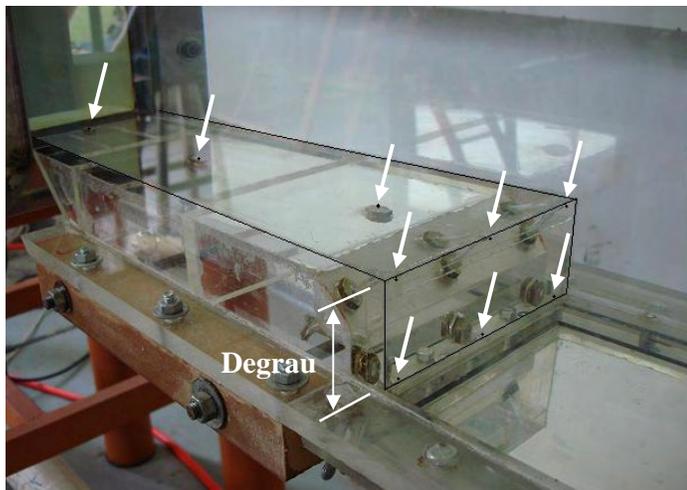


Figura 3.3: Orifícios de injeção de corante / tomadas de pressão, instalados a montante da cavidade.

## 3.2. VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS

### 3.2.1. Técnicas de visualização

Neste trabalho, duas diferentes técnicas de visualização em meio líquido foram empregadas como ferramenta de análise qualitativa de escoamentos – a injeção de corante líquido e a sementeira de partículas sólidas no fluido de trabalho –, as quais são descritas a seguir.

#### a) Injeção de corantes líquidos

A injeção de corantes possui muitas vantagens em relação a outras metodologias de visualização em meio líquido, como, por exemplo, facilidade de implementação e baixo custo operacional. A implementação da técnica pode ser feita de duas maneiras distintas: através de orifícios posicionados nas paredes da seção de testes ou sobre a superfície do modelo a ser ensaiado, bem como por intermédio de uma agulha posicionada num ponto preestabelecido no interior do escoamento. Em ambos os casos, a injeção deve ser feita de maneira bastante cuidadosa, de modo a introduzir a menor perturbação possível no escoamento. Assim, a velocidade e a pressão de injeção devem ser controladas e mantidas em valores próximos

àqueles encontrados no escoamento, a fim de que o filamento de corante se mantenha nítido e estável.

Vários produtos têm sido empregados como traçadores líquidos em trabalhos de visualização de escoamentos. Dentre eles, destacam-se as tintas fluorescentes, que podem ser excitadas pela luz (DOBRODZICKI, 1982), pela ação de componentes químicos (FRIEDMAN, 1956), ou através de campos elétricos (HOWLAND et al. 1966). Existem, ainda, as chamadas soluções fotocromáticas, que alteram sua coloração na presença de radiações eletromagnéticas (Popovich et al. 1967). O uso de muitas outras substâncias, como o leite, a anilina, o nanquim e o permanganato de potássio, diluídos numa solução de água e álcool, também é mencionado com certa frequência na literatura. Entretanto, os traçadores líquidos mais frequentemente utilizados são, ainda hoje, os corantes alimentícios e os corantes para pintura, ambos solúveis em água.

No presente trabalho, optou-se pela utilização de uma solução aquosa de pigmento para tinta à base de PVA, que possui baixo custo e grande poder de tingimento, além de ser facilmente encontrado no mercado. A injeção foi realizada com o auxílio do dispositivo representado na Figura 3.4, constituído de um reservatório pressurizado, uma válvula reguladora de vazão e uma mangueira flexível, a qual tanto pode ser conectada aos orifícios presentes no piso da seção de testes e como a uma ou mais agulhas dobradas em forma de cotovelo.

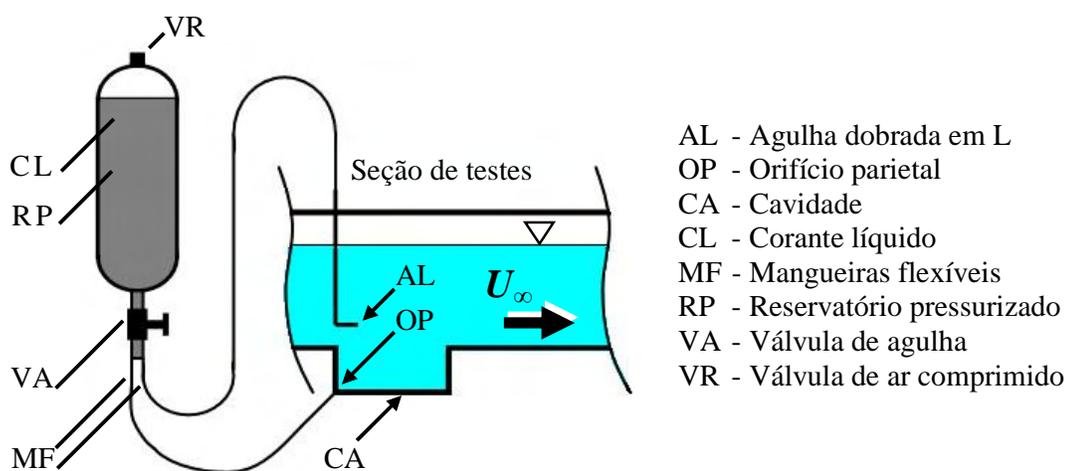


Figura 3.4: Dispositivo de injeção de corantes líquidos.

O diâmetro da agulha de injeção é um fator importante a ser considerado, pois a esteira

que se forma à jusante da própria agulha pode introduzir perturbações indesejáveis sobre o escoamento investigado. A fim de quantificar esta perturbação, Lindquist (2000) realizou medidas anemométricas para determinar o perfil de velocidade à jusante de uma agulha com 0,7 mm de diâmetro externo, em três estações ao longo da seção, para três valores de velocidades distintos. O autor encontrou um déficit de velocidade na região da esteira da agulha em torno de 8% da velocidade da corrente livre na estação mais próxima da agulha, atenuando para regiões mais afastadas da agulha e para velocidades menores. Através dessa análise o autor pôde optar pelo uso de uma agulha retrátil durante as visualizações, a fim de eliminar este problema.

A técnica utilizada no presente trabalho se assemelha à utilizada por Lindquist (2000), onde a injeção do corante também foi efetuada por meio de agulhas retráteis. As agulhas foram introduzidas na seção de testes através da superfície livre do canal, onde o suporte das agulhas foi fixado com o auxílio de imãs nos flanges superiores da seção de testes. Deste modo, as agulhas puderam banhar a cavidade com corante em abundância, e logo em seguida puderam ser retiradas da seção, conforme esquematizado na Figura 3.5. Ao mesmo tempo, foram realizadas outras injeções de corante através dos orifícios no piso da seção de testes.



Figura 3.5: Esquema para a injeção de corante líquido.

### **b) Partículas sólidas**

A partir dos anos 1980, houve grande avanço na utilização de traçadores sólidos para a visualização de escoamentos, principalmente devido ao advento das técnicas de velocimetria por imagens de partículas (PIV), que possibilitaram a quantificação de campos de escoamento a partir do tratamento de imagens. Neste tipo de aplicação, são empregadas, em geral, partículas com dimensão inferior à 50  $\mu\text{m}$ , como discutido por Vieira (1997).

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

No presente trabalho, partículas de Pliolite, um copolímero acrílico desenvolvido pela Goodyear, com dimensão característica da ordem de 100-125  $\mu\text{m}$ , foram utilizadas como traçadores sólidos. Além de exibirem densidade próxima à da água, estas partículas apresentam alto poder de reflexão, mostrando-se bastante adequadas a este tipo de aplicação.

### **3.2.2. Iluminação, captura e processamento de imagens**

Para cada técnica de visualização utilizada, adotou-se um sistema de iluminação diferente, conforme descrito a seguir.

Com o uso da técnica de injeção de corante líquido, a iluminação foi realizada a contraluz, utilizando-se um arranjo de oito lâmpadas fluorescentes de 40 W cada uma, incidindo diretamente sobre um anteparo translúcido de papel vegetal, posicionado entre a face posterior da seção de testes e a fonte luminosa. A câmera, por sua vez, foi cuidadosamente posicionada em frente à face anterior da seção de testes, com o foco ajustado manualmente. A Figura 3.6, ilustra esta montagem.

A técnica de visualização por semeadura de traçadores sólidos no fluido de trabalho é, frequentemente, combinada com a iluminação por folha de luz. Neste caso, o sistema de

iluminação envolve, na maioria das vezes, a utilização de uma fonte laser, cujo feixe luminoso deve incidir sobre uma lente bicilíndrica ou sobre um artefato rotativo com faces espelhadas, para produzir uma folha de luz na região de interesse. Ao serem iluminadas, as partículas sólidas, que idealmente devem ser arrastadas pelo escoamento como um escalar passivo, promovem o espalhamento da luz incidente (*scattering*), permitindo uma excelente condição para a visualização do escoamento.

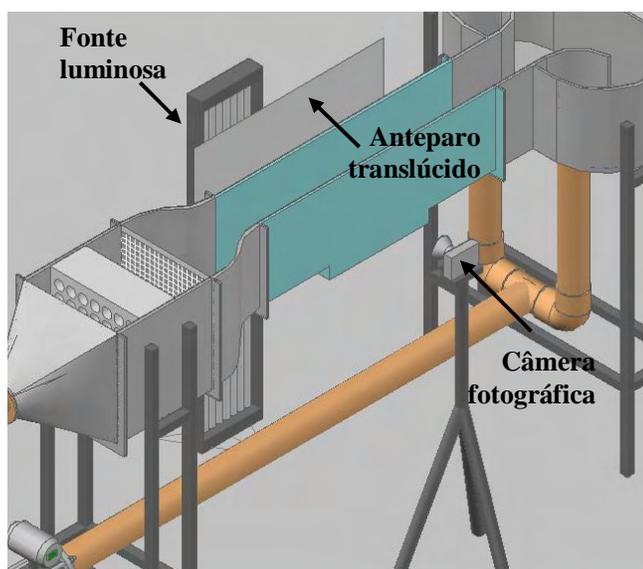
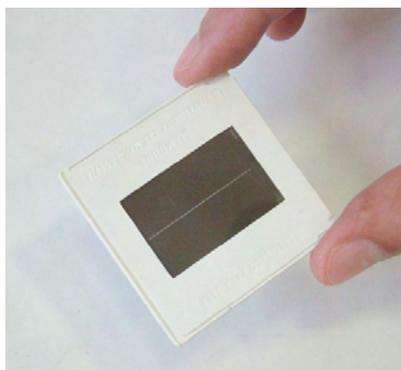


Figura 3.6: Esquema de iluminação

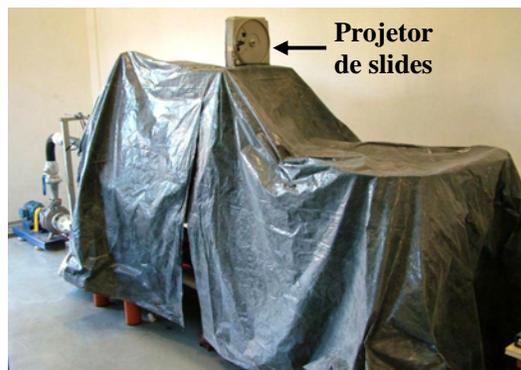
No presente trabalho, entretanto, devido à indisponibilidade de uma fonte laser com potência suficiente para a execução desta tarefa, foi necessária a montagem de um sistema adaptado, utilizando-se um projetor de slides da marca Kodak, como fonte luminosa. Para gerar uma folha de luz de largura suficientemente fina, foi necessária a confecção de um slide opaco contendo um risco permeável à passagem da luz. Para isso, uma folha de papel de cor branca, contendo apenas o desenho de uma linha reta bastante fina, foi inicialmente fotografada e, a partir daí, um slide negativo foi confeccionado. Como se pode observar na Figura 3.7(a), esta linha, que era negra sobre a folha branca, aparece como um risco transparente sobre o slide negativo. Uma vez inserido no projetor de slide, apenas este risco permitirá a passagem da luz, gerando uma folha iluminada, propícia à visualização de escoamentos.

Com o intuito de evitar a entrada de luminosidade na região de interesse do escoamento, todos os ensaios com o uso de traçadores sólidos foram realizados no período noturno e todo o aparato experimental, incluindo a câmera fotográfica, foi envolto por uma lona

preta, como pode ser visto na Figura 3.7(b). Assim, para permitir o acesso visual ao escoamento e facilitar a operação de enquadramento e focagem, um monitor de vídeo de 10" JVC de alta resolução foi acoplado à câmera fotográfica.



(a) Slide negativo contendo uma linha transparente.



(b) Aparato experimental envolto por uma lona preta.

Figura 3.7: Aparato experimental e sistema gerador de folha de luz para a visualização de escoamentos utilizando-se traçadores sólidos.

### 3.2.3. Captura e processamento de imagens

Imagens dos escoamentos foram capturadas com o auxílio de uma câmera digital Fujifilm FinePix S7000, de 6.0 Megapixels e zoom óptico de 3X. Um tempo de exposição suficientemente longo foi adotado na captura das imagens, a fim de possibilitar o registro dos rastros deixados pelas partículas de Pliolite semeadas no fluido de trabalho e, a partir daí, a identificação dos diferentes padrões topológicos que caracterizam este tipo de escoamento. Para cada condição de teste, o tempo de exposição ideal, capaz de fornecer as melhores imagens, foi obtido empiricamente, através de tentativas sucessivas.

Por fim, para melhorar a qualidade das imagens e ressaltar detalhes importantes dos escoamentos estudados, um processamento de baixo nível – que envolve pequenos retoques e ajustes das imagens, tais como o reforço de cores e de contraste – foi aplicado. O chamado processamento de alto nível, que exige equipamentos sofisticados e constitui uma tarefa bem mais complexa, não foi empregado no desenvolvimento deste trabalho.

### 3.3. MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS

#### 3.3.1. Vazão

Na tubulação de sucção, entre o reservatório de descarga (RD) e a entrada da bomba, foi instalado um medidor de vazão eletromagnético, marca Yokogawa (MV), modelo ADMAG AE208MG. Com a ajuda deste instrumento, a velocidade média no interior da seção de testes pode ser facilmente obtida, dividindo-se a vazão pela área transversal da seção.

#### 3.3.2. Velocidade local instantânea e intensidade turbulenta

Todas as medições de velocidade no interior da seção de testes foram realizadas utilizando-se uma sonda acústica ADV (*acoustic Doppler velocimeter*), representada na Figura 3.8 e cujos detalhes construtivos e princípio de funcionamento são apresentados no Apêndice B.

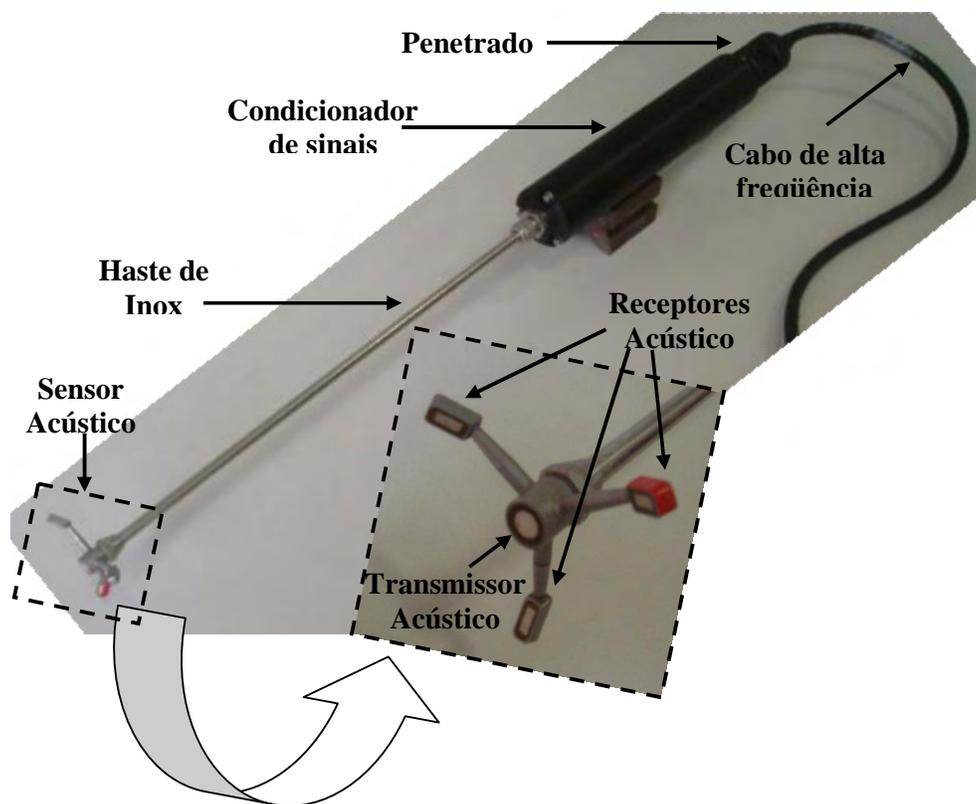


Figura 3.8: Sonda ADV para medição de velocidade local instantânea.

Como mostra a Figura 3.9, a sonda ADV é fixada ao posicionador tridimensional e introduzida na seção de teste através da superfície livre do canal. A base do posicionador é fixada aos flanges superiores da seção de testes por meio de parafusos com porcas do tipo

borboleta, para facilitar o deslocamento longitudinal do conjunto. A base do suporte possui um sistema de trilho para permitir o movimento transversal da sonda, enquanto o deslocamento vertical é feito por meio de um parafuso sem fim, ilustrado na Figura 3.9(b).

Embora o instrumento opere com um sensor acústico intrusivo, o volume de medida, onde são coletados os dados de velocidade local instantânea, situa-se a uma distância suficientemente grande da sonda, para que eventuais perturbações causadas sobre o escoamento no ponto de medição possam ser desprezadas. Além disso, o instrumento é equipado com um programa de aquisição e tratamento de sinal bastante versátil, que permite a obtenção de variáveis turbulentas, incluindo a intensidade de turbulência  $I$ , dada por:

$$I = \frac{V'}{\bar{V}} \quad (3.1)$$

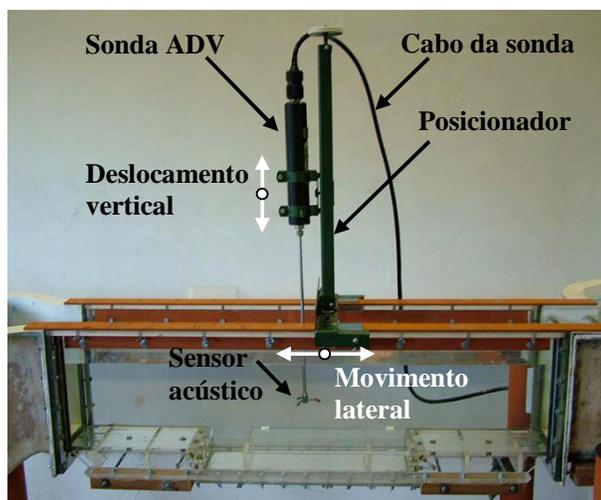
com:

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (3.2)$$

e

$$V' = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2} \quad (3.3)$$

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



(a) Vista lateral.



(b) Vista transversal.

Figura 3.9: Posicionador tridimensional de Sonda ADV.

### 3.3.3. Vibrações mecânicas

As características do escoamento no interior da seção de testes podem ser fortemente afetadas pelos níveis de vibração apresentados pelo aparato experimental. Durante os ensaios preliminares, elevados níveis de vibração foram identificados na seção de testes, induzidos pelo sistema de propulsão e pelo próprio escoamento, sobretudo em condições de altas vazões. Com o propósito de quantificar o estado vibratório da seção de testes, investigando possíveis soluções de projeto capazes de minimizá-lo, um acelerômetro PCB Piezotronics, modelo 352C22, acoplado a uma placa de aquisição de dados dSPACE 1103, foi colado à seção de testes, na posição mostrada na Figura 3.10.

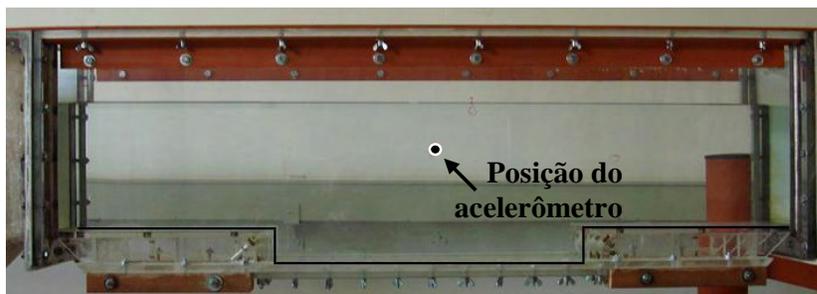


Figura 3.10: Posição do acelerômetro colado na seção de testes para a medição da vibração induzida pelo escoamento.

# RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados experimentais apresentados a seguir foram divididos em duas partes. A primeira delas diz respeito aos ensaios de qualificação do canal e engloba o levantamento de perfis de velocidade e de intensidade de turbulência ao longo da seção de testes, bem como a análise dos níveis de vibração encontrados no aparato. A segunda parte, por sua vez, reúne os resultados referentes ao estudo do escoamento em cavidades abertas, para diferentes razões de aspecto e números de Reynolds.

## 4.1. QUALIFICAÇÃO DO CANAL DE ÁGUA RECIRCULANTE

### 4.1.1. Análise de vibração

Num primeiro momento, tubos de PVC rígido com parede espessa foram empregados em toda a extensão das tubulações que conectam o canal ao sistema de propulsão, tanto no lado de sucção como no de recalque. Entretanto, testes realizados preliminarmente revelaram que esta montagem induzia altos níveis de vibração nos principais elementos do canal, prejudicando a qualidade do escoamento na seção de testes. Através de simples inspeção, pôde-se identificar que uma parte desta vibração era introduzida no sistema pelo funcionamento do conjunto moto-bomba, enquanto uma parcela não menos importante era produzida pelo próprio escoamento na tubulação de recalque, durante o percurso do fluido através dos tubos e conexões de PVC rígido.

A solução clássica para este tipo de problema consiste no aumento de massa da estrutura e na utilização de materiais visco elásticos como absorvedores de vibrações, instalados em pontos estrategicamente escolhidos do aparato. No presente caso, uma solução de baixo custo, mas eficiente, foi adotada. Para diminuir as vibrações do conjunto moto bomba, quatro amortecedores de impacto e vibração do tipo vibra-stop foram instalados sob sua base. Ao mesmo tempo, pequenos trechos da tubulação rígida de PVC foram substituídos por mangueiras sanfonadas, isolando o conjunto moto-bomba dos demais elementos do canal, como mostrado na Figura 4.1.

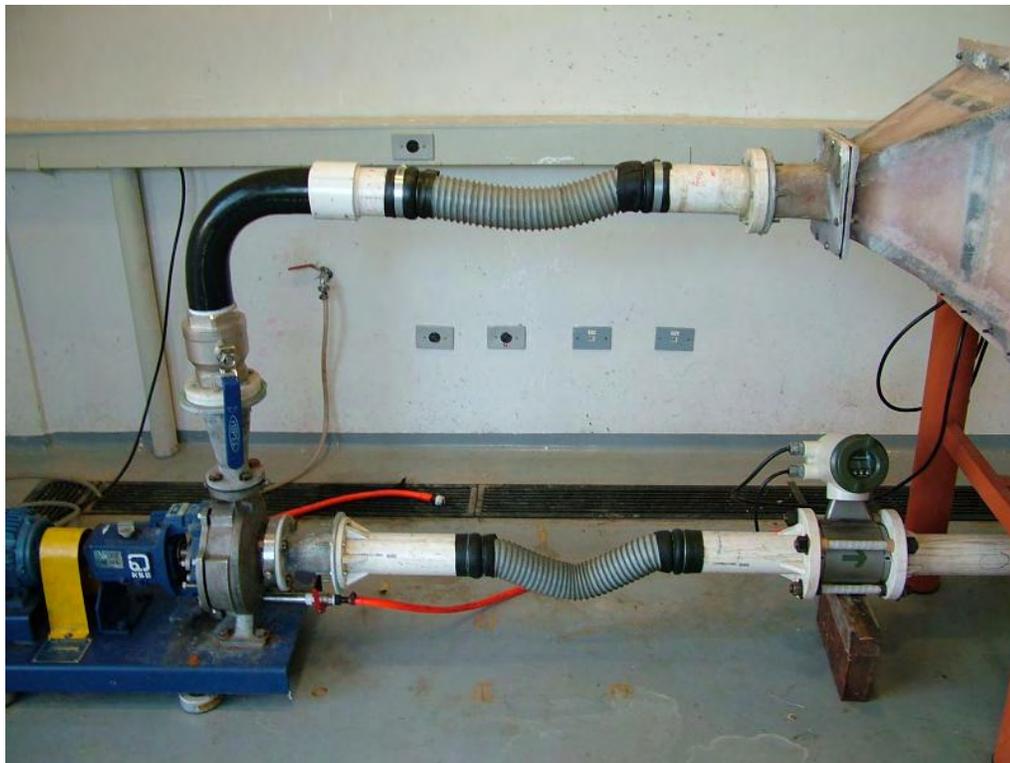


Figura 4.1: Mangueiras sanfonadas nas tubulações de sucção e de recalque.

Os testes de qualificação foram realizados para quatro valores diferentes de vazões, a saber:  $Q_1 = 3 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $Q_2 = 7,6 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $Q_3 = 15 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $Q_4 = 32 \text{ m}^3/\text{h}$ . As medições foram efetuadas utilizando-se um acelerômetro PCB Piezotronics®, modelo 352C22, e placa de aquisição de dados dSPACE 1103.

As Figuras 4.2(a) e (b) apresentam o comportamento vibratório da seção de testes, nos domínios do tempo e da frequência, respectivamente, para a vazão máxima de  $32 \text{ m}^3/\text{h}$ . Para as demais vazões, resultados similares foram obtidos, demonstrando a eficácia das modificações efetuadas na montagem original.

Na Figura 4.2(b), pode-se observar que os maiores picos, que antes das modificações estavam concentrados na faixa de 0 a 200Hz, foram significativamente atenuados. Para uma análise quantitativa das vibrações induzidas na seção de testes, antes e depois das modificações, a norma do vetor amplitude foi empregada como parâmetro de comparação. Com isto, pôde-se constatar que as medidas adotadas reduziram os níveis vibração em torno de 90%. Neste ponto, é interessante assinalar que apenas a faixa de 0 a 500Hz foi investigada, pois, acima deste limite as amplitudes de vibração tornam-se bastante amortecidas, pouco comprometendo a dinâmica estrutural.

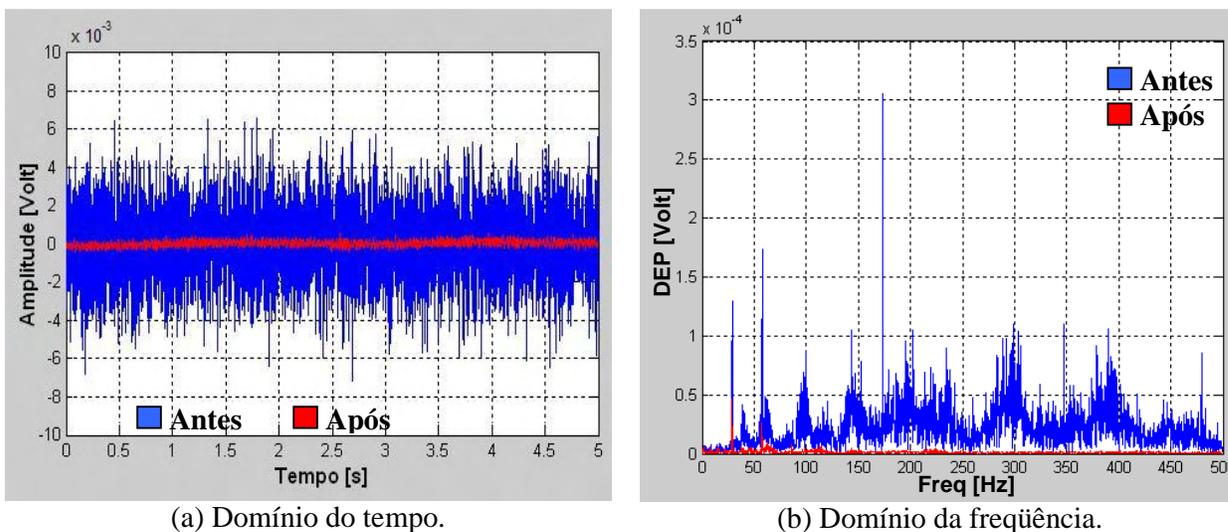


Figura 4.2: Características vibratórias da seção de testes, antes e após as modificações realizadas.

Uma comparação interessante foi, também, realizada, investigando-se as vibrações do conjunto moto-bomba e da seção de testes individualmente, antes de depois das alterações efetuadas. Os resultados obtidos para a vazão máxima de  $32\text{m}^3/\text{h}$  estão representados na Figura 4.3, mostrando que, antes das modificações, as amplitudes de vibração da bomba e da seção de testes eram muito próximas, confirmando que a bomba transmitia boa parte da vibração para o canal. Após as adaptações, Figura 4.3(b), houve uma significativa diminuição nas amplitudes de vibração na seção de testes, indicando que grande parte das perturbações geradas pela bomba e pelo trajeto do fluido nos tubos, conexões e acessórios instalados no recalque da bomba deixaram de ser transmitidos à seção de testes.

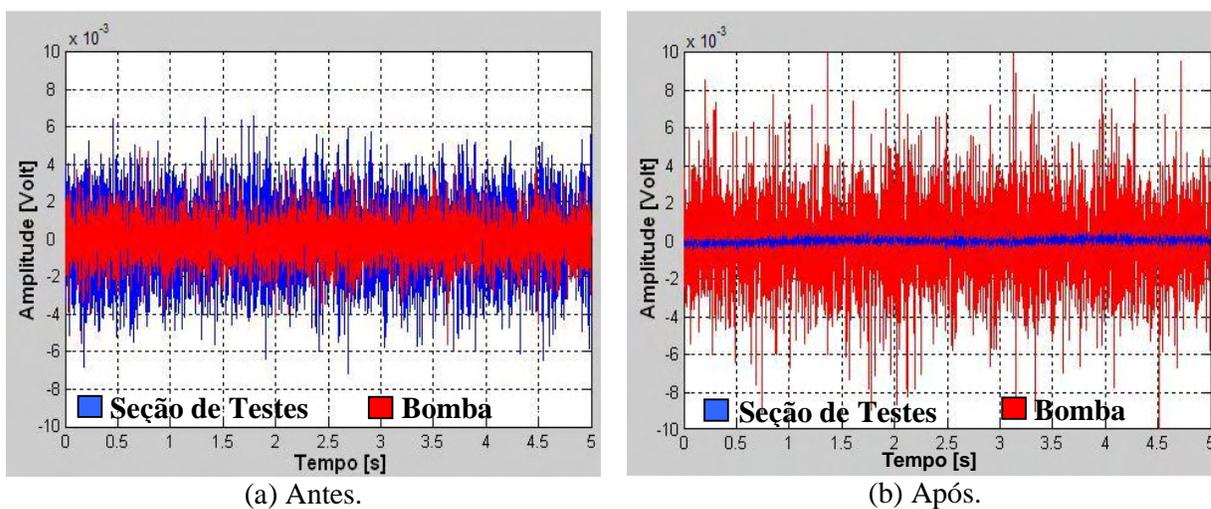


Figura 4.3: Amplitude das vibrações do sistema de bombeamento e da seção de testes, antes e após as modificações propostas.

#### 4.1.2. Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência

Os ensaios de qualificação hidrodinâmica da seção de testes foram executados para as mesmas vazões anteriores ( $Q_1 = 3 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $Q_2 = 7,6 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $Q_3 = 15 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $Q_4 = 32 \text{ m}^3/\text{h}$ ), anulando-se a presença da cavidade. Para isto, uma placa plana intercambiável foi cuidadosamente ajustada no interior da cavidade, de maneira a se alinhar com o fundo da seção de testes, como ilustrado na Figura 4.4. Medições de velocidade local foram efetuadas nas dez estações indicadas na Figura 4.4(a), cujas coordenadas são apresentadas na Tabela 4.1. Em cada uma das estações, a sonda ADV foi posicionada sobre a linha de centro da seção de testes, em catorze diferentes alturas, como representado na Figura 4.4(b). A distância entre o fundo da cavidade e a localização do volume de medida é controlada pelo próprio *software* da sonda, com precisão milimétrica. Para cada uma das vazões, o cálculo da velocidade média local em cada um dos catorze pontos foi realizado com base nos dados adquiridos em três séries temporais de 60 s, colhidos a uma taxa de 25 Hz.



Figura 4.4: Localização das estações de medição de velocidade e dos volumes de medida.

Tabela 4.1: Posição das estações de medição em relação à origem da seção de testes.

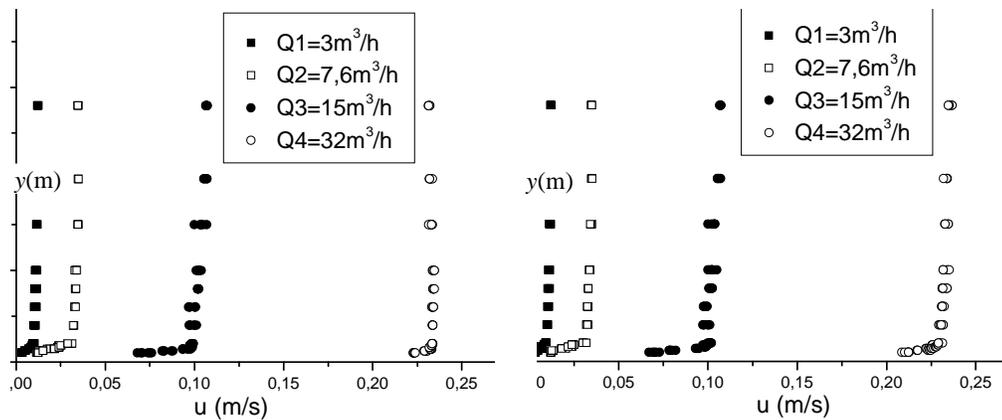
Estações	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Coordenada $x$ (mm)	50	150	250	350	475	600	725	850	950	1050

Os gráficos da Figura 4.5 apresentam os perfis de velocidade obtidos em cada uma das estações. Em todos os casos, observa-se uma boa uniformidade do perfil e uma camada limite razoavelmente delgada, na maioria das vezes inferior a 10 mm.

Os perfis de velocidade apresentados na Figura 4.5 foram integrados na área transversal da seção de testes, para a determinação da vazão. Os valores assim obtidos foram comparados com aqueles fornecidos pelo medidor eletromagnético instalado na tubulação de sucção da bomba. Para as maiores vazões ( $Q_3$  e  $Q_4$ ) investigadas, os resultados fornecidos

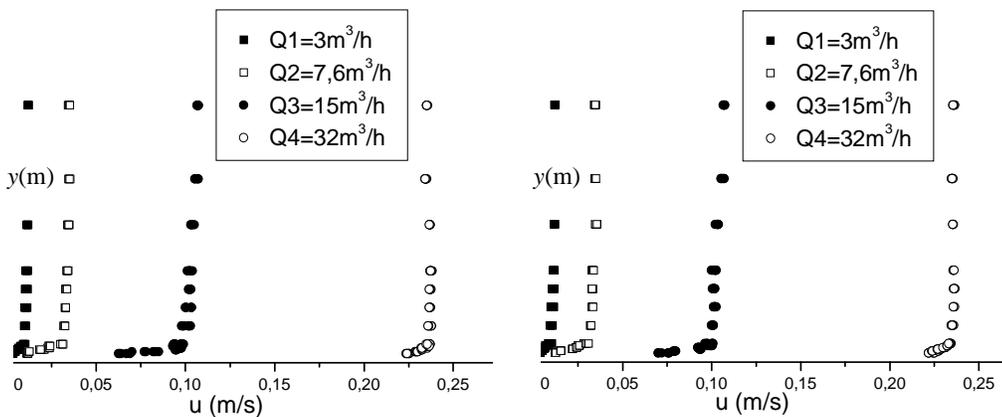
pelos dois métodos são bastante próximos, com discrepâncias compreendidas entre 1 e 4,5%.

Para baixas vazões ( $Q_1$  e  $Q_2$ ), entretanto, diferenças da ordem de a 40% foram observadas.



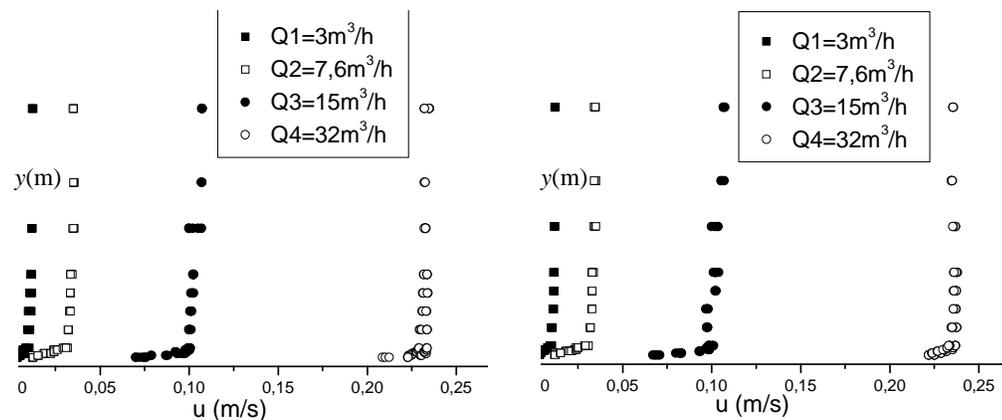
(a) Estação 1.

(b) Estação 2.



(c) Estação 3.

(d) Estação 4.



(e) Estação 5.

(f) Estação 6.

Figura 4.5: Perfis...(continua).

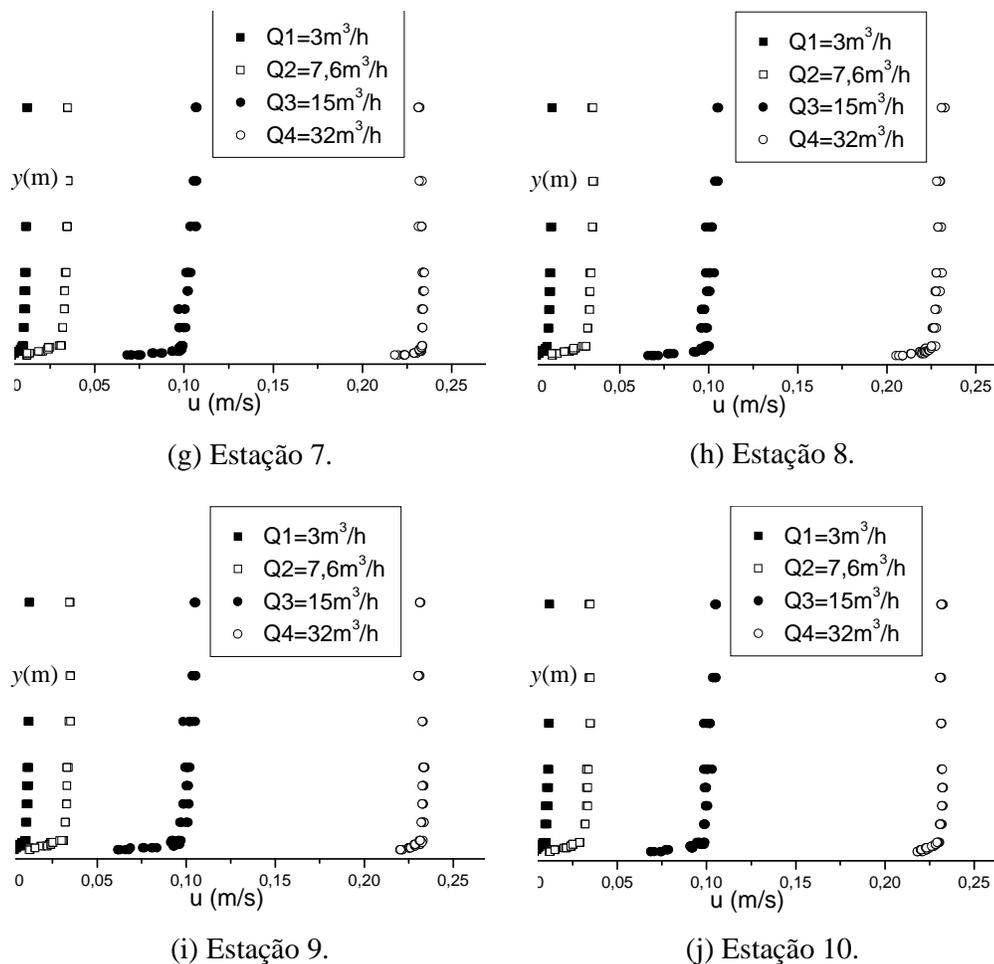


Figura 4.5: Perfis de velocidade ao longo da seção de testes.

A intensidade turbulenta em cada ponto de medição também foi obtida para cada uma das quatro vazões analisadas. Na Figura 4.6, são apresentados os perfis de intensidade turbulenta obtidos apenas para a estação de medição 1, uma vez que, para as demais estações, os resultados são bastante similares.

Para todas as vazões ensaiadas, observam-se valores bastante elevados nos níveis de turbulência nas proximidades da parede inferior da seção de testes. Nesta região, situam-se as menores velocidades e as medições das flutuações turbulentas realizadas com este tipo de sonda são pouco confiáveis. Por outro lado, pode-se notar que, para a vazão  $Q_4 = 32 \text{ m}^3/\text{h}$ , a intensidade turbulenta fora da camada limite apresenta um valor em torno de 2,2%. Segundo Assi (2005), este valor é considerado baixo para canais de água. No entanto, os níveis de turbulência obtidos para baixas vazões fora da camada limite são bem mais elevados, chegando próxima a 40%, no caso da vazão  $Q_1$ .

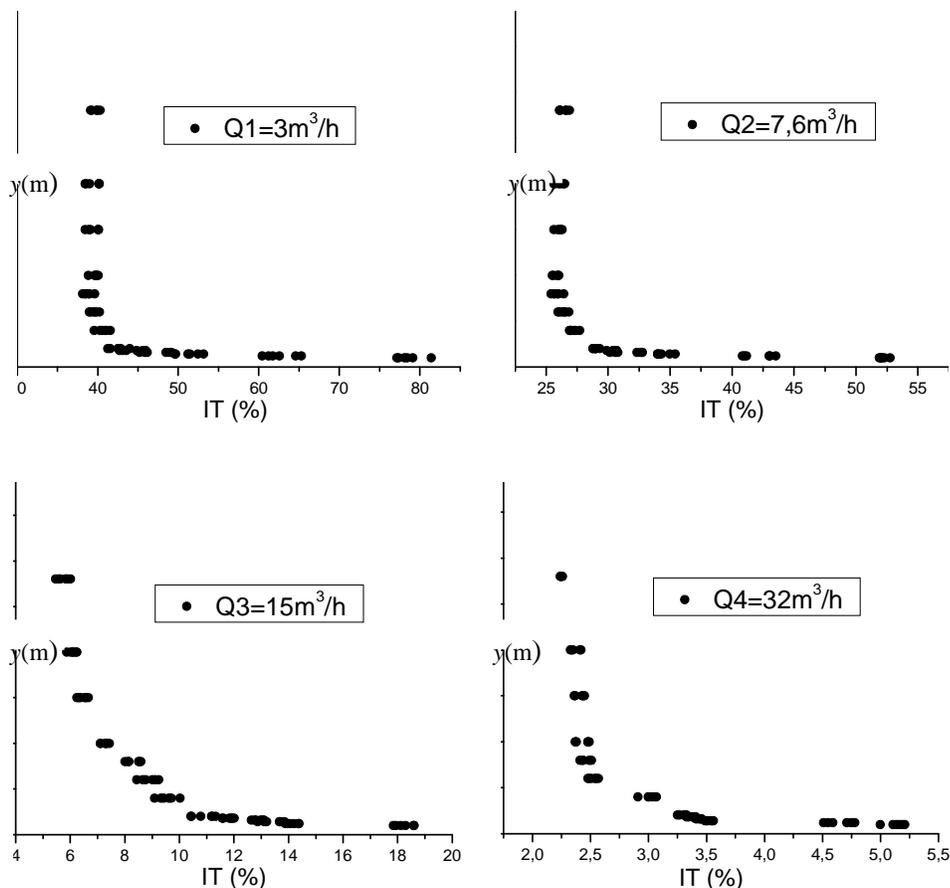


Figura 4.6: Intensidade turbulenta na estação 1, para diferentes vazões.

## 4.2. ESTUDO DO ESCOAMENTO EM CAVIDADES ABERTAS

Os resultados apresentados nesta seção, envolvendo visualizações de escoamento e medições de velocidade, foram agrupados segundo a razão de aspecto das cavidades que se prestaram à realização dos ensaios, ou seja,  $b/h = 0,5$ , 1 e 2. Para cada uma delas, quatro diferentes números de Reynolds foram obtidos –  $Re = 1000$ , 2648, 5000 e 10000 – variando-se a vazão de alimentação do canal. Em todos os casos, o número de Reynolds foi calculado com base na altura da cavidade ( $h$ ) e na velocidade média do escoamento na entrada da seção de testes ( $U_0$ ), determinada a partir da vazão fornecida pelo medidor eletromagnético instalado na tubulação de sucção da bomba.

### 4.2.1. Cavidade com razão de aspecto $b/h = 1$

A maioria dos estudos relacionados com o escoamento no interior de cavidades abertas aborda cavidades com seção transversal quadrada, isto é, com razão de aspecto  $b/h = 1$ . Para

esta situação geométrica, resultados experimentais de boa qualidade estão disponíveis na literatura, os quais foram comparados com dados obtidos ao longo da presente campanha de ensaios, o que, de certa forma, serviu para dar mais confiabilidade aos resultados aqui apresentados, além de qualificar o dispositivo e os procedimentos experimentais empregados.

As Figuras 4.7 e 4.8 mostram imagens do escoamento em uma cavidade quadrada, para diferentes números de Reynolds, visualizados pela técnica de injeção de corante líquido e com a ajuda de traçadores sólidos, respectivamente.

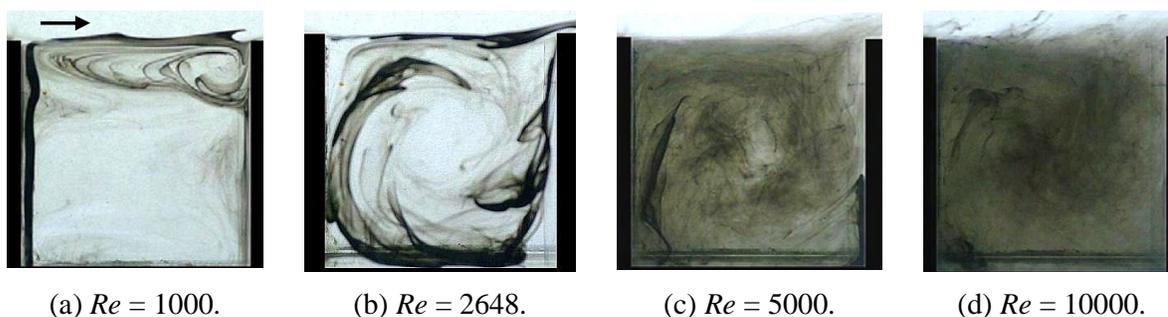


Figura 4.7: Visualização do escoamento no interior de uma cavidade com  $b/h = 1$ , para diferentes números de Reynolds, com a utilização de corante líquido.

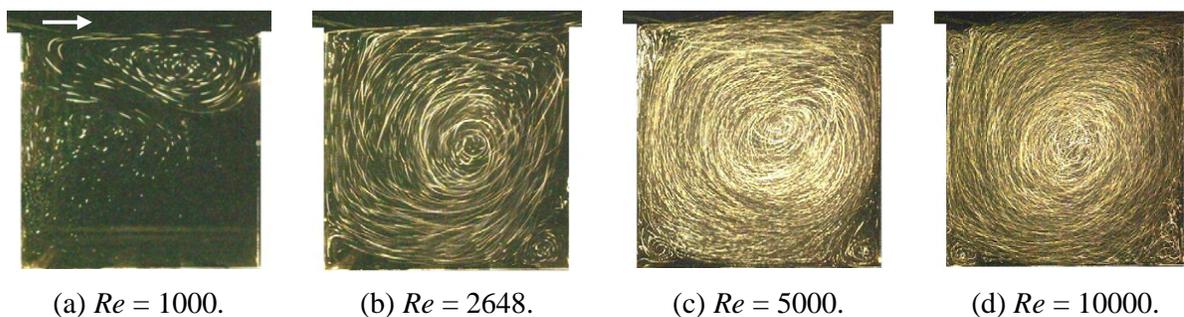


Figura 4.8: Visualização do escoamento no interior de uma cavidade com  $b/h = 1$ , para diferentes números de Reynolds, com o emprego de traçadores sólidos.

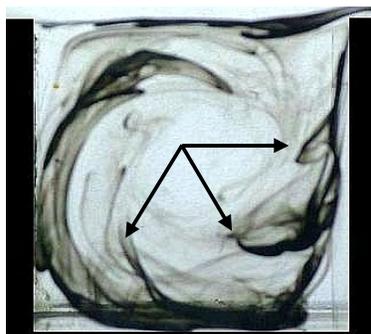
Para  $Re = 1000$ , Figuras 4.7(a) e 4.8(a), pode-se observar que uma única recirculação estacionária, de aparência triangular, ocupa toda a parte superior da cavidade, enquanto o escoamento na porção inferior permanece praticamente estagnado. Nota-se, ainda, na Figura 4.8(a), a formação de instabilidades do tipo Kelvin-Helmholtz no topo da cavidade, geradas pelo forte cisalhamento que caracteriza a região que delimita os escoamentos interno e externo à cavidade.

Com o aumento do número de Reynolds para 2648, Figuras 4.7(b) e 4.8(b), este

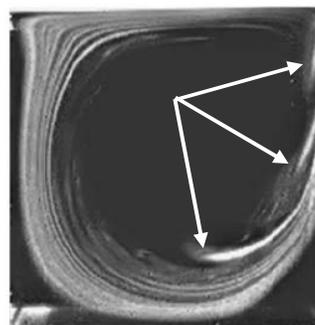
vórtice triangular adquire forma arredondada, passando a ocupar toda a seção transversal da cavidade. Neste caso, um exame da Figura 4.8(b) permite identificar a presença de recirculações secundárias junto aos cantos inferiores da cavidade. Segundo Shen e Floryan (1985), tais recirculações são conhecidas por vórtices de Moffat, por terem sido apresentadas pioneiramente por Moffat (1964).

Para números de Reynolds mais elevados,  $Re = 5000$  e  $10000$ , as duas técnicas de visualização fornecem informações distintas. De fato, as Figuras 4.8(c) e (d) mostra, com o auxílio de traçadores sólidos, que o escoamento interno à cavidade continua a ser dominado por um grande vórtice central estacionário, acompanhado de pequenas estruturas turbilhonares que se posicionam nos cantos inferiores da cavidade. As Figuras 4.7(c) e (d), por sua vez, revelam uma acentuada difusão do corante no interior da cavidade, que decorre da tridimensionalização do escoamento inerente ao processo de transição à turbulência já iniciado para números de Reynolds desta magnitude.

Utilizando ar como fluido de trabalho e neblina de fumaça como agente de visualização, Faure et al. (2007) obtiveram resultados bastante parecidos com estes, para números de Reynolds da mesma ordem de grandeza, como mostram as comparações apresentadas nas Figuras 4.9 e 4.10. As setas desenhadas sobre as imagens ressaltam pontos específicos do escoamento, indicando que a boa concordância qualitativa entre os resultados vai além da semelhança observada na topologia do vórtice principal, estendendo-se também a estruturas turbilhonares de menor escala.



(a) Presente trabalho.



(b) Faure et al. (2007).

Figura 4.9: Comparação qualitativa entre resultados experimentais do presente trabalho ( $Re = 2648$ ) e da literatura ( $Re = 2300$ ), para  $b/h = 1$ .

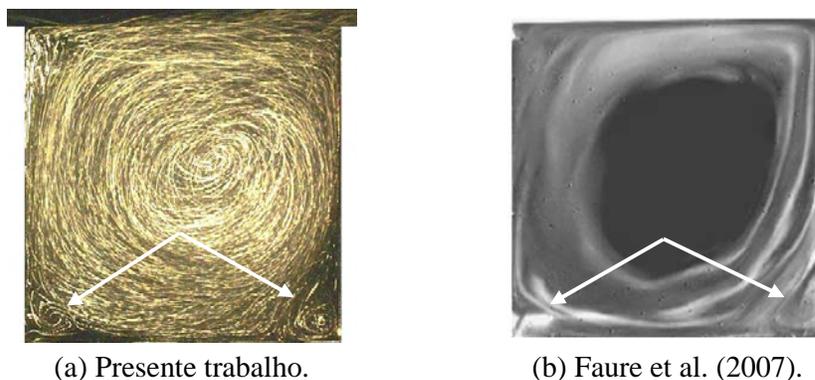


Figura 4.10: Comparação qualitativa entre resultados experimentais do presente trabalho ( $Re = 5000$ ) e da literatura ( $Re = 5330$ ), para  $b/h = 1$ .

Uma outra comparação interessante pode se feita a partir dos resultados obtidos por Frigo (2004), em um estudo numérico sobre o escoamento em uma cavidade de seção quadrada ( $b/h = 1$ ) a  $Re = 2648$ . Como mostra a Figura 4.11, resultados muito próximos aos do presente trabalho também foram encontrados pelo autor. É interessante destacar que a visualização experimental efetuada com o uso de traçadores sólidos muito se assemelhada ao mapa de linhas de corrente obtido numericamente, enquanto que a imagem obtida com a utilização de corante líquido se mostra bastante similar ao campo de isovorticidade.

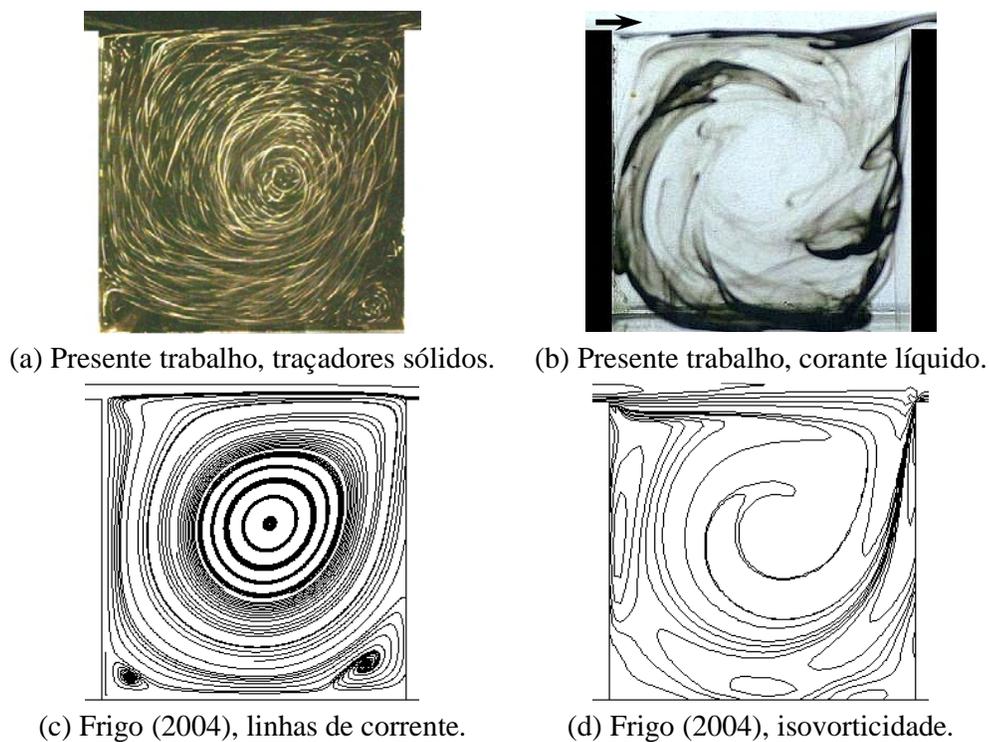


Figura 4.11: Comparação entre resultados experimentais do presente trabalho e numéricos de Frigo (2004), para  $b/h = 1$  e  $Re = 2648$ .

Um fato que chama atenção nos resultados para  $Re = 10000$  refere-se à presença de uma terceira bolha de recirculação no vértice superior esquerdo da cavidade, indicada por uma seta na Figura 4.12(a). Examinando-se novamente a Figura 4.10(a), pode-se notar que esta bolha, que agora aparece bastante nítida, já era incipiente para  $Re = 5000$ . Curiosamente, este mesmo padrão de escoamento foi encontrado por Gupta e Kalita (2005) numa investigação numérica sobre o clássico problema da cavidade com tampa deslizante (*lid driven cavity*), como mostra a Figura 4.12(b).

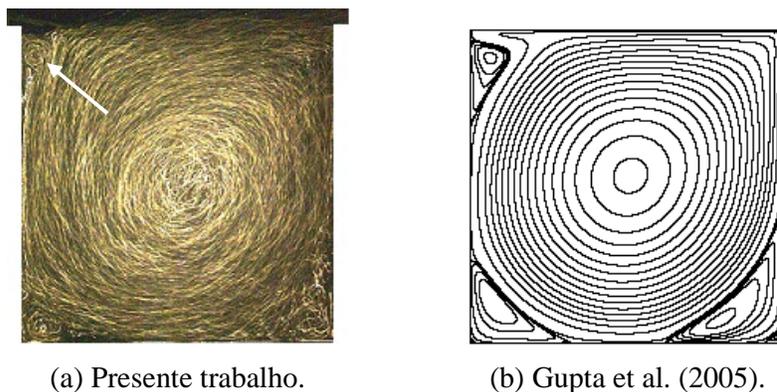


Figura 4.12: Comparação entre resultados experimentais do presente trabalho ( $Re = 10000$ , cavidade aberta) e numéricos da literatura ( $Re = 5000$ , cavidade com tampa deslizante), para  $b/h = 1$ .

A boa concordância dos resultados experimentais deste trabalho com a literatura é observada também em dados quantitativos, como comprovam os resultados apresentados a seguir.

A Figura 4.13 apresenta perfis de velocidade determinados com a utilização da sonda ADV, em diferentes estações, dentro e fora da cavidade, para  $Re = 2648$ . Este número de Reynolds é o mesmo utilizado no trabalho experimental de Sinha, Gupta e Oberai (1982), frequentemente utilizado por outros autores como padrão de comparação, principalmente na validação de resultados numéricos, como feito por Arruda (2004).

Deve-se esclarecer que, para esta razão de aspecto ( $b/h = 1$ ), as medições realizadas nas estações  $x_2 = 0,25 b$  e  $x_4 = 0,75 b$  só puderam ser efetuadas na parte superior da cavidade, em razão das características geométricas e operacionais da sonda ADV. Com efeito, para estas posições, todas as tentativas de aquisição dos sinais na metade inferior da cavidade fracassaram, devido à proximidade dos captores da sonda com as paredes verticais, inviabilizando a transmissão e recepção dos pulsos acústicos. Assim, todos os pontos

experimentais obtidos nestas estações, indicados por símbolos cheios nos gráficos da Figura 4.13, estão concentrados na região em de  $y/h > 0,5$ .

De qualquer modo, a concordância entre todos os resultados é notável, valendo ressaltar que os presentes dados experimentais parecem em melhor acordo com os de Arruda (2004) do que com os de Sinha, Gupta e Oberai (1982). Neste sentido, observa-se que os dados experimentais de Sinha, Gupta e Oberai (1982) foram obtidos como auxílio de uma sonda anemométrica de fio quente, que além de fornecer apenas a magnitude do vetor velocidade, via de regra é incapaz de capturar dados confiáveis nas proximidades de paredes, justamente onde ocorrem as principais divergências.

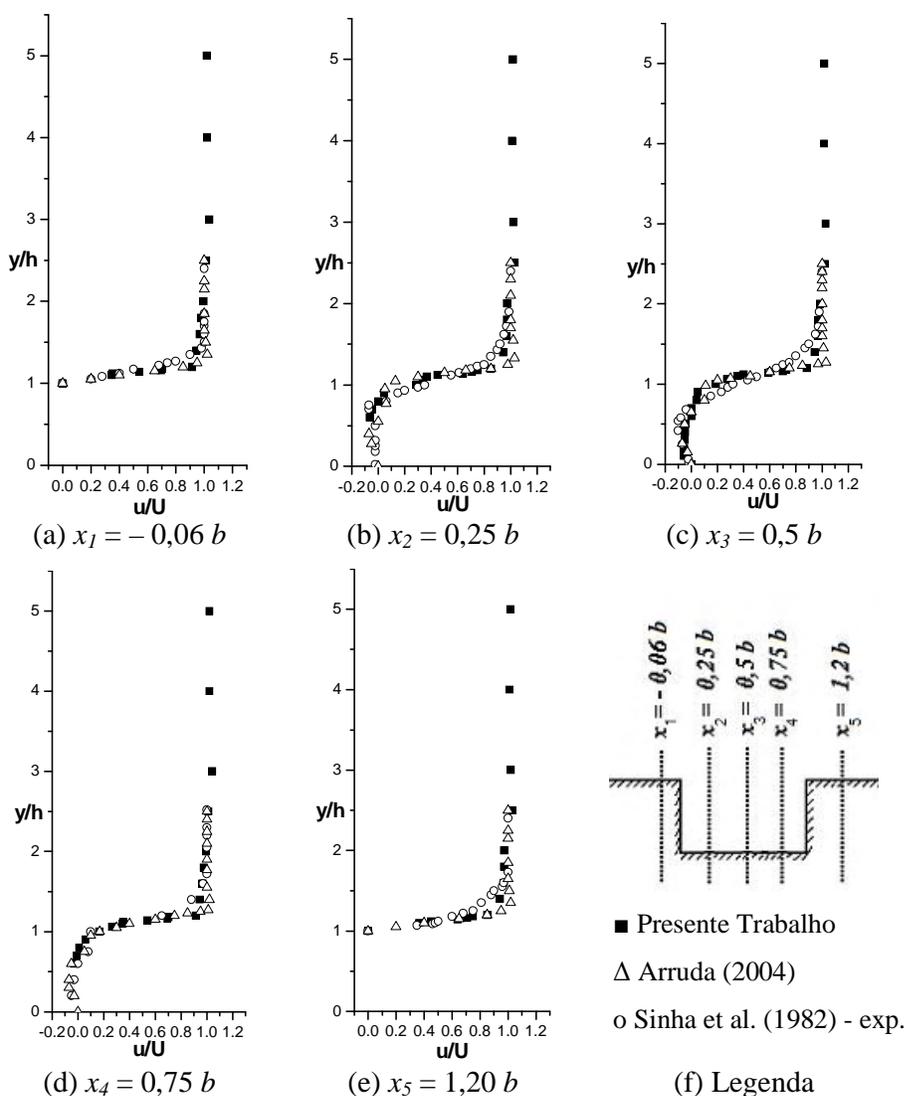


Figura 4.13: Perfis da componente  $u$  da velocidade em diferentes posições  $x$ , para  $b/h = 1$  e  $Re = 2648$ .

A Figura 4.14 apresenta os perfis de velocidade obtidos na linha de centro vertical da cavidade (estação  $x_3$ ), para diferentes números de Reynolds. Em linhas gerais, pode-se dizer que os perfis obtidos são condizentes com a topologia do escoamento dentro da cavidade, com velocidades positivas na metade superior da cavidade e negativas na porção inferior. Destaca-se, ainda, que, neste caso, o ponto onde ocorre esta mudança de sinal encontra-se bem próximo da  $y/h = 0,5$ , coincidindo com o centro geométrico da cavidade.

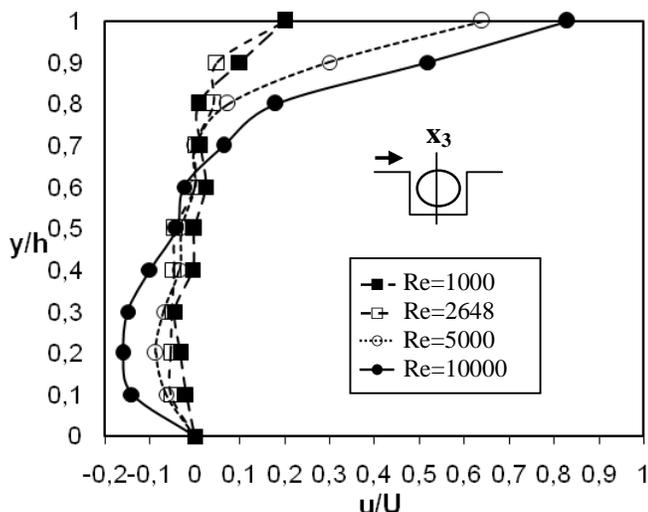
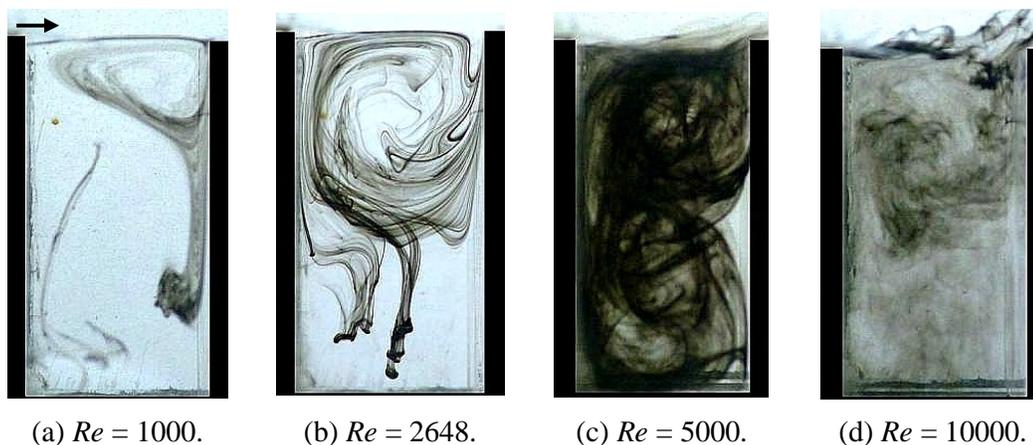


Figura 4.14: Perfil da componente  $u$  da velocidade na posição  $x_3 = 0,5 b$ , para  $b/h = 1$  e diferentes números de Reynolds.

#### 4.2.2. Cavidade com razão de aspecto $b/h = 0,5$

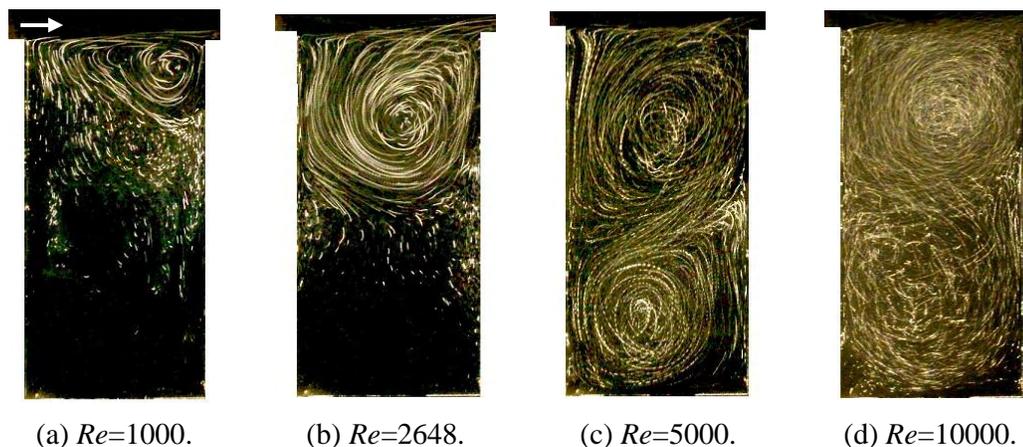
A Figura 4.15 apresenta imagens do escoamento no interior de uma cavidade retangular esbelta, com razão de aspecto  $b/h = 0,5$ , visualizado pela técnica de injeção de corante líquido, enquanto a Figura 4.16 mostra imagens obtidas para os mesmos números de Reynolds, com a utilização de traçadores sólidos em suspensão no fluido de trabalho. Esta razão de aspecto foi obtida mantendo-se inalterada a altura da cavidade ( $h = 50$  mm) e modificando-se seu comprimento  $b$ , de 50 mm para 25 mm.

De forma similar ao observado anteriormente, no estudo da cavidade quadrada ( $b/h = 1$ ), constata-se que, para  $Re = 1000$ , apenas um vórtice com aspecto triangular, permanece estacionário na parte superior direita da cavidade, como mostram as Figuras 4.15(a) e 4.16(a). Fora desta região, o fluido no interior da cavidade permanece praticamente estacionário.



(a)  $Re = 1000$ . (b)  $Re = 2648$ . (c)  $Re = 5000$ . (d)  $Re = 10000$ .

Figura 4.15: Escoamento no interior de cavidades com  $b/h = 0,5$ , para diferentes números de Reynolds, visualizados pela técnica de injeção de corante líquido.



(a)  $Re=1000$ . (b)  $Re=2648$ . (c)  $Re=5000$ . (d)  $Re=10000$ .

Figura 4.16: Escoamento no interior de cavidades com  $b/h = 0,5$ , para diferentes números de Reynolds, visualizados com o emprego de traçadores sólidos.

Com o aumento do número de Reynolds para 2648, Figuras 4.15(b) e 4.16(b), este vórtice triangular adquire forma mais arredondada, passando a ocupar toda a metade superior da cavidade, enquanto o fluido na parte inferior continua estacionário.

Para  $Re = 5000$ , duas grandes estruturas turbilhonares contra-rotativas sobrepostas aparecem na imagem das Figuras 4.15(c) e 4.16(c). Neste caso, a estrutura localizada na parte superior gira no sentido horário, enquanto a inferior movimenta-se no sentido anti-horário.

Por último, nota-se que, para  $Re = 10000$ , as Figuras 4.15(d) e 4.16(d) mostram detalhes diferentes do mesmo escoamento. De fato, a Figura 4.15(d) revela a presença de uma grande estrutura turbilhonar situada na parte superior da cavidade, no interior da qual podem

ser identificados turbilhões menores, indicando um processo de transição à turbulência nesta região. Observa-se, ainda, que a camada cisalhante formada na fronteira entre a cavidade e o escoamento externo torna-se bem mais agitada. A Figura 4.16(d), por sua vez, permite constatar que os dois vórtices contra-rotativos observados para  $Re = 5000$  ainda estão presentes quando o número de Reynolds cresce até 10000.

Usando ar como fluido de trabalho, visualizações de escoamento dentro desta geometria também foram realizadas por Faure et al. (2007). Os resultados produzidos pelos autores para  $Re = 2300$  e  $5340$  são confrontados com as imagens obtidas nos presentes ensaios experimentais, para números de Reynolds próximos a estes ( $Re = 2648$  e  $5000$ ), apresentando boa concordância. Observa-se, nas Figuras 4.17(a) e (b), que o vórtice superior é alimentado por pequenas estruturas, indicadas por setas, que têm origem nas oscilações da camada cisalhante, próximo ao vértice superior direito da cavidade. Nas Figuras 4.17(c) e (d) observa-se, também, uma grande semelhança entre as configurações apresentadas pelo escoamento a números de Reynolds próximos de 5000.

É importante assinalar que, na parte inferior da cavidade mostrada na Figura 4.17(a), aparecem pequenos coágulos de corante, cujo movimento descendente decorre da forte influência da gravidade nesta região, caracterizada pela presença de velocidades muito baixas. Os rastros deixados por estes coágulos em seu movimento rumo ao fundo da cavidade aproximam-se bastante do eixo vertical.

A Figura 4.18 apresenta os perfis de velocidade no interior da cavidade, determinados com a utilização da sonda ADV, para diferentes números de Reynolds, na posição  $x_l = 0,5 b$ , ou seja, sobre a linha vertical que passa pelo centro da cavidade. Como no caso anterior, para esta razão de aspecto ( $b/h = 0,5$ ), a aquisição dos perfis de velocidade também só foi possível na parte superior da cavidade, em razão das características da sonda ADV. Assim, os pontos apresentados na Figura 4.18 referem-se apenas as velocidades obtidas no vórtice superior, a partir da altura  $y/h = 0,5$ . Como se pode observar, os perfis apresentados são compatíveis com o campo de velocidade esperado para um vórtice girando no sentido horário, com velocidades negativas em sua parte inferior e velocidades positivas na porção superior. Observa-se, ainda, que a cota  $y$  em que ocorre a inversão do sinal da velocidade horizontal  $u$  pouco se altera com o número de Reynolds, situando-se em torno de  $y/h = 0,8$ .

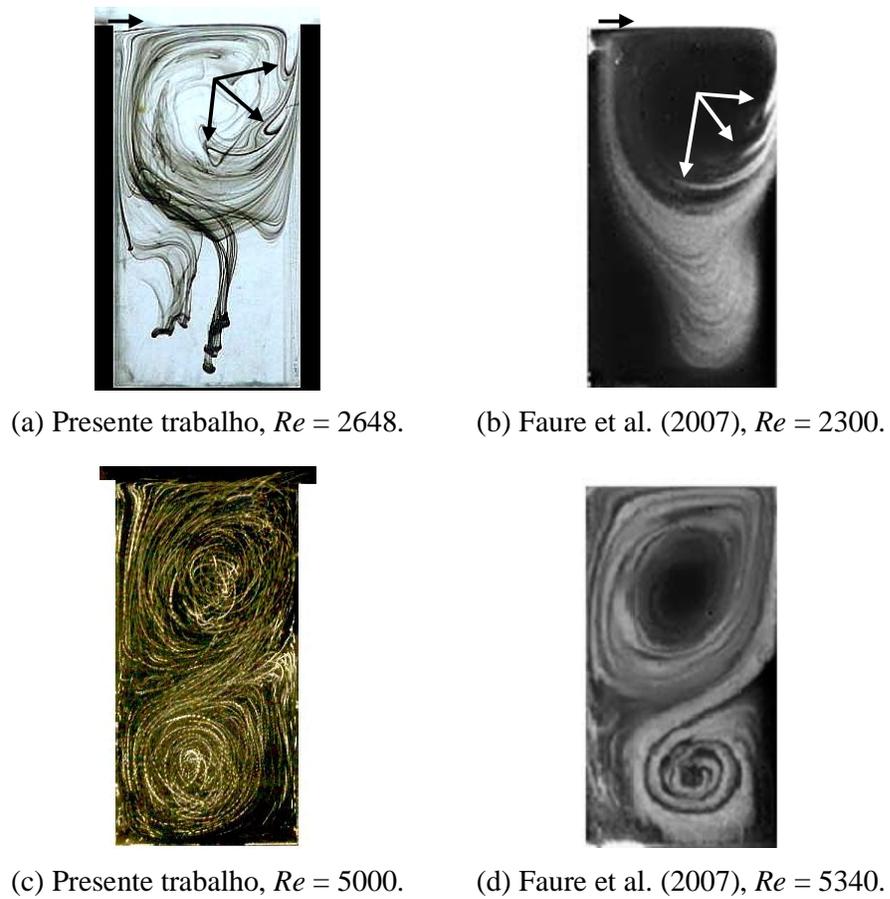


Figura 4.17: Comparação entre resultados experimentais do presente trabalho e de Faure et al. (2007), para  $b/h = 0,5$  e diferentes números de Reynolds.

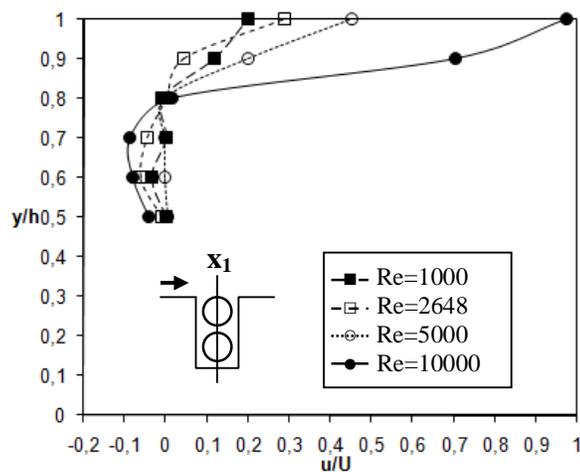


Figura 4.18: Perfil da componente  $u$  da velocidade na posição  $x_1 = 0,5 b$ , para  $b/h = 0,5$  e diferentes números de Reynolds.

### 4.2.3. Cavidade com razão de aspecto $b/h = 2$

Nas Figuras 4.19 e 4.20, são apresentadas as visualizações do escoamento em uma cavidade retangular alongada, com razão de aspecto  $b/h = 2$ , para os diferentes números de Reynolds investigados neste trabalho. De maneira similar aos ensaios realizados anteriormente, a altura  $h$  da cavidade foi mantida em 50 mm, modificando-se o comprimento  $b$ , o qual, no presente caso, passou a ser de 100 mm. Também da mesma forma que nos casos anteriores, as visualizações foram feitas ora com o auxílio de corante líquido, ora com a utilização de traçadores sólidos em suspensão.

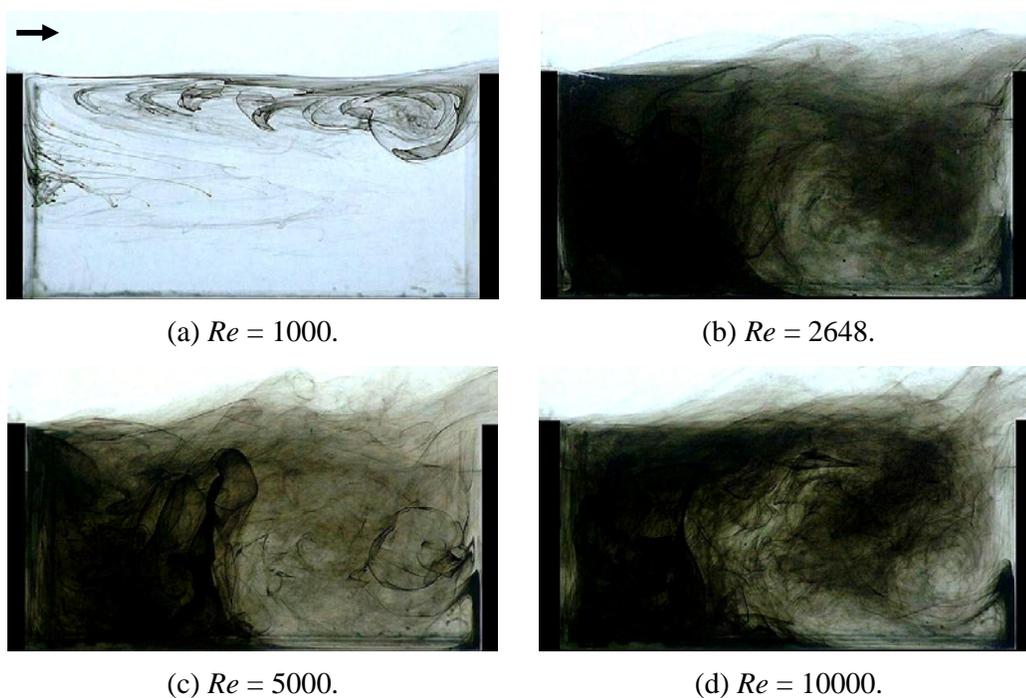


Figura 4.19: Visualização do escoamento no interior de uma cavidade com  $b/h = 2$ , para diferentes números de Reynolds, com a utilização de corante líquido.

A Figura 4.19(a) mostra que, apesar do significativo aumento na razão de aspecto da cavidade, o escoamento para  $Re = 1000$  mantém as mesmas características topológicas dos casos anteriores, com um vórtice triangular ocupando toda a parte superior da cavidade. Nota-se, ainda, o início de oscilações da camada cisalhante, resultante da interação entre os escoamentos interno e externo no topo da cavidade.

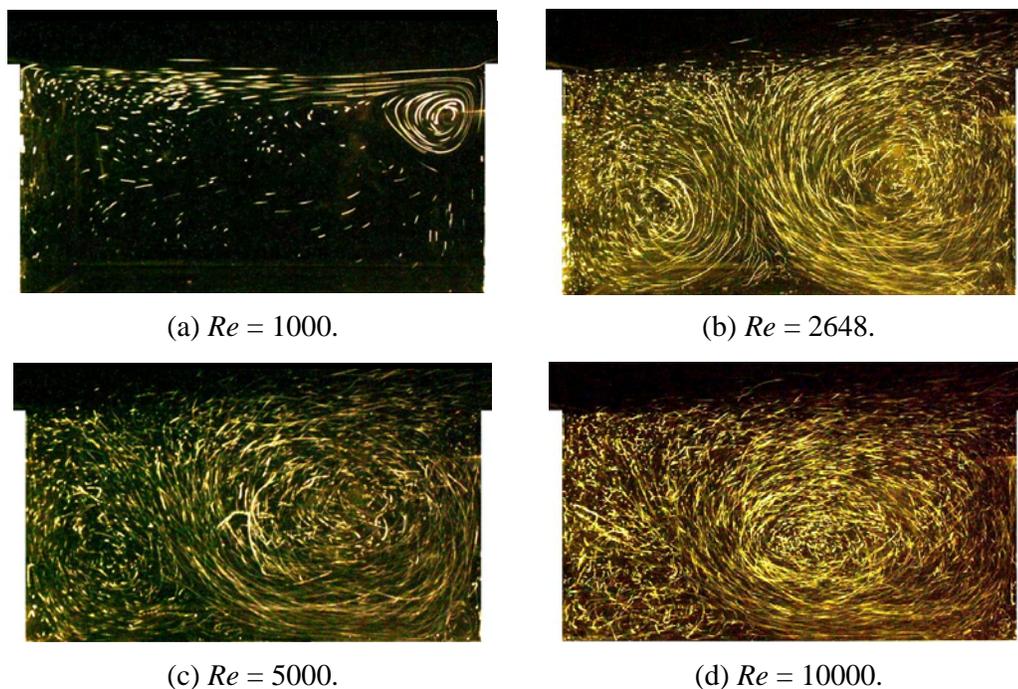


Figura 4.20: Visualização do escoamento no interior de uma cavidade com  $b/h = 2$ , para diferentes números de Reynolds, com o emprego de traçadores sólidos.

Para valores de Reynolds maiores que 1000, torna-se mais evidente a interação entre o escoamento recirculante interno e o escoamento no canal acima da cavidade, quando comparada com as demais razões de aspecto estudadas anteriormente. Observa-se nas Figuras 4.19(b), (c) e (d) estruturas que se desprendem do córner superior esquerdo da cavidade, devido ao descolamento da camada limite, e são transportadas pelo escoamento médio, até se chocarem contra o córner oposto. Neste ponto, parte do fluido é direcionada para dentro da cavidade, obrigando a que uma massa equivalente do fluido migre para fora da cavidade, uma vez que o escoamento é incompressível. Este mecanismo alimenta o processo de ondulação da camada cisalhante, onde, frequentemente são identificadas instabilidades hidrodinâmicas do tipo Kelvin-Helmholtz.

As imagens obtidas nas Figuras 4.19 e 4.20 mostram também que, para  $Re > 1000$ , as duas técnicas de visualização permitem observar nitidamente a presença de uma grande estrutura turbilhonar na porção direita da cavidade. Na metade esquerda, entretanto, o fluido parece recircular com velocidade bem mais baixa, tornando a visualização com corante líquido deficiente e incapaz de revelar a estrutura do escoamento ali existente. Por outro lado, as imagens das Figuras 4.20(b), (c) e (d), obtidas com o emprego de traçadores líquidos, mostram que esta região é ocupada por uma segunda estrutura rotativa, com dimensão

característica ligeiramente inferior àquela apresentada pelo vórtice posicionado do lado direito. Estas imagens mostram, ainda, que o aumento do número de Reynolds provoca um crescimento no diâmetro horizontal da estrutura turbilhonar localizada na parte direita da cavidade, ao mesmo tempo em que o vórtice do lado esquerdo vai, aos poucos, perdendo sua identidade. De fato, enquanto na Figura 4.20(b) a recirculação do fluido no lado esquerdo da cavidade é claramente identificada, na Figura 4.20(d) nota-se o conjunto de partículas sólidas que seguem caminhos mais randômicos, sem uma estrutura claramente definida.

Alguns trabalhos da literatura apresentam resultados interessantes para cavidades com  $b/h = 2$  e números de Reynolds 2300 e 2648, os quais são comparados, na Figura 4.21, com as imagens aqui obtidas. Esta análise comparativa permite observar que todos os trabalhos foram capaz de bem reproduzir a topologia e as dimensões das duas grandes estruturas turbilhonares que dominam o escoamento dentro da cavidade. Além disso, na Figura 4.21(e), as setas destacam as duas bolhas de recirculação nos córneres inferiores da cavidade, que apresentam ótima concordância com os resultados de Frigo (2004), mostrados na Figura 4.21(a).

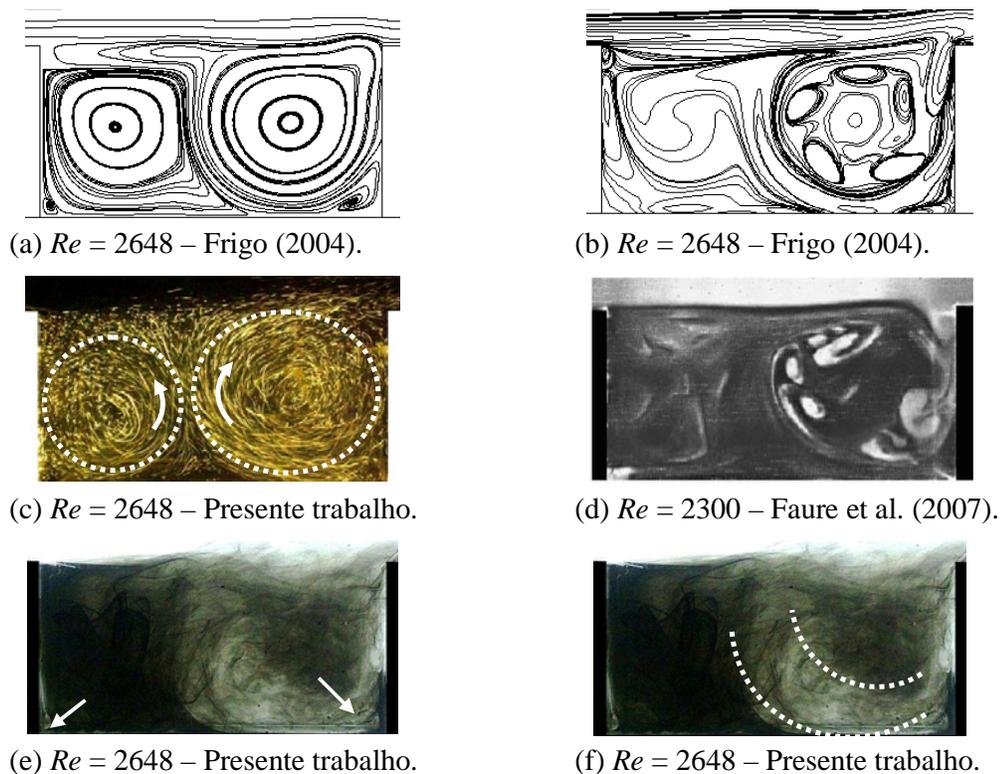


Figura 4.21: Comparação entre resultados do presente trabalho com resultados experimentais de Faure et al. (2007) e numéricos de Frigo (2004), para  $b/h = 2$ .

É interessante, ainda, tecer alguns comentários sobre as interessantes estruturas

turbilhonares que podem ser identificadas no interior do grande vórtice principal, localizado na metade direita da cavidade. Tais estruturas têm origem nas oscilações da camada cisalhante próximo ao vértice superior direito da cavidade, que resultam na formação de uma pequena bolha de recirculação, que invade a cavidade em movimento descendente e se integra ao grande vórtice do lado direito da cavidade, onde fica aprisionada, atribuindo-lhe o aspecto de uma planetária ou de um mancal de rolamentos. Estas estruturas não puderam ser identificadas, com clareza, no presente trabalho. Porém, observa-se na Figura 4.21(f), uma região mais clara ao redor do centro de rotação do vórtice principal, destacada pelo arco tracejado, onde são notadas estruturas turbilhonares menores, possivelmente comparáveis às evidenciadas por Frigo (2004) e Faure et al. (2007).

Perfis de velocidade para a cavidade aberta com razão de aspecto  $b/h = 2$  e número de  $Re = 2648$  são apresentados na Figura 4.22. Os perfis, adquiridos com a sonda ADV nas estações indicadas na própria Figura 4.22, são confrontados com as simulações numéricas de Arruda (2004). Mais uma vez, ótima concordância foi encontrada.

Para finalizar, a Figura 4.23 apresenta os perfis de velocidade  $u$  no interior da cavidade com razão de aspecto  $b/h=2$ , para diferentes Reynolds, nas posições  $x_2 = 0,25 b$  e  $x_4 = 0,75 b$ .

Nota-se que, na posição  $x_4$ , todos os perfis obtidos são consistentes com o campo de velocidades esperados para um vórtice girando no sentido horário. Esta mesma consistência é encontrada, também, na posição  $x_2$ , para  $Re = 1000, 2648$  e  $5000$ , para  $y/h < 0,8$ , onde os perfis são positivos na parte inferior e negativo na metade superior, indicando a presença de uma recirculação girando no sentido anti-horário, como era de se esperar. Além disso, observa-se que, próximo ao topo da cavidade, velocidades positivas são encontradas, mostrando que o vórtice do lado esquerdo não atinge o topo da cavidade, como evidenciado no trabalho de Frigo (2004) – ver Figura 4.21(a). Por outro lado para  $Re = 10000$ , o perfil obtido na porção vertical compreendida entre  $0 < y/h < 0,7$  apresenta apenas valores negativos, indicando a provável extinção do vórtice esquerdo. Estes resultados concordam com os resultados da visualização, onde o vórtice principal passa a acupar quase que a totalidades da cavidade, confinando o vórtice secundário a uma pequena porção próxima à parede esquerda da cavidade.

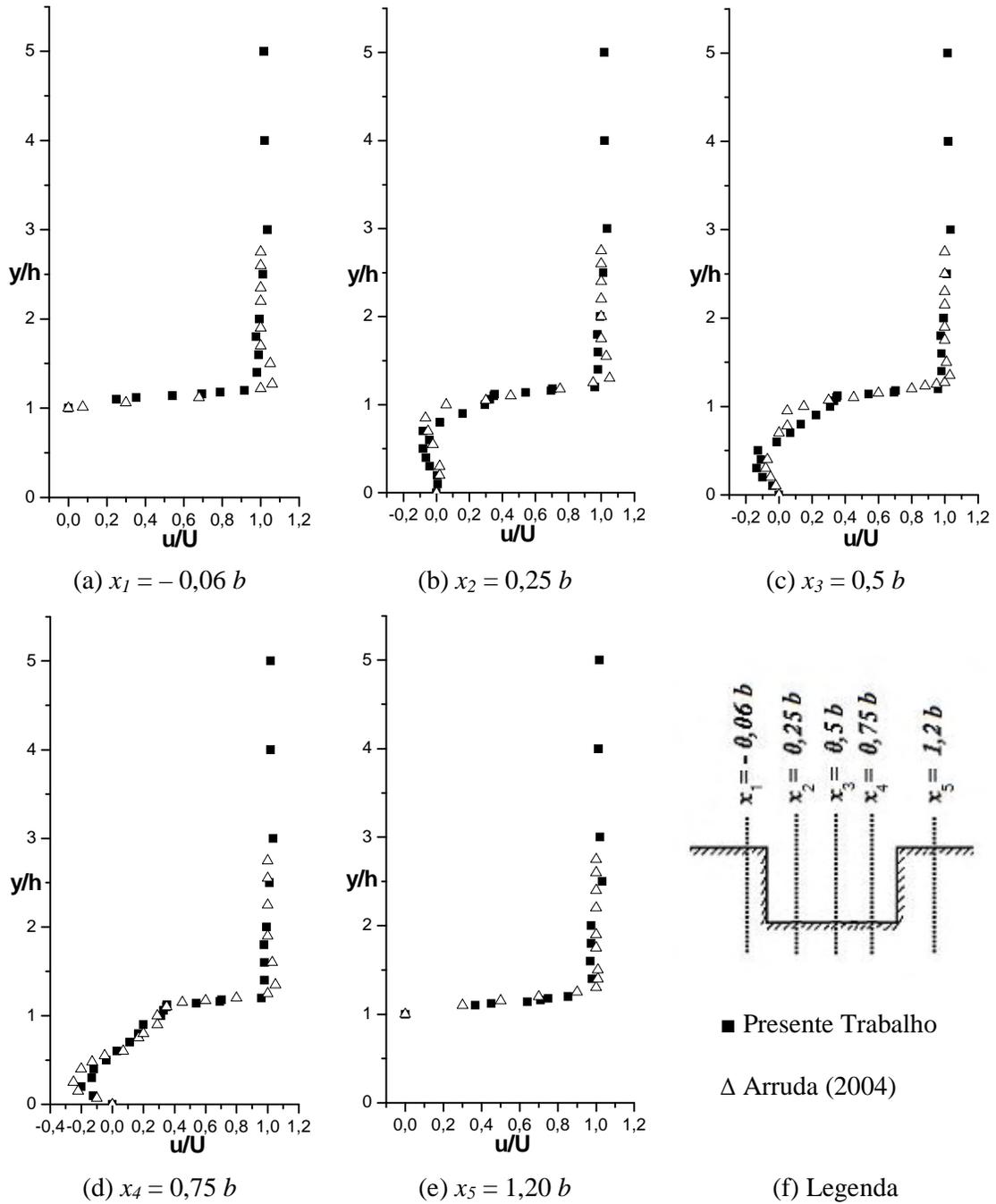


Figura 4.22: Perfis da componente  $u$  da velocidade em diferentes posições  $x$ , para  $b/h = 2$  e  $Re = 2648$ .

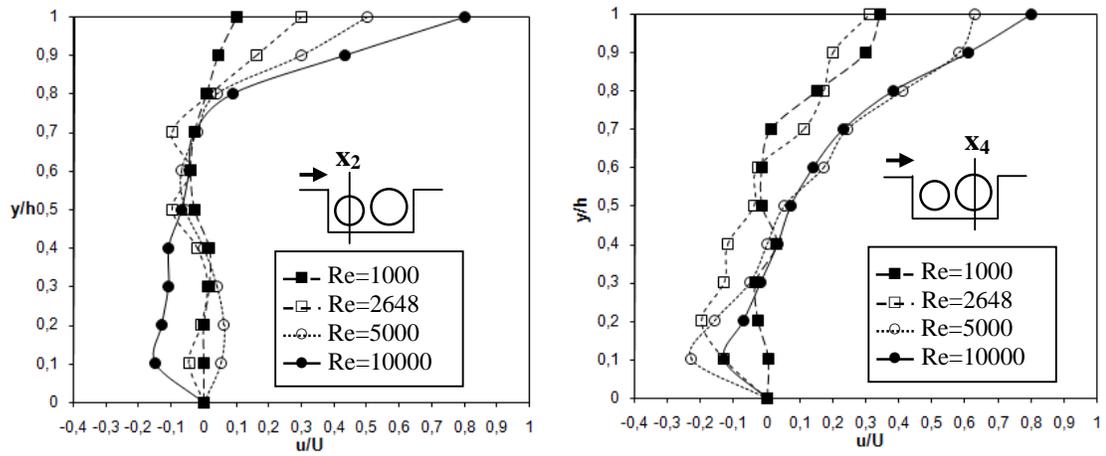
(a) Perfil  $u$ , na posição  $x_2=0,25b$ .(b) Perfil  $u$ , na posição  $x_4=0,75b$ .

Figura 4.23: Perfil da componente  $u$  da velocidade para  $b/h = 2$ , em diferentes posições  $x$  e diferentes números de Reynolds.

# CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

No presente trabalho, um canal de água recirculante de médio porte, foi desenvolvido e qualificado. Os processos de fabricação utilizados na confecção dos componentes são detalhados, bem como o levantamento das principais características hidrodinâmicas e vibratórias do aparato experimental.

Medições de vibração realizadas na seção de testes com a ajuda de um acelerômetro, apontaram que algumas mudanças no projeto do canal deveriam ser imediatamente implementadas, antes que os ensaios definitivos fossem realizados. Com as alterações já efetuadas, mudanças significativas nos resultados foram observadas. Mesmo assim, acredita-se que, com pequenos ajustes no projeto, as vibrações induzidas pelo próprio escoamento em diferentes elementos do canal possam ser substancialmente reduzidas, melhorando as características operacionais do equipamento. Neste sentido, as principais mudanças sugeridas são as seguintes:

- Substituição do difusor atual, por um difusor mais extenso, para evitar a separação do escoamento na entrada do difusor, como representado na Figura 5.1;
- Instalação de elementos complementares na seção de estabilização, com direcionadores de fluxo a jusante do difusor e mais telas a montante da seção de testes;
- Substituição da conexão em T na saída do reservatório de descarga (RD), por uma forma de Y, a fim de minimizar as perdas de carga no circuito e as mudanças bruscas de direção, principal fonte de vibrações induzidas pelo escoamento;
- Instalação de pés do tipo vibra-stop na estrutura de aço que sustenta o canal e de amortecedores e borracha nos suportes da tubulação de sucção e nos pontos de fixação do canal à estrutura.

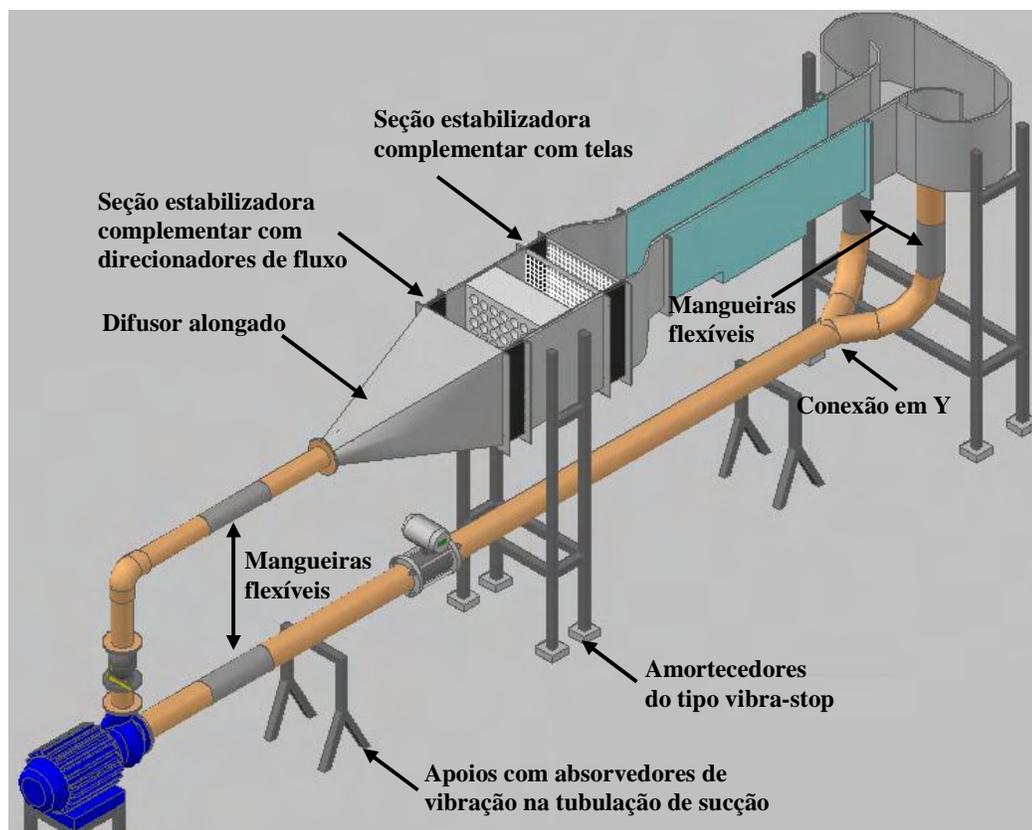


Figura 5.1: Nova configuração do canal de água, incorporando as modificações sugeridas.

Os resultados dos ensaios de qualificação hidrodinâmica, por sua vez, realizados com o auxílio de uma sonda velocimétrica ADV (*acoustic Doppler velocimeter*), mostraram que os perfis de velocidade ao longo de toda a seção de testes são suficientemente uniformes e apresentam intensidade de turbulência relativamente baixa para um canal de água, especialmente para as vazões mais elevadas. Para baixas vazões, entretanto, os valores RMS obtidos para as flutuações de velocidade se apresentaram, em muitos casos, bem superiores às próprias velocidades médias da corrente livre, resultando em altos níveis de turbulência. Ainda que a confiabilidade das medições de velocidade com sonda ADV possa ser questionada para estas condições de ensaio, acredita-se que, com a implementação das modificações propostas acima, as vibrações induzidas pelo escoamento na seção de testes serão amortecidas, e estes resultados poderão ser consideravelmente melhorados.

Com relação ao estudo do escoamento no interior de cavidades abertas, diferentes razões de aspecto e números de Reynolds foram investigados. Imagens dos padrões de escoamento foram obtidas empregando-se duas técnicas de visualização – a injeção de

corantes líquidos e traçadores sólidos em suspensão no fluido de trabalho. Além disso, perfis de velocidade foram estabelecidos com a utilização da sonda ADV. Os resultados qualitativos e quantitativos desta investigação foram comparados com dados de outros autores, mostrando uma ótima concordância, revelando, ainda, as potencialidades do dispositivo experimental para o estudo do escoamento em cavidades e para o desenvolvimento de outros trabalhos de pesquisa no campo da mecânica dos fluidos.

Os estudos empreendidos sobre este tema de pesquisa e a experiência adquirida durante a condução deste projeto permitem formular algumas sugestões que poderão contribuir para aprofundar as investigações sobre o escoamento em cavidades abertas. Dentre elas, merecem destaque:

- Ampliar a faixa de velocidade, substituindo o grupo propulsor por um de maior potência;
- Testar o uso de outros tipos de corante líquido (permanganato do potássio, anilina, etc.) como agente de visualização;
- Implementar e testar o uso da técnica da geração de bolhas de hidrogênio para a visualização deste tipo de escoamento;
- Utilizar um conjunto formado por uma fonte laser e uma lente bicilíndrica para a geração do plano de luz.
- Investigar a influência da distância entre as paredes laterais da cavidade e da rugosidade superficial das paredes internas sobre as características deste tipo de escoamento.

## Referências

---

ARRUDA, J. M. **Modelagem matemática de escoamentos internos forçados utilizando o método da fronteira imersa e o modelo físico virtual.** Uberlândia, 2004. 150 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.

ASSI, G.R. **Estudo experimental do efeito de interferência do escoamento ao redor de cilindros alinhados.** São Paulo, 2005. 302 f. Tese (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CATTAFESTA, L.; WILLIAMS, D. R.; ROWLEY, C. W.; ALVI, F. Review of active control of flow-Induced cavity resonance, In: AIAA FLUID DYNAMICS CONFERENCE, 33., 2003, Orlando. **Proceeding...** Orlando –: AIAA, 2003.

COLONIUS, T.; BASU, A. J.; ROWLEY, C. W. Numerical investigation of the flow past a cavity, In: AIAA/CEAS AEROACUSTICS CONFERENCE, 5., 1999, Washington. **Proceedings...** Washington: AIAA, 1999.

COLONIUS, T.; BASU, A. J.; ROWLEY, C. W. Computation of sound generation and flow/acoustic instabilities in the flow past an open cavity, In: ASME/JSME JOINT FLUIDS ENGINEERING CONFERENCE, 3., 1999, San Francisco. **Proceedings...** San Francisco: ASME, 1999.

COOK, N. J., A boundary layer wind tunnel for building aerodynamics. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Netherlands, v.1, p.3-12, 1975.

COUNIHAN, J. An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v.3, p.197-214, 1969.

COUNIHAN, J. The structure and the wind tunnel simulation of rural and urban adiabatic boundary layers. In: PROCEEDINGS OF THE SYMPOSIUM ON EXTERNAL FLOW, 1972, Bristol. **Proceedings...** Bristol: University of Bristol, 1972.

DOBRODZICKI, G.A. **Flow visualization water tunnel - its construction and capabilities,**

Ottawa: NAE - National Aeronautical Establishment, 1982. (Aeronautical Report LR-610 NRC, 20235).

ESTEVE, M. J.; REULET, P.; MILLAN, P. Flow field characterization within a rectangular cavity. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLICATIONS OF LASER TECHNIQUES TO FLUID MECHANICS, 10, 2000, Lisboa. **Proceeding...** Lisboa – Portugal: FEUP, 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**, French, v.42, p.169-184, 2007.

FRIEDMAN, A.S. Chemiluminescence as a tool in the study of liquid flow boundaries. **Journal of Applied Physics**, New York, v.27, n.4, p.417, 1956.

FRIGO, L. M. **Simulação numérica de escoamentos incompressíveis tridimensionais turbulentos e em transição**. Ilha Solteira, 2004. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2004.

GUPTA, M.M.; KALITA, J.C. A new paradigm for solving Navier-Stokes equations: streamfunction-velocity formulation. **Journal of Computational Physics**, Netherlands, v.207, p.52-68, 2005.

HANSEN, S.O.; SORENSEN, E.G. A new boundary layer wind tunnel at the danish maritime institute. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Netherlands, v.18, p.213-224, 1985.

HOWLAND, B.; SPRINGER, G.S.; HILL, M.G. Use of electrochemiluminescence in visualizing separated flows. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v.24, pt. 4, p.697-704, 1966.

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**, South Korea, v.89, n.10, p.947–966, 2001.

KLINE, S.J.; MCCLINTOCK, F.A. Describing uncertainties in single-sample experiments.

**Mechanical Engineering**, v.59, p.3-8, 1953.

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

LUGT, H.J. **Vortex flow in nature and technology**. New York: John Wiley & Sons, 1983.

MANOVSKI, P.; HONNERY, D. R.; SORIA, J. Investigation of flow past a cavity using PLIF and MCCDPIV. Disponível em:

<<http://www.mecheng.adelaide.edu.au/acldfmc/cdrom/Papers/22-p93.pdf>>. Acesso em: 24 abril 2008.

MOFFATT, H. K. Viscous and resistive eddies near a sharp corner. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v.18, n.1, p.1-18, 1964.

MOFFAT, R.J. Contributions to the theory of single-sample uncertainty analysis. **Journal of Fluids Engineering**, v.104, p.250-260. 1982.

MOFFAT, R.J. Using uncertainty analysis in the planning of an experiment. **Journal of Fluids Engineering**, v.107, p.173-178. 1985.

MOFFAT, R.J. Describing the uncertainties in experimental results. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v.22, n.1, p.3-17. 1988.

PARK, J.T; CUTBIRT, J.M.; BREWEL, W.H., Hydrodynamic performance of de large cavitation channel, In: JOINT FLUIDS ENGINEERING CONFERENCE, 4., 2003, Honolulu. **Proceeding...** Hawaii: FEDSM, 2003.

POPOVICH, A.T.; HUMMEL, R.L. A new method for non-disturbing turbulent flow measurements very close to a wall. **Chemical Engineering Science**, New York, v.22, n..., p.21–25, 1967.

ROWLEY, C. W.; COLONIUS, T.; MURRAY, R. M. Dynamical models for control of cavity oscillations, In: AEROACOUSTICS CONFERENCE, 7., 2001, Maastricht. **Proceeding...** Maastricht: AIAA, 2001.

ROWLEY, C. W.; COLONIUS, T.; BASU, A. J. On self-sustained oscillations in two-dimensional compressible flow over rectangular cavities, **Journal of Fluid Mechanics**, California, v.455, p.315-346, 2002.

SAROHIA, V. Experimental investigation of oscillations in flows over shallow cavities. **AIAA Journal**, California, v.15, n.7, p.984-991, 1977.

SHEN, C.; FLORYAN, L. M. Low Reynolds number flow over cavities. **Physics of Fluids**, London, v.28, n.11, p.3191-3202, 1985.

SINHA, S. N.; GUPTA, A. K.; OBERAI, M. M. Laminar separating flow over backsteps and cavities – Part II: Cavities. **AIAA Journal**, India, v.20, n.3, p.370-375, 1982.

STANDEN, M.M. **A spire array for generating thick turbulent shear layers for natural wind simulation in wind tunnels**. Canada: National Research Council of Canada, 1972. (NAE Report LTR-LA-94, 1972).

SUPONITSKY, V.; AVITAL, E.; GASTER, M. On three-dimensionality and control of incompressible cavity flow. **Physics of Fluids**, London, v.17, n.10, p.104103-104122, 2005.

SYKES, D. M.; A new wind tunnel for industrial aerodynamics. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Netherlands, v.2, p.65-78, 1977.

TANEDA, S. Visualization of separating stokes flows. **Journal of the Physical Society of Japan**, Fukuoka, v.46, n.6, p.1935-1942, 1979.

TAKEMATSU, M. Slow viscous flow past a cavity. **Journal of the Physical Society of Japan**, Tokyo, v.21, p.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**. 1997. Tese (Doutorado) - 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, p.1098-1104, 2006.

ZDANSKI, P. S. B. **Análise numérica do escoamento incompressível sobre cavidades rasas**. São José dos Campos, 2001. 77 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2001.

WHITE, F.M. **Fluid Mechanics**. 2.ed. New York: McGraw-Hill, 1986. p.736.

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, p.247-260, 1956.

WITTEWER, A.R.; MÖLLER, S.V., Characteristics of low speed wind tunnel of the UNNE. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Netherlands, v.84, p.307-320, 2000.

# DESENVOLVIMENTO DO CANAL DE SUPERFÍCIE LIVRE COM ÁGUA RECIRCULANTE

### A.1. DIRETRIZES DO PROJETO

A concepção do canal de água recirculante desenvolvido no presente trabalho foi inspirada numa instalação similar, pertencente ao NDF/EPUSP – Núcleo de Dinâmica dos Fluidos na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, a qual apresenta a configuração mostrada na Figura A.1.

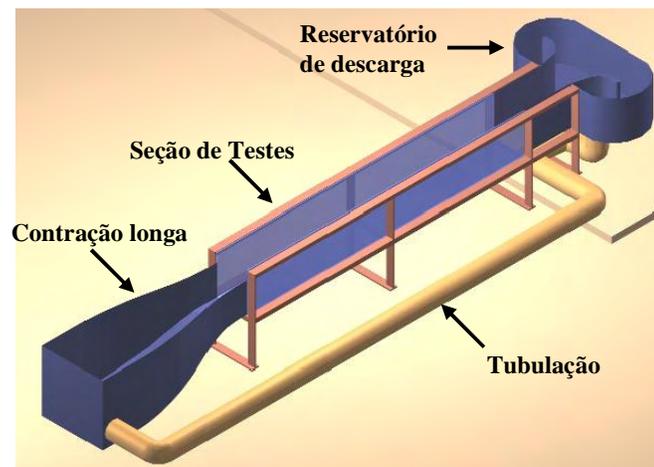


Figura A.1: Esquema do canal de água recirculante do NDF/EPUSP (Assi, 2005).

Como ponto de partida para o início do projeto, as dimensões da seção de ensaios foram fixadas em 200 mm de largura, 300 mm de altura e 1200 mm de comprimento. A parede inferior da seção de testes possui um rebaixo de 50 x 50 mm, que permite o ensaio de cavidades com diferentes razões de aspecto, até o limite  $b/h = 10$ .

Em seguida, fixou-se a velocidade máxima do escoamento na seção de testes em 0,2 m/s. Com estes dados, decidiu-se que o sistema de propulsão seria constituído por uma bomba centrífuga em aço inox, capaz de proporcionar uma vazão máxima da ordem de 30 m<sup>3</sup>/h.

O dimensionamento dos demais elementos foi realizado tomando-se como referência

as dimensões da seção de testes e o espaço físico existente no laboratório onde seria instalado o canal de água. O resultado final é ilustrado na Figura A.2.

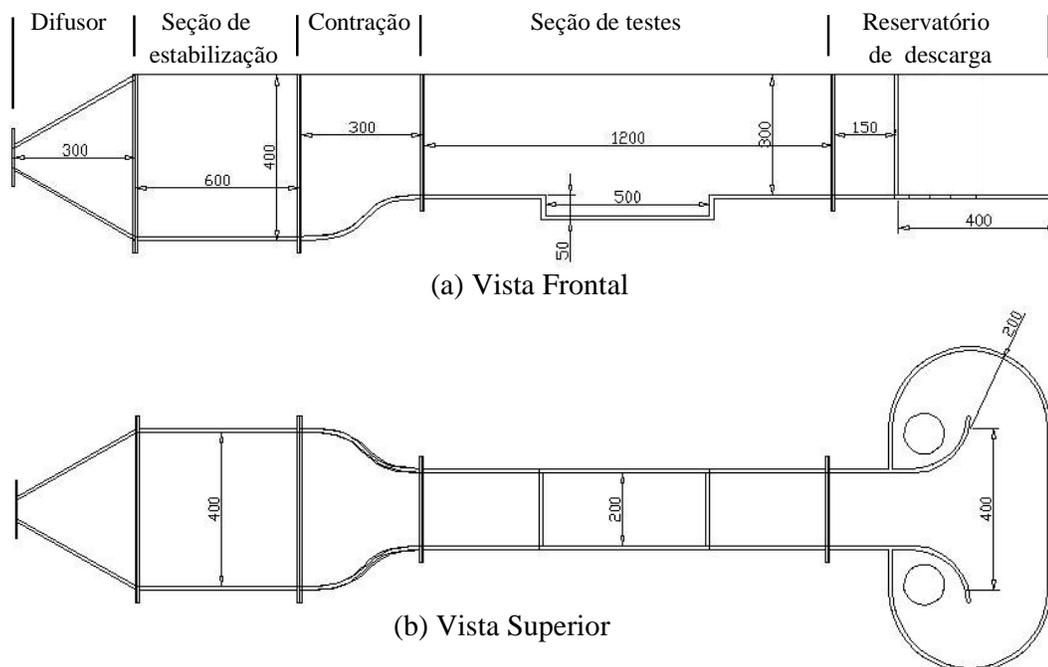


Figura A.2: Canal de água recirculante (dimensões em mm).

Todas as peças são intercambiáveis, a fim de facilitar operações de manutenção, limpeza e/ou a substituição de peças, quando necessário. Uma tubulação de PVC roscada, com diâmetro nominal de 3", foi empregada para conduzir o fluido do reservatório de descarga à sucção da bomba e da bomba ao difusor. A estrutura de suporte do canal, confeccionada em tubos de aço carbono com 4" de diâmetro, foi dimensionada para suportar, com folga, o peso próprio do canal e os efeitos dinâmicos produzidos pelo movimento do fluido.

## A.2. ELEMENTOS DO CANAL

### A.2.1. Difusor

O difusor, representado na Figura A.3, faz a transição da tubulação de recalque, de 3" de diâmetro, para uma seção de estabilização, de 400 x 400 mm de lado. Para homogeneizar o escoamento, o difusor foi inteiramente preenchido com esferas de plástico de 29 mm de diâmetro, criando um meio poroso, mostrado na Figura A.3(d).

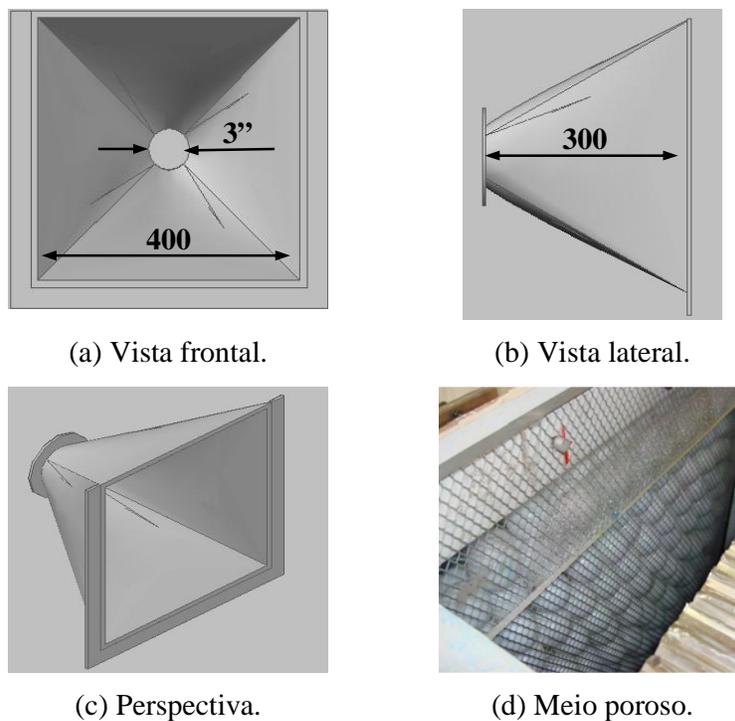


Figura A.3: Difusor (dimensões em mm).

### A.2.2. Seção de estabilização

Equipada com telas e colméias, a seção de estabilização, mostrada na Figura A.4, tem por finalidade a dissipação de grandes recirculações e a uniformização do perfil de velocidade na entrada da contração.

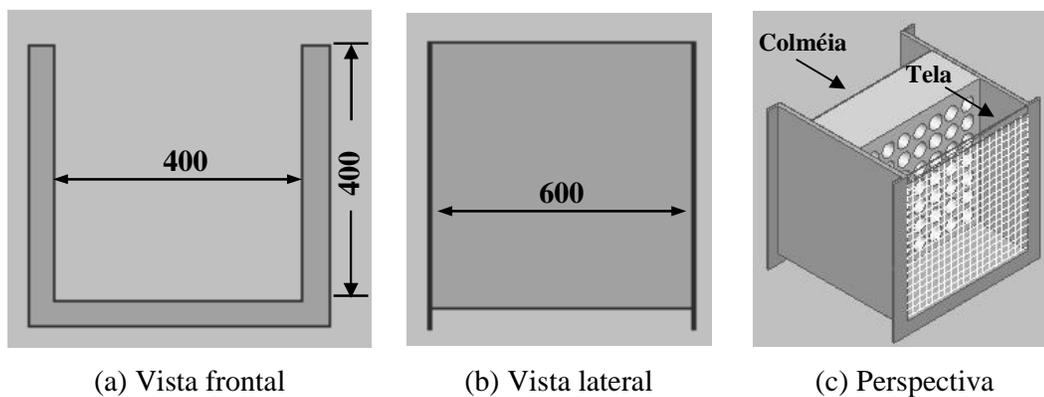
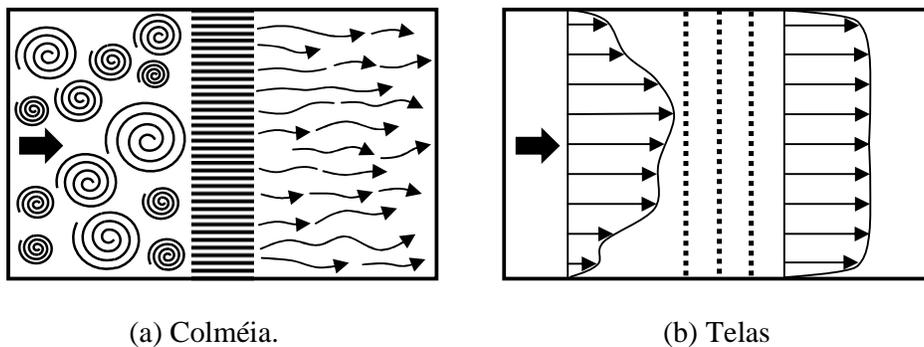


Figura A.4: Seção de estabilização (dimensões em mm).

Como ilustra a Figura A.5, as colméias têm a função de reduzir as componentes transversais da velocidade, estruturas turbilhonares maiores que os elementos constitutivos da colméia. As telas, por sua vez, reduzem os gradientes transversais de velocidade, homogeneizando o perfil.



(a) Colméia. (b) Telas

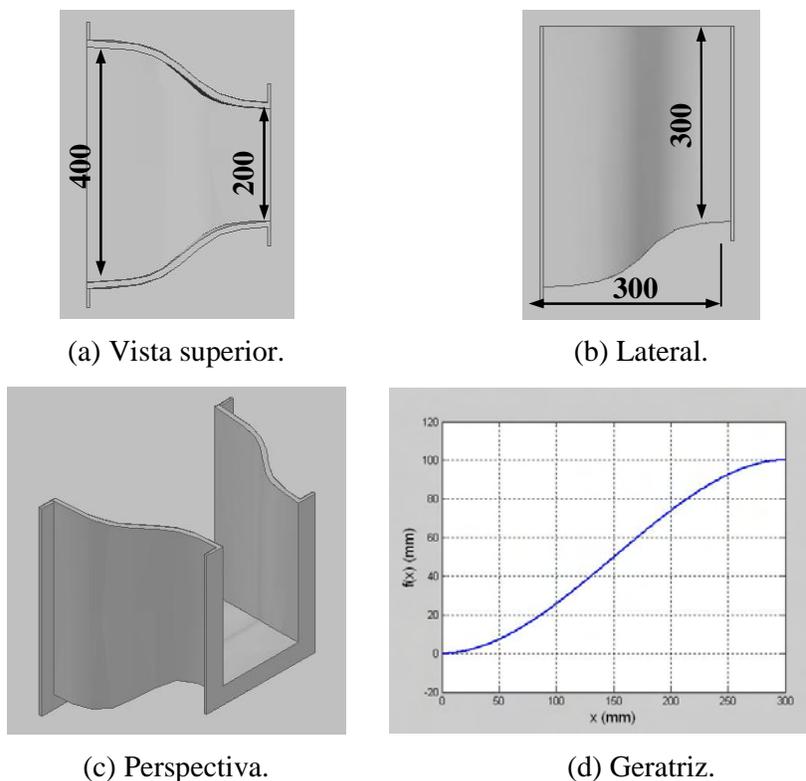
Figura A.5: Retificação do escoamento na passagem por colméias e telas.

### A.2.3. Contração

Localizada a montante da seção de testes, a contração tem a principal finalidade de acelerar o escoamento já retificado, que se encontra em baixa velocidade. A Figura A.6 apresenta o formato e as dimensões da contração utilizada neste canal, bem como a geratriz que lhe deu origem, que obedece a equação do 3º grau:

$$f(x) = -7,4 \cdot 10^{-6} x^3 + 3,33 \cdot 10^{-3} x^2 \quad (\text{A.1})$$

que apresenta derivadas nulas nas extremidades e ponto de inflexão em  $x = 150$  mm.



(a) Vista superior.

(b) Lateral.

(c) Perspectiva.

(d) Geratriz.

Figura A.6: Contração (dimensões em mm).

#### A.2.4. Seção de testes

A seção de testes apresentada na Figura A.7 foi projetada para permitir o ensaio de cavidades e modelos de diferentes formas e dimensões, além de permitir a instalação de instrumentação e a visualização do escoamento através da superfície livre e de suas faces laterais. Para isto, este elemento foi inteiramente construído em acrílico transparente de boa qualidade ótica.

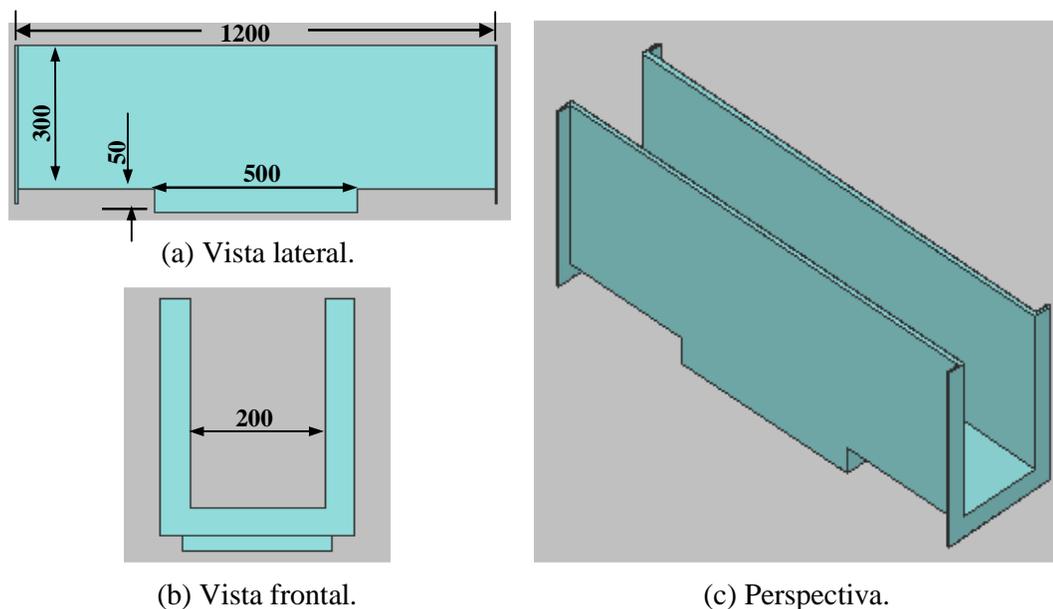


Figura A.7: Seção de testes (dimensões em mm).

#### A.2.5. Reservatório de descarga

O reservatório de descarga tem a função de receber a água que acaba de passar pela seção de testes, conduzindo-a à tubulação de sucção da bomba. A construção deste elemento foi inteiramente baseada no trabalho de Assi (2004), o qual, utilizando ferramentas de CFD, otimizou sua geometria, de maneira a permitir um escoamento simétrico, sem refluxo para a seção de testes. Para auxiliar nesta tarefa, duas aletas curvas foram instaladas na entrada do reservatório. Ao contrário do recomendado por Assi (2005), as aletas empregadas no presente projeto foram confeccionadas com espessura constante. No entanto, estas aletas são intercambiáveis, permitindo, se necessário, sua fácil substituição, para a utilização ou teste de diferentes geometrias.

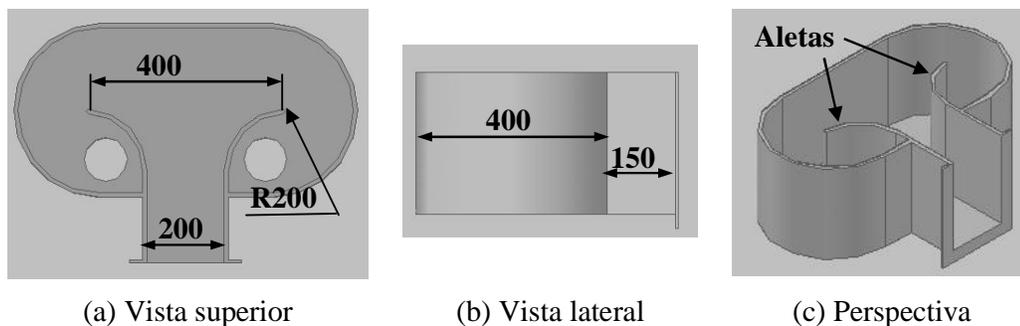


Figura A.8: Reservatório de descarga (diensões em mm).

### A.2.6. Sistema de propulsão

O grupo propulsor é composto por um motor elétrico de 3 hp, 1750 rpm, acoplado a uma bomba centrífuga, KSB Megachem 32-200, em aço inoxidável, com rotor de  $\phi = 209$  mm, cuja curva característica é apresentada na Figura A.9.

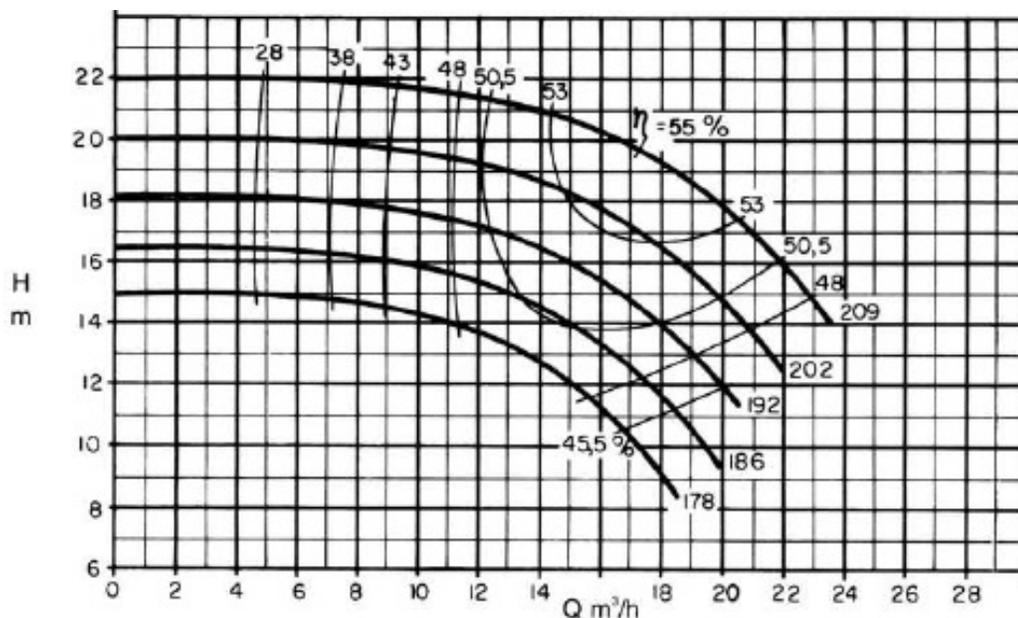


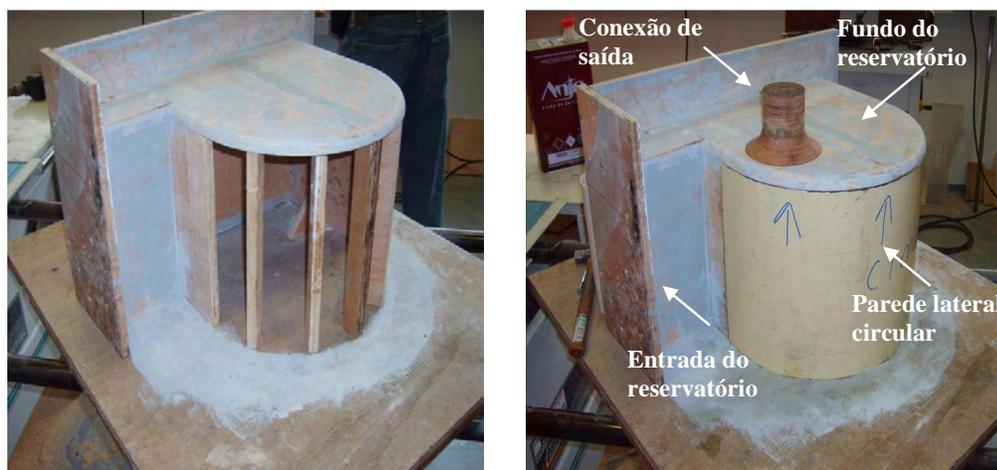
Figura A.9: Curva característica da bomba centrífuga KSB MEGACHEM 32-200, para rotação de 1750 rpm.

## A.3. CONSTRUÇÃO DOS ELEMENTOS DO CANAL

### A.3.1. Construção das peças em fibra de vidro

Todas as peças do canal, com exceção da seção de testes, foram confeccionadas em material composto de resina poliéster e fibra de vidro, reforçadas com uma estrutura de aço, que lhe confere maior rigidez.

O processo de fabricação de peças em material composto de resina e fibra requer, em geral, a confecção de moldes (em madeira, em concreto, em aço ou em resina, dentre outros materiais). Um grande cuidado deve ser tomado na confecção destes moldes, a fim de assegurar uma boa qualidade dimensional e superficial dos elementos do canal. Dependendo da complexidade geométrica da peça, a fabricação do moldes pode ser bastante difícil e trabalhosa. Neste sentido, os elementos cujos moldes demandaram maior tempo e cuidados para serem executados foram a contração e o reservatório de descarga. Este último, em particular, teve que ser construído de forma bipartida, para facilitar o processo de desmoldagem. A Figura A.10 ilustra a confecção do molde de madeira referente a uma das metades desta peça.



(a) Estrutura do molde.

(b) Molde acabado.

Figura A.10: Molde bipartido do reservatório de descarga (RD).

Depois de prontos, os moldes são recobertos com uma camada de desmoldante, uma de gel coat e uma de fibra impregnada com a resina – esta última etapa do processo recebe o nome de laminação e está ilustrada na Figura A.11. Esta operação é repetida quantas vezes forem necessárias, até que as paredes do elemento atinjam uma espessura adequada. Na maioria dos componentes, reforços metálicos foram adicionados, para dar maior rigidez à peça acabada, como mostra a Figura A.12.

Após a cura do material polimérico, as peças podem ser removidas de seus respectivos moldes, numa operação nem sempre simples de ser executada. Finalmente, as peças são submetidas às operações de rebarbação, limpeza, polimento e pintura.

A estrutura de sustentação do canal foi construída com tubos e perfisados de aço carbono, sobre os quais foi aplicado revestimento anticorrosivo.



Figura A.11: Processo de laminação de fibra de vidro.



Figura A.12: Reforços de aço sobre peças de fibra de vidro.

### A.3.2. Construção da seção de testes

A seção de testes foi construída com chapas de acrílico de 10 mm de espessura. Cada peça que integra este conjunto foi cuidadosamente cortada, usinada, polida e, então, soldada com adesivo à base de metacrilato de metila.

Durante o processo de colagem, cuidados especiais foram tomados para assegurar o paralelismo e a perpendicularidade das paredes da seção, incluindo a confecção de gabaritos especialmente concebidos para esta finalidade.

Por abrigar um considerável volume de água e por ser o acrílico um material relativamente frágil, a seção foi reforçada com fitas e cantoneiras de aço, como mostra a Figura A.13.

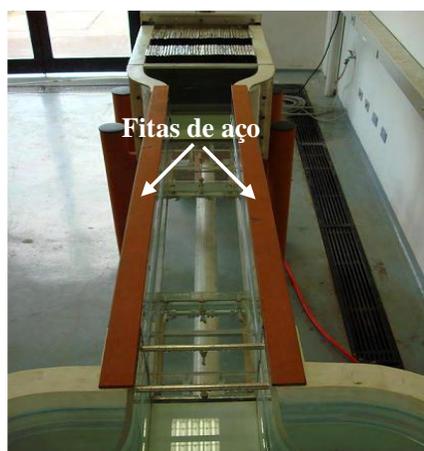


Figura A.13: Reforços de aço e madeira utilizados na seção de testes.

Após a construção de todos os componentes do canal, este foi montado conforme mostra a Figura A.14.

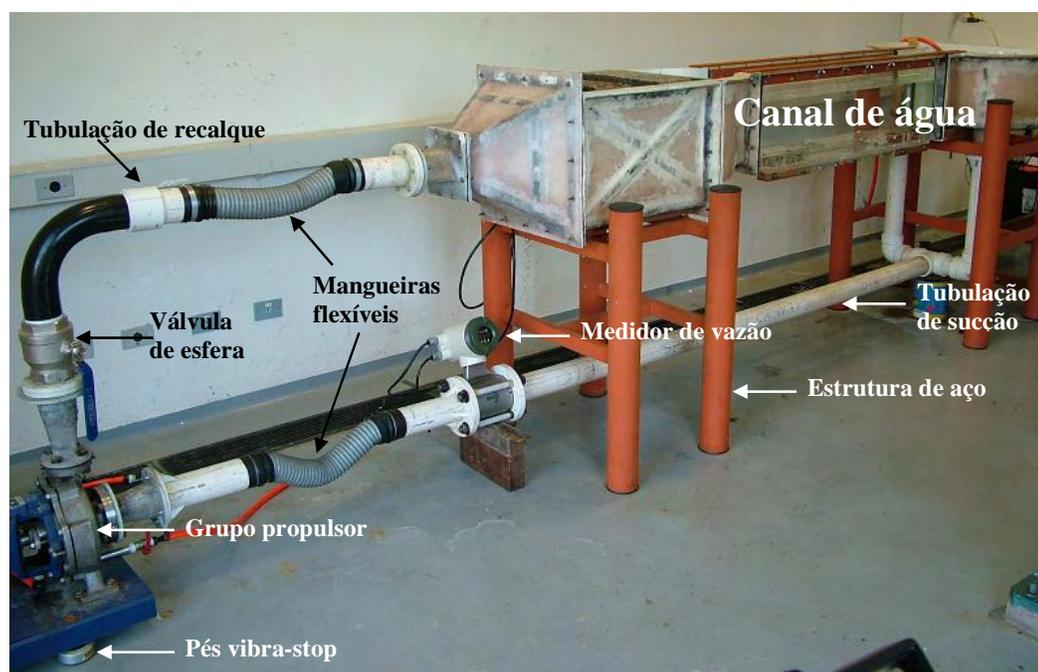


Figura A.14: Canal de água montado.

# PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DA SONDA DE VELOCIDADE ADV (ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER)

### B.1. EFEITO DOPPLER

Quando uma fonte estacionária emite ondas a uma determinada frequência, observadores também estacionários recebem estas ondas na mesma frequência emitida pela fonte. Esta situação pode ser mais bem compreendida com o desenho da Figura B.1, que mostra ambos os observadores, o da esquerda e da direita, recebendo o sinal oriundo da fonte estacionária com o mesmo comprimento de onda e, portanto, com a mesma frequência emitida.

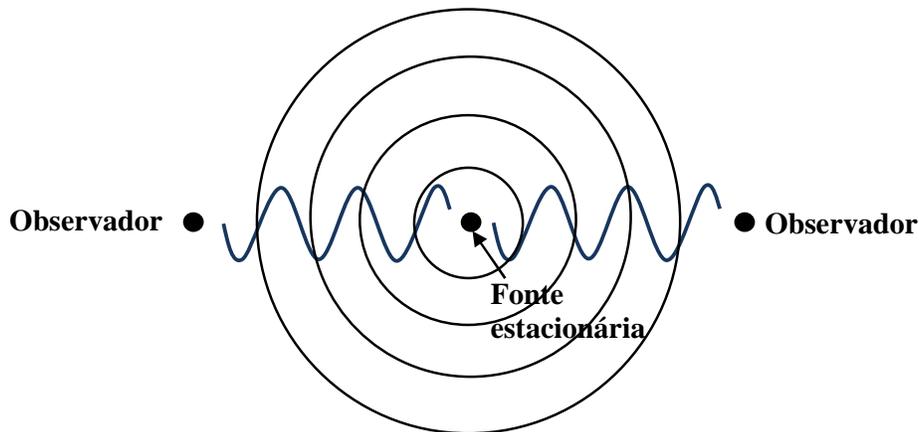


Figura B.1: Propagação de ondas sonoras emitidas por uma fonte estacionária.

Denomina-se efeito Doppler a alteração da frequência em virtude do movimento relativo de aproximação ou afastamento entre uma fonte de ondas e o observador. No caso de aproximação, a frequência aparente da onda recebida pelo observador fica maior que a frequência emitida. No caso de afastamento, ao contrário, a frequência aparente diminui, conforme ilustrado na Figura B.2, que mostra uma fonte emissora movendo-se para da direita para a esquerda. Neste caso, para o observador posicionado à esquerda, o comprimento de

onda percebido parecerá menor que o das ondas emitidas, o que implica em aumento da frequência. De maneira inversa, para o observador da direita a frequência das ondas recebidas é menor que a emitida, uma vez que a frequência de emissão lhe dará a impressão de ser menor do que de fato é.

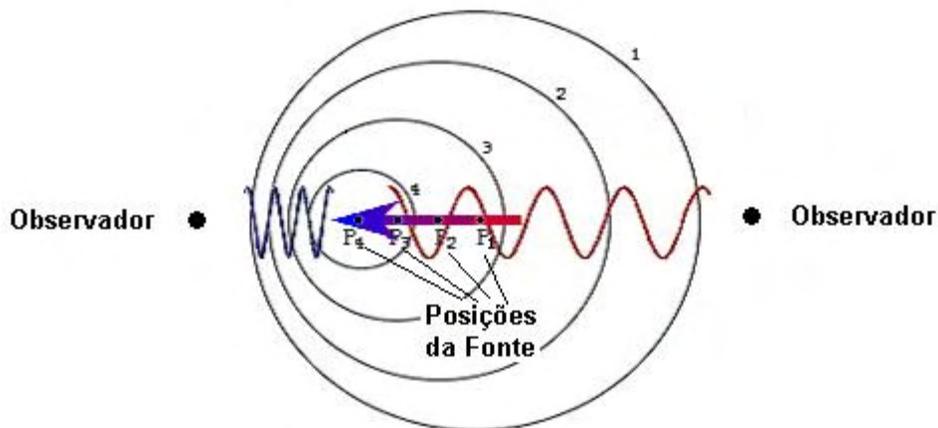


Figura B.2: Ilustração do efeito Doppler.

Embora se trate de um fenômeno característico a qualquer propagação ondulatória, o efeito Doppler sonoro é mais comum de se observar em experiências do cotidiano. Um exemplo típico é o caso de uma ambulância com sirene ligada que passa por um observador estacionário. Ao se aproximar, o som parece mais agudo e, ao se afastar, torna-se mais grave.

O efeito Doppler tem sido bastante empregado em aplicações da hidráulica e da Mecânica dos Fluidos, na medição da velocidade de escoamentos, utilizando-se a emissão e a reflexão de ondas acústicas ou luminosas (em geral, emitidas por lasers). No presente trabalho, especificamente, uma sonda ADV (*acoustic Doppler velocimeter*) foi usada com este propósito, cujo princípio básico de funcionamento é apresentado a seguir.

## B.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA SONDA ADV.

A Figura B.3 esquematiza o princípio de funcionamento de uma sonda acústica. O transmissor acústico gera um pequeno pulso sonoro de frequência conhecida ( $Ft$ ), o qual se propaga através da água, ao longo do eixo do transmissor, até atingir o volume de medida, onde a energia acústica é refletida em todas as direções pelas partículas em suspensão (sedimentos, pequenos organismos, bolhas, etc.). Parte da energia refletida viaja de volta ao longo dos eixos dos receptores, onde é captada pela sonda. Através de um processamento

eletrônico, alterações na frequência são quantificadas. O valor da parcela responsável pela mudança da frequência é conhecido como frequência Doppler ( $F_d$ ), e é proporcional à velocidade das partículas presentes na água ( $V$ ).

$F_t$  = Frequência do pulso emitido pelo Transmissor Sonoro

$F_d$  = Frequência Doppler

$V$  = Velocidade relativa entre a fonte (partículas) e o receptor

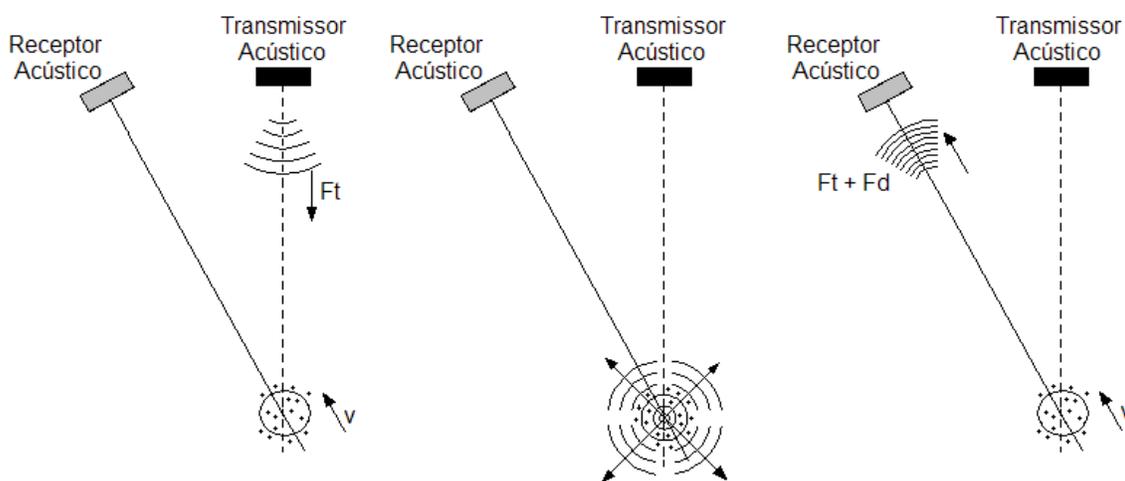


Figura B.3: Princípio de operação da sonda ADV para medição de velocidade por efeito Doppler.

### B.3. COMPONENTES DA SONDA ADV

A Figura B.4 apresenta os componentes típicos de uma sonda acústica, como a utilizada neste trabalho. A região ampliada mostra, com mais detalhes, o chamado sensor acústico. Este elemento é composto por um transmissor e dois ou três receptores acústicos (para sondas 2D ou 3D), fixado na extremidade de uma haste de aço inox. Durante o processo de medição, a sonda ADV pode ser orientada em relação ao sistema de coordenadas terrestres, ou em relação a um sistema de coordenadas cartesianas ( $XYZ$ ) arbitrário, utilizando-se, como referência, o receptor de cor vermelha.

No modelo 10 MHz ADV da sonda fabricada pela SonTek, o módulo de condicionamento de sinal é constituído por um cilindro de alumínio revestido de plástico, com

64 mm de diâmetro e 285 mm de comprimento, dentro do qual se alojam componentes eletrônicos. Um cabo de alta frequência conduz os sinais analógicos oriundos da sonda até os processadores eletrônicos digitais que compõem a placa de aquisição, acoplada a um microcomputador.

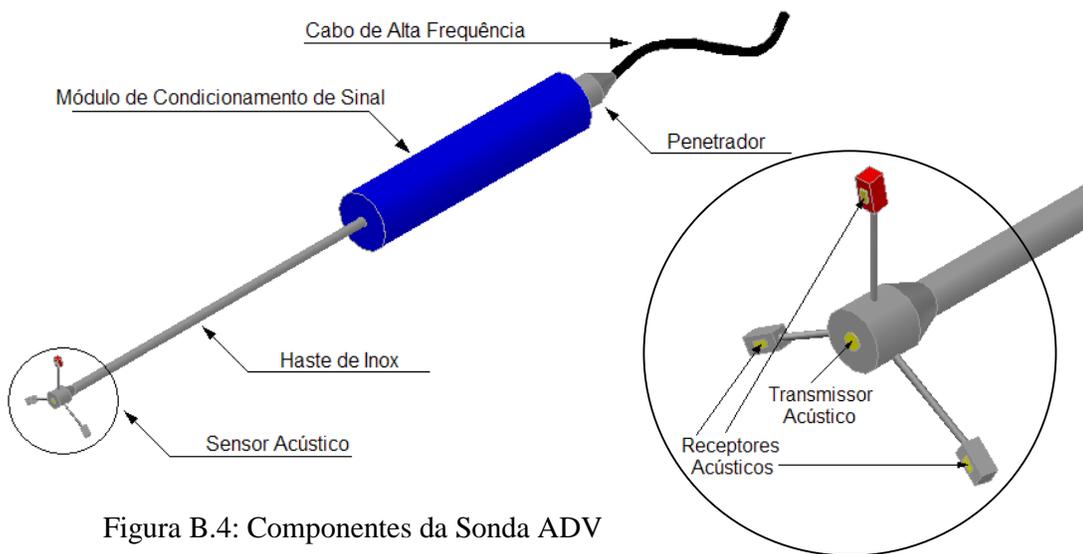


Figura B.4: Componentes da Sonda ADV

#### B.4. VOLUME DE MEDIDA

Entende-se por volume de medida a pequena região do escoamento, de aproximadamente  $0,3 \text{ cm}^3$ , no interior da qual a sonda ADV realizará a aquisição dos sinais de velocidade. A localização do volume de medida depende da configuração geométrica da sonda, porém sempre estará posicionado no mesmo eixo do transmissor, conforme esquematizado na Figura B.5. No presente caso, o volume de medida está localizado a 50 mm do transmissor acústico.

A extensão do volume de medida é determinada pelas formas do feixe do transmissor e dos receptores, assim como pelo comprimento do pulso acústico emitido. No caso da sonda empregada nas presentes medições, os feixes possuem a forma aproximada de um cilindro de 6 mm de diâmetro. Os limites verticais do volume de medida são definidos pelo comprimento do pulso acústico, podendo atingir a altura máxima de 9 mm. Através do *software* de aquisição da sonda ADV, pode-se ajustar o comprimento do pulso emitido, o que permite controlar o tamanho do volume de medida e, assim, a resolução espacial do instrumento, que se mantém sempre inferior a 0,09 cc.

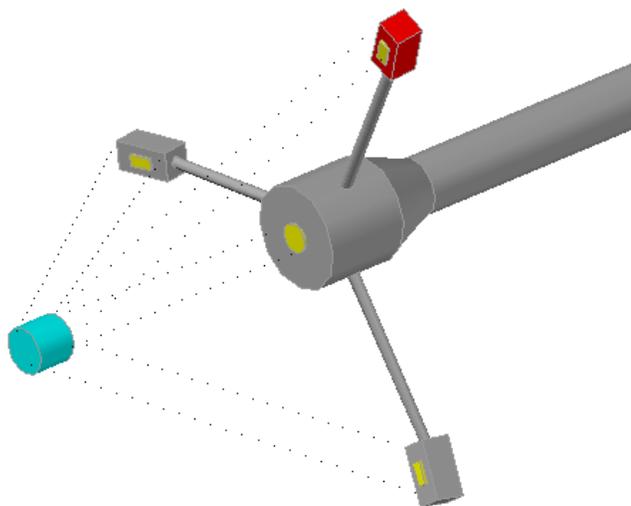


Figura B.5: Localização do volume de medida.

# ANÁLISE DE INCERTEZAS

## C.1. INTRODUÇÃO

No meio científico, não é aceitável apresentar resultados experimentais sem descrever as incertezas envolvidas. Além de prover uma estimativa da confiabilidade dos resultados obtidos, a definição do intervalo dentro do qual os resultados de um experimento deve recair é de grande valia, tanto para o experimentalista, quanto para o usuário final. Para o experimentalista, esta prática fornece um método racional para avaliar o significado da dispersão dos dados em repetidas medições, possibilitando a detecção de eventuais problemas em experimentos mal comportados. Para o usuário final, a incerteza deve ser considerada como critério de decisão para a avaliação de resultados, sobretudo quando estes resultados são comparados com dados anteriormente publicados.

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

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

O termo "incerteza" é então utilizado para referir-se a "um possível valor que o erro

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

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

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

Numa definição mais ampla, a diferença entre a análise por amostragem simples ou múltipla reside na quantidade de observações independentes realizadas em cada ponto experimental, e como os dados são manipulados.

## **C.2 ANÁLISE DE INCERTEZA PARA AMOSTRAGEM SIMPLES**

Experimentos de amostragem simples são aqueles em que cada ponto experimental é testado somente uma vez, ou no máximo algumas poucas vezes. Experimentos de pesquisa em mecânica dos fluidos e transferência de calor são geralmente experimentos de amostragem simples, caracterizados por dados distribuídos ao longo de uma ampla faixa do parâmetro em estudo (MOFFAT, 1988).

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

um experimento.

Se  $X_i$  é uma variável e  $X_i$  incerteza a ela associada, então, pode-se escrever:

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

Esta representação deve ser interpretada da seguinte maneira:

- A melhor estimativa de  $X_i$  é  $X_i$  (medido);
- Existe uma incerteza em  $X_i$  que pode ,ser tão grande quanto  $\pm X_i$ ;
- As chances da incerteza de  $X_i$  ser menor do que  $\pm X_i$  são de 20 pra 1(95%).

O valor de  $X_i$  medido representa a leitura realizada, enquanto que  $X_i$  representa  $2\sigma$ , onde  $\sigma$  é o desvio padrão da população de possíveis medidas das quais a única amostra  $X_i$  foi tirada. A equação (C1) segue da hipótese de que se um número infinito de observações fosse feito, a média seria o valor verdadeiro e os erros aleatórios seriam normalmente distribuídos ao seu redor, com desvio padrão igual a  $\sigma$ . Uma vez que 95% de todos os elementos de uma população com distribuição normal situam-se dentro do intervalo  $\pm 2\sigma$  em torno da média, podemos dizer com 95% de confiança que o valor médio deve estar contido no intervalo de  $\pm 2\sigma$  do valor medido.

Para o caso de experimentos com amostragem simples, a determinação de  $\sigma$  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:

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

O efeito da incerteza de uma única variável sobre o resultado calculado, se somente esta variável possui uma incerteza associada, é dada por:

$$R_{X_i} = \frac{\partial R}{\partial X_i} X_i \quad (\text{C.3})$$

A derivada parcial de  $R$  em relação a  $X_i$  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 da seguinte forma:

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

Esta é a equação básica da análise das incertezas. Cada termo representa a contribuição feita pela incerteza de uma variável ( $X_i$ ) para a incerteza global do resultado ( $R$ ). Todos os termos possuem a mesma forma: a derivada parcial de  $R$  em relação a  $X_i$ , multiplicada pela incerteza desta variável. A equação (C4) é válida quando as seguintes condições são observadas:

- A incerteza de cada variável é expressa com a mesma probabilidade;
- Cada uma das medições é independente das demais;
- 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 (C4) 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 (C5), a incerteza relativa pode ser encontrada diretamente. Isto é, se

$$R = X_1^a X_2^b X_3^c \dots X_N^m \quad (\text{C.5})$$

então,

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

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 (C6).

### C.3 ANÁLISE DE INCERTEZA DAS VARIÁVEIS DE INTERESSE

#### C.3.1 Comprimento

Todas 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  $X = 0,5\text{mm}$  e para o paquímetro é  $X = 0,005\text{mm}$ .

#### C.3.2. Área

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

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

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

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

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

#### C.3.3 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 uma ponta termopar tipo K, e mede temperaturas na faixa de  $-50^{\circ}\text{C} - 750^{\circ}\text{C}$ , com incerteza de 0,01% da leitura.

#### C.3.4 Viscosidade Cinemática

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

$$\nu(T) = \frac{\nu(T)}{\nu(T)} \quad (\text{C.9})$$

Existem na literatura diversas correlações bem estabelecidas para a viscosidade absoluta e a densidade da água em função da temperatura. Para o cálculo da viscosidade cinemática da água, foram utilizadas as correlações listadas na Tabela C.1.

Tabela C.1: Correlações para o cálculo da viscosidade cinemática da água.

Propriedade	Correlação	Fonte	Incerteza
$\nu(T)$ [kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ]	$\ln\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right) = -1,704 - 5,306Z + 7,003Z^2$ onde $Z = 273/T$ e $\nu_0 = 1,788 \times 10^{-3}$	White (1986)	±0,1%
$\rho(T)$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	$= 1000 - 0,0178(T - 4)^{1,7}$		

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

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

A temperatura da água foi mantida em 30°C, para a realização dos ensaios. Portanto a incerteza relativa da viscosidade cinemática da água é de 0,1%.

### C.3.5 Vazão

A vazão do escoamento que flui através da seção de testes é medida com o auxílio de um medidor de vazão eletromagnético. Segundo a especificação do fabricante, este instrumento possui uma precisão de ±1% do valor 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 ±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 32 m<sup>3</sup>/h, que corresponde à máxima vazão utilizada. Assim, a incerteza da vazão pode ser estimada como  $Q = 0,16 \text{ m}^3/\text{h}$ , para vazões inferiores a 16 m<sup>3</sup>/h, e  $Q = 0,32 \text{ m}^3/\text{h}$ , para vazões superiores a 16 m<sup>3</sup>/h.

### C.3.6 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,

$$V = \frac{Q}{A} \quad (\text{C.11})$$

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 pode ser estimada por

$$\frac{V_{\infty}}{V_{\infty}} = \left[ \left( \frac{Q}{Q} \right)^2 + \left( -\frac{A}{A} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{C.12})$$

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

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

$Q(m^3 / h)$	$V_{\infty}(m / s)$	$V_{\infty} / V_{\infty}$
3	0,02	5%
7,6	0,053	2,13%
15	0,105	1%
32	0,228	1%

### C.3.7 Número de Reynolds

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

$$Re = \frac{V_{\infty} \cdot h}{\nu} \quad (\text{C.13})$$

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

A incerteza do número de Reynolds pode ser calculada como:

$$\frac{Re}{Re} = \left[ \left( \frac{V_{\infty}}{V_{\infty}} \right)^2 + \left( \frac{h}{h} \right)^2 + \left( - \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{C.14})$$

A Tabela C.3 apresenta valores das incertezas dos números de Reynolds para diferentes valores de velocidades.

Tabela C.3: Valores típicos da incerteza do número de Reynolds.

$V_{\infty} (m / s)$	$Re$	$Re / Re$
0,02	1000	5%
0,053	2650	2,13%
0,105	5250	1%
0,228	11400	1%

### C.3.8 Razão de Aspecto

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

$$RA = \frac{b}{h} \quad (C.15)$$

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

$$\frac{\Delta RA}{RA} = \left[ \left( \frac{\Delta b}{b} \right)^2 + \left( \frac{\Delta h}{h} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (C.16)$$

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

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

$RA$	$RA / RA$
0,5	0,022%
1	0,014%
2	0,011%