

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

VISUALIZAÇÃO DA BIESTABILIDADE EM DOIS CILINDROS CIRCULARES  
DISPOSTOS LADO A LADO EM UM CANAL HIDRÁULICO POSICIONADOS NA  
HORIZONTAL E NA VERTICAL

por

Bruno Volkmer Destefani

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2016

VISUALIZAÇÃO DA BIESTABILIDADE EM DOIS CILINDROS CIRCULARES  
DISPOSTOS LADO A LADO EM UM CANAL HIDRÁULICO POSICIONADOS NA  
HORIZONTAL E NA VERTICAL

por

Bruno Volkmer Destefani

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Alexandre Vagtinski de Paula

Comissão de Avaliação:

Prof. Paulo Smith Schneider

Prof. Sergio Viçosa Möller

Prof<sup>a</sup>. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 22 de junho de 2016.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai, um amigo sem igual, por me tornar uma pessoa mais sábia e espiritualizada. Ao meu segundo pai, um anjo colocado em minha existência, por seu amor e companheirismo. À minha mãe, minha grande fortaleza e exemplo de vida, por me tornar um homem forte e resiliente. À minha irmã, minha segunda mãe. À minha esposa e ao meu filho, por nossa força, união e cumplicidade. Aos meus amigos do peito, colegas e professores.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os meus colegas de classe que, unidos, formaram um grande time vencedor, e tornaram esta vitória possível. Àqueles professores exemplares do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS, em especial ao professor Alexandre Vagtinski de Paula, sempre muito prestativo. À professora Thamy Cristina Hayashi, pela compreensão ao longo dos processos construtivos no laboratório LAEFT. Aos laboratórios LETA e LAEFT, pela disponibilização de toda a estrutura necessária para a construção do canal hidráulico. Ao técnico João Batista da Rosa, do laboratório LETA, sem o qual, a realização deste trabalho não teria sido capaz.

Agradeço também à minha mãe, esposa e filho, pela compreensão enquanto estive ausente, escrevendo este trabalho.

DESTEFANI, B. V. **Visualização da biestabilidade em dois cilindros circulares dispostos lado a lado em um canal hidráulico posicionados na horizontal e na vertical.** 2016. 19 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental referente ao fenômeno da biestabilidade que ocorre em escoamentos turbulentos sobre dois cilindros circulares dispostos lado a lado. Para a realização do experimento, foram escolhidas duas posições para os cilindros: uma em que os cilindros circulares foram colocados na posição horizontal e outra em que os cilindros foram colocados na posição vertical. O experimento, realizado com escoamento de água e Reynolds de  $Re = 5,5 \times 10^3$ , exigiu a construção de um canal hidráulico de circuito fechado, tendo como inspiração o projeto de canal hidráulico desenvolvido pelo Núcleo de Dinâmica e Fluidos da Universidade de São Paulo. A construção, realizada com chapas de alumínio de 0,8 mm de espessura e chapas de acrílico de 10 mm de espessura, teve diversos processos de fabricação com a utilização de máquinas e ferramentas diversas. Para os cilindros circulares, escolheu-se tubos de PVC de 25 mm de diâmetro externo, razão de espaçamento  $P/D = 1,26$ , onde “ $P$ ” é a distância entre os centros dos cilindros adjacentes e “ $D$ ” o diâmetro. Para a visualização das esteiras de vórtices formadas pelos cilindros, injetou-se tinta nanquim colorida diluída em água através de finas mangueiras de 2 mm de diâmetro. Estas foram inseridas no interior dos cilindros com as saídas simétricas ao ponto de estagnação, defasadas  $60^\circ$  uma da outra, voltadas para montante do escoamento e rentes às geratrizes externas dos cilindros. O canal hidráulico, construído para este experimento, possibilitou uma excelente visualização do fenômeno da biestabilidade, mostrando com clareza as trocas entre as esteiras larga e estreita, conforme relatos da literatura - fato verificado por meio de coleta de imagens em vídeo e análise no *software* Tracker. Realizou-se uma comparação qualitativa entre os resultados deste trabalho e os resultados encontrados por De Paula, 2008, em canal aerodinâmico, apresentando similaridade.

**PALAVRAS-CHAVE:** cilindros circulares dispostos lado a lado; biestabilidade; esteira de vórtices.

DESTEFANI, B. V. **Bistability visualization of two horizontal and vertical side-by-side circular cylinders in a hydraulic channel**. 2016. 19 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## ABSTRACT

This work refers to an experimental study related to the bistability phenomenon that occurs under turbulent flows by two circular cylinders arranged side by side. Two different positions were chosen for cylinders for this experiment. The circular cylinders were placed horizontally and also vertically, to be mentioned. The experiment was conducted using water flow as Reynolds set at  $Re = 5.5 \times 10^3$ . This setup is required for construction channel inspired of the project developed by Dynamics and Fluid Center, University of São Paulo. The construction of the channel used 0.8 mm thick aluminum plates, 10 mm thick acrylic plate. Different manufacturing processes and various machines and tools were used for the construction of the model. An 25 mm outer diameter PVC pipe were chosen for circular cylinders, the aspect ratio  $P/D$  chosen was of 1.26, where “ $P$ ” is the pitch or the distance between the centers of adjacent cylinders and “ $D$ ” the diameter. For the vortex shedding visualization formed by the rollers a dissolved ink is injected by 2 mm thin hoses. Those hoses were inserted into the interior of the cylinders by a symmetrical outputs the 60 lagged from the stagnation point and so facing upstream of the flow and flushed by the outer walls of the cylinders. The channel was built for this experiment enabled an excellent view of the bistability phenomenon showing clearly the exchanges between the wide and narrow wake, according to published literatures. It was based on the images and analysis using the software Tracker. A qualitative analysis was realized between the results of this work and the results found by De Paula, 2008, in aerodynamic channel, showing similar results.

**KEYWORDS:** Side-by-side circular cylinders; bistability; vortex shedding.

## ÍNDICE

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1.1 Motivação</b> .....	1
<b>1.2 Justificativa</b> .....	1
<b>1.3 Objetivos</b> .....	1
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	2
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	3
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	6
<b>4.1 Canal hidráulico</b> .....	6
<b>4.2 Esteiras dos cilindros</b> .....	7
<b>4.3 Software Tracker</b> .....	9
<b>5 RESULTADOS</b> .....	9
<b>5.1 Validação do canal hidráulico</b> .....	10
<b>5.2 Escoamento biestável</b> .....	10
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	13
<b>6.1 Sugestões de trabalhos futuros</b> .....	14
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	14
APÊNDICE A .....	16
APÊNDICE B .....	18

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

A determinação das características de escoamento de fluidos, em torno de geometrias simples, é útil para compreender as características dos escoamentos em geometrias mais complexas e de maior escala. O entendimento dos fenômenos que podem ocorrer em escalas maiores tem grande importância para a engenharia, visto que dessa forma, possibilita-se a construção de estruturas das quais sem tal entendimento, jamais poderiam ser construídas com confiança.

O emprego de cilindros circulares é encontrado em diversas áreas da engenharia, sendo uma das geometrias mais elementares tanto de estruturas quanto de componentes mecânicos.

Os escoamentos cruzados ao redor de um único cilindro circular já são bastante estudados (Blevins, 1990; Zdravkovich, 2003), assim como os escoamentos ao redor de bancos de cilindros. Já para o caso de escoamentos sobre dois cilindros dispostos lado a lado, a literatura mostra que, dependendo da razão de espaçamento entre eles, algo intrigante acontece. Dá-se que a esteira de vórtices de um dos cilindros é maior que a do outro, dando origem a forças de arrasto e de sustentação distintas entre estes. Ao longo do tempo, esse comportamento se alterna com relação aos cilindros, dando origem ao que se chama de biestabilidade [De Paula, 2013].

Tal fenômeno pode ser relevante no projeto de muitas aplicações práticas, como no núcleo de reatores nucleares e no interior de trocadores de calor do tipo casco e tubos, por exemplo.

A esteira de vórtices, que se propaga no sentido do escoamento, afetada pelo escoamento de fenda entre os cilindros, pode provocar vibrações estruturais, aumentando, assim, as chances de ocasionar graves falhas em estruturas.

## 1.2 Justificativa

Os efeitos causados pelo escoamento cruzado nas geometrias estudadas neste trabalho são relevantes para uma melhor compreensão do fenômeno da biestabilidade, quando analisados na prática.

O fenômeno da biestabilidade, primeiramente estudado por Berman e Wadcok (1973), tem sido pesquisado por engenheiros de diversos lugares do mundo, com enfoque nos efeitos da esteira de vórtices emanada pela fenda que separa os dois cilindros. Todavia, os estudos, até então, não apresentam resultados para uma possível configuração específica: quais seriam os efeitos, ao estudar a esteira de vórtices dos cilindros posicionados na horizontal – cilindros paralelos ao solo, em escoamento cruzado – com a força da gravidade atuando sobre os vórtices emanados pelos mesmos? Esta é uma configuração natural da posição dos cilindros, e, sem dúvida, interessante.

Preliminarmente à execução do presente trabalho, houveram experimentos nos quais não se detectaram o fenômeno da biestabilidade em canal de superfície livre, com os cilindros posicionados na horizontal. Com o intuito de constatar tal fato, o presente trabalho visa experimentar tal configuração dos cilindros com o emprego de um canal hidráulico de superfície fechada.

## 1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é verificar se, assim como na posição vertical, há a ocorrência da biestabilidade para a posição horizontal com o posicionamento dos cilindros circulares dispostos lado a lado em escoamento cruzado. Os objetivos específicos deste trabalho são:



- Realizar a visualização de escoamento cruzado, sobre dois cilindros circulares, em um canal hidráulico de circuito fechado, com circulação de água à temperatura ambiente;
- Comparar as esteiras de vórtices utilizando a injeção de tinta no escoamento, em uma relação de espaçamento de  $P/D = 1,26$ ;
- Trabalhar com os cilindros na posição vertical e horizontal, utilizando a relação de espaçamento entre eles de  $P/D = 1,26$ .

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Uma extensa análise a respeito do comportamento das esteiras de vórtices formadas pela passagem de um escoamento de fluido através de cilindros circulares foi apresentada por Williamson, 1996.

Silveira, 2011, cita que “o escoamento sobre um único cilindro é definido como sendo aquele que, ao ser imerso em uma corrente de fluido, gera separação do escoamento, e esta ocorre em uma porção considerável da sua superfície. A separação em um corpo com seção transversal bidimensional faz com que haja a formação de duas camadas cisalhantes livres na região imediatamente posterior ao corpo, com vorticidades de sinais opostos, constituindo um sistema instável na presença de pequenas perturbações quando certas condições são satisfeitas. A interação entre estas duas camadas cisalhantes consiste na principal razão da formação e do desprendimento de vórtices do corpo”.

Ribeiro, 2002, comenta que entre os diversos fenômenos relacionados com a turbulência, o desprendimento de vórtices é um fenômeno que ocorre quando se tem o escoamento de um fluido ao redor de um obstáculo. Uma notável característica deste fenômeno é que ele gera variações de pressão na superfície do corpo imerso no escoamento, causando esforços dinâmicos que induzem oscilações. O surgimento desses esforços, torna seu estudo essencial.

De acordo com Miyata *et al.*, 1990, um grande número de investigações tem sido feitas sobre escoamentos em torno de cilindros circulares, avançando constantemente tanto na área experimental quanto na área de simulação numérica, com relevante significado nos efeitos físicos e grande importância prática, em aplicações de engenharia.

“A evolução das estruturas de vórtices, na região da esteira formada pelos cilindros circulares, tem um grande efeito sobre os problemas aerodinâmicos, de arrasto, transferência de calor, vibração e ruído induzidos pelo escoamento [Sik Yoon *et al.*, 2009]”.

Conforme Chen *et al.*, 2015, o cilindro circular é utilizado em muitas estruturas de engenharia, tais como: tubos de trocadores de calor, de perfuração de petróleo, linhas de transmissão elétrica, etc. Essas estruturas, em um escoamento de ar ou água, são submetidas a vibrações induzidas pelos vórtices, e tem risco de falha estrutural. Características também observadas por Xiao-hui *et al.*, 2009, em que os autores afirmam que o desprendimento de vórtices dos cilindros resultará em vibrações estruturais, ruídos acústicos ou ressonância, e até mesmo em falha da estrutura.

“Quando um cilindro circular é flexível ou fixado de forma flexível, as esteiras de vórtices oriundas do mesmo produzem um estado excitado de oscilações, quando a frequência de vibração está próxima da frequência natural do cilindro [Zdravkovich M.M, 1988]”.

Lam *et al.*, 2003, afirmam que as vibrações induzidas nos cilindros – ocasionadas pelas excitações do fluido – têm um impacto significativo sobre a vida útil das estruturas devido à fadiga, e poderia causar falhas desastrosas, com elevadas perdas financeiras e até mesmo a perda de vidas humanas.

“A determinação das características do escoamento e vórtices dinâmicos ao redor de corpos de simples configuração - como o cilindro circular - ajuda no entendimento do escoamento sobre geometrias maiores e mais complexas [Alam *et al.*, 2003]”.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

“Quando dois cilindros circulares de igual diâmetro são imersos em um escoamento transversal com velocidade constante,  $U$ , é sabido que os cilindros exibem um padrão de escoamento assimétrico, para valores intermediários de espaçamento entre os centros [Sumner *et al.*, 1999]”.

“Como o espaçamento entre dois cilindros circulares dispostos lado a lado é variado, são observados dois regimes principais de escoamento, caracterizados pelo comportamento da região da esteira formada pelos cilindros. No primeiro regime, em que a esteira formada pelos cilindros é instável e assimétrica, a esteira formada no espaçamento entre os cilindros tende para um lado ou para outro (Figura 2.1). Para o cilindro ao qual o escoamento é direcionado, há a formação de uma esteira estreita de vórtices com maior frequência de desprendimento. Já no outro cilindro tem-se uma esteira larga com uma baixa frequência de desprendimento de vórtices. A esteira estreita tem como característica um menor arrasto.

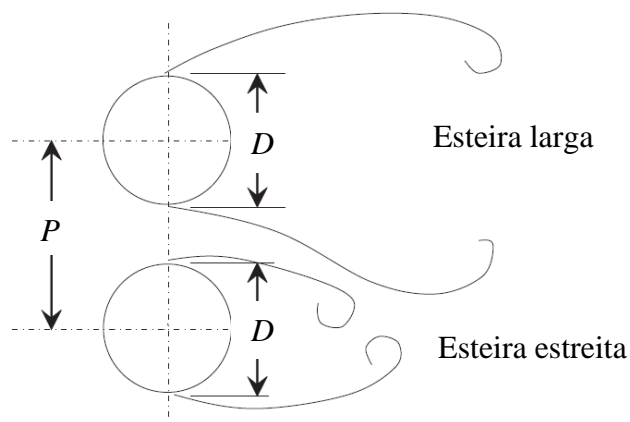


Figura 2.1 – Definição das variáveis de dois cilindros circulares dispostos lado a lado. Adaptado de Alam *et al.*, 2011.

O escoamento da fenda que é biestável, troca de um cilindro para o outro em intervalos irregulares de tempo. Há um regime em que a esteira de vórtices atrás de um dos cilindros é similar a esteira do outro cilindro, e as duas esteiras exibem a mesma frequência. Nesse regime de escoamento (Figura 2.2) as esteiras de vórtices de ambos os cilindros estão em fase ou anti-fase [Mahbud *et al.*, 2003]”.

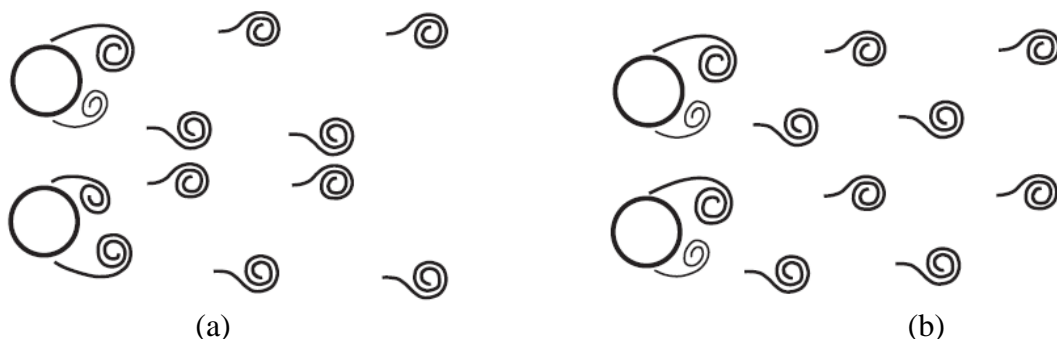


Figura 2.2 – Configuração dos vórtices de dois cilindros com grande relação  $P/D$ , (a) em fase e (b) em anti-fase. Adaptado de Alam *et al.*, 2003.

“O padrão de escoamento assimétrico é caracterizado pela esteira larga formada atrás de um dos cilindros, e uma esteira estreita atrás do outro, e as duas frequências de desprendimento de vórtices podem ser expressas em formas adimensionais em função do número de Strouhal. Em alguns casos, o padrão de escoamento entre as esteiras formadas pelos cilindros, troca entre eles, e esse comportamento é denominado como sendo biestável [Sumner *et al.*, 1999]”.

Diversos pesquisadores observaram a importante relação existente entre razão de espaçamento entre os cilindros, seus diâmetros, número de Reynolds e o formato da esteira de vórtices. De acordo com os pesquisadores Sumner *et al.*, 1999, o padrão de escoamento biestável é observado com valores de  $1,2 < P/D < 2,2$ .

Olinto, 2005, apresenta um desenho esquemático de razão de espaçamento entre os cilindros (Figura 2.3) e as respectivas esteiras de vórtices geradas por simulação numérica para  $Re = 100$  são apresentados na Figura 2.4 [Yoon *et al.*, 2009].

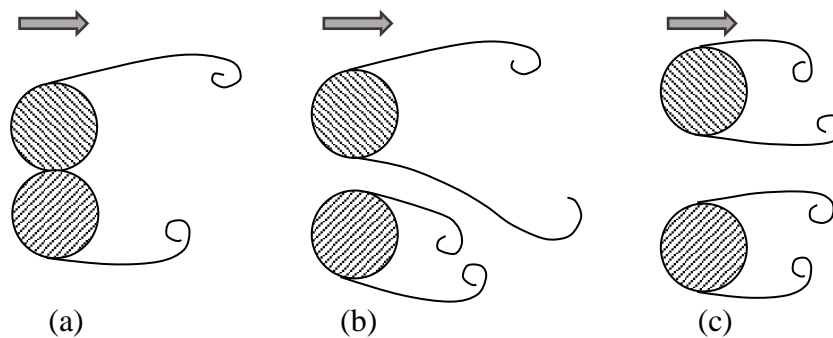


Figura 2.3 – Diferentes modos de escoamento para a geometria de dois tubos lado a lado: (a) cilindros em contato, (b) relação  $P/D$  intermediária, (c) grande relação  $P/D$ . Adaptado de Olinto, 2005.

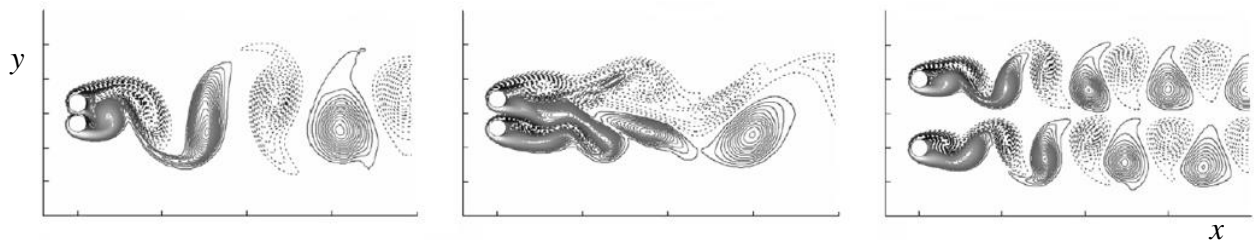


Figura 2.4 – Comportamento das esteiras de vórtices em diferentes razões de espaçamentos para  $Re = 100$ , gerado por simulação numérica. Adaptado de Yoon *et al.*, 2009.

Uma explanação detalhada a respeito desta razão de espaçamento é apresentada por Zdravcovich, 1985 – “a interferência entre dois cilindros começa quando eles estão suficientemente próximos uns dos outros. Os efeitos da proximidade entre os cilindros, dispostos lado a lado em escoamento transversal, podem ser divididos em três padrões de escoamento:

- Quando a relação de espaçamento entre os cilindros é pequena,  $1 < P/D < 1,2$ , uma esteira simples de vórtices é formada no sentido do escoamento. Os dois cilindros se comportam como se fossem um único corpo
- Quando a relação de espaçamento entre os cilindros está entre  $1,2 < P/D < 2,2$ , uma esteira larga e outra estreita são formadas, divididas pelo escoamento oriundo do espaçamento formado atrás dos cilindros. Esse padrão de escoamento formado atrás dos cilindros é chamado de biestável, havendo uma alternância entre as esteiras larga e estreita.
- Quando a relação de espaçamento é aumentada, ambas esteiras de vórtices possuem a mesma frequência, podendo ser em fase ou anti-fase.

A frequência de desprendimento de vórtices de dois cilindros depende da sua disposição, e o número de Strouhal pode variar desde 0,1 até 0,38. O cilindro com elevado número de Strouhal começa a oscilar em baixa velocidade, enquanto o outro pode manter-se estável, apesar do fato de que ambos os cilindros são do mesmo tamanho e têm a mesma frequência natural. Outra possibilidade, inexistente para um único cilindro, é que as oscilações de um cilindro podem afetar fortemente o desprendimento de vórtices e de sincronização subsequente do segundo cilindro”.

Uma versão mais recente das principais características e faixas de ocorrência da biestabilidade são apresentados por Alam *et al.*, 2003.

Os modos de desprendimento de vórtices de cilindros circulares são classificados em função do número de Reynolds, definido como:

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu} \quad (3.1)$$

em que  $U$  é a velocidade média do escoamento,  $D$  é um comprimento característico (diâmetro no caso do cilindro) e  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido, válido para fluidos reais ( $\nu > 0$ ).

De acordo com Pastò, 2008, a esteira de vórtices formada pela passagem do escoamento por um cilindro circular depende fortemente do número de Reynolds, sendo classificada da seguinte forma:

- $Re = 5$ , não há descolamento da camada limite ao longo da superfície do cilindro;
- $5 \leq Re < 45$ , ocorre o desprendimento de uma pequena parte da camada limite, atrás do cilindro, com a formação de uma esteira estreita caracterizada pela formação de pares simétricos de vórtices;
- $45 \leq Re < 150$ , os vórtices começam a ser lançados alternadamente a partir dos lados do cilindro, e a esteira de vórtices é formada por dois vórtices laminares e de sinais opostos;
- $150 \leq Re < 300$ , a esteira se torna turbulenta, porém a camada limite é laminar;
- $300 \leq Re < 1,5 \times 10^5$ , regime chamado de subcrítico, onde o desprendimento de vórtices é forte e periódico. A camada limite ainda permanece colada ao corpo e laminar;
- Reynolds acima de  $1,5 \times 10^5$ , passam a apresentar uma camada limite turbulenta.

Os casos relevantes para este estudo, podem ser observados na Figura 3.1, adaptada de De Paula, 2013.

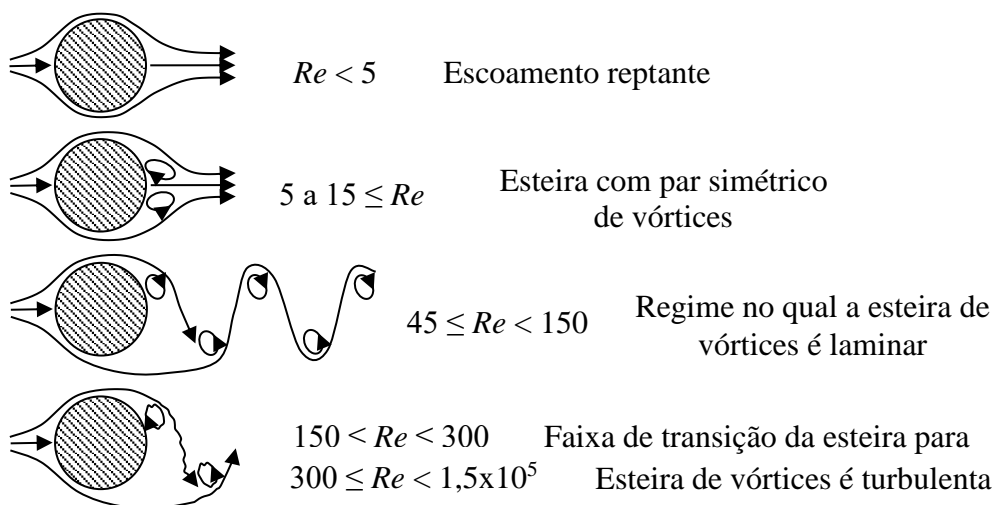


Figura 3.1 – Regime esquemático de desprendimento de vórtices para escoamentos através de cilindros lisos. Adaptado de De Paula, 2013.

As frequências de desprendimento dos vórtices em cilindros podem ser calculadas de forma adimensional através do número de Strouhal, definido como:

$$St = \frac{f \cdot D}{U} \quad (3.2)$$

em que  $f$  é a frequência de desprendimento dos vórtices.

Conforme De Paula, 2013, para todo regime subcrítico,  $300 \leq Re < 1,5 \times 10^5$ , o número de Strouhal mantém-se em um valor aproximadamente constante de 0,21.

## 4 METODOLOGIA

Este trabalho tem como objetivo realizar um experimento em um canal hidráulico construído especialmente para o experimento, com o intuito de obter a representação visual do campo de escoamento tridimensional através dos cilindros, utilizando um circuito fechado de circulação de água à temperatura ambiente.

O estudo experimental aplicado neste trabalho, assim como no trabalho realizado por De Paula, 2008, consiste em analisar as trocas das esteiras larga e estreita provocadas pela passagem da água através de dois cilindros circulares dispostos lado a lado em duas posições – na vertical e na horizontal – efetuando-se um estudo comparativo do fenômeno da biestabilidade por meio da técnica de visualização de escoamento em um canal hidráulico, com o emprego da injeção de tinta.

Para a análise das flutuações de velocidade, utilizou-se o *software* Tracker (Tracker, 2016), uma ferramenta livre para estudo e modelagem de vídeos

### 4.1 Canal hidráulico

O canal hidráulico, projetado para o experimento deste estudo, teve como inspiração, o projeto do canal de circulação de água para experimentos de dinâmica de fluidos desenvolvido pelo Núcleo de Dinâmica e Fluidos (NDF) da Universidade de São Paulo.

Projetado para ser utilizado no Laboratório de Aplicações em Energia e Fenômenos de Transporte – LAEFT, exigiu adaptações em suas dimensões, para que se adequasse a bancada hidráulica já existente no local.

De acordo com Ássi *et al.*, 2005, o canal hidráulico é um importante instrumento de pesquisa, o qual possibilita testes de inúmeras aplicações em todo o campo da engenharia: automobilístico, aeronáutico, naval, oceânico, *offshore*, transporte de gás e óleo, entre outros.

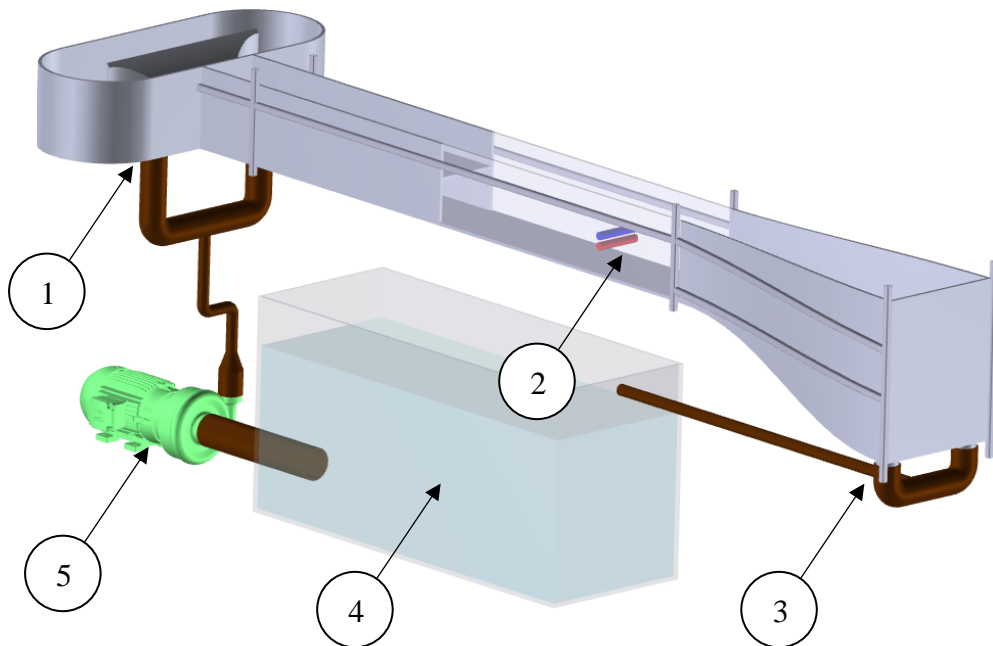
Um dos elementos mais importantes da estrutura do canal hidráulico foi a seção de testes, construída com o mesmo diâmetro hidráulico utilizado por De Paula, 2008, onde foram coletados os dados para a análise de resultados. Por essa razão, todos os elementos construtivos devem contribuir para a qualidade do escoamento. A montante da seção de testes há um tanque que serve como reservatório de água para que o escoamento, que se desloca para uma contração, tenha suas perturbações reduzidas. A contração do bocal na entrada da seção, reduz o nível de turbulência do escoamento proveniente do sistema de propulsão, acelerando o fluido até atingir a área da seção de teste – seção de área constante – tornando o escoamento desenvolvido em uma curta distância. Algumas especificações do canal hidráulico podem ser observadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Especificações do canal hidráulico de circulação de água.

Tipo de circuito	Fechado
Fluido de trabalho	Água
Dimensões da seção de teste	193 mm x 146 mm (largura x altura)
Vazão máxima	0,943 ℓ/s (0,000943 m <sup>3</sup> /s)
Sistema de propulsão	Bomba centrífuga Texius de ½ CV

Para a construção do canal hidráulico, utilizou-se chapas de alumínio. Após o corte de dobras dos componentes do canal, iniciou-se o processo de montagem utilizando as ferramentas e estrutura disponibilizadas pelo laboratório LETA. Para a união dos componentes, utilizou-se rebites e, para a vedação das uniões, cola (PU) e silicone. As conexões entre o canal e a bomba foram feitas utilizando-se encanamento de PVC de 50 mm de diâmetro. A tampa e a janela da seção de testes foram construídas com acrílico, de 10 mm de espessura.

Para suportar a pressão exercida pela água, foi necessária a construção de uma estrutura de contenção externa. Sobre a bancada, o canal foi disposto com uma inclinação de 2,5°, favorecendo o escoamento no sentido jusante. Uma ilustração esquemática do canal hidráulico realizada em CAD 3D é apresentada na Figura 4.1.1.



1. Entrada de água no canal hidráulico
2. Seção de testes com os cilindros circulares posicionados na horizontal
3. Retorno da água para o tanque de armazenamento
4. Tanque de armazenamento
5. Bomba centrífuga

Figura 4.1.1 – Modelo esquemático do canal hidráulico modelado em CAD 3D.

#### 4.2 Esteiras dos cilindros

Os cilindros circulares, utilizados no experimento, foram construídos com tubos de PVC de 25 mm de diâmetro externo e 146 mm de comprimento, fixados a dez diâmetros hidráulicos do último acidente.

Para uma representação visual do fenômeno da biestabilidade ao longo do escoamento, escolheu-se tinta nanquim colorida, diluída em água, a qual foi introduzida pelo interior dos cilindros de PVC através de mangueiras de 2 mm de diâmetro. Cada cilindro foi conectado a um reservatório de tinta com capacidade de 500 ml, aproximadamente 1 m acima do nível dos cilindros, para que houvesse energia potencial gravitacional suficiente para a liberação da tinta no escoamento.

A disposição das mangueiras no interior dos cilindros foi projetada de forma a evitar o ponto de estagnação, com os orifícios simétricos a este ponto, defasados  $60^\circ$  um em relação ao outro, voltados para montante do escoamento, como pode ser observado na Figura 4.2.1a. Na Figura 4.2.1b observa-se que para o controle da vazão da tinta, utilizou-se mangueiras dosadoras hospitalares.

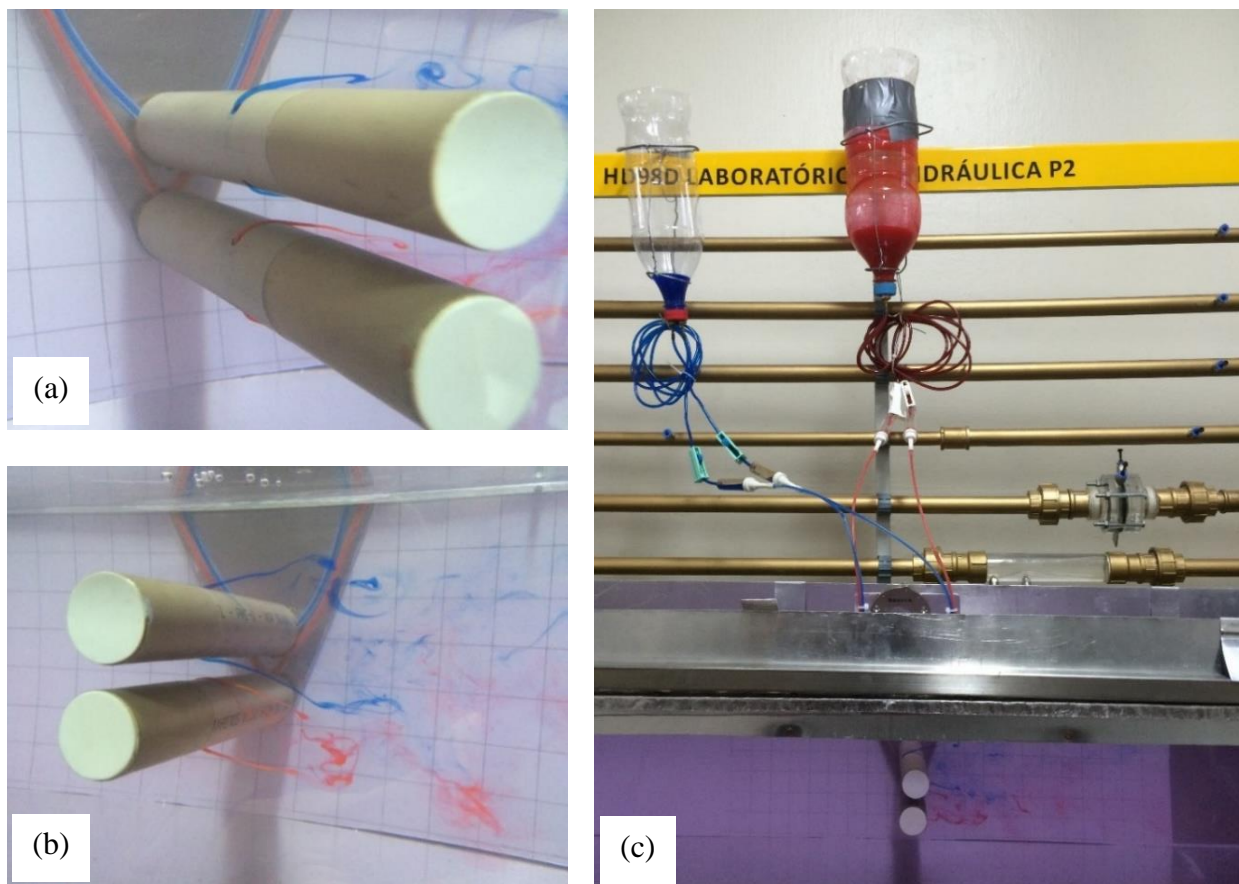


Figura 4.2.1 – (a) Vista frontal da saída de tinta nos cilindros; (b) Vista dos vórtices emanados pela tinta; (c) Reservatórios de tinta conectado as mangueiras dosadoras hospitalares.

No interior do canal hidráulico, inseriu-se uma placa de PVC com marcação quadriculada, de 20 mm de lado. A inserção da placa quadriculada de PVC foi necessária para a análise de resultados no *software* Tracker, visando fornecer um referencial das dimensões da seção de testes perante o escoamento.

Um estudo qualitativo da deflexão das linhas de corrente produzidas por três agulhas no escoamento principal, sem os cilindros, indicou que o canal possui escoamento uniforme em seu centro para a faixa de número de Reynolds utilizada. Também no estudo original de Ássi *et al.*, 2005, tanto simulações numéricas quanto experimentos foram realizados, evidenciando a uniformidade dos perfis de velocidade



### 4.3 Software Tracker

O *software* Tracker foi utilizado para a análise dos resultados coletados por vídeo. No *software*, posicionou-se a origem do plano cartesiano na extremidade de um dos cilindros conforme Figura 4.3.1. Fixou-se no eixo  $x$  positivo uma coordenada arbitrária, marcando as oscilações da esteira interna do cilindro superior, no eixo  $y$ . As trocas entre as esteiras larga e estreita foram marcadas pela variação entre o eixo  $y$  positivo e negativo. Para cada ponto marcado, os dados de  $x$  e  $y$  corresponderam, respectivamente, aos catetos adjacente e oposto do triângulo formado com a origem, possibilitaram o cálculo do ângulo de deflexão ( $\alpha$ ) da esteira interna do cilindro superior. Ângulo de deflexão ( $\alpha$ ) positivo representa a esteira azul como estreita e a esteira vermelha como larga. Já o ângulo de deflexão ( $\alpha$ ) negativo, representa a esteira azul como larga e a vermelha como estreita. Os vídeos apresentaram um total de aproximadamente 45.000 quadros e pontos foram coletados a cada 200 quadros.

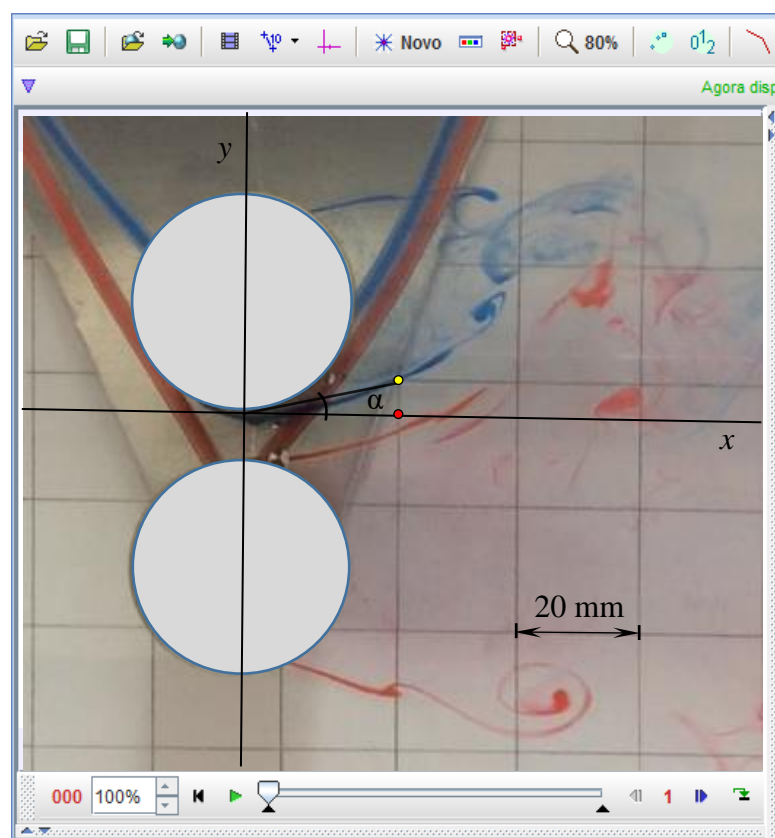


Figura 4.3.1 – Calibragem do plano cartesiano em relação ao fundo quadriculado utilizando o *software* Tracker. O ponto vermelho representa a coordenada do eixo  $x$  fixada e o ponto amarelo, as coordenadas que oscilaram entre valores positivos e negativos do eixo  $y$ .

## 5 RESULTADOS

Foram coletados dados para duas posições distintas dos cilindros circulares: uma em que os cilindros encontravam-se na vertical e outra em que os cilindros encontravam-se na horizontal. Mediu-se o tempo de alternância entre as esteiras larga e estreita, mantendo o número de Reynolds fixo em  $Re = 5,5 \times 10^3$ . O valor do número de Reynolds foi calculado de acordo com a Equação 3.1 e as incertezas associadas são apresentadas no Apêndice A.



## 5.1 Validação do canal hidráulico

Com o intuito de verificar se a técnica de visualização de escoamento proposta produz resultados confiáveis, alguns testes preliminares foram realizados. O teste consistiu na visualização do escoamento sobre um único cilindro, para diferentes números de Reynolds, e os resultados foram comparados com os regimes esquemáticos de desprendimento de vórtices caracterizados por Pastò, 2008 (Figura 5.1.1). A comparação direta entre estas imagens mostra uma forte concordância entre os resultados, o que valida a técnica experimental de visualização de escoamento implementada.

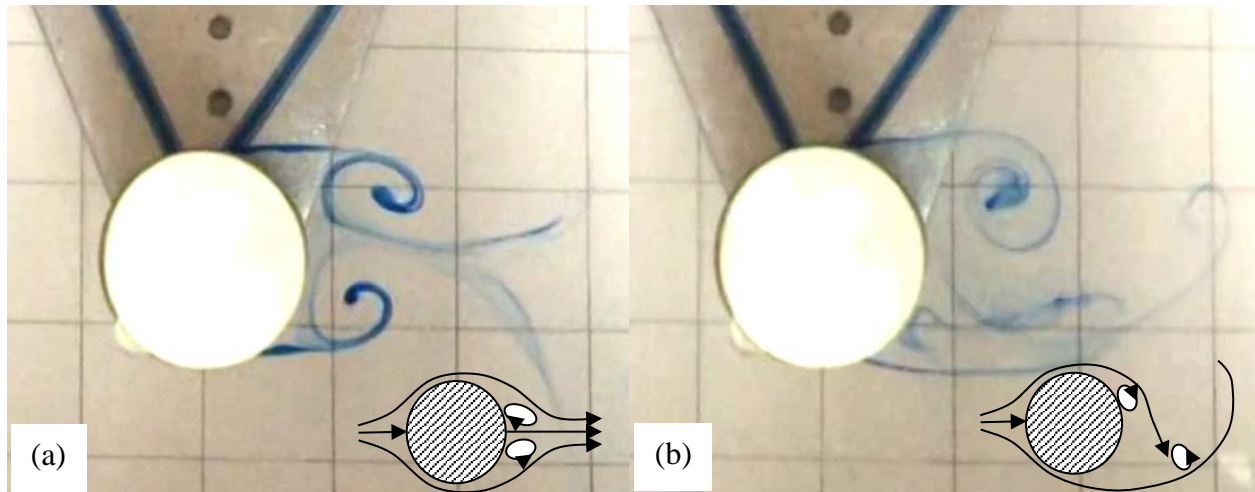


Figura 5.1.1 – Visualização do escoamento ao redor de um cilindro em comparação com os regimes esquemáticos de desprendimento de vórtice caracterizados por Pastò, 2008.  
(a)  $5 \leq Re < 45$ ; (b)  $300 \leq Re < 1,5 \times 10^5$ .

## 5.2 Escoamento biestável

Para a coleta de dados deste experimento foram realizadas diversas tomadas de vídeo com a câmera posicionada de forma a captar as imagens dos cilindros em vista superior. Foram realizadas tomadas de vídeo em que os cilindros circulares se encontravam na posição vertical e tomadas em que os cilindros se encontravam na posição horizontal. Todas as tomadas de vídeo tiveram duração entre 20 e 25 minutos (aproximadamente 45.000 quadros). As imagens foram editadas e posteriormente analisadas com o *software* Tracker.

Deu-se uma atenção maior para a observação dos cilindros circulares colocados na posição horizontal, visto que, não se encontrou material com esse enfoque na literatura.

A Figura 5.2.1 mostra o resultado da visualização para as duas posições estudadas. Percebe-se a formação da esteira larga atrás de um dos cilindros e da esteira estreita atrás do outro. As esteiras alternaram-se entre os cilindros em intervalos de tempo aleatórios, conforme observado também no trabalho de De Paula, 2008.

Os resultados para ambas as posições – cilindros dispostos na posição vertical ou na posição horizontal – foram similares, com padrões randômicos nas trocas entre as esteiras larga e estreita ao longo das tomadas de vídeo. Tal fato já era esperado conforme relatos da literatura, não havendo relação com o tempo de permanência entre os modos das esteiras.

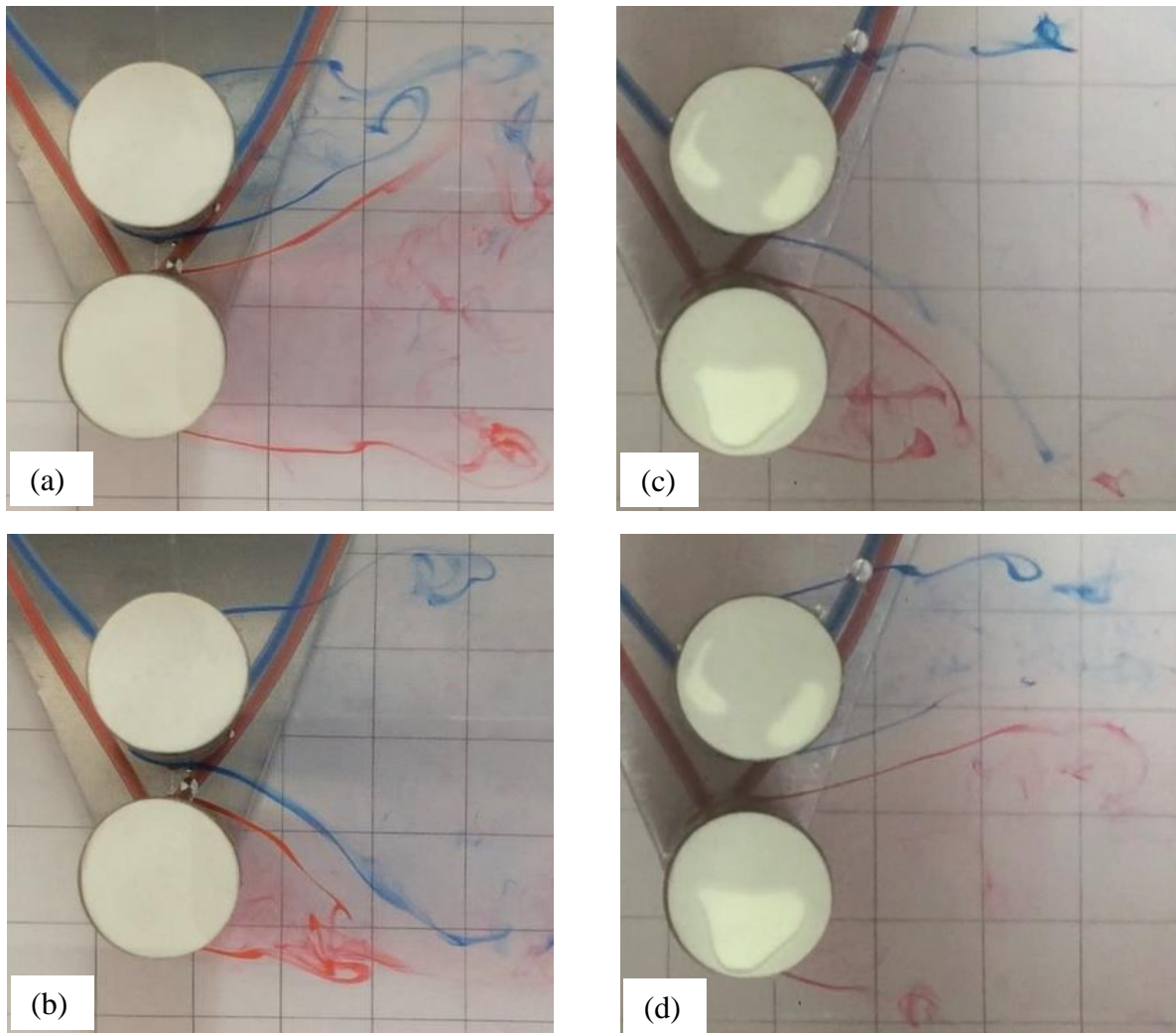


Figura 5.2.1 – Visualização do escoamento através dos cilindros dispostos lado a lado, em vista superior. Razão  $P/D = 1,26$  e  $Re = 5,5 \times 10^3$ . (a) e (b) – Troca entre as esteiras dos cilindros posicionados na horizontal; (c) e (d) – Troca entre as esteiras dos cilindros na vertical.

A partir dos dados extraídos com o *software* Tracker, foi possível plotar os gráficos de cada tomada de vídeo, o que possibilitou uma análise qualitativa entre os dados encontrados neste trabalho e os dados encontrados no trabalho realizado por De Paula, 2008.

Os resultados deste trabalho podem ser observados na Figura 5.2.1. Na Figura 5.2.1a, o ângulo de deflexão ( $\alpha$ ) encontra-se negativo quase que na totalidade do tempo, ou seja, teve-se a esteira azul larga e a esteira vermelha estreita, ocorrendo apenas uma pequena troca entre elas entre  $800 < t < 1000$  s. Na Figura 5.2.1b, percebemos duas trocas principais, uma logo no início e outra entre  $900 < t < 1000$  s. Na Figura 5.2.1c, há apenas uma troca bem definida entre  $500 < t < 600$  s. Já na Figura 5.2.1d, o ângulo de deflexão ( $\alpha$ ) manteve-se positivo ao longo de todo o tempo, não havendo trocas entre as esteiras.

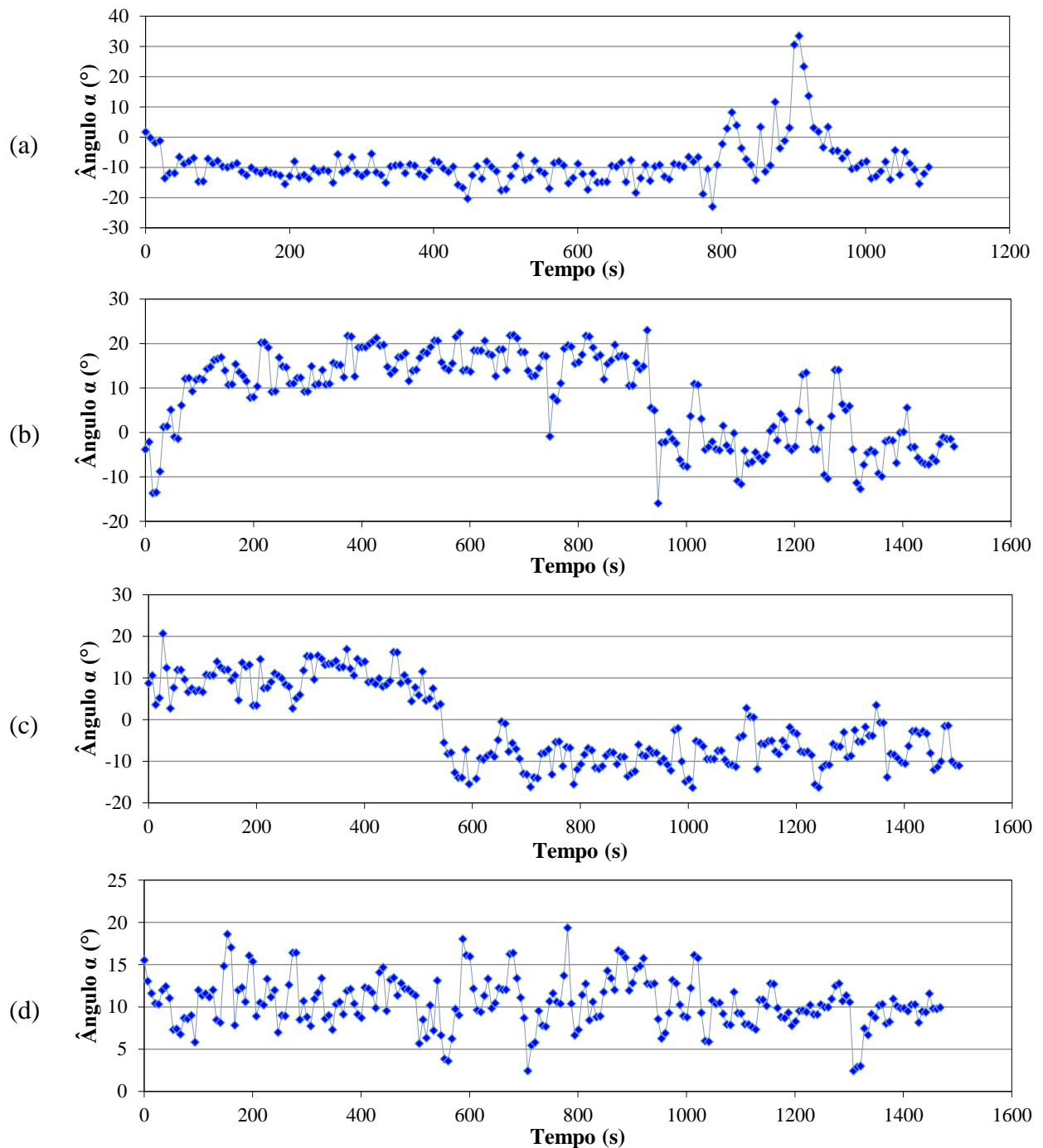


Figura 5.2.1 – (a) Cilindros na vertical; (b) Cilindros na horizontal com mais de duas trocas; (c) Cilindros na horizontal com uma troca; (d) Cilindros na horizontal sem trocas.

De Paula, 2008, apresentou resultados baseados na obtenção das velocidades médias e das flutuações de velocidade do ar – experimento realizado em canal aerodinâmico, com área de seção teste de 193 x 146 mm – através da técnica de anemometria de fio quente. Os sinais filtrados por transformada discreta de ondaletas apresentam um comportamento semelhante quanto a flutuação de velocidade ao longo do tempo, em relação aos resultados apresentados neste trabalho, conforme pode ser observada na Figura 5.2.3.

Neste trabalho, os resultados se dão através da análise da variação do ângulo de deflexão ( $\alpha$ ) da esteira interna do cilindro superior ao longo do tempo. Olinto *et al.*, 2009, também realizaram um estudo do escoamento no interior de um banco de tubos, referente ao ângulo de

inclinação com relação à direção axial. O ângulo de deflexão ( $\alpha$ ) da esteira interna do cilindro superior (a direita do escoamento olhando de jusante), é dado conforme Figura 5.2.2.

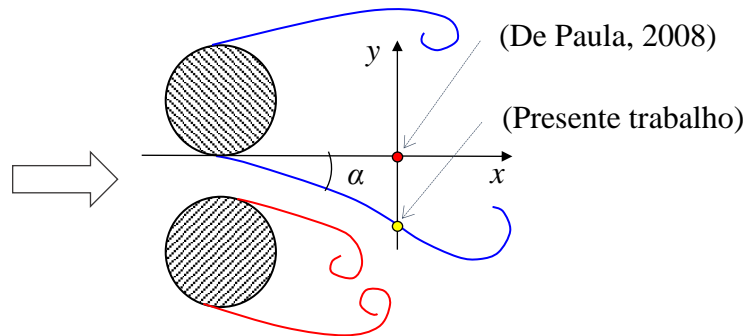


Figura 5.2.2 – Desenho esquemático dos cilindros circulares, em vista superior. O ponto vermelho mostra onde De Paula, 2008, posicionou o anemômetro de fio quente, e o ponto amarelo onde o ângulo de deflexão ( $\alpha$ ) da esteira interna do cilindro superior, foi analisado.

O ângulo ( $\alpha$ ) está diretamente relacionado com as flutuações de velocidade das esteiras dos cilindros. Se  $\alpha$  é positivo, então a esteira do cilindro superior é estreita e a esteira do cilindro inferior é larga, sendo o contrário para o caso em que  $\alpha$  é negativo. No fenômeno da biestabilidade, quanto menor (mais estreita) for a esteira de vórtices emanada, maior a velocidade, e vice-versa.

A comparação entre o trabalho de De Paula, 2008, e o presente trabalho se dá de maneira qualitativa, devido às diferenças nos números de Reynolds, na metodologia empregada e por se tratar de escoamentos com fluidos diferentes. Porém, a comparação qualitativa apresentada possui resultados condizentes.

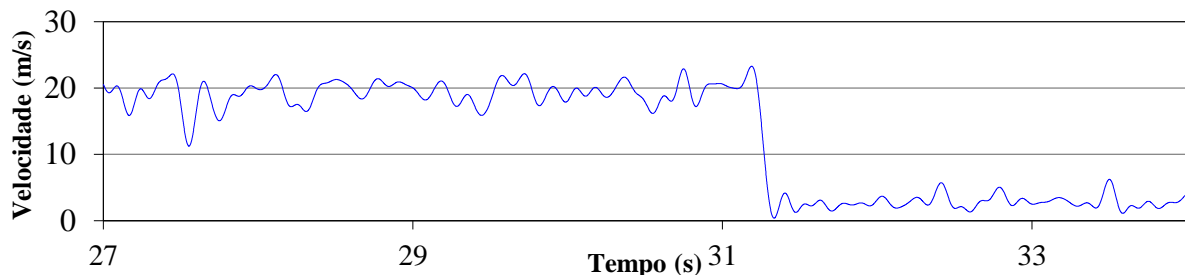


Figura 5.2.3 – Sinal filtrado por transformada discreta de ondaleta. Adaptado de De Paula, 2008.

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um estudo experimental a respeito do fenômeno da biestabilidade em escoamento turbulento cruzado sobre dois cilindros circulares dispostos lado a lado, nas posições vertical e horizontal. Os experimentos foram realizados com número de Reynolds de  $Re = 5,5 \times 10^3$ . A razão de espaçamento entre os cilindros foi de  $P/D = 1,26$ .

Foi dada especial atenção para a ocorrência do fenômeno em que os cilindros circulares foram dispostos na posição horizontal. Com imagens nítidas das esteiras formadas em cada cilindro e a ocorrência do fenômeno biestável, a observação do escoamento ao redor dos cilindros circulares através da injeção de tinta nanquim diluída em água mostrou-se muito eficiente. O fenômeno da biestabilidade pôde ser observado em ambas as posições, tanto na vertical quanto na horizontal, onde foi possível se observar as flutuações entre as esteiras larga e estreita.

Realizou-se uma comparação qualitativa da flutuação de velocidade do escoamento (De Paula, 2008) com a variação do ângulo de deflexão estudada no presente trabalho, apresentando

boa concordância entre os resultados. Os resultados obtidos neste experimento, assim como no trabalho realizado por De Paula, 2008, demonstram um comportamento não-estacionário do fenômeno. Não se observou relação entre as trocas das esteiras larga e estreita e o tempo de permanência de cada uma delas ao longo das tomadas de vídeo realizadas.

O software Tracker, utilizado neste trabalho para análise do ângulo de deflexão do escoamento, se mostrou adequado e de fácil utilização em estudos de visualização.

### 6.1 Sugestões de trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, sugere-se que sejam realizadas análises com linhas de visualização que não poluam a água, como a utilização da técnica de bolhas de hidrogênio, por exemplo, e de filmagens com maiores durações. Uma análise dimensional pode ser realizada para determinar uma frequência característica – ou pseudofrequência – das trocas entre os modos do escoamento, e relacioná-los para fluidos de trabalho distintos (ar e água). Com isso, pode ser possível determinar uma escala de comprimento da biestabilidade em ambos os canais – aerodinâmico e hidráulico.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alam, Md. M.; Moriya, M.; Sakamoto, H. “**Aerodynamic characteristics of two side-by-side circular cylinders and application of wavelet analysis on the switching phenomenon**”, *Journal of Fluids and Structures*, v.18, p.325-346, 2003.

Alam, Md. M; Zhou, Y.; Wang, X. W. “**The Wake of two side-by-side square cylinders**”, *J. Fluid Mech.*, v.669, p.432-471, 2011.

Ássi, G. R. S., “**Estudo experimental do efeito de interferência no escoamento ao redor de cilindros alinhados**”, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 2005.

Bearman, P. W.; Wadcock, A. J., The Interaction between a Pair of Circular Cylinders Normal to a Stream, **Journal of Fluid Mechanics**, v. 61, Part 3, p. 499-511. 1973.

Blevins, R. D. “**Flow-induced vibration**”, Second Edition, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.

Chen, W.; Ji, C.; Xu, W.; Liu, S.; Campbell, J. “**Response and wake patterns of two side-by-side elastically supported circular cylinders in uniform laminar cross-flow**”, *Journal of Fluids and Structures*, v.55, p.218-236, 2015.

De Paula, A. V. “**Estudo sobre o fenômeno da biestabilidade de escoamentos turbulentos em bancos de tubos de arranjo triangular**”, Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica, PROMEC-UFRGS, Porto Alegre, RS. 2008.

De Paula, A. V. “**Determinação de parâmetros que caracterizam o fenômeno da biestabilidade em escoamentos turbulentos**”, Tese de Doutorado em Engenharia, PPGEM-UFRGS, Porto Alegre, RS. 2013.

Fox, R. W.; Pritchard, P. J.; McDonald, A. T.; “**Introdução à Mecânica dos Fluidos**”, LTC, Brasil, 7ª edição, 2012.

Lam, K.; Li, J. Y.; So, R. M. C. “**Force coefficients and Strouhal numbers of four cylinders in cross flow**”, *Journal of Fluids and Structures*, v.18, p.305-324, 2003.

Miyata, H.; Shikazono, N.; Kanai, M. “**Forces on a circular cylinder advancing steadily beneath the free-surface**”, *Department of Naval Architecture and Ocean Engineering*, v.17, p.81-104, 1990.

Olinto, C. R. “**Estudo experimental das características do escoamento turbulento nas primeiras fileiras de bancos de tubos**”, Tese de Doutorado, PROMEC-UFRGS, Porto Alegre, RS, 2005.

Olinto, C. R. ; Indrusiak, M. L. S. ; Endres, L. A. M. ; Möller, S. V. **Experimental study of the characteristics of the flow in the first rows of tube banks**. *Nuclear Engineering and Design* , v. 239, p.2022-2034, 2009.

Pastò, S. “**Vortex-induced vibrations of a circular cylinder in laminar and turbulent flows**”, *Journal of Fluids and Structures*, v.24, p.977-993, 2008.

Ribeiro, P. A. R. “**Desprendimento de vórtices e controle em esteira de cilindros por simulação numérica direta**”, Dissertação de Mestrado, IPH-UFRGS, Porto Alegre, RS. 2002.

Sumner, D.; Wong, S. S. T.; Price, S. J.; Païdoussis, M. P. “**Fluid Behavior of side-by-side circular cylinders in steady cross-flow**”, *Journal of Fluids and Structures*, v.13, p.309-338. 1999.

Silveira, R. S. “**Estudo experimental do efeito da razão de bloqueio em canal aerodinâmico sobre o número de Strouhal e o fenômeno da biestabilidade no escoamento em cilindros**”, Dissertação de Mestrado, PROMEC-UFRGS, Porto Alegre, RS. 2011.

Tracker – Video Analysis and Modeling Tool, *Open Source Physics*, versão 4.92 de 23 de janeiro de 2016, disponível em [physlets.org/tracker](http://physlets.org/tracker), 2016

Williamson, C. H. K. “**Vortex Dynamics in the cylinder wake**”, *Annual Reviews Fluid. Mech.*, v.28, p.477-539, 1996.

Xiao-hui, GUO.; Jian-zhong, LIN.; Cheng-xu, TU.; Hao-li, WANG. “**Flow past two rotating circular cylinders in a side-by-side arrangement**”, *Journal of Hydrodynamics*, v.21, p.143-151, 2009.

Yoon, H. S.; Hwan Chun, H.; Hu Kim, J.; Ryong Park, I. L. “**Flow characteristics of two rotating side-by-side circular cylinder**”, *Computers & Fluids*, v.38, p.466-474, 2009.

Zdravkovich, M. M. “**Flow induce oscilations of two interfering circular cylinders**”, *Journal of Sound and Vibration*, v.101, p.511-521, 1985.

Zdravkovich, M. M. “**Review of interference-induced oscillations in flow past two parallel circular cylinders in various arrangements**”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v.28, p.183-200, 1988.

Zdravkovich, M.M, 2003, **Flow arround circular cylinders, Vol 2: Applications**, Oxford Science Publications, New York, 1264 p.

## APÊNDICE A - INCERTEZAS

Incerteza no Número de Reynolds:

De acordo com Fox *et al.*, 2012, as medições empregadas para calcular o resultado  $R$ , possuem erros que se propagam no cálculo de  $R$  através das medições das variáveis independentes,  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , em que  $R = R(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

Para estimar o intervalo de incerteza no resultado do número de Reynolds, calculado pela equação 3.1, foi utilizada a Equação A.1 retirada de Fox *et al.*, 2012.

$$u_{R_i} = \frac{x_i}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial x_i} \cdot u_{x_i} \quad (\text{A.1})$$

onde  $u_{R_i}$  é o intervalo de incerteza relativa,  $x_i$  é a variável independente,  $R$  é o resultado a ser medido e  $u_{x_i}$  é a incerteza relativa da variável independente.

A vazão em massa de água fluindo através do canal foi determinada coletando-a em um recipiente.

A vazão em massa foi calculada a partir da massa líquida coletada dividida pelo intervalo de tempo,

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (\text{A.2})$$

em que  $\Delta m = m_f - m_e$ . Massa do recipiente cheio,  $m_f$ , e massa do recipiente vazio,  $m_e$ .

As incertezas relativas nas quantidades medidas são:

$$u_m = \pm \frac{200 \text{ g}}{20000 \text{ g}} = \pm 0,01$$

$$u_{\Delta t} = \pm \frac{0,2 \text{ s}}{21,21 \text{ s}} = \pm 0,00943$$

A incerteza relativa no valor medido da massa líquida será:

$$u_{\dot{m}} = \pm \left[ \left( \frac{\Delta m}{m} \frac{\partial \dot{m}}{\partial \Delta m} u_{\Delta m} \right)^2 + \left( \frac{\Delta t}{m} \frac{\partial \dot{m}}{\partial \Delta t} u_{\Delta t} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Substituindo os termos já resolvidos na equação, vem:

$$u_{\dot{m}} = \pm \left\{ [(1)(\pm 0,000001)]^2 + [(-1)(\pm 0,00943)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{\dot{m}} = \pm 0,0137$$

A incerteza relativa no diâmetro é estimada como:

$$u_d = \pm \frac{0,05mm}{25,00mm} = \pm 0,002$$

A viscosidade da água depende da temperatura, estimada em  $T = 24 \pm 0,5^\circ\text{C}$ . Segundo Fox *et al.*, 2012, um modo de estimar a incerteza relativa na temperatura seria da seguinte maneira:

$$u_{\mu(T)} = \pm \frac{\delta\mu}{\mu} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{d\mu}{dT} (\pm\delta T) \quad (\text{A.3})$$

onde  $T$  é a temperatura.

A derivada pode ser estimada a partir de dados tabulados de viscosidade perto da temperatura nominal considerada de  $24^\circ\text{C}$ . Assim temos:

$$\frac{d\mu}{dT} \approx \frac{\Delta\mu}{\Delta T} = \frac{\mu(25^\circ\text{C}) - \mu(23^\circ\text{C})}{(25 - 23)^\circ\text{C}} = (0,000890 - 0,000933) \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \times \frac{1}{2^\circ\text{C}}$$

$$\frac{d\mu}{dT} = -2,15 \times 10^{-5} \text{Ns}/(\text{m}^2^\circ\text{C})$$

Segue-se, da Equação A.2, que a incerteza na viscosidade devida à temperatura é:

$$u_{\mu(T)} = \frac{1}{0,000911} \frac{\text{m}^2}{\text{Ns}} \times -2,15 \times 10^{-5} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2^\circ\text{C}} \times (\pm 0,5^\circ\text{C})$$

$$u_{\mu(T)} = \pm 0,0118$$

Os próprios dados tabulados de viscosidade também têm alguma incerteza, segundo Fox *et al.*, 2012, ela pode ser de  $\pm 1,0\%$ , então uma estimativa para a incerteza relativa resultante na viscosidade será:

$$u_{\mu(T)} = \pm [(\pm 0,01)^2 + (\pm 0,0118)^2]^{1/2} = \pm 0,0155$$

As incertezas na velocidade, diâmetro do tubo e viscosidade, necessárias para calcular o número de Reynolds, são agora conhecidas. As derivadas parciais requeridas, determinadas a partir da Equação 3.1, são:

$$\frac{\dot{m}}{\text{Re}} \frac{\delta \text{Re}}{\delta \dot{m}} = \frac{\dot{m}}{\text{Re}} \frac{4}{\pi \mu D} = \frac{\text{Re}}{\text{Re}} = 1$$

$$\frac{\mu}{\text{Re}} \frac{\delta \text{Re}}{\delta \mu} = (-1) \frac{\mu}{\text{Re}} \frac{4 \dot{m}}{\pi \mu^2 D} = -\frac{\text{Re}}{\text{Re}} = -1$$

$$\frac{D}{\text{Re}} \frac{\delta \text{Re}}{\delta D} = (-1) \frac{D}{\text{Re}} \frac{4 \dot{m}}{\pi \mu D^2} = \frac{\text{Re}}{\text{Re}} = -1$$

Substituindo na Equação A.1, obtém-se:





A construção do canal hidráulico ocorreu nos laboratórios LETA e LAEFT, conforme Figura B.3.



Figura B.3 Imagens do processo construtivo do canal hidráulico; (a) Marcação das chapas para serem cortadas; (b) Conexões de PVC; (c) Bocal de entrada de água do canal; (d) Teste hidrostático após termino da construção; (e) Disposição final do canal hidráulico da bancada do laboratório LAEFT.