

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

VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO AO REDOR DE CILINDROS CIRCULARES
POSICIONADOS LADO A LADO EM CANAL HIDRÁULICO UTILIZANDO A
TÉCNICA DE GERAÇÃO DE BOLHAS DE HIDROGÊNIO

por

Willian Righi Assis

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, Novembro de 2016



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO AO REDOR DE CILINDROS CIRCULARES
POSICIONADOS LADO A LADO EM CANAL HIDRÁULICO UTILIZANDO A
TÉCNICA DE GERAÇÃO DE BOLHAS DE HIDROGÊNIO

por

Willian Righi Assis

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: **Energia e Fenômenos de Transporte.**

Orientador: Prof. Alexandre Vagtinkski de Paula

Comissão de Avaliação:

Prof. Sérgio Frey

Prof. Sérgio Möller

Prof. Thamy Hayashi

Porto Alegre, Novembro de 2016.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer e dedicar este trabalho a minha família e amigos, em especial a minha irmã, a qual sempre me apoiou em todas as decisões tomadas e a minha namorada, por ter paciência com este tempo de ausência. Aos colegas do LETA, por sempre estarem disponíveis em ajudar. Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS, em especial ao Professor Alexandre Vagtinski de Paula e à professora Thamy Cristina Hayashi pelas críticas e sugestões, as quais fizeram com que este trabalho fosse finalizado. Aos colegas da empresa Fitesa pela paciência ao longo deste semestre.

ASSIS, W. R. **Visualização de escoamento ao redor de cilindros circulares posicionados lado a lado em canal hidráulico utilizando a técnica de geração de bolhas de hidrogênio**, 2016. 24 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 consiste na visualização de escoamento, através do uso da técnica de geração de bolhas de hidrogênio em canal hidráulico aberto, ao redor de cilindros circulares posicionados lado a lado com uma razão de espaçamento de $P/D = 1,26$, onde P é a distância entre os centros dos cilindros e D é o diâmetro dos cilindros. O experimento foi realizado no LAEFT – Laboratório de Aplicações em Energia e Fenômenos de Transporte (UFRGS), através de um canal hidráulico já existente. A motivação para este estudo é de desenvolver a técnica de geração de bolhas de hidrogênio, no LAEFT, em comparação com a de injeção de tinta, evitando a troca d'água do reservatório com maior frequência. Usou-se a água como fluido de trabalho e dois cilindros de 19 mm de diâmetro foram posicionados na seção de teste do canal. Um circuito foi montado através de uma tensão elétrica, capacitor e ponte de diodo a fim se obter uma corrente elétrica contínua através de um fio de 0,3 mm de diâmetro de cobre para gerar bolhas de hidrogênio em água. A validação da técnica foi realizada para um número de Reynolds de 300, e as imagens obtidas foram para número de Reynolds de 367. A captura e a análise de imagens foram feitas através de uma câmera digital e do *software* Tracker, respectivamente. Como resultado, conseguiu-se verificar as diferenças do tempo de troca de modo da esteira interna do cilindro a direita do escoamento visto de jusante e comparar as características, assim como os pontos positivos e negativos, da presente técnica em relação à de injeção de tinta, realizado por Destefani, 2016.

PALAVRAS-CHAVE: visualização de escoamento, bolhas de hidrogênio, troca de modos de esteira.

ASSIS, W.R. **Flow visualization around circular cylinders placed side-by-side in a hydraulic channel using hydrogen bubble generation technique**, 2016. 24 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 consists of flow visualization around circular cylinders placed side-by-side through the use of hydrogen bubble generation technique in an open hydraulic channel. The aspect ratio used was $P/D = 1,26$, where P is the distance between the centers of the cylinders and D is the diameter of the cylinders. The experiment was done at LAEFT – Laboratory of Applications in Energy and Transport Phenomena (UFRGS), through an existing hydraulic channel. The motivation of this study is to develop the bubble hydrogen technique, at LAEFT, comparing with ink injection technique, avoiding changing the water in the channel with a high frequency. Water was used as working fluid and two 19 mm diameter cylinders were positioned in the test section of the channel. A circuit was assembled using an electric voltage, capacitor and diode bridge in order to obtain a continuous electric current through a 0,3 mm diameter cooper wire to generate hydrogen bubble in water. The validation of the technique was performed for a Reynolds number of 300, and the images obtained were for Reynolds number of 367. The capture and analysis of the images were done through a digital camera and the software Tracker, respectively. As results, it was possible to verify the differences in the time of the switching wake mode of the inner wake of the right cylinder seen from the downstream and compare the characteristics as well as the positives and negatives aspects present in this work over the ink injection technique, performed by Destefani, 2016.

KEYWORDS: Flow visualization, hydrogen bubble, switching wake mode.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Justificativa.....	1
1.3 Objetivo.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 Biestabilidade e desprendimento de vórtices.....	2
2.2 Visualização do escoamento por técnica de bolhas de hidrogênio	3
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
4. METODOLOGIA.....	6
4.1 Funcionamento e Geometria do Canal Hidráulico	6
4.2 Técnica de geração de bolhas de hidrogênio	7
4.3 Iluminação da seção de testes	8
4.5 Tomadas experimentais.....	9
5. RESULTADOS	10
6. CONCLUSÃO.....	13
6.1 Sugestões de trabalhos futuros	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
APÊNDICE A - INCERTEZAS	16
APÊNDICE B – ESQUEMA - GERAÇÃO DE BOLHAS DE HIDROGÊNIO.....	19
ANEXO A - CONSTRUÇÃO DO CANAL HIDRÁULICO	20

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Visualização de escoamento é uma ferramenta muito útil nos estudos de mecânica dos fluidos, tendo em vista sua facilidade para compreender e estudar fenômenos já existentes em estruturas na natureza, como por exemplo, fenômenos de biestabilidade.

Para tanto, um dos casos mais comuns e estudados é o de cilindros circulares através de um escoamento transversal. Alguns exemplos desta aplicação na engenharia referem-se a tubulações industriais de petróleo, trocadores de calor, gasodutos, linhas de transmissão de energia e tubos em geral.

Assim, entende-se a importância da pesquisa do escoamento através destes corpos, a fim de entender o seu comportamento ao longo do tempo.

1.2 Justificativa

Segundo Alam *et al.*, 2003, com o estudo do escoamento através de dois tubos alinhados, observa-se esteiras de vórtices saindo entre os dois cilindros e alinhando-se para um dos lados dos tubos. Com o tempo, a direção das esteiras muda inesperadamente e começa a percorrer outra direção, formando o fenômeno conhecido como biestabilidade.

De Paula, 2008, estudou o escoamento em um banco de tubos posicionados também lado a lado, para espaçamento de $P/D = 1,26$ e $P/D = 1,6$. Como resultado, verificou-se que a troca de modos é cerca de 30 vezes mais rápida para o segundo espaçamento em comparação com o primeiro, respectivamente.

Com o objetivo de entender este efeito fenomenológico de troca de esteiras de vórtices através de cilindros espaçados, usam-se técnicas de visualização devido à sua facilidade em se obter dados mensuráveis de escoamentos pela captura de imagens. Esta é a grande vantagem e justificativa em se utilizar tais técnicas. Para tanto, o uso de geração de bolhas de hidrogênio torna-se extremamente útil, tendo em vista que uma vez escolhido o material do fio e o fluido do canal, a geração de bolhas é realizada através da variação da voltagem elétrica no sistema. Outro ponto a se destacar é que tal técnica não suja a água do canal hidráulico, proporcionando um tempo de trabalho maior, sem a troca d'água, em comparação com o da técnica de injeção de tinta.

1.3 Objetivo

O objetivo geral consiste no experimento de visualização de regiões com maior densidade de bolhas, através da técnica de geração de bolhas de hidrogênio, ao redor de cilindros circulares presentes em um canal hidráulico em regime laminar. O objetivo específico do presente trabalho consiste em:

- validar a técnica de bolhas de hidrogênio para um único cilindro, em escoamento cruzado;
- verificar as diferenças do tempo de troca de modo das esteiras dos cilindros, através da análise de imagens usando o *software* Tracker;
- comparar as características, assim como os pontos positivos e negativos, da presente técnica em relação à de injeção de tinta, com dois cilindros em uma razão de espaçamento de $P/D = 1,26$ realizado por Destefani, 2016.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Biestabilidade e desprendimento de vórtices

Segundo Sumner *et al.*, 1999, escoamentos transversais através de cilindros posicionados lado a lado podem apresentar esteiras de vórtices de diferentes modos, caracterizando o que se conhece hoje por efeito biestável (Figura 2.1.1). Este efeito depende basicamente do diâmetro dos cilindros (D) e da distância entre seus centros (P). Para tanto, há quatro opções de estudos destes casos:

- 1) $P/D = 1$: neste caso, os cilindros ficam lado a lado comportando-se como um único corpo, gerando menos desprendimentos de vórtices, pois há o aumento de sua camada cisalhante;
- 2) $1 < P/D < 1,2$: neste segundo caso, observa-se uma frequência de desprendimentos dos vórtices muito próxima a do caso em que $P/D = 1$ devido ao fato de os cilindros ainda se comportarem como se fossem um único corpo. O desprendimento de vórtices ocorre na camada externa dos tubos e não na fenda entre eles;
- 3) $1,2 < P/D < 2,2$: para este terceiro caso, tem-se a formação de uma esteira de vórtice larga e outra estreita atrás dos cilindros. Este comportamento é associado à frequência de desprendimento de vórtices, ou seja, onde há frequências baixas de desprendimento temos associado uma larga esteira e onde há frequências altas de desprendimento, temos associado uma esteira estreita. O fluido tende a se deslocar para o lado onde há esteira estreita de vórtices;
- 4) $P/D > 2,2$: para este último caso, temos uma grande relação de P/D e os cilindros comportam-se como corpos sem interação entre si.

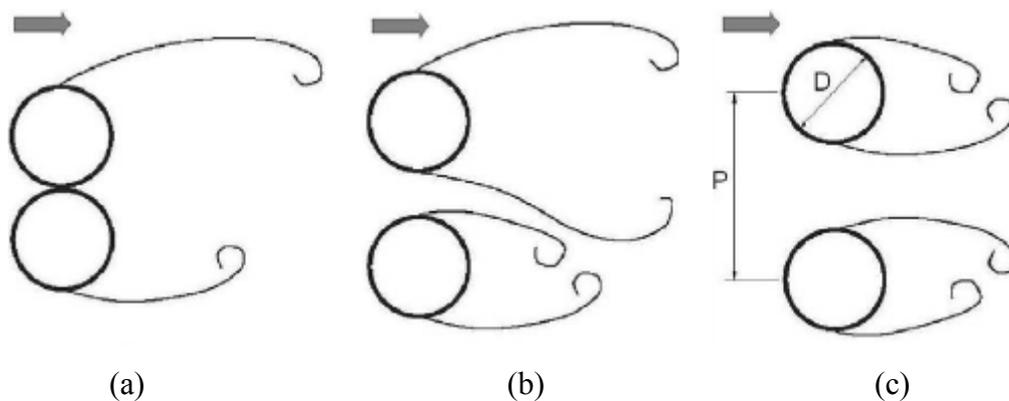


Figura 2.1.1 – Diferentes modos de escoamento para a geometria de dois tubos lado a lado: (a) cilindros em contato, (b) relação P/D intermediária, (c) grande relação P/D .

Adaptado de Olinto, *et al.*, 2005.

Olinto *et al.*, 2005, estudaram o fenômeno da biestabilidade através de dois tubos alinhados lado a lado com $Re = 3 \times 10^4$. Usando a técnica de anemometria de fio quente, concluíram que as esteiras de vórtices são geradas independentes em cada cilindro. Se os vórtices estiverem em fase, as esteiras tendem a crescer com o tempo. Além disso, se a razão de espaçamento P/D for maior que do que 1, a esteira resultante irá permanecer atrás de um dos tubos, até que haja uma nova desestabilização no escoamento e o processo recomeça.

De Paula, 2008, também estudou o comportamento de escoamentos transversais em dois cilindros, dispostos lado a lado, usando razão de espaçamento de $P/D = 1,6$ e $Re = 7,5 \times 10^3$. Como resultado, observa-se a formação de uma esteira larga e outra estreita

atrás dos tubos (cores azul e vermelho na figura 2.1.2 (a) respectivamente). Após certo instante, esta ordem é invertida, conforme visto na figura 2.1.2 (b).

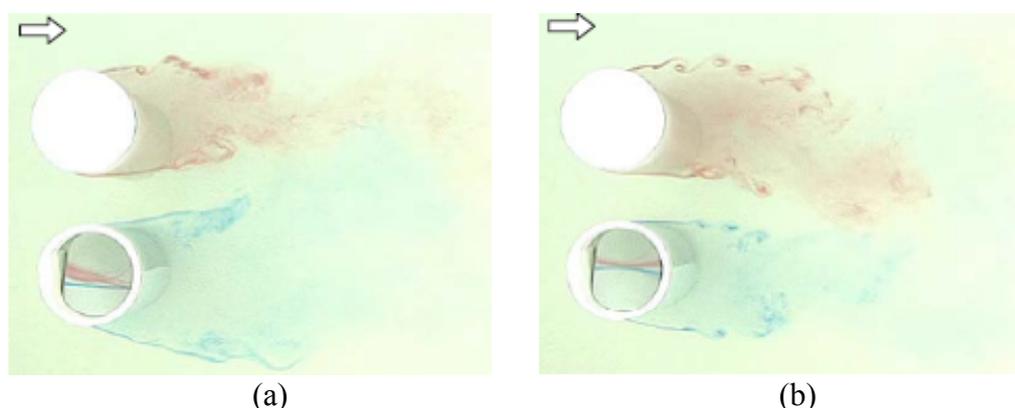


Figura 2.1.2 - Visualização de escoamento em dois cilindros lado a lado, usando a técnica de injeção de tinta. De Paula, 2008.

2.2 Visualização do escoamento por técnica de bolhas de hidrogênio

A técnica de geração de bolhas de hidrogênio consiste na eletrólise da água. Há a passagem de uma corrente elétrica em um meio aquoso, como por exemplo, água e sal ou água e base. Para tanto, é necessário ter-se um cátodo e um ânodo para gerar a dissociação dos íons. Cátodo consiste no eletrodo positivo no qual ocorre redução e, combinado com água, faz a liberação de um átomo de hidrogênio. Ânodo consiste no eletrodo negativo que sofre a oxidação, ou seja, o recebimento de moléculas de oxigênio.

De acordo com Wolfgang Merzkirch, 2009, usando um fio que gere uma linha contínua de bolhas, não se consegue informações precisas em escoamentos mais complexos, devido à sobreposição das linhas de correntes. Por isso, a figura 2.2.1 (a) e (b) apresenta a técnica de isolamento de partes dos fios e a técnica de dobramento do fio, respectivamente, para que as bolhas consigam sair espaçadas.

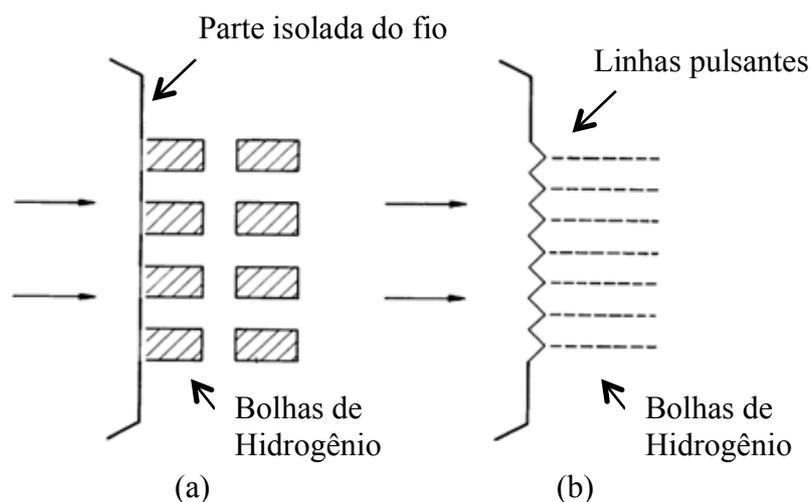


Figura 2.2.1 – Duas técnicas de geração de bolhas de hidrogênio. Adaptado de Wolfgang Merzkirch, 2009.

Também de acordo com Wolfgang Merzkirch, 2009, o tamanho do diâmetro da bolha de hidrogênio está associado ao tamanho do diâmetro do fio usado, condutividade do fluido e

na tensão e corrente elétrica aplicada. Geralmente usam-se fios de platina, aço inoxidável ou algum outro material condutor na aplicação devido à nobreza do material e por serem bons condutores elétricos.

O tempo de duração da visualização da bolha de hidrogênio é limitado pela dissolução do hidrogênio na água. Difusão ou perda da visualização das bolhas aumenta com o aumento do número de Reynolds. (Wolfgang Merzkirch, 2009).

Ezzat e Mansoor, 2012, apresentaram dados a respeito do uso da técnica de bolhas de hidrogênio para estudo qualitativo e quantitativo acerca de padrões de escoamentos ao redor de corpos cilíndricos em canal aberto de água. Para a geração e visualização dos escoamentos, usou-se um fio de 0,05mm de diâmetro de cobre, juntamente com lâmpadas de 1000 W e uma fonte de 30 V. Como resultados quantitativos, observou-se a formação e desprendimentos de vórtices ao redor dos cilindros, utilizando $Re = 1623$, conforme mostra a figura 2.2.2.

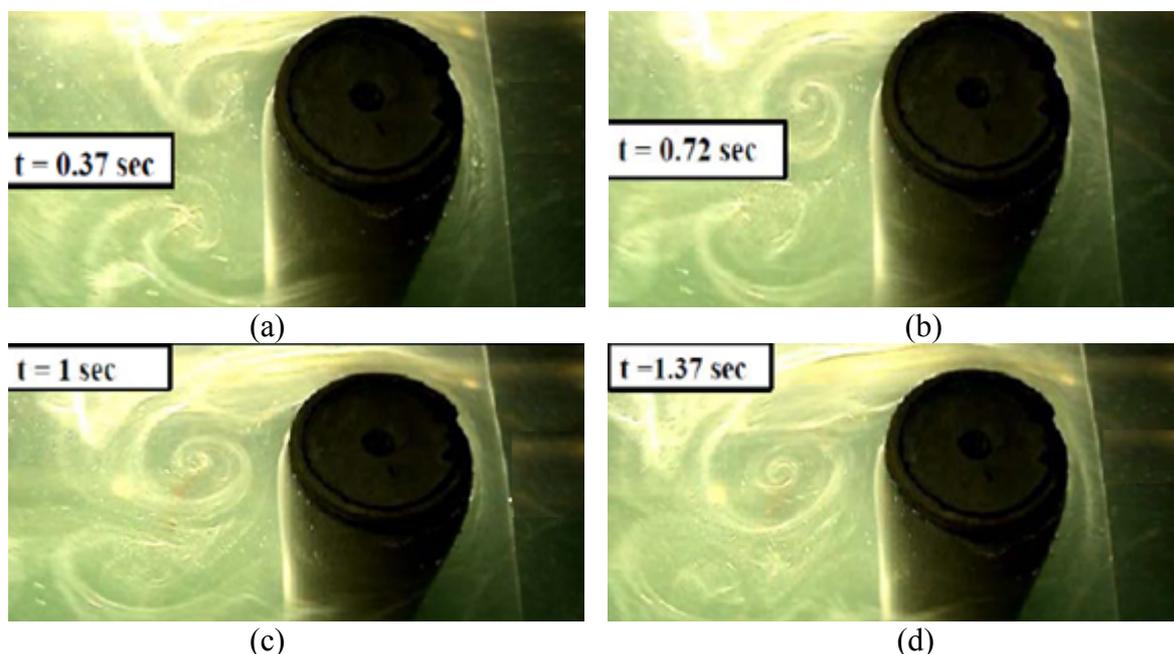


Figura 2.2.2 – Resultados da visualização de vórtices ao redor de cilindros circulares ao longo do tempo, utilizando a técnica de geração de bolhas de hidrogênio. Adaptado de Ezzat e Mansoor, 2012.

Segundo Kline *et al.*, 1967, foi realizada a técnica de visualização usando um canal aberto, com velocidade da água em torno de 0,06-0,21 m/s e um fio de platina de 0,025 mm como cátodo na reação.

Segundo Garcia *et al.*, 2007, usou-se a técnica de geração de bolhas de hidrogênio usando fio de cobre para visualizar escoamento em tubos de 32 mm de diâmetro.

De acordo com Hiramoto e Higuchi, 2003, a técnica foi usada para visualizar vórtices em cilindros circulares posicionados lado a lado com um pequeno ângulo entre eles. O experimento foi realizado em canal d'água e o Reynolds dos cilindros foi de 440 para uma velocidade de escoamento de 0,035 m/s.

Segundo Pipe e Monkewitz, 2006, a técnica foi usada para visualizar vórtices em um cilindro de 3 mm de diâmetro e Reynolds de 50-150. Fio de aço inoxidável de 70 μ m de diâmetro foi usado no experimento.

Burley e Grigg, 1970, descreveram a técnica usando um fio de nicromo de 0,25 mm de diâmetro e 3 cm de comprimento. Uma haste de latão foi usada como ânodo na reação.

Strykowaki e Sreenivasan, 1990, usaram a técnica para visualizarem vórtices em cilindros circulares em um canal aberto com $Re = 80$. Fio de aço de 0,05 mm de diâmetro foi usado como cátodo.

Ellis e Stefan, 1986, usaram um fio de tungstênio, em um canal d'água, com um diâmetro de 0,001 polegadas e uma velocidade de fluido de 0,4 a 0,8 cm/s.

Davis e Fox, 1967, aplicaram a técnica para medir a perfis de velocidade em tubo circular. Utilizaram fio de tungstênio de 0,002 polegadas de diâmetro.

Alam *et al.*, 2003, usaram a técnica de visualização por bolhas de hidrogênio através de dois cilindros circulares com diâmetro de 20 mm posicionados lado a lado. O fluido em questão foi a água e o número de Reynolds dos cilindros era de 350. Para a geração das bolhas, usou-se um fio de platina de 0,02 mm. Além disso, usou-se um filtro em formato de favo de mel para retirar toda irregularidade em grande escala. A figura 2.2.3 exemplifica a troca de modos das esteiras, usando a técnica de geração de bolhas de hidrogênio.

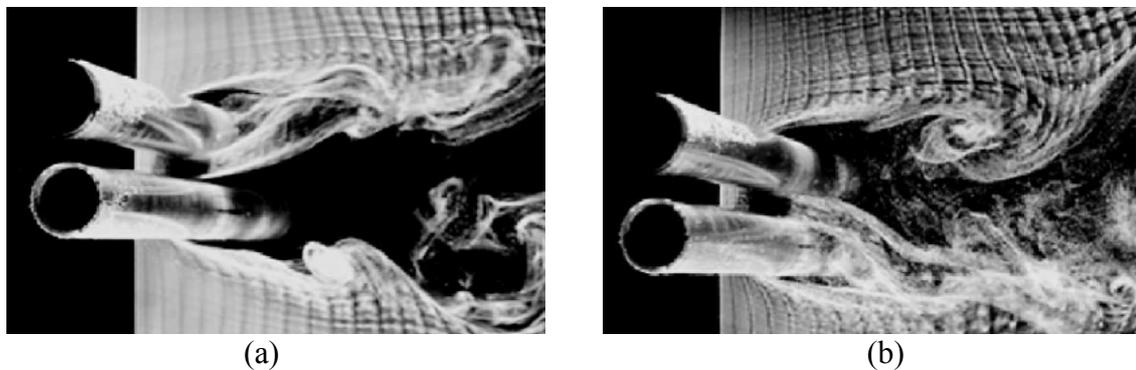


Figura 2.2.3 – Troca de modos de esteiras em dois cilindros circulares dispostos lado a lado, utilizando a técnica de geração de bolhas de hidrogênio. Adaptado de Alam *et al.*, 2003.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo Fox *et al.*, 2011, o número de Reynolds é dado por

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (3.1)$$

onde Re é o valor adimensional de Reynolds, U é a velocidade do escoamento, ν é a viscosidade do fluido e D é o diâmetro do cilindro.

Blevins, 1990, estudou como o comportamento do desprendimento de vórtices é relacionado através do número de Reynolds. Variando de $Re = 5$ até $Re = 3 \times 10^5$ têm-se as seguintes configurações (figura 3.1):

- $5 \leq Re \leq 40$: há a presença de vórtices estacionários;
- $50 \leq Re \leq 150$: existe uma formação de uma esteira laminar periódica de vórtices;
- $150 \leq Re \leq 300$: camada sobre o cilindro continua sendo laminar, entretanto, os vórtices desprendidos começam a tornarem-se turbulentos;
- $300 \leq Re \leq 3 \times 10^5$: vórtices desprendidos são completamente turbulentos e periódicos.

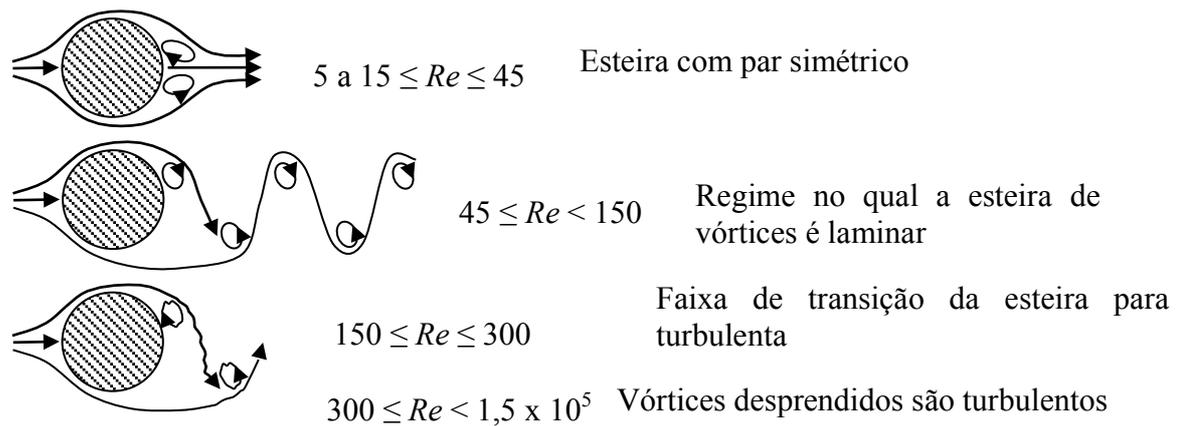


Figura 3.1 – Visualização esquemática dos desprendimentos de vórtices usando diferente número de Reynolds. Adaptado de De Paula, 2008.

Segundo Meneghini, 2002, o número de Strouhal representa um valor adimensional das frequências de desprendimento de vórtices em cilindros, e é dado por:

$$St = \frac{fD}{U} \quad (3.2)$$

onde f é a frequência de desprendimento de vórtices, U é a velocidade do fluido e D é o comprimento característico. Meneghini, 2002, comenta que quão mais rombudo o corpo for, maior o coeficiente de arrasto e, assim, menor número de Strouhal para uma mesma velocidade de escoamento em questão.

4. METODOLOGIA

Este trabalho tem como objetivo a visualização de escoamentos ao redor de cilindros circulares utilizando a técnica de geração de bolhas de hidrogênio. Para tanto, o experimento foi realizado em um canal hidráulico já existente e localizado no LAEFT – Laboratório de Aplicações em Energia e Fenômenos de Transporte. O estudo consiste na análise de troca de esteira de vórtices através do escoamento de água em cilindros circulares arranjados lado a lado. Para a análise de imagens, utilizou-se o *software* Tracker como ferramenta.

4.1 Funcionamento e Geometria do Canal Hidráulico

Segundo Destefani, 2016, a seção de testes foi construída usando o mesmo diâmetro hidráulico que De Paula, 2008, e é nela que se coletam os dados para os resultados finais (figura 4.1.1). Além disso, há um tanque, localizado a montante da seção de testes, que serve como reservatório de água e cuja capacidade é de 400 litros. Outro ponto de destaque é a contração do bocal na entrada da seção, reduzindo o nível de turbulência do escoamento vindo do sistema de propulsão e acelerando o fluido até o momento da chegada à região de área constante.

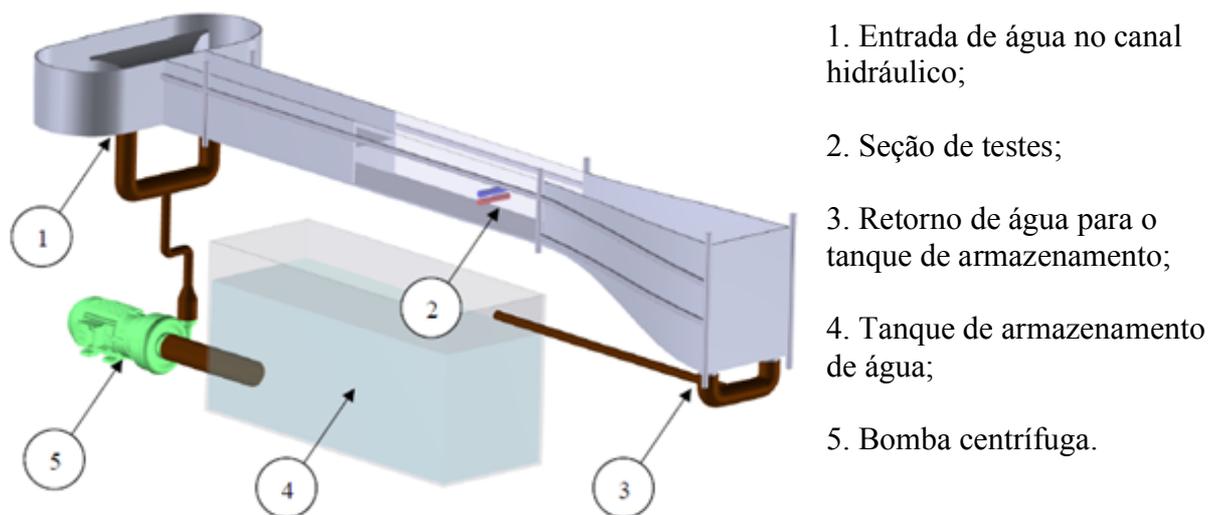


Figura 4.1.1 – Modelo de funcionamento do canal hidráulico utilizado no experimento. Adaptado de Destefani, 2016.

Na tabela 4.1.1, encontram-se as especificações para os equipamentos usados.

Tabela 4.1.1 – Especificações do canal hidráulico. Adaptado de Destefani, 2016.

Especificação	Característica
Tipo de circuito	Aberto
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 ³ /s)
Sistema de propulsão	Bomba centrífuga Texius de ½ CV

No presente trabalho, utilizou-se canal aberto para visualização do escoamento, diferentemente do canal fechado utilizado por Destafani, 2016. Destefani, 2016, afirmou: “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”, comprovando o funcionamento do canal hidráulico para os valores também validados pelo autor. O escoamento na seção de testes é laminar, devido ao número de Reynolds de 544, calculado usando a equação 3.1.

4.2 Técnica de geração de bolhas de hidrogênio

Para ocorrer a geração de bolhas de hidrogênio no canal hidráulico, usou-se os materiais listados na tabela 4.2.1.

O circuito para gerar bolhas de hidrogênio consiste na entrada de uma corrente elétrica alternada, a qual é retificada pela ponte de diodo, e sai como contínua para o fio de cobre, o qual gerará as bolhas de hidrogênio. O uso de corrente elétrica contínua deve-se ao fato de ter uma geração ininterrupta de bolhas de hidrogênio no canal hidráulico. Além disso, o uso do Varivolt deve-se ao controle da quantidade de bolhas geradas, tendo em vista que a geração delas deve-se à tensão elétrica aplicada.

Tabela 4.2.1 – Materiais usados para a geração de bolhas de hidrogênio.

Especificação	Característica	Quantidade / Dimensões
Capacitor	450 V e 220 μ F	1 Unidade
Ponte de Diodo	KBU 808 , com capacidade para 8 A	1 Unidade
Placa de Cobre	Funciona como o ânodo da eletrólise	0,09 x 0,05 m
Fio de Cobre	Funciona como o cátodo da eletrólise	0,3 mm (diâmetro)
Cabo de cobre	Realiza a ligação do circuito	2 m
Varivolt	Regulador de tensão do circuito (0-240 VAC)	1 Unidade

4.3 Iluminação da seção de testes

O primeiro teste realizado foi com iluminação com caneta a *laser* acima do canal. O resultado não foi satisfatório, na avaliação visual, devido à ineficácia de dissipação da luz através da extensão da seção de teste.

Para gerar uma melhor dissipação de luz, optou-se por usar quatro lâmpadas *LED*, de 18 W cada, posicionadas acima do canal. Este foi o melhor resultado obtido, tendo em vista que o canal não permite a incidência de luz abaixo da seção, pois há a presença da chapa de alumínio, e dificulta a visualização e filmagem com o uso de luzes a frente da seção de teste, devido à presença de reflexos.

Outro ponto de destaque é o uso de adesivo preto ao fundo do canal para melhorar a captura de imagens. Os cilindros foram fixados através do encaixe, devido que seu comprimento é o mesmo do canal hidráulico. As filmagens foram tomadas à noite e com uma cobertura no canal, tendo em vista a retirada de qualquer fonte luminosa, exceto as lâmpadas utilizadas. A figura 4.3.1 ilustra a organização da iluminação da seção de testes.

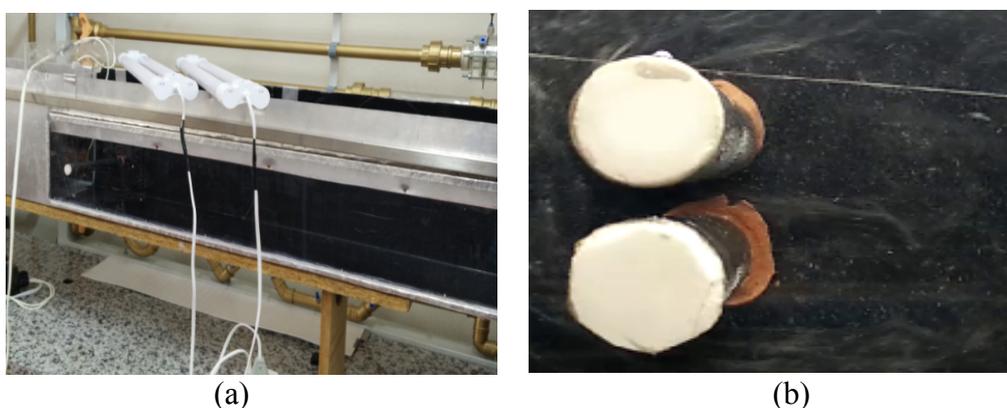


Figura 4.3.1 – Iluminação da seção de testes utilizada na técnica de visualização de escoamentos por bolhas de hidrogênio.

4.4 Perfis estudados

Cilindros de PVC com comprimento de 193 mm e diâmetro de 19 mm foram utilizados no experimento. Como validação da técnica, o número de Reynolds utilizado foi de 300 e a comparação com os padrões esperados encontra-se na figura 4.4.1.

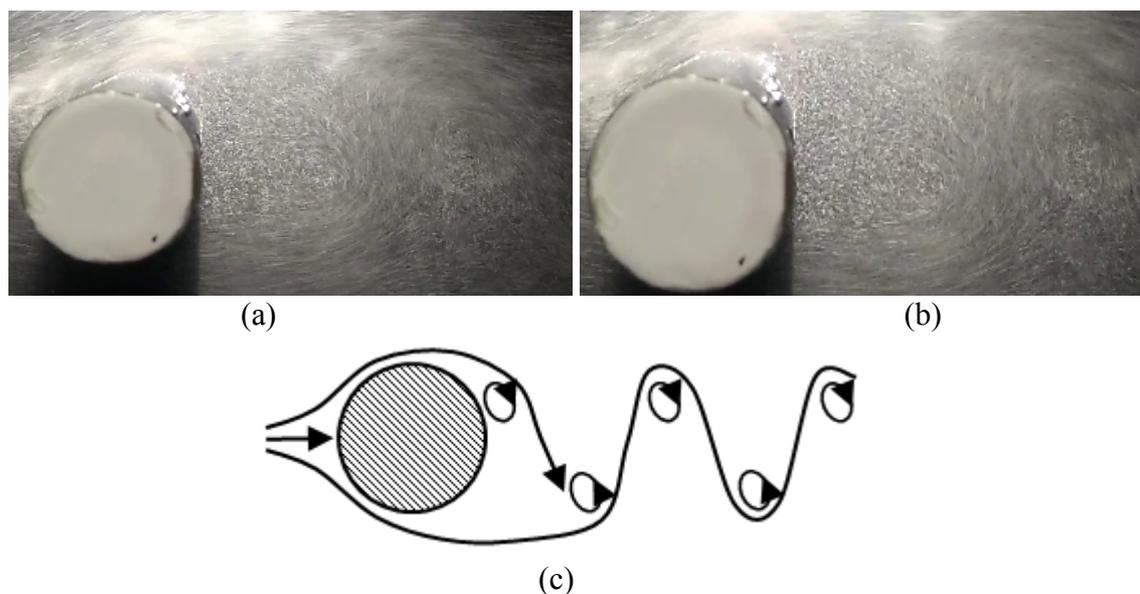


Figura 4.4.1 – Validação da técnica de geração de bolhas de hidrogênio usando um cilindro, uma tensão elétrica de 80 V e uma corrente elétrica de 0.08 A. Comparação com a teoria de desprendimentos de vórtices de Blevins, 1990.

4.5 Tomadas experimentais

O registro dos experimentos foi realizado com uma câmera digital, com resolução de 1920×1090 pixels (*Full HD*). Foram gravados dois vídeos de 20 minutos cada. Após, utilizando o *software* Tracker, traçaram-se as coordenadas x e y da esteira interna do cilindro a direita do escoamento visto de jusante, visando medir o ângulo de deflexão de escoamento da esteira de vórtices. Uma linha em azul foi traçada a uma distância equivalente ao diâmetro dos cilindros, para possibilitar rastrear os vórtices na direção y das coordenadas. As posições utilizadas na verificação dos ângulos de deflexão do escoamento foram obtidas quando as bolhas de hidrogênio, em sua maior concentração, desprendiam-se na esteira interna do cilindro a direita, visto a jusante do escoamento. Utilizou-se um total 36.000 quadros, em um intervalo de 150 quadros por ponto traçado. Os cilindros foram dispostos na posição horizontal em todas as tomadas. Após, calculou-se o valor do ângulo α através da hipotenusa e cateto adjacente do triângulo mostrado na figura 4.5.1.

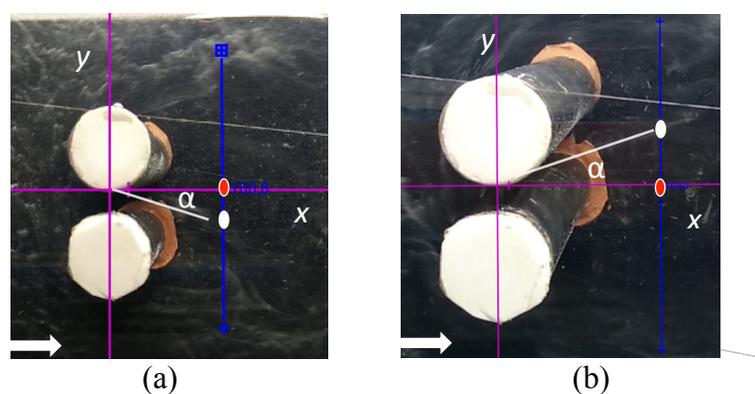


Figura 4.5.1 – Tomadas experimentais e calibragem utilizando o *software* Tracker. Ponto branco representa os valores encontrados no eixo y e ponto vermelho os valores encontrados no eixo x .

5. RESULTADOS

Os dados coletados foram em relação aos cilindros dispostos $P/D = 1,26$ e com número de Reynolds de 367. O cálculo da velocidade do escoamento foi realizado através de um traçador, uma fita métrica e, com o auxílio de um cronômetro. O cálculo do Re foi feito através da equação 3.1 e das incertezas associadas a ela, conforme o Apêndice deste trabalho.

Percebeu-se que quando havia escoamento sem nenhum corpo de prova na seção de teste, a geração de bolhas de hidrogênio era praticamente uniforme e contínua. Quando um objeto era colocado na seção, conseguiu-se perceber que os vórtices desprendidos acima do cilindro localizado à direita do escoamento visto a jusante eram mais visíveis, devido à concentração de bolhas na região (camada cisalhante).

A figura 5.1 (a) e (b) é referente ao primeiro vídeo gravado, onde houve duas trocas de esteiras. Na figura 5.1 (a) percebe-se um ângulo de deflexão positivo e a presença de uma esteira estreita saindo da fenda entre os cilindros. A mudança de modo de esteira é capturada e visualizada na figura 5.1 (b), onde se tem um ângulo de deflexão negativo.

A figura 5.1 (c) e (d) é referente ao segundo vídeo gravado, onde não foi constatado troca de modo de esteiras. Percebeu-se a presença de uma esteira estreita, com ângulo de deflexão positivo, em toda a filmagem.

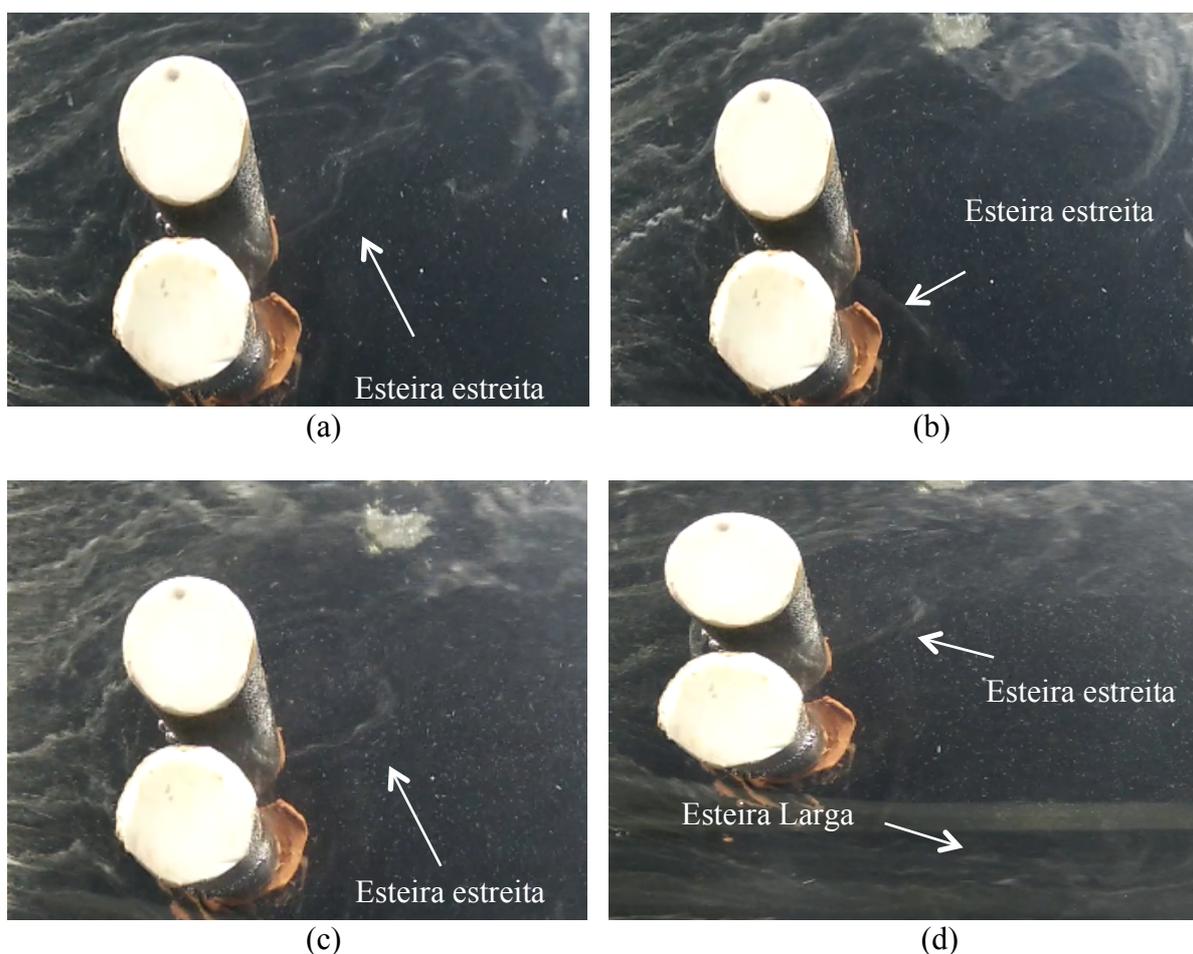


Figura 5.1 –Resultados das duas filmagens com número de Reynolds de 367. Figura 5.1 (a) e (b) referente à filmagem em que houve duas trocas de esteiras , e 5.1 (c) e (d) referente à filmagem em que não houve troca de esteiras.

Realizando a comparação dos resultados obtidos da técnica de geração de bolhas de hidrogênio com a de injeção de tintas, têm-se as figuras obtidas por Destefani, 2016, (Figura 5.2 (a) e (b)), onde se consegue ter uma melhor nitidez em comparação com às obtidas com a técnica de geração de bolhas de hidrogênio.

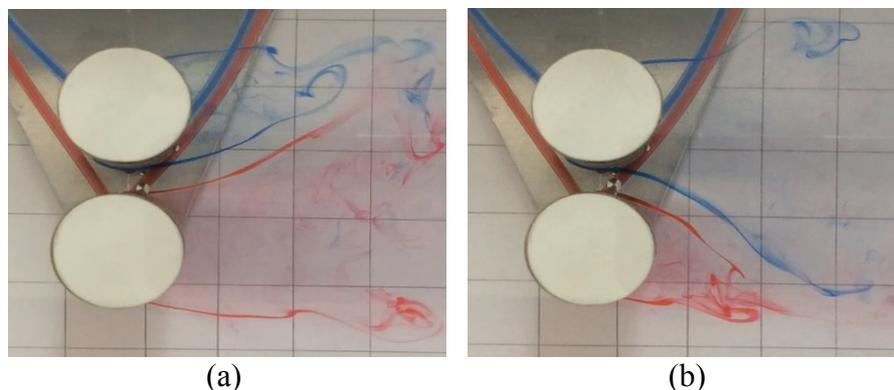


Figura 5.2 – Visualização de escoamentos em cilindros circulares utilizando a técnica de injeção de tintas. Razão de espaçamento $P/D = 1,26$ e $Re = 5,5 \times 10^3$. Imagem (a) e (b) mostram a troca entre esteiras dos cilindros dispostos na horizontal. Adaptado de Destefani, 2016.

Extraindo os dados do *software* Tracker, consegue-se traçar a variação do ângulo de deflexão com o tempo. A figura 5.3 (a) representa os resultados da visualização aonde ocorreram duas trocas de esteiras. A primeira troca ocorre aos $550 < t < 650$ s, e a segunda aos $950 < t < 1050$ s. Na figura 5.3 (b), ve-se que, ao total de $t = 1200$ s, não há a presença de troca de esteiras.

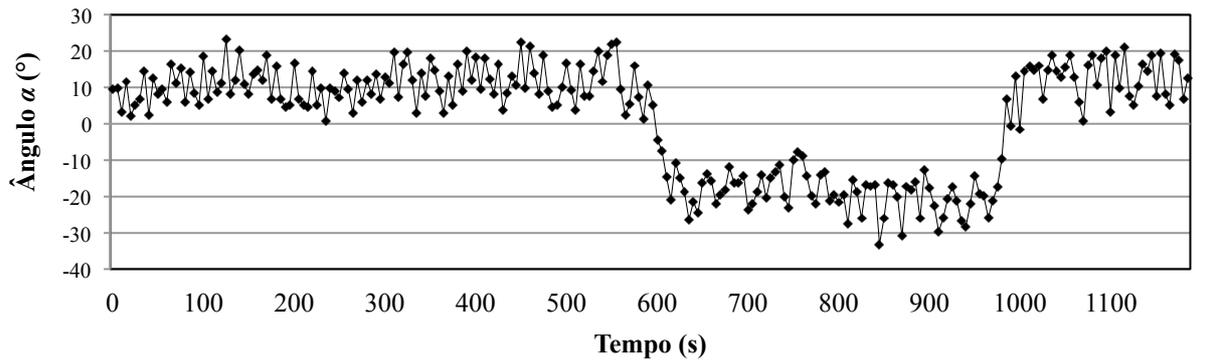
O tempo de permanência em cada um dos modos muda com o passar do tempo (não é constante). Logo, espera-se resultados distintos entre experimentos consecutivos. Além disso, a variação do ângulo (α) depende basicamente da velocidade das esteiras ao longo do escoamento. Ou seja, quanto menor a velocidade da esteira, mais estreita ela será (Destefani, 2016).

Comprovando novamente o que a literatura relata, as figuras 5.3 (c) e (d) mostram as trocas de esteiras, utilizando a técnica de injeção de tinta, em intervalos não periódicos e a não ocorrência deste fenômeno, respectivamente.

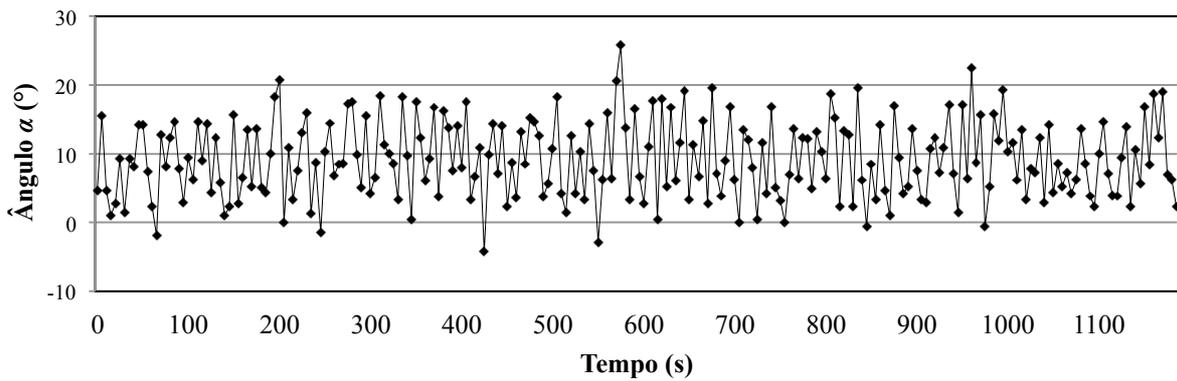
Mesmo com todas as dificuldades encontradas no presente trabalho, e pelo acúmulo de bolhas à direita do cilindro superior visto a jusante do escoamento, consegue-se obter resultados, da deflexão do ângulo (α) com o tempo, semelhantes aos obtidos usando a técnica de injeção de tinta.

A tabela 5.1 mostra as características da técnica estudada neste trabalho e no trabalho de Destefani, 2016. Para $P/D = 1,26$, a esteira estreita do cilindro a direita do escoamento visto a jusante (modo de mais alta frequência) apresenta número de Strouhal de aproximadamente 0,303 (Alam *et al.*, 2003). Este valor também foi usado no cálculo da frequência de desprendimentos de vórtices de Destefani, 2016. Considerou-se o escoamento do fio como potencial devido ao seu baixo número de Reynolds e à sua pequena área de desprendimento de vórtices. Usando a equação 3.2 consegue-se calcular a frequência de desprendimentos de vórtices para o presente trabalho.

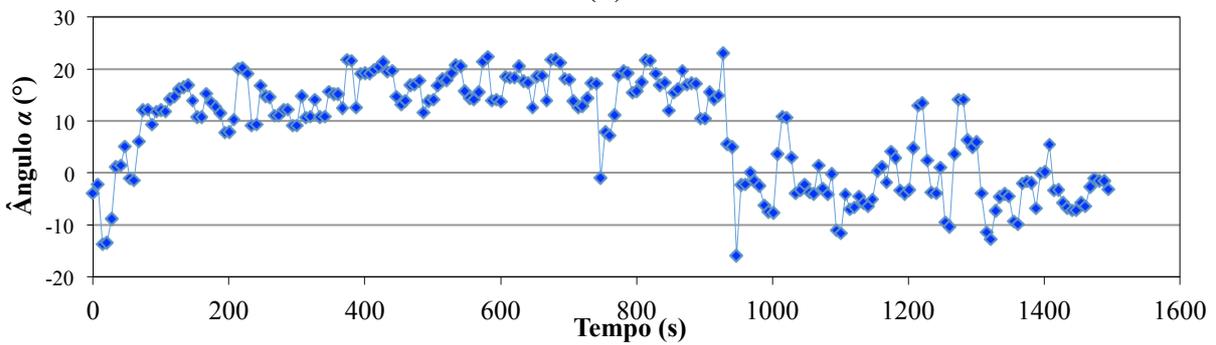
Percebe-se que, com uma diferença na grandeza de 90% no número de Reynolds entre as duas técnicas, consegue-se uma diferença na grandeza de 80% na frequência de desprendimentos dos vórtices dos cilindros. Isto se deve também à diferença dos diâmetros dos cilindros (6 mm) utilizados nas duas técnicas.



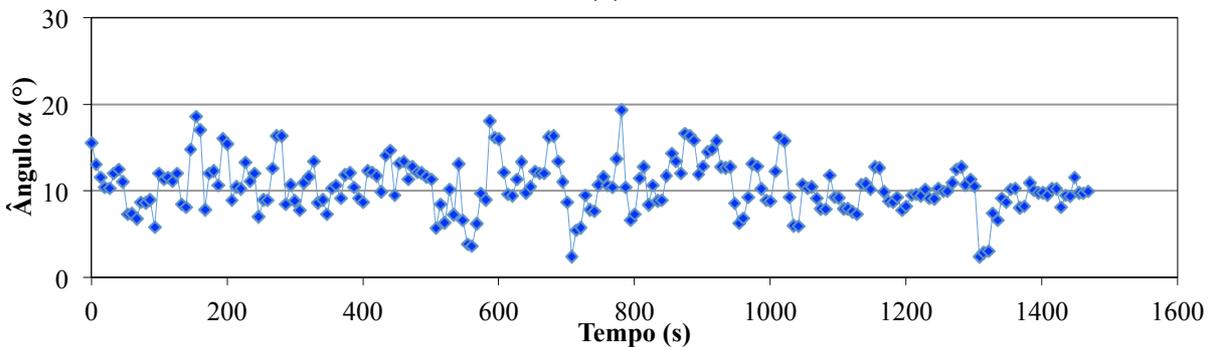
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.3 – (a) Duas trocas de esteiras. Técnica de bolhas de hidrogênio; (b) Nenhuma troca de esteiras. Técnica de bolhas de hidrogênio; (c) Duas trocas de esteiras. Técnica de injeção de tinta (Adaptado de Destefani, 2016); (d) Nenhuma troca de esteiras. Técnica de injeção de tinta (Adaptado de Destefani, 2016).

Tabela 5.1 – Comparação das características dos trabalhos de visualização usando técnica de geração de bolhas de hidrogênio e injeção de tinta.

Característica	Presente Trabalho	Injeção de tinta
Tipo de Canal	Aberto	Fechado
Re - Cilindro	367	$5,5 \times 10^3$
Re - Fio	5,8	-
Frequência de desprendimento de vórtices – (Hz) - Cilindro	0,46	3,99
Razão de espaçamento - P/D	1,26	1,26
Diâmetro Cilindros (mm)	19	25

Na presente análise, observou-se também que para uma tensão elétrica de 80 V e corrente elétrica de 0.08 A, e usando um fio de cobre de 0,3 mm de diâmetro, necessita-se trocar o fio a cada 25 minutos, pois o mesmo começa a se degradar e a geração de bolhas não se torna tão eficaz.

Além disso, o efeito do empuxo nas bolhas faz com que elas subam e colidam com a placa superior da seção de testes. Visando a melhora disto, tirou-se esta placa, tendo um canal com superfície livre, onde a velocidade superior é maior do que zero, arrastando as bolhas ao longo do escoamento, melhorando assim, a captura e visualização de imagens.

Outro ponto a se destacar é que em testes preliminares com fio de aço inox de 0,45 mm de diâmetro, a geração de bolhas não se apresentou de forma uniforme em comparação com o fio de cobre de 0,3 mm de diâmetro. O fato da escolha do fio de cobre deve-se ao baixo custo em comparação com o fio de platina.

6. CONCLUSÃO

No presente trabalho, foi aplicada a instrumentação da técnica de geração de bolhas de hidrogênio em canal hidráulico aberto para número de Reynolds de 367. Os objetos de estudo foram cilindros circulares de 19 mm de diâmetro cada, posicionados lado a lado com uma razão de espaçamento de $P/D = 1,26$. A validação da técnica ocorreu para $Re = 300$ e dados quantitativos foram retirados do *software* Tracker, mostrando a deflexão do ângulo (α) com o tempo.

Como comparação com a técnica de injeção de tinta, tem-se alguns pontos positivos usando a técnica de geração de bolhas de hidrogênio, tais como: não necessita trocar a água do canal com uma grande frequência, tendo em vista que a água permanece por mais tempo limpa; e devido a pouca perturbação do escoamento em relação à interação com as bolhas de hidrogênio, pois há um escoamento potencial no fio. Adicionando a isto, é necessário que a velocidade de injeção da tinta seja exatamente idêntica à do escoamento no canal, diferenciando do uso da técnica de bolhas de hidrogênio.

Como pontos negativos, observaram-se: o contraste da visualização por bolhas de hidrogênio não apresenta uma qualidade tão boa quanto ao de injeção de tinta; este é o grande motivo pelo qual não se conseguiu discernir as duas esteiras da fenda entre os cilindros, apenas uma. Adicionando a isto, outro ponto negativo da técnica é a necessidade de uma boa iluminação e um fundo que permite um alto contraste ao longo do escoamento, para perceber os seus detalhes. Por fim, tem-se o risco de choques elétricos na bancada devido ao circuito elétrico aplicado.

6.1 Sugestões de trabalhos futuros

Como sugestão para futuros trabalhos envolvendo o uso da técnica de bolhas de hidrogênio, recomenda-se uso de fio de platina como cátodo na reação, tendo em vista que é um material mais nobre e com uma melhor condutividade do que o cobre. Além disso, espera-se o uso de um fio com diâmetro menor do que 0,3 mm e uma corrente elétrica maior do que 0.08 A, a fim de gerar mais bolhas e, então, colocar a tampa superior do canal (conduto forçado). Assim, esperam-se melhores resultados quantitativos e qualitativos em relação às imagens obtidas. Por uma questão de segurança, sugere-se a troca do Varivolt por uma fonte de computador chaveada, a fim de evitar potenciais choques elétricos ao longo do experimento. Outro ponto importante é a troca da iluminação de *LED* por *laser* e a colocação de filtro posicionado antes dos cilindros, para dissipar qualquer tipo de perturbação nas bolhas de hidrogênio. Com isso, pode ser possível ter um melhor contraste e uma melhor captura dos detalhes do escoamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Davis, W., and Fox, R.W., "An Evaluation of the Hydrogen Bubble Technique for the Quantitative Determination of Fluid Velocities within Clear Tubes", Journal of Basic Engineering, Vol. 89, 1967.

Alam, M. M.; Moriya, M. e Sakamoto, H., 2003, "Aerodynamic characteristics of two side-by-side circular cylinders and application of wavelet analysis on the switching phenomenon", Journal of Fluids and Structures, Vol. 18 pp. 325-346.

Blevins, R. D., 1990, "Flow-induced vibration", 2a ed., Van Nostrand Reinhold, New York.

De Paula, A.; "Estudo sobre o fenômeno da biestabilidade de escoamentos turbulentos em bancos de tubos de arranjo triangular". Dissertação de mestrado, PROMEC-UFRGS, Porto Alegre, RS.

Fox, R. W.; Pritchard, P. J.; McDonald, A. T., "Introdução à Mecânica dos Fluidos", 7. ed., Rio de Janeiro, LTC, 2011.

Meneghini, J. R., 2002, "Mecânica da geração e desprendimento de vórtices no escoamento ao redor de cilindros", Anais da ETT 2002 – III Escola de Primavera de Transição e Turbulência, pp. 217-344, Florianópolis, SC.

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

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. TCC-UFRGS.

Kline, S. J., Reynolds W.C., Shraub F.A. e Runstadler P.W., "The Structure of Turbulent Boundary Layer", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 30, 1967.

Garcia, A. Solano, J.P., Vicente, P.G., e Viedma, A., "**Flow Pattern Assessment in Tubes with Wire Coil Inserts in Laminar and Transition regimes**", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 28, 2007.

Hiramoto R. and Higuchi H., "**Vortex Shedding behind a Non Parallel pair of Circular Cylinders**" Journal of Fluids and Structures, Vol. 18, 2003.

Pipe, C.J. and Monkewitz, P.A., "**Vortex Shedding in Flows of Dilute polymer solutions**", Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 139, 2006.

Burley, R., and Grigg, P.J., "**A Solid State Pulsar for the Hydrogen Bubble Flow Visualization Technique**" J.Phys.E:Sci.Instrum, Vol.3, 1970.

Ezzat, A.W. and Mansoor T.M., "**Water Flow Visualization And Velocity Measurement Using Hydrogen Bubble Generation Technique In Low Speed Open Channel**" Journal of Engineering, Vol. 18, 2012.

Strykowski, P.J., and Sreenivasan, K.R., "**on the Formation and Suppression of Vortex Shedding at Low Reynolds Numbers**", Journal of Mechanics, Vol. 218, 1990.

Ellis, C.R. and Stefan, H.G., "**Development of Hydrogen Bubble Velocity Meter**", Journal of Hydraulic Engineering, Vol.112, 1986.

Merzkirch, Wolfgang., "**Flow Visualization**", Second edition ,2009.

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

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.13,1999.

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.

Moffat, R. J., 1988, "**Describing the uncertainties in experimental results**", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 1.

Blevins, R. D. "**Flow Induced Vibration**", New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1997.

APÊNDICE A - INCERTEZAS

Para o cálculo das incertezas, usou-se a equação A.1 deste apêndice, baseado no trabalho de Moffat, 1988, o qual relatou que a incerteza de um valor (δR) é composta das incertezas acumuladas das medições das variáveis que compõem este valor.

$$\delta R = \left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial R}{\partial X_i} \delta X_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.1})$$

onde $R = R(x_1, x_2, \dots, x_m)$ é o resultado do cálculo, m é o número de variáveis presente, e δX_i é a incerteza de cada variável.

APÊNDICE A.1 – Número de Reynolds

No cálculo das incertezas do número de Reynolds, necessita-se conhecer as incertezas das seguintes variáveis:

- Tempo (t): erro do cronômetro estimado em $\pm 0,1$ s;
- Distância (y): erro relativo da trena estimado em ± 1 mm;
- Diâmetro dos cilindros (D): o diâmetro dos cilindros foi medido através de um paquímetro com incerteza de $\pm 0,1$ mm. A incerteza é estimada como:

$$\delta D = \pm \frac{0,05 \text{ mm}}{19,00 \text{ mm}} = \pm 0,002$$

- Diâmetro do fio (d): o diâmetro do fio foi medido através de um paquímetro com incerteza de $\pm 0,1$ mm. A incerteza é estimada como:

$$\delta d = \pm \frac{0,05 \text{ mm}}{0,3 \text{ mm}} = \pm 0,166$$

- Temperatura (T): temperatura do dia de gravação era de $T = 24 \pm 0,1$ °C.

A velocidade U foi calculada através do tempo (5 s) em que o traçador percorria uma distância de 145 mm no canal hidráulico. Usando a equação A.1, consegue-se calcular a incerteza em relação à velocidade (equações A.1.1, A.1.2 e A.1.3).

$$\delta U = \left[\left(\frac{\partial(y/t)}{\partial y} \delta y \right)^2 + \left(\frac{\partial(y/t)}{\partial t} \delta t \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.1.1})$$

$$\delta U = \left[\left(\frac{1}{t} 0,001 \right)^2 + \left(-\frac{0,145}{t^2} 0,1 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.1.2})$$

$$\delta U = \pm 6,13 \times 10^{-4} \quad (\text{A.1.3})$$

Segundo Fox *et al.*, 2011, usa-se a equação A.1.4 para estimar a incerteza em relação à temperatura:

$$\delta v_{v(T)} = \pm \frac{\delta v}{v} = \frac{1}{v} \frac{dv}{dT} (\pm \delta T) \quad (\text{A.1.4})$$

onde T é a temperatura e ν a viscosidade cinemática.

Tem-se o cálculo da derivada, considerando a temperatura nominal em 24°C:

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

Então, a incerteza da viscosidade devido à temperatura é dada através da equação A.1.4:

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

$$\delta v_{v(T)} = \pm 0,00236$$

Fox *et al.*, 2011, também relataram que os dados de viscosidade, que estão em livros e tabelas, também tem incerteza, e é estimada em $\pm 1,0\%$. Assim, o valor final da incerteza da viscosidade é:

$$\delta v_{v(T)} = \pm \left[(\pm 0,01)^2 + (\pm 0,00236)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \pm 0,01027$$

Então, o cálculo da incerteza do número de Reynolds é realizado através da equação A.1:

$$\delta \text{Re} = \left[\left(\frac{\partial \text{Re}}{\partial U} \delta U \right)^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}}{\partial D} \delta D \right)^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}}{\partial \nu} \delta \nu \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.1.5})$$

$$\delta \text{Re} = \left[\left(\frac{D}{\nu} \delta U \right)^2 + \left(\frac{U}{\nu} \delta D \right)^2 + \left(-\frac{U \times D}{\nu^2} \delta \nu \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.1.6})$$

Substituindo os valores das variáveis na equação A.1.6, obtem-se a incerteza do número de Reynolds para os cilindros, para o fio e para a seção de testes, respectivamente:

$$\delta Re = \pm 0,064$$

$$\delta Re = \pm 5,284$$

$$\delta Re = \pm 0,019$$

APÊNDICE A.2 – Frequência de desprendimento de vórtices

O cálculo da incerteza da frequência de desprendimento de vórtices é realizado, também, com a equação A.1. Usou-se número de Strouhal de 0,21 para calcular a frequência de desprendimentos nos cilindros deste trabalho e no trabalho de Destefani, 2016. Para a frequência no fio, usou-se número de Strouhal de 0,1.

Usando a equação 3.2 na equação A.1, tem-se:

$$\delta f = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial D} \delta D \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial U} \delta U \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.2.2})$$

$$\delta f = \left[\left(-\frac{StU}{D^2} \delta D \right)^2 + \left(\frac{St}{D} \delta U \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.2.3})$$

Usando a equação 3.1 e sabendo-se o número de Reynolds, a viscosidade cinemática e o diâmetro do cilindro, consegue-se calcular o valor da velocidade do escoamento no trabalho de Destefani, 2016. As incertezas do número de Reynolds, diâmetro do cilindro e viscosidade são tiradas do trabalho e apresentadas a seguir:

$$\delta Re = \pm 0,0208$$

$$\delta D = \pm 0,002$$

$$\delta v_{v(T)} = \pm 0,0118$$

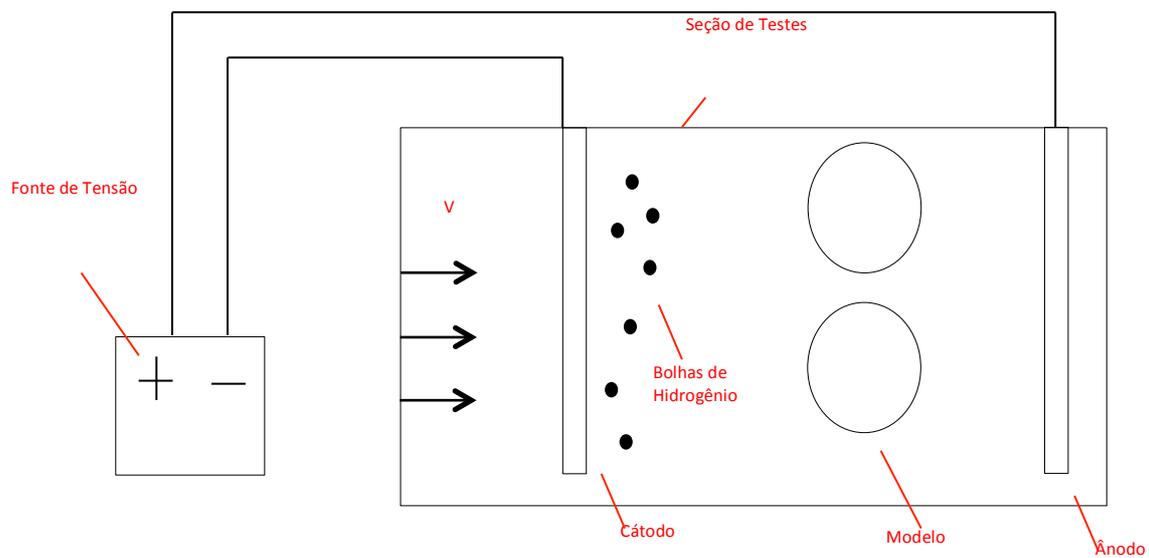
Assim, o cálculo da incerteza da velocidade para o trabalho de Destefani, 2016, é:

$$\delta U = \left[\left(\frac{\partial U}{\partial Re} \delta Re \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial v} \delta v \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial D} \delta D \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.2.4})$$

Substituindo os valores das incertezas na equação A.2.3, têm-se as incertezas da frequência de desprendimento de vórtices para os cilindros deste trabalho, para os cilindros do trabalho de Destefani, 2016, e para o fio utilizado neste trabalho, respectivamente:

$$\delta f = \pm 0,049$$

$$\delta f = \pm 0,440$$

APÊNDICE B – ESQUEMA - GERAÇÃO DE BOLHAS DE HIDROGÊNIO

ANEXO A - CONSTRUÇÃO DO CANAL HIDRÁULICO

As dimensões do canal hidráulico, modeladas em CAD 3D, podem ser observadas na Figura B.1 e na Figura B.2.

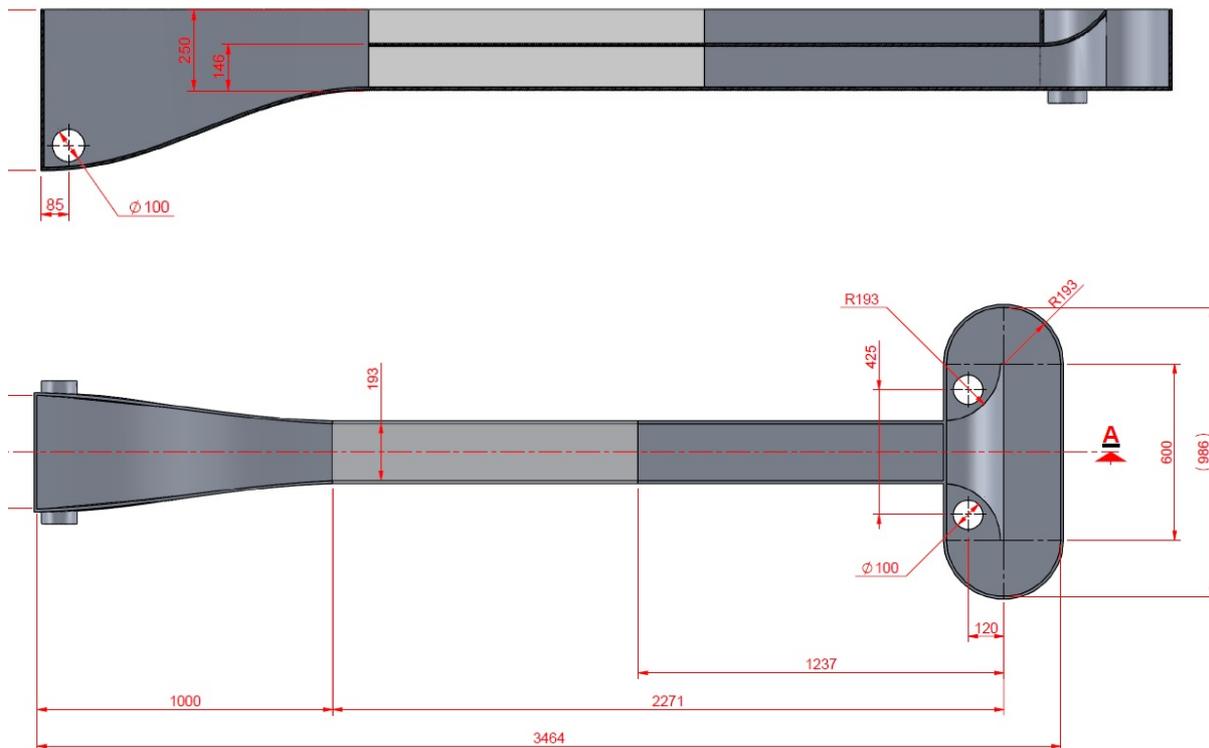


Figura B.1 Dimensões do canal hidráulico, projetado em CAD 3D (Fonte: Destefani, 2016).

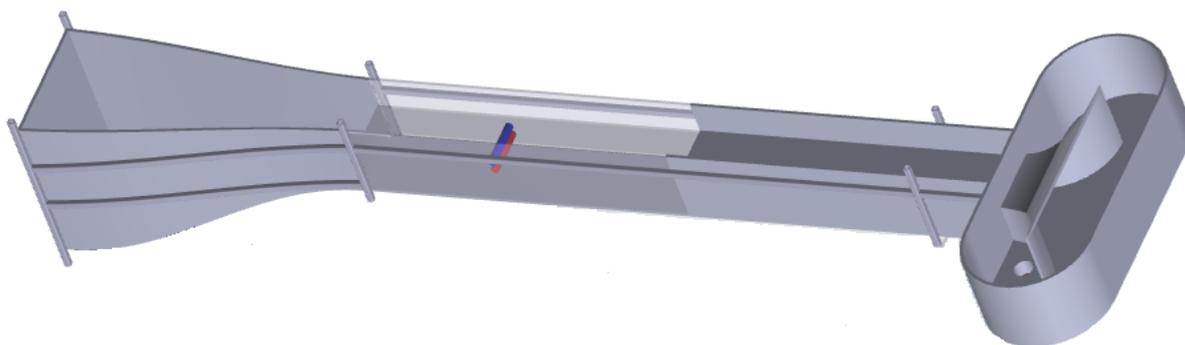


Figura B.2 Esquema ilustrativo do canal hidráulico, em CAD 3D (Fonte: Destefani, 2016).