

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

VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO BIDIMENSIONAL EM CANAL HIDRODINÂMICO DA
BIESTABILIDADE EM DOIS TUBOS DISPOSTOS LADO A LADO COM E SEM SUPRESSÃO
DO FENÔMENO

por

Otávio Cassepp Borges

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 2015.



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

VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO BIDIMENSIONAL EM CANAL DA BIESTABILIDADE EM
DOIS TUBOS DISPOSTOS LADO A LADO COM E SEM SUPRESSÃO DO FENÔMENO

por

Otávio Cassepp Borges

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 Vagtinski de Paula

Comissão de Avaliação:

Prof. Paulo Smith Schneider

Prof. Horácio A. Vielmo

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 12, junho de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que me apoiaram e ajudaram durante a realização deste trabalho. A minha família, pelo apoio incondicional e exemplo de perseverança. Ao meu orientador, pelas críticas e sugestões sem as quais este estudo não seria completo. Aos técnicos do laboratório, pela ajuda com as adaptações necessárias da bancada. Ao proprietário e aos funcionários da empresa Automasafety, pela doação e produção de componentes indispensáveis ao experimento.

BORGES, O. C. **Visualização De Escoamento Bidimensional Em Canal Hidrodinâmico Da Biestabilidade Em Dois Tubos Dispostos Lado A Lado Com E Sem Supressão Do Fenômeno**. 2015. 24. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

Neste estudo é realizada a adaptação de uma bancada de visualização de linhas de corrente formadas por água com sabão, para a observação de linhas de emissão formadas por tinta injetada no escoamento. As observações são realizadas em dois perfis cilíndricos para a visualização do fenômeno da biestabilidade em canal aproximadamente bidimensional. A bomba e a válvula encontradas na bancada, responsáveis pelo escoamento, são mantidas. Duas abas laterais são introduzidas para diminuir a seção do canal. Dois furos criados no fundo do canal servem como entrada de tinta pelo interior dos perfis. Dois reservatórios, um para cada cor, são posicionados a uma cota superior à da bancada para criar uma coluna de líquido. Com isso se realiza injeção por gravidade regulada por válvulas. Observam-se então a ocorrência de biestabilidade em canal raso, o efeito do ângulo dos tubos em relação ao escoamento e a aplicação de aletas em cinco diferentes posicionamentos para suprimir o fenômeno. A biestabilidade ocorreu normalmente em canal raso, com alternâncias de largura de esteiras em tempos aleatórios. Para os experimentos com desvios angulares o fenômeno ocorreu apenas em ângulos inferiores a $3,92^\circ$. Para os dois testes realizados em ângulos de $0,78^\circ$ e $1,57^\circ$ os tempos foram progressivamente maiores entre as ocorrências, mas em tempos ainda imprevisíveis. Com a inserção das aletas a biestabilidade foi suprimida para as cinco configurações, como resultado as esteiras mantiveram larguras semelhantes e oscilando em frequências mais altas e regulares. Com as duas aletas a jusante o resultado foi diferente, uma esteira permaneceu larga e a outra estreita ao longo de toda a tomada, sendo esta considerada a melhor configuração aletada, na qual foram suprimidas todas as respostas dinâmicas.

PALAVRAS-CHAVE: biestabilidade; escoamento; aletas; supressão.

BORGES, O. C. **Visualization to tow-dimensional flow in Hydrodynamic channel of bistability in two tubes arranged side by side with and without suppression of the phenomenon.** 2015. 24. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

This study is performed the adaptation of a visualization counter to chain lines formed by water with soap, to observe emission lines formed by ink injected in the flow. Observations are made in two cylindrical profiles for viewing the bistability phenomenon in approximately two-dimensional channel. The pump and the valve found on the counter, responsible for the flow are maintained. Two side flaps are introduced to decrease the channel section. Two holes created in the channel bottom serve as ink entry by profiles interior. Two reservoirs, one for each color, are positioned one elevation above to the counter to create a liquid column. This performs injection by gravity regulated by valves. We observe, then, the occurrence of bistability in shallow channel, the effect of the angle of the tubes relative to flow and the application off lips in five different positions to suppress the phenomenon. The bistability normally occurred in shallow channel, alternating at random times. For the experiments with the angular deviation, phenomenon occurred only at angles lower than 3,92 degrees. For both tests in 0,78 degrees and 1,57 degrees, the times were progressively larger between occurrences, but times still unpredictable. With the insertion of the flips, bistability has been suppressed to the five settings. As a result, mats remained similar widths and hovering higher and regular frequency. With the two flips downstream, the result was different. A mat remained broad and one narrow throughout the take, being this considered the better flipped configuration in which all dynamic responses were suppressed.

KEYWORDS: bistability; flow; flips; suppression.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO	1
3. METODOLOGIA.....	3
3.1. FUNCIONAMENTO DA BANCADA	3
3.2. GEOMETRIA DO CANAL	3
3.3. CORANTES	4
3.4. PERFIS TESTADOS	5
3.5. TOMADAS DE EXPERIMENTOS.....	6
4. RESULTADOS E DISCUSÕES.....	6
4.1. DISPOSIÇÃO PERPENDICULAR NÃO ALETADA.....	6
4.2. DISPOSIÇÕES EM ÂNGULO.....	10
4.3. DISPOSIÇÕES COM UMA ALETA.....	12
4.4. DISPOSIÇÕES COM DUAS ALETAS	13
5. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
APÊNDICE A - INCERTEZAS	16

1. INTRODUÇÃO

A visualização das linhas de emissão é uma ferramenta poderosa em um estudo sem previsibilidade: a excitação de estruturas tubulares provocada por escoamentos transversais quando do aparecimento do fenômeno da biestabilidade. Tais estruturas são muito comuns, estando presentes em poços de petróleo, trocadores de calor e nas mais diversas linhas de transmissão de fluidos e sofrem efeitos biestáveis tanto em escoamento hidrodinâmico quanto escoamento aerodinâmico. Desta forma mostra-se de extrema necessidade um estudo no sentido de entender o comportamento dos fluidos no cruzamento com tais geometrias e o efeito que possam causar nas mesmas.

Este trabalho teve como objetivo a produção e validação de uma bancada de visualização de linhas de emissão formadas por corantes em escoamentos hidrodinâmicos em canal predominantemente bidimensional. O visualizador produzido partiu de uma bancada já em uso, que funciona com corrente de água em canal aberto e na água era adicionado sabão em pó para facilitar a visualização do escoamento ao redor de diferentes perfis. Nesta configuração surgem duas adversidades: a formação indesejada de espuma, que extrapola a capacidade de contenção dos reservatórios e a formação de ondulações adjacentes aos perfis testados. A primeira foi naturalmente eliminada com o uso de tinta, a segunda resolveu-se com o uso de perfis e nível de água mais baixos, possuindo estes 10 mm de altura. O filme fino do escoamento se mostra mais estável e é inibido de produzir ondulações que perturbem as visualizações.

Vedat *et al.*, 2012, visualizaram o fenômeno em experimento com canal raso, tendo este a profundidade de 750 mm. Neste trabalho também foram realizados testes com aleta alinhada ao escoamento, posicionada entre os perfis.

A possibilidade executar estudos em biestabilidade em canais predominantemente bidimensionais motiva esta pesquisa, que tem como objetivo validar o método e compará-lo com o máximo de configurações experimentadas na literatura, a fim de determinar os aspectos relativos às esteiras que permanecem inalterados na supressão da componente vertical.

Para aprovar a configuração modificada introduziu-se um perfil cilíndrico para simular um tubo vertical. Então, estando a bancada validada, seguiram os testes em uma configuração formada pela simulação de dois dutos lado a lado em relação ao escoamento para estudar a possibilidade do aparecimento do fenômeno da biestabilidade, que já foi estudado e confirmado para dutos verticais em três dimensões. A biestabilidade é percebida na alternância sucessiva e aleatória entre as larguras de esteiras formadas por ambos os tubos, o que gera grandes diferenças no arrasto entre estes.

Com as modificações pretende-se não somente validar o modelo de visualizador, como confirmar ou descartar o aparecimento de efeitos do fenômeno da biestabilidade em escoamentos em duas dimensões, para escoamentos perpendiculares, com desvios angulares e com diferentes configurações de aletas.

2. FUNDAMENTAÇÃO

Segundo Meneghini, 2002, os modos de desprendimento de vórtices em cilindros circulares são classificados em função do número de Reynolds, sendo este definido como

$$Re = \frac{U*d}{\nu} \quad (2.1)$$

em que Re é o valor adimensional do número de Reynolds, U é a velocidade do escoamento, d é o diâmetro do cilindro e ν a viscosidade cinemática do fluido.

Para diferentes intervalos de números de Reynolds, Blevins, 1990, definem-se os modos de desprendimento de vórtices.

Para Re até 5 o escoamento contorna o perfil sem desprendimentos;

Para Re entre 5 e 40 se forma um par simétrico de vórtices no interior da esteira;

Para Re entre 40 e 150 se forma uma esteira laminar, mas oscilante por instabilidade das camadas cisalhantes;

Para Re entre 150 e $3 \cdot 10^5$ ocorre a transição para a turbulência;

Para Re entre $3 \cdot 10^5$ e $3,5 \cdot 10^6$ a camada limite laminar sofre transições para a turbulência em uma esteira estreita;

Para Re acima de $3,5 \cdot 10^6$ é restabelecida a camada limite turbulenta com oscilações similares ao terceiro modo, porém, neste caso sem correntes laminares.

De acordo com, Girardi *et al.*, 2003, a curvatura do perfil de entrada em túneis de visualização que minimiza as perturbações de entrada do escoamento pode ser descrita por um par de equações, descritas abaixo:

$$y = 1 + \frac{y_c - 1}{x_c^3} x^3 \quad (2.2)$$

$$y = 1 + \frac{y_c}{(1 - x_c)^3} (1 - x)^3 \quad (2.3)$$

onde y é o valor adimensional que quantifica o estrangulamento do canal, y_c e x_c são os pontos em y e x , respectivamente, em que ocorre a troca de equação e onde existe inflexão da curva e x é a variável de comprimento ao longo da curva (sentido do escoamento) que gera como resposta um valor de y .

O padrão de comportamento das esteiras formadas pelo escoamento cruzado em relação a dois cilindros lado a lado é a combinação de uma esteira larga (WW) e uma esteira estreita (NW), vistas na figura 2.1. Esta configuração foi confirmada para escoamentos aerodinâmicos (Alam *et al.*, 2003) e escoamentos hidrodinâmicos (Alam *et al.*, 2004).

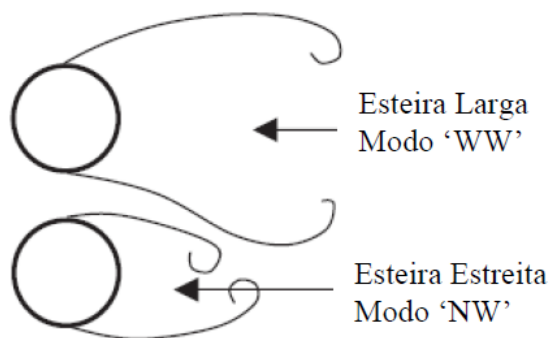


Figura 2.1 – Padrão de formação de esteiras para dois cilindros lado a lado. Fonte: Lopez, 2014.

De acordo com Alam *et al.*, 2003, dois cilindros de mesmo diâmetro, lado a lado e em escoamento cruzado sofrem alternância entre as larguras de suas esteiras, de forma aleatória para valores de p/d entre 1,1 e 2,5, onde p é o passo (distância entre centros) e d o diâmetro destes. Para razões de espaçamento (p/d) acima de 2,5 as esteiras passam a ser quase insensíveis uma a outra. A desigualdade entre as larguras de esteiras formadas pelos perfis, gera diferenças de arrasto entre estes, sendo, de acordo com os autores, o valor de maior arrasto associado à esteira estreita para razões de espaçamento inferiores a 1,5.

3. METODOLOGIA

Este trabalho consistiu em adaptar uma bancada existente usada para a visualização de linhas de corrente formadas por uma mistura de água e sabão, de forma que pudesse se observar linhas de emissão em canal predominantemente bidimensional. Para validar as modificações, foram efetuados testes com resultados presentes na literatura para perfis tridimensionais, sendo estes, a observação dos três primeiros modos de desprendimento de vórtices. Partindo da confirmação de que resultados relativos a formação de esteiras em perfil circular único condiziam com comportamentos descritos por outros autores, partiu-se para os experimentos específicos.

3.1. FUNCIONAMENTO DA BANCADA

A bancada da qual se iniciou o projeto era formada por dois reservatórios com paredes de vidro localizados em suas extremidades, entre estes uma chapa de policarbonato servia como base para a geração da lamina d'água para as visualizações. O tanque de saída, ligado por um circuito externo de circulação de água por mangueiras, alimentava o tanque de entrada. Esta canalização passava por uma bomba centrífuga e por uma válvula para regular a vazão volumétrica e então retornava ao tanque de entrada, que ao ser preenchido transbordava sobre a chapa que definia o fundo do canal. O maior dos reservatórios, o de entrada, possui maior dimensão a fim de minimizar perturbações provenientes das canalizações. No mesmo sentido a chapa de policarbonato era curvada em sua interface com tal tanque.

3.2. GEOMETRIA DO CANAL

Para o experimento o canal foi reduzido em suas laterais por duas guias de 30 mm de largura por 10 mm de altura, ao longo de todo o comprimento do canal. Com o objetivo de criar uma entrada suave, não perturbando o escoamento e este se tornando desenvolvido com a menor distância possível, buscou-se uma geometria de bocal para a entrada do canal de visualização.

Das fórmulas apresentadas por Girardi *et al.*, 2003, foram desenvolvidas curvas para suavizar a entrada e a saída do canal, desta forma a região de visualização fica entre dois bocais convergentes. O bocal da entrada serve para suavizar a estricção do canal original da bancada para a largura usada no experimento, dado que os perfis estudados possuem escala menor do que os usados com sabão. O bocal de saída foi produzido posteriormente, em duas peças, vista a necessidade de criar uma perda de carga que aumentasse o preenchimento do canal para as vazões usadas. A figura 3.1 apresenta uma vista da bancada completa onde é possível ver as guias laterais e as curvas (na cor preta) do bocal de saída.

As curvas definidas por este equacionamento foram calculadas em planilha digital e seus valores geraram o gráfico contido na figura 3.2. A área azul representa a porção fechada do canal pelo bocal e é calculada de 0 % a 100 % de fechamento, representada no eixo vertical

e de 0 a 100 (adimensional) em comprimento desenvolvido no sentido do escoamento, representado no eixo horizontal.

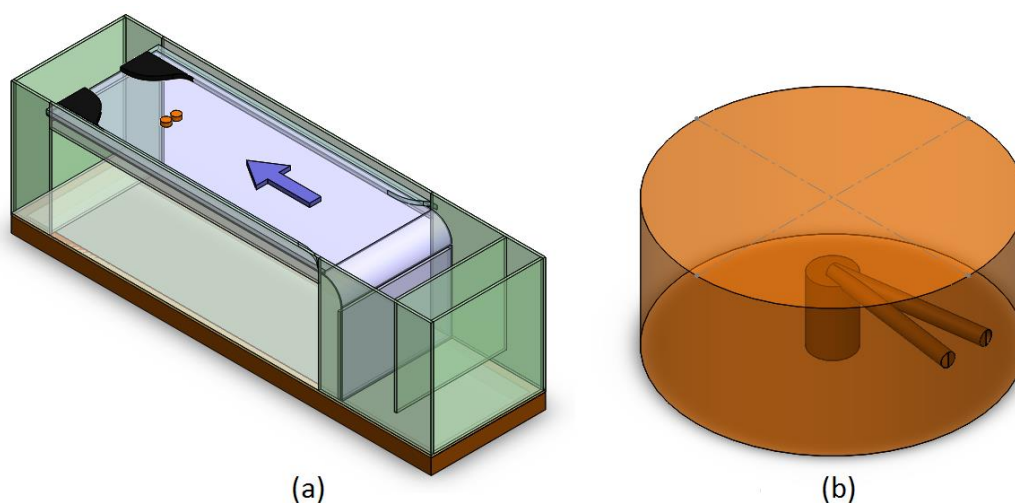


Figura 3.1 – Bancada de testes utilizada nos experimentos com as guias laterais e bocal de saída posicionados, cilindros e indicação do sentido do escoamento (a). Cilindro com detalhe do canal de entrada de tinta e saídas a 12° (b).

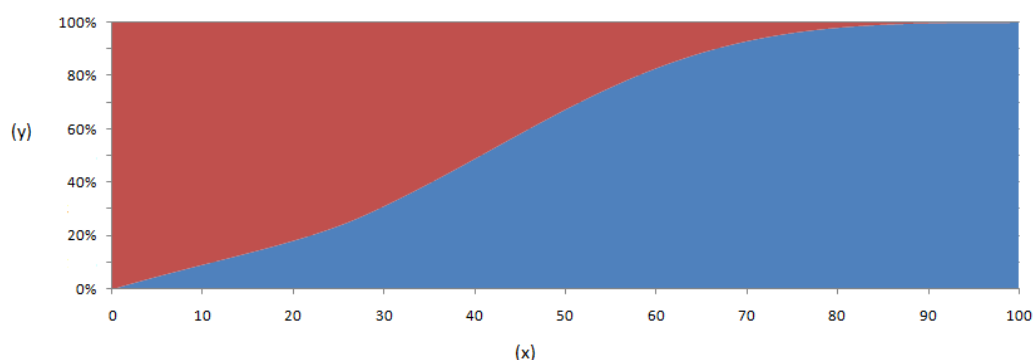


Figura 3.2 – Gráfico de valores de estricção (y) no eixo vertical, de 0% a 100%, ao longo do desenvolvimento da curva (x) no eixo horizontal, de 0 a 100 adimensionais.

Assim, as equações para as curvas dos bocais foram aplicadas aos intervalos de 0 mm a 100 mm em x e 0 mm a 30 mm em y para o bocal de entrada e 0 mm a 120 mm em x e 0 mm a 70 mm em y para o bocal de saída.

3.3. CORANTES

Os corantes escolhidos para as visualizações foram à base de tinta nanquim diluída em uma porção para duas porções de água. Estes se comportam bem para tal uso, pois sendo miscíveis em água, puderam ser diluídos e após entrarem no reservatório de saída se misturam completamente, não sendo percebidos nos filmes que mostram escoamentos de recirculação. As cores usadas foram preferencialmente combinações de uma cor quente (vermelha ou amarela) com uma fria (verde ou azul).

Como foram observados dois corpos cilíndricos, se utilizaram dois reservatórios. Estes com capacidade para aproximadamente 400 ml (mililitros) cada, posicionados entre 0,5 m e 1 m acima da cota onde o corante entrava em contato com a corrente livre liberam tinta por

gravidade. As mangueiras para ligar os reservatórios aos perfis foram as usadas para soro medicinal intravenoso, que além de possuírem reguladores de vazão próprios são de dimensão transversal apropriada para evitar obstruções.

Dois formas de controlar a vazão de corante estavam disponíveis, a regulagem de altura do tripé que sustentou os reservatórios e o fechamento/abertura das válvulas próprias das mangueiras.

Os perfis testados foram os próprios geradores das linhas de emissão conduzindo por seu interior a tinta liberada por orifícios orientados para montante do escoamento. Uma abertura na base dos perfis recebia a fina mangueira de condução da tinta desde o reservatório e duas saídas a 12° expelindo para o escoamento. Considerou-se que os corantes não influenciaram o escoamento de forma significativa pois a vazão destas é insignificante se comparada com a vazão do escoamento de água.

3.4. PERFIS TESTADOS

Os perfis usados para o experimento foram dois segmentos cilíndricos com diâmetro de 21,3 mm e altura de 10 mm. Ambos os corpos, inicialmente maciços foram perfurados em suas bases para receberem a entrada do corante por baixo do canal. Em cada cilindro se fizeram duas aberturas horizontais anguladas em aproximadamente 12° uma da outra para expelir a tinta e, com isso, produzir as linhas de emissão por ambos os lados e assim definir as extremidades das esteiras formadas. Os perfis escolhidos foram propositalmente curtos para induzir a realização de um experimento predominantemente bidimensional.

Seguindo como exemplo autores como de Paula, 2008 e Olinto, 2005, decidiu-se adotar para este estudo a razão de espaçamento $p/d = 1,26$, onde p é o passo (distância entre centros dos perfis) e d o diâmetro, igual para os dois cilindros. De maneira que a distância entre os centros foi fixada em 26,84 mm.

Foram testadas quatro configurações, sendo elas:

- Dois tubos lado a lado em diversas velocidades de escoamento, a fim de confirmar o aparecimento do fenômeno da biestabilidade no canal raso;
- Dois tubos lado a lado com três pequenos desvios angulares para observação da existência ou não do fenômeno com pequeno desalinhamento;
- Dois tubos lado a lado com a introdução de uma aleta paralela ao escoamento e simetricamente posicionada entre os perfis em três posições:
 - Com sua extremidade final alinhada ao ponto mais a montante dos perfis;
 - Exatamente entre os perfis;
 - Com sua extremidade inicial alinhada ao ponto mais a jusante dos perfis.
- Dois tubos lado a lado com duas aletas posicionadas normais aos perfis, em duas configurações, no sentido a montante e no sentido a jusante.

Podem ser vistos na figura 3.3 os cinco posicionamentos citados com aletas.

A aleta utilizada possuía $0,35 \text{ mm} \pm 0,01$ de espessura, $17,5 \text{ mm} \pm 0,01$ de comprimento (sentido do escoamento) e partiu do corte transversal de uma lamina comercial para estilete, tendo suas dimensões de seção transversal, incluindo fio, preservadas. Para as três montagens com uma aleta entre os perfis a lamina foi posicionada com fio a montante e para as duas montagens com duas laminas normais aos cilindros a posição foi com os fios nas extremidades opostas aos corpos em teste.

Todos os experimentos com aletas utilizaram a mesma velocidade média de escoamento de $68 \text{ mm/s} \pm 1$, a qual gerou um número de Reynolds de 1605 ± 20 e foram filmados em vídeos de 20 minutos.

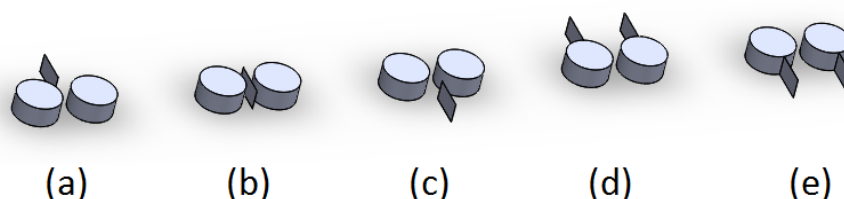


Figura 3.3 – Cinco configurações de aletas. (a) centralizada a montante, (b) entre os perfis, (c) centralizada a jusante, (d) unidas aos perfis a montante e (e) unidas aos perfis a jusante.

3.5. TOMADAS DE EXPERIMENTOS

Para cada arranjo, sendo reto, com desvio angular ou com a aletas, os resultados foram coletados através de vídeos gravados com máquina fotográfica digital da marca Sony, modelo DSC-W610. A câmera foi montada em apoio improvisado no laboratório para ser posicionada firmemente sobre a bancada experimental. Os vídeos gravados variaram de 2,5 minutos a 32 minutos. Todas as filmagens foram produzidas com a bancada isolada da aproximação de pessoas para que não fossem geradas perturbações ao escoamento. Após o termino das seções experimentais todos os vídeos foram cuidadosamente analisados e seus resultados registrados como exposto nas tabelas apresentadas no capítulo 4.

4. RESULTADOS E DISCUSÕES

Foram coletados dados do experimento para três diferentes configurações. Na primeira forma os tubos permaneceram lado a lado em relação ao escoamento e foram medidos os tempos entre as alternâncias de largura de esteiras para diferentes números de Reynolds. A segunda tomada de dados se concentrou no efeito de pequenos desvios angulares para o escoamento em relação à linha que unia os centros dos tubos. A terceira tomada visou à tentativa de se anular o fenômeno biestável com a colocação de uma quilha entre os perfis, testada em três posições e em duas posições para duas aletas uma em cada cilindro para duas posições.

4.1. DISPOSIÇÃO PERPENDICULAR NÃO ALETADA

Dos experimentos realizados puderam ser medidos os tempos em que ocorreram as trocas de largura de esteiras. Das observações foi criada a tabela 4.1. Nela pode ser vista a velocidade da corrente livre com respectivo número de Reynolds, a cor da tinta cujo tubo possui esteira larga no momento inicial, os tempos de troca de largura entre as esteiras com a respectiva cor que passa a ter esteira larga e o tempo final da gravação, sendo a última cor a que permaneceu até o momento final dos registros. Os valores dos Números de Reynolds foram calculados segundo a equação 2.1 e as incertezas associadas a estes calculadas conforme o apêndice A.

A espessura da camada limite calculada na posição dos cilindros, referente a placa plana ficou na faixa de 11,17 mm a 14,57 mm. Estudos da influência da espessura da camada limite no desprendimento de vórtices não foram realizados neste trabalho.

De acordo com De Paula, 2008, a visualização de tinta em canal hidráulico tridimensional apresenta resultados similares para três planos distintos de injeção de tinta, sendo que o mesmo foi observado no presente trabalho.

Tabela 4.1 – Tempos em minutos de alternâncias de largura de esteiras para cinco valores do número de Reynolds (Re_D) – escoamento perpendicular.

Vídeo 1		Vídeo 2		Vídeo 4	
$U = 60 \text{ mm/s} \pm 0,8$		$U = 75 \text{ mm/s} \pm 1,2$		$U = 65 \text{ mm/s} \pm 0,9$	
$Re_D = 1416 \pm 19$		$Re_D = 1770 \pm 29$		$Re_D = 1534 \pm 22$	
Tempo (s)	Cor	Tempo (s)	Cor	Tempo (s)	Cor
0	Vermelho	0	Vermelho	0	Vermelho
455	Verde	1266	Fim	30	Verde
515	Vermelho			60	Vermelho
1040	Verde			153	Fim
1090	Vermelho				
1175	Verde	Vídeo 3			
1247	Vermelho	$U = 50 \text{ mm/s} \pm 0,6$			
1780	Verde	$Re_D = 1180 \pm 14$			
1813	Vermelho	Tempo (s)	Cor	Vídeo 5	
1927	Fim	0	Vermelho	$U = 85 \text{ mm/s} \pm 1,5$	
		440	Verde	$Re_D = 2006 \pm 36$	
		522	Vermelho	Tempo (s)	Cor
		599	Fim	0	Vermelho
				118	Verde
				195	Vermelho
				210	Verde
				298	Vermelho
				314	Fim

Entre a primeira e a última alteração de larguras de esteiras, em cada observação calcularam-se os tempos de permanência mantidos até a variação seguinte, destes foram obtidos a média e desvio padrão. A segunda observação não foi incluída neste cálculo, pois esta não mostrou alternâncias, assim como a terceira e a quarta observações, estas não obtiveram mais de um tempo intermediário de permanência. Ver tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Tempos de permanência de configurações de escoamentos com média e desvio padrão.

Vídeo 1		Vídeo 5	
Tempo (s)	Cor	Tempo (s)	Cor
60	Verde	77	Verde
525	Vermelho	15	Vermelho
50	Verde	88	Verde
85	Vermelho	60	Média
72	Verde	39	Desvio padrão
533	Vermelho		
33	Verde		
194	Média		
229	Desvio padrão		

As figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 se referem aos resultados dos experimentos com canal reto e sem aletas.



Figura 4.1 – Capturas do vídeo 1 relativas às configurações das esteiras com os respectivos tempos em que foram tomadas. $Re_D = 1416 \pm 19$.



Figura 4.2 – Capturas do vídeo 3 relativas às configurações das esteiras com os respectivos tempos em que foram tomadas. $Re_D = 1180 \pm 14$.

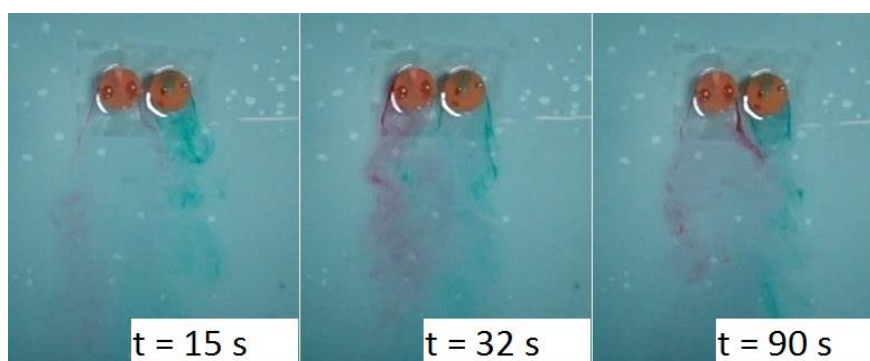


Figura 4.3 – Capturas do vídeo 4 relativas às configurações das esteiras com os respectivos tempos em que foram tomadas. $Re_D = 1534 \pm 22$.

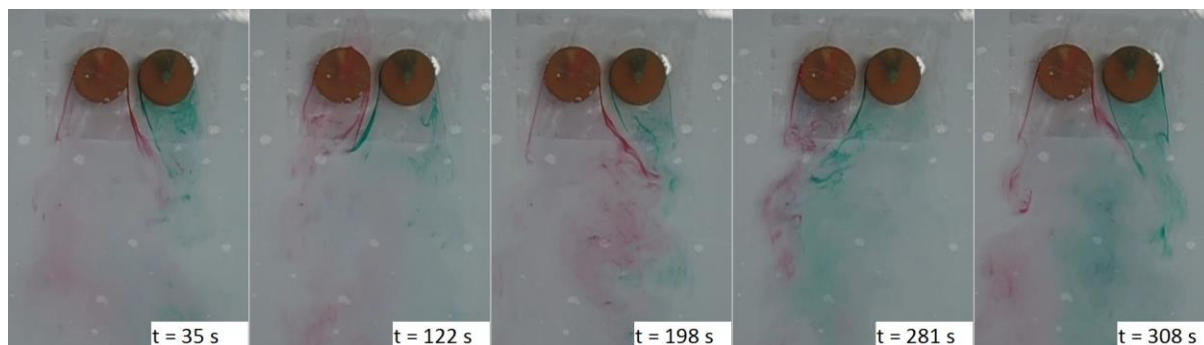


Figura 4.4 – Capturas do vídeo 5 relativas às configurações das esteiras com os respectivos tempos em que foram tomadas. $Re_D = 2006 \pm 36$.

A comparação dos valores de média e desvio padrão vistos na tabela 4.2 apresenta, principalmente na observação do vídeo 1, uma forte tendência a aleatoriedade, já esperada segundo a bibliografia. As variações se deram em tempos imprevisíveis e não demonstraram qualquer tendência de tempo de permanência em qualquer configuração. Ainda pôde-se perceber que no vídeo 2, que possuía um valor de número de Reynolds intermediário e um dos maiores tempos de gravação, não ocorreram alternâncias entre as esteiras, o que rejeita a ideia de uma tentativa de relação entre U ou Re com o tempo para as trocas. Pode o fenômeno ser produzido pela presença do escoamento não tendo relação com os parâmetros do mesmo.

4.2. DISPOSIÇÕES EM ÂNGULO

Alam *et al.*, 2004, experimentaram configurações para ângulos entre a linha que une os centros dos cilindros e o escoamento variando de 0° a 75°. Para os desvios de 10°, 25°, 45°, 60° e 75°, foram registrados comportamentos biestáveis, porém estes em configurações diferentes das observadas para tubos lado a lado e em oscilações intermitentes.

Os ângulos foram gerados pelas guias laterais, estas, com 73 cm de comprimento, foram desviadas das paredes do canal original em 50 mm e 20 mm (à direita) e 10 mm (à esquerda), de um lado a montante e de outro a jusante dos perfis gerando os ângulos vistos na tabela 4.3, que apresenta os resultados dos tempos de alternância entre as larguras das esteiras. A tabela 4.4 apresenta os tempos de permanência relativos à tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resultados das trocas de largura de esteiras para os três diferentes ângulos testados.

Vídeo 6		Vídeo 7		Vídeo 8	
$\theta = 3,92^\circ \pm 0,079$		$\theta = 1,57^\circ \pm 0,078$		$\theta = -0,78^\circ \pm 0,078$	
$U = 106 \text{ mm/s} \pm 2,3$		$U = 80 \text{ mm/s} \pm 1,4$		$U = 94 \text{ mm/s} \pm 1,9$	
$Re_D = 2501 \pm 49$		$Re_D = 1888 \pm 29$		$Re_D = 2218 \pm 39$	
Tempo (s)	Cor	Tempo (s)	Cor	Tempo (s)	Cor
0	Verde	0	Vermelho	0	Verde
1927	Fim	118	Verde	39	Vermelho
		350	Fim	79	Verde
				252	Vermelho
				277	Verde
				428	Vermelho
				502	Verde
				511	Vermelho
				582	Verde
				599	Fim

Tabela 4.4 – Tempos de permanência de esteiras com média, desvio padrão e tempos totais para cada esteira.

Vídeo 8			
Tempo (s)	Cor	Tempo (s)	Cor
40	Vermelho	71	Vermelho
173	Verde	79	Média
25	Vermelho	68	Desvio
151	Verde	Total	
74	Vermelho	139	Vermelho
9	Verde	333	Verde

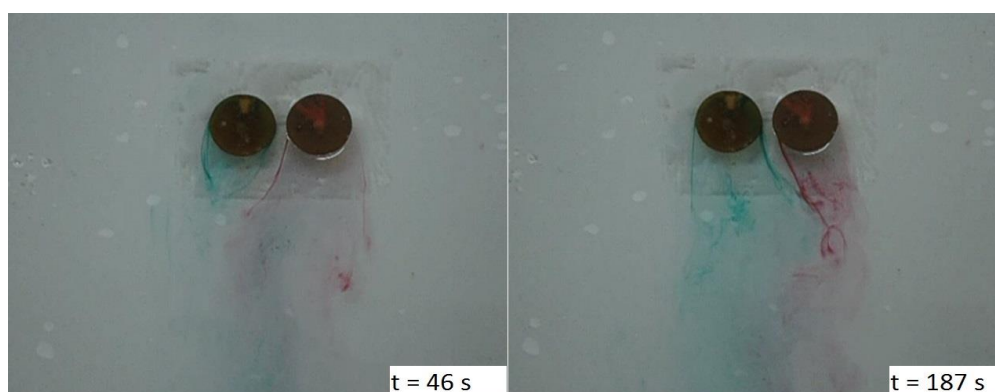


Figura 4.5 – Capturas do vídeo 7 relativas às configurações das esteiras com os respectivos tempos em que foram tomadas. $Re_D = 1888 \pm 29$.

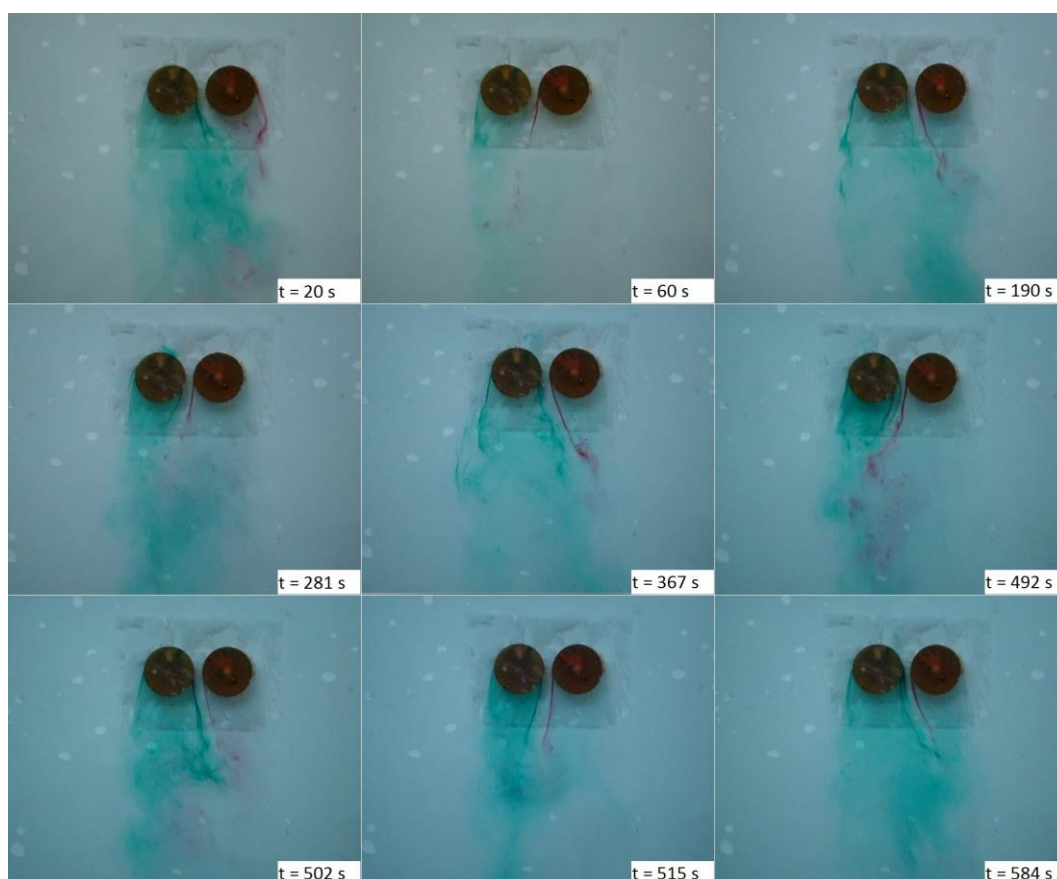


Figura 4.6 – Capturas do vídeo 8 relativas às configurações das esteiras com os respectivos tempos em que foram tomadas. $Re_D = 2218 \pm 39,3$.

Como é possível ver na Tabela 4.3, as trocas não ocorreram para o ângulo de $3,92^\circ$ mesmo para um tempo relativamente grande de captura (1927 segundos). Este fato pode ser visto como normal para um fenômeno com a aleatoriedade percebida até então. Por outro lado, com o ângulo de $1,57^\circ$ ocorre apenas uma troca dentro de um intervalo de tempo de 350 segundos. Isto pode indicar uma tendência ao aumento do período entre alternâncias para a

aplicação de pequenos ângulos até a anulação das ocorrências e reaparecimento do fenômeno para grandes ângulos, mas em formas distintas, como as observadas por Alam *et al.*, 2004.

Intuitivamente pensou-se que os ângulos fariam com que a esteira larga permanecesse por mais tempo ao redor do perfil levemente a jusante, pois este posicionamento forçaria, entre os mesmos, um jato direcionado para a esteira do cilindro a montante, contribuindo para manter esta esteira estreita e sua complementar larga. Esta teoria não se comprovou nos resultados das visualizações. Deve ser ressaltado, no entanto, o fato de que no vídeo 6, com o maior ângulo, a permanência da configuração seja condizente com esta possibilidade e no vídeo 7 a única troca tenha ocorrido da esteira larga de (segundo este raciocínio) menor tendência de permanência para a de maior tendência. Já a terceira tomada, vista no vídeo 8 indica o contrário a este comportamento. Com desvio a esquerda, o comportamento similar as observações anteriores seria o de a esteira de corante vermelho permanecer por maior tempo com largura predominante. Esta, permanecendo por pouco mais de um terço do tempo observado sendo mais larga pode indicar duas possibilidades: este modelo do comportamento de tendência de maior permanência em função do ângulo não é válido ou a pequena angulação utilizada no último experimento teve seu efeito suplantado, possibilitando efeitos da aleatoriedade característica do fenômeno da biestabilidade.

4.3. DISPOSIÇÕES COM UMA ALETA

Vedat, *et al.*, 2012, realizaram experimentos com uma aleta entre os cilindros. Para o estudo, estes usaram uma razão de espaçamento $p/d = 1,25$ e razão L/d entre 1 e 5, onde L é o comprimento da aleta. A posição utilizada foi fixa, com a extremidade a montante lado a lado com os pontos de estagnação dos cilindros. Destes observaram-se alterações no escoamento em que, para valores de L/d acima de 3, as esteiras se tornavam simétricas.

Com o posicionamento de uma aleta nas três configurações mencionadas foram registrados novos vídeos, um para cada arranjo. Nestes experimentos a velocidade do escoamento se manteve inalterada em aproximadamente $68 \text{ mm/s} \pm 1$, sendo desta forma o número de Reynolds 1605 ± 20 .

No vídeo com a aleta central a montante o efeito da biestabilidade foi anulado, mas as esteiras, que permaneceram em larguras próximas ao diâmetro dos tubos permaneceram por todo o experimento oscilando lateralmente. Estas variações (flip-flop), assim como no fenômeno biestável ocorreram de forma a uma esteira complementar o espaço ocupado anteriormente pela outra, porém com variações em mais alta frequência (aproximadamente $0,5 \text{ Hz} \pm 0,02$) e em trocas previsíveis. Pôde-se observar a formação de vórtices nas laterais externas das esteiras (Figura 4.2 (a)).

Os experimentos com a aleta entre os dois perfis e com a aleta a jusante destes mantiveram-se as mesmas características gerais do caso anterior. Para estes, no entanto, a frequência de oscilação se manteve a $0,7 \text{ Hz} \pm 0,02$. Ainda se mostrou claramente a formação de vórtices em ambas as extremidades laterais das duas esteiras (Figura 4.2 (b) e (c)).

Em todos os casos de formação de vórtices para as configurações com uma aleta, os mesmos se formaram no momento em que a linha de emissão limitadora da esteira avançou em sentido do próprio interior.

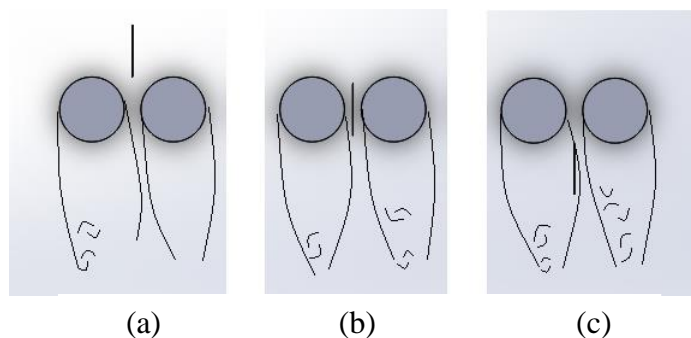


Figura 4.2 – Esteiras formadas pelos perfis com uma aleta. (a) a montante, (b) entre os tubos e (c) a jusante.

Os três posicionamentos experimentados geraram efeitos similares ao escoamento e caracterização das esteiras, eliminando a biestabilidade, que geralmente é um fenômeno indesejado. Todavia, da colocação da aleta surgiram oscilações que podem, dependendo do caso ser prejudiciais e ainda mais nocivas do que a biestabilidade. Estas podem ter efeitos estruturais de cargas cíclicas e levar as tubulações ao colapso por fadiga. A figura 4.3 apresenta o resultado do experimento com uma aleta centralizada a montante dos cilindros. Foram observadas variações de amplitude lateral inferiores as vistas na biestabilidade, mas para tempos próximos a um segundo entre um e outro extremos.



Figure 4.3 – Resultado do experimento com uma aleta a montante dos cilindros, com quadros de 7 segundos, 8 segundos e 9 segundos. $Re_D = 1605 \pm 20$.

4.4. DISPOSIÇÕES COM DUAS ALETAS

Da mesma forma como para aleta única, os experimentos realizados com duas foram realizados em velocidade de corrente livre padrão e sem variações, esta igualmente a $68 \text{ mm/s} \pm 1$ e, por consequência, número de Reynolds 1605 ± 20 .

A disposição com duas aletas a jusante dos perfis apresentou, diferentemente das outras configurações aletadas, um padrão de esteiras larga e estreita. Ao logo do tempo de observação, porém, não foram constatadas alternâncias e a esteira larga permaneceu assim por mais de vinte minutos. Desta forma se concluiu ser esta a melhor entre as configurações testadas para a anulação da biestabilidade. Não havendo trocas de largura entre as esteiras o fenômeno em estudo foi anulado com sucesso e não ocorrendo as oscilações com frequência definida as estruturas são preservadas em relação a rupturas por fadiga ou qualquer excitação dinâmica.

A observação da filmagem feita com as aletas frontais (a montante) mostra, assim como visto para aleta única, um padrão oscilatório e ritmado, este com frequência medida de

0,7 Hz \pm 0,02, efeito similar ao observado para aleta entre os perfis e aleta a jusante. Outro fator percebido foi o avanço dos corantes em ambos os perfis avançando até a extremidade de suas respectivas aletas como um indício da presença de recirculação frontal.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta resultados de visualizações do escoamento do fenômeno da biestabilidade para dois tubos lado a lado em bancada de canal hidrodinâmico aproximadamente bidimensional. O fenômeno foi identificado para diversos números de Reynolds, sendo que este é um resultado inovador, pois até então o fenômeno é estudado com tubos tridimensionais.

Para a disposição perpendicular sem aletas, que é a configuração mais comum na literatura, existe uma forte tendência à aleatoriedade, e esta pôde ser comprovada para o canal raso. Mesmo para números de Reynolds intermediários entre os testados, não ocorreram comportamentos que possam ser vistos com linearidade ou qualquer influência de proporcionalidade aos experimentos adjacentes, o que rejeita as tentativas de relacionar velocidade ou número de Reynolds com a forma como se dá o fenômeno.

Observou-se o fato de que, para os três ângulos testados, a frequência de alternâncias entre a largura das esteiras foi inversa ao desvio da perpendicularidade, diminuindo à medida que o ângulo aumentava, embora de forma não proporcional, possuindo ainda forte influência de aleatoriedades. Quanto a uma tendência de maior permanência de determinada esteira como a mais larga em relação a desvios angulares nada foi comprovado, sendo assim sugerido um estudo mais aprofundado do assunto.

A biestabilidade se mostrou um fenômeno facilmente anulável pelo uso de aletas. Das cinco formas de aplicação, todas resultaram em comportamentos diferentes para as esteiras. A inserção de aletas para a maior parte dos posicionamentos gerou outro comportamento geralmente indesejado, as oscilações com frequência mais alta e definida.

A disposição com duas aletas a jusante dos perfis, que apresentou um padrão de esteiras larga e estreita sem alternância, esta foi considerada a melhor entre as configurações testadas para a anulação da biestabilidade, pois neste posicionamento não ocorreram os dois efeitos indesejados, o fenômeno em estudo e as alternâncias de mais alta frequência.

A observação do escoamento ao redor dos perfis com aletas a montante mostra efeito similar ao visto para aleta única a montante, entre os perfis e a jusante, um padrão oscilatório e ritmado, com duas esteiras de largura aproximada. Ainda para esta configuração podem ser vistos sinais de recirculação a montante dos tubos.

Os experimentos realizados em canal hidrodinâmico predominantemente bidimensional não se diferenciaram, qualitativamente, em comportamento relativo às esteiras, dos resultados encontrados na literatura, podendo-se assim, considerar que a minimização da componente vertical não altera o comportamento biestável para os casos testados.

Para experimentos similares recomenda-se o uso de dutos para condução de corantes com diâmetro interno superior a 2 mm, do contrário, a perda de carga associada a estes tende a anular o escoamento. Para evitar que a tinta seja expelida em jatos intermitentes a solução encontrada foi a diminuição da altura de coluna de tinta em combinação com a maior abertura das válvulas.

Em testes com variações do número de Reynolds em canal raso e com profundidade necessariamente fixa é recomendada a produção de um conjunto de bocais de saída para obter controle da perda de carga neste ponto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

Alam, M. M.; Sakamoto, H.; Zhou, Y., 2004, "**Determination of flow configurations and fluid forces acting on two staggered circular cylinders of equal diameter in cross-flow**", Journal of Fluids and Structures, Vol. 21 pp. 363-394.

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.

Girardi, R. M.; Fico, N. G. C. R.; Mello, O. A. F. e Komatsu, P., "**Research Wind Tunnel of the Aeronautical Institute of Technology: Manufacturing Aspects and Design Details**", In: International Congress of Mechanical Engineering, 17., 2003, São Paulo, Proceedings of COBEM, São Paulo ABCM, 2003. p. 1232323-4324254.

Incropera, F. P.; Dewitt, D. P.; Bergman, T. L.; Lavine, A. S., "**Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**", 6. ed., Rio de Janeiro, LTC, 2008.

Lopez. J. J. O., 2014, "**Simulação numérica das características do escoamento turbulento sobre cilindros dispostos lado a lado**", Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais da Integridade da Engenharia, Publicação 016A/2014, Faculdade UnB Gama/FT/Universidade de Brasília, DF, 95 p.

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.

Moffat, R. J., 1988, "**Describing the uncertainties in experimental results**", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 1, pp. 3-17.

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.

Vedat, O.; Akar, M. A.; Hüseyin A., Besir S., 2012, "**Suppression of asymmetric flow behavior downstream of two side-by-side circular cylinders with a splitter plate in shallow water**", Measurement, Vol. 46 pp. 442–455.

APÊNDICE A - INCERTEZAS

De acordo com Moffat, 1988, a incerteza de um valor (δR) composta pelas incertezas acumuladas de diversas medidas pode ser aproximada pela equação:

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

em que $R = R(x_1, x_2, \dots, x_m)$ é o resultado da análise, m é o número de variáveis da equação e δX_i é a incerteza de cada variável.

APÊNDICE A.1 - Número de Reynolds

Para o cálculo de incertezas dos números de Reynolds os erros das variáveis são:

Velocidade (U): a velocidade foi medida pelo o tempo que um marcador de baixa densidade flutuando na corrente livre percorria uma distância de 0,5 m:

Distância medida para as velocidades (s): erro relativo à trena utilizada de ± 1 mm;

Tempos medidos para as velocidades (t): tempo de reação e erro de cronômetro estimados em $\pm 0,1$ s;

Diâmetro (d): o diâmetro dos perfis foi medido com erro relativo ao paquímetro de $\pm 0,01$ mm;

Temperatura (T):

Os vídeos 1, 2, 3, 4 e 5 são gravações do dia 25/05/2015 ($T = 24 \pm 0,1$ °C);

Os vídeos 6, 7 e 8 são gravações do dia 28/05/2015 ($T = 20 \pm 0,1$ °C);

Os vídeos 9, 10, 11, 12 e 13 são gravações do dia 01/06/2015 ($T = 18 \pm 0,1$ °C).

Aplicando a equação A.1 calculam-se as incertezas associadas às velocidades do escoamento:

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

$$\delta U = \left[\left(\frac{1}{t} * 0,001 \right)^2 + \left(-\frac{0,5}{t^2} * 0,1 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.3})$$

$$\delta U = \left[\left(\frac{1,00 * 10^{-5}}{t^2} \right) + \left(\frac{2,50 * 10^{-3}}{t^4} \right) \right]^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{1,00 * 10^{-5} * t^2 + 2,50 * 10^{-3}}{t^4} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.4})$$

A partir dos dados da tabela de propriedades da água, apêndice A, Fox, *et al.*, 2011, e por interpolação desta, as incertezas associadas à viscosidade cinemática (ν) de cada dia de experimento são calculadas:

$T = 24 \pm 0,1$ °C (dia 25/05/2015)

$\nu_{min} = 9,17 * 10^{-7}$ m²/s, $\nu_{max} = 9,21 * 10^{-7}$ m²/s, $\nu = 9,19 \pm 0,02 * 10^{-7}$ m²/s, $\delta \nu = 2,00 * 10^{-9}$ m²/s;

$T = 20 \pm 0,1$ °C (dia 28/05/2015)

$\nu_{min} = 1,01 * 10^{-6}$ m²/s, $\nu_{max} = 1,01 * 10^{-6}$ m²/s, $\nu = 1,01 \pm 0,00 * 10^{-6}$ m²/s, $\delta \nu = 0,00$ m²/s;

$T = 18 \pm 0,1$ °C (dia 01/06/2015)

$\nu_{min} = 1,06 * 10^{-6}$ m²/s, $\nu_{max} = 1,06 * 10^{-6}$ m²/s, $\nu = 1,06 \pm 0,00 * 10^{-6}$ m²/s, $\delta \nu = 0,00$ m²/s.

Por fim calcula-se a incerteza associada ao número de Reynolds:

$$\delta ReD = \left[\left(\frac{\partial ReD}{\partial U} * \delta U \right)^2 + \left(\frac{\partial ReD}{\partial d} * \delta d \right)^2 + \left(\frac{\partial ReD}{\partial v} * \delta v \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (A.5)$$

$$\delta ReD = \left[\left(\frac{d}{v} * \delta U \right)^2 + \left(\frac{U}{v} * \delta d \right)^2 + \left(\frac{U*d}{v^2} * \delta v \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (A.6)$$

$$\delta ReD = \left[\left(\frac{0,0213}{v} * \delta U \right)^2 + \left(\frac{U}{v} * 1,00 * 10^{-5} \right)^2 + \left(-\frac{U*0,0213}{v^2} * \delta v \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (A.7)$$

APÊNDICE A.2 - Ângulos

De forma análoga, são calculadas as incertezas associadas à medição dos ângulos. Os desvios angulares foram determinados pelo arco-seno da razão entre o afastamento (a) das extremidades das guias laterais e o comprimento (c) das mesmas, (equação A.8). A figura A.1 apresenta as medidas efetuadas.

$$\emptyset = \text{sen}^{-1}(a/c) \quad (A.8)$$

Aplicando a equação A.1 à equação A.8, e desenvolvendo o cálculo, obtém-se:

$$\delta \emptyset = \left[\left(\frac{\partial \emptyset}{\partial a} * \delta a \right)^2 + \left(\frac{\partial \emptyset}{\partial c} * \delta c \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (A.9)$$

$$\delta \emptyset = \left[\left(\frac{1}{c} * \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{a}{c}\right)^2}} * \delta a \right)^2 + \left(\frac{-a}{c^2} * \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{a}{c}\right)^2}} * \delta c \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (A.10)$$

Inserindo os valores $c = 730$ mm e os erros de a e c , $\delta a = 0,1$ mm e $\delta c = 0,1$ mm:

$$\delta \emptyset = \left[\left(\frac{1}{730 * \sqrt{1-\left(\frac{a}{730}\right)^2}} * 1 \right)^2 + \left(\frac{-a}{730^2 * \sqrt{1-\left(\frac{a}{730}\right)^2}} * 1 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (A.11)$$

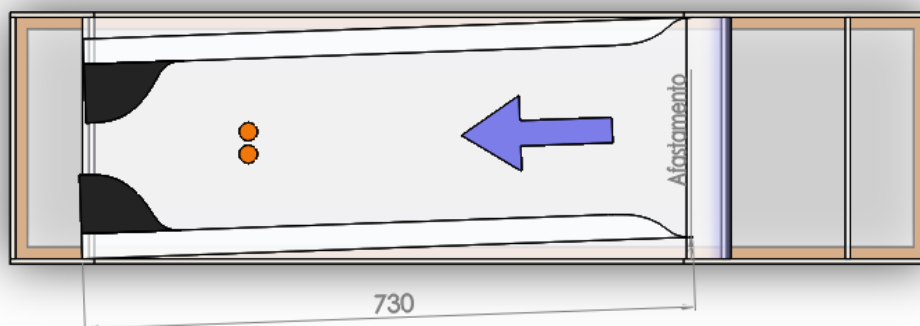


Figura A.1 – Medidas realizadas para cálculo de ângulo de desvio do escoamento, comprimento (c) das guias de 730 mm e afastamentos. Seta com sentido do escoamento.

Os valores resultantes da equação A.11 são dados em radianos, desta forma devem ser convertidos para a unidade utilizada ao longo do texto (graus). A equação A.12 pode ser aplicada para a conversão.

$$\theta = 57,29 * \varnothing \quad (\text{A.12})$$

Em que θ é o ângulo em graus e \varnothing é o ângulo em radianos.

APÊNDICE A.3 – Frequências

As incertezas relativas às frequências de oscilação de esteiras (δf) são novamente uma aplicação da equação A.1. Esta medida se originou da contagem do número de oscilações (n) entre as esteiras ocorridas no tempo (t) de trinta segundos e a equação A.13 descreve o cálculo.

$$f = \frac{n}{t} \quad (\text{A.13})$$

Da aplicação de A.1 em A.13 e do desenvolvimento pertinente das equações, obtém-se como resultado a equação A.15.

$$\delta\varnothing = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial n} * \delta n \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial t} * \delta t \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.14})$$

$$\delta\varnothing = \left[\left(\frac{1}{t} * \delta n \right)^2 + \left(\frac{-n}{t^2} * \delta t \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.15})$$

A incerteza associada à medição do tempo é de 1 s (um segundo), e a incerteza associada ao número de ciclos é de meio ciclo, pois o controle de posição das esteiras não é exato. Desta forma as incertezas de frequência são dadas pela equação A.16.

$$\delta\varnothing = \left[\left(\frac{1}{70} \right)^2 + \left(\frac{-n}{35^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.16})$$