

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

GIULIO DALMOLIN CERVO

ESTUDO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO SOBRE PLACAS PLANAS
MUNIDAS DE PROTUBERÂNCIAS QUADRADAS E ONDULADAS

Ilha Solteira - SP
2013

GIULIO DALMOLIN CERVO

ESTUDO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO SOBRE PLACAS PLANAS
MUNIDAS DE PROTUBERÂNCIAS QUADRADAS E ONDULADAS

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia do Campus de Ilha Solteira –
UNESP como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica.

Área de conhecimento: Ciências térmicas.

Prof. Dr. Edson Del Rio Vieira
Orientador

Prof. Dr. Sérgio Said Mansur
Co-orientador

Ilha Solteira - SP
2013

FICHA CATALOGRÁFICA

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

C419e

Cervo, Giulio Dalmolin.

Estudo experimental do escoamento sobre placas planas munidas de protuberâncias quadradas e onduladas / Giulio Dalmolin Cervo. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2013
101 f. : il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Conhecimento: Ciências Térmicas, 2013

Orientador: Edson Del Rio Vieira

Coorientador: Sérgio Said Mansur

1. Visualização de escoamento. 2. Emissão de vórtices. 3. Anemometria.



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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Estudo Experimental do Escoamento sobre Placas Planas Munidas de Protuberâncias Quadradas e Onduladas

AUTOR: GIULIO DALMOLIN CERVO

ORIENTADOR: Prof. Dr. SERGIO SAID MANSUR

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

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



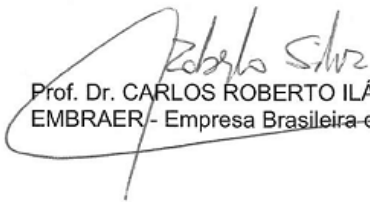
Prof. Dr. EDSON DEL RIO VIEIRA

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. RICARDO ALAN VERDÚ RAMOS

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. CARLOS ROBERTO ILÁRIO DA SILVA

EMBRAER - Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A.

Data da realização: 18 de março de 2013.

Aos meus pais, Nilo e Rosane e à minha
irmã, Thaís, pelo incentivo, compreensão
e carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por se mostrar presente em minha vida e sempre auxiliar em minhas escolhas.

Aos meus pais, Nilo e Rosane e à minha irmã Thaís por sempre me aconselhar, apoiar e motivar a vencer todos os desafios.

Aos meus orientadores pelos ensinamentos e pela amizade ao longo deste percurso.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Mecânica, em especial a Edvaldo Silva de Araújo e Marino Teixeira Caetano, por tornarem possível a realização deste trabalho e pela amizade durante esta caminhada.

Ao corpo docente da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira que me propiciou uma excelente formação acadêmica.

A todos meus amigos de Ilha Solteira e aos amigos de longa data, Edson Amorim Beiro Júnior, Izidro Cervo Cabrera e Paulo Ricardo de Andrade, pessoas com as quais compartilhei dos meus melhores momentos nesta caminhada.

“Aprenda como se fosse viver para sempre. Viva como se fosse morrer amanhã.”

Mahatma Gandhi

RESUMO

No presente trabalho, padrões de escoamento e emissão de vórtices produzidos por protuberâncias quadradas e onduladas situadas sobre uma placa plana são experimentalmente estudados através de visualização de escoamentos e anemometria de filme quente. Os experimentos foram conduzidos em um túnel hidrodinâmico vertical com intensidade turbulenta da corrente livre inferior a 0,3%. Informações qualitativas e quantitativas foram obtidas para números de Reynolds de até 2 500. Os padrões de escoamento foram capturados por meio de imagens estáticas com o túnel em operação no modo blow-down enquanto que a frequência de emissão de vórtices foi determinada por anemometria de filme quente em regime permanente. A injeção de corante líquido a montante das protuberâncias permitiu a visualização de recirculações nas cavidades bem como a formação e emissão de vórtices na camada cisalhante sobre as protuberâncias. A visualização de escoamento também contribuiu para encontrar o melhor posicionamento da sonda de filme quente a fim de obter a frequência de emissão de vórtices. Imagens da visualização de escoamentos obtidas para diferentes números de Reynolds mostraram a complexa estrutura topológica do escoamento, caracterizada pela emissão de vórtices, bolhas de recirculação, escoamento reverso e características da camada limite. Adicionalmente, o comportamento da frequência de emissão de vórtices como função do número de Reynolds foi determinado.

Palavras-chave: Visualização de escoamentos. Emissão de vórtices. Anemometria.

ABSTRACT

In the present work, flow patterns and vortex shedding phenomenon produced by square and wavy protuberances placed on a flat wall are experimentally studied by means of flow visualization and hot-film anemometry. The experiments have been performed in a vertical hydrodynamic tunnel whose turbulent intensity measured was less than 0,3%. Qualitative and quantitative information have been obtained for Reynolds numbers up to 2 500. The flow patterns have been captured in photographic still images in blow-down mode while vortex shedding frequencies have been determined by hot-film anemometry in steady mode operating. Injection of liquid dye upstream protuberances has allowed to visualize the recirculating flow inside cavities as well as vortex formation and shedding in the shear layer over the protuberances. Flow visualization has also helped to identify the best position to insert the hot-film probe in the flow in order to obtain a vortex shedding frequency with a high signal noise ratio. Flow visualization images obtained at different Reynolds number have shown the complex topological structure of the flow, characterized by vortex shedding, recirculating bubbles, reverse flow and boundary layer separation and attachment. Additionally, the behavior of the dimensionless vortex shedding frequency as a function of the Reynolds number has been determined.

Keywords: Flow visualization. Vortex shedding. Anemometry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Desenhos de Leonardo da Vinci retratando as características de diferentes escoamentos.	14
Figura 2 –	Componentes de uma unidade computacional.	16
Figura 3 –	Trocador de calor compacto de placas paralelas com aletas retangulares interrompidas dispostas em quincôncio.	17
Figura 4 –	Escoamento de ar em torno de edifícios.	18
Figura 5 –	Ilha de calor formada devido à zona de recirculação de ar.	18
Figura 6 –	Esplanada dos Ministérios em Brasília-DF.	19
Figura 7 –	Aeronave em voo.	20
Figura 8 –	Regimes de escoamento em um duto. (a) laminar, (b) transição, (c) turbulento.	21
Figura 9 –	(a) Sinal periódico no tempo. (b) Espectro de frequência do sinal.	22
Figura 10 –	Esquema da geometria do obstáculo no canal de escoamento.	24
Figura 11 –	Visualização do escoamento através de lâmina de laser.	25
Figura 12 –	Vórtices de uma protuberância quadrada sobre uma placa plana.	26
Figura 13 –	Diagrama esquemático do modelo experimental.	27
Figura 14 –	Linhas de corrente em torno de protuberâncias para $Re = 200$	29
Figura 15 –	Linhas de corrente em torno de protuberância para $Re = 2000$	29
Figura 16 –	Linhas de corrente no plano central ao canal de escoamento.	30
Figura 17 –	Ilustração esquemática das barras bidimensionais.	30
Figura 18 –	Ilustração esquemática do modelo. O escoamento flui da direita para a esquerda.	32
Figura 19 –	Região de recirculação e vórtices secundários.	32
Figura 20 –	Aparato experimental.	33
Figura 21 –	Diagrama esquemático do escoamento em torno da protuberância. ...	33
Figura 22 –	Comparação entre perfis de velocidade teórico e experimental.	34
Figura 23 –	Ilustração esquemática do túnel hidrodinâmico vertical.	37
Figura 24 –	Montagem experimental da seção de testes.	38
Figura 25 –	Janelas utilizadas na seção de testes do túnel hidrodinâmico.	40
Figura 26 –	Imagem do corpo de prova com protuberâncias de seção quadrada. (a) Vista geral e (b) Vista em detalhes.	41

Figura 27 – Imagem do corpo de prova com protuberâncias onduladas. (a) Vista geral e (b) Vista em detalhes.	42
Figura 28 – Características dos corpos de prova utilizados nos ensaios. (a) Protuberâncias de seção quadrada e (b) sobressaltos ondulados.	43
Figura 29 – Laboratório de Visualização de Escoamentos.	45
Figura 30 – Aplicação de anemometria no estudo do escoamento em maquetes: (a) Plataforma de petróleo e (b) Cadeia de montanhas.	46
Figura 31 – Diferentes tipos de sondas unidimensionais utilizadas em anemometria.	47
Figura 32 – Sondas de fio quente (a) tipo “X” para duas dimensões e (b) ortogonal para três dimensões.	48
Figura 33 – Componente do circuito de controle de uma ponte CTA.	49
Figura 34 – Relação entre a saída (Volts) e a velocidade (m/s).	50
Figura 35 – Aparelhos utilizados para processamento de dados colhidos pela sonda de fio quente.	51
Figura 36 – Esboço de Da Vinci mostrando vórtices formados no escoamento em uma expansão brusca e em torno de obstáculos.	52
Figura 37 – Dispositivo para injeção de corantes líquidos.	54
Figura 38 – Visualização do escoamento ao redor de corpo triangular utilizando injeção de corantes.	54
Figura 39 – Jato livre axissimétrico em meio quiescente, visualizado com o auxílio de duas técnicas de injeção de corante e iluminação contraluz.	56
Figura 40 – Imagens do escoamento sobre protuberâncias quadradas para Reynolds 11 a 134.	58
Figura 41 – Recirculações presentes nas cavidades para $Re \approx 35$	59
Figura 42 – Imagens do escoamento sobre protuberâncias quadradas para Reynolds 228 a 758.	61
Figura 43 – Recirculações presentes para $Re \approx 321$	62
Figura 44 – Formação da Instabilidade de Kelvin-Helmholtz. Martinez (2006)	63
Figura 45 – Escoamento para $Re \approx 445$	63
Figura 46 – Escoamento sobre uma placa plana munida de protuberâncias quadradas para $Re \approx 451$	64
Figura 47 – Detalhes do escoamento sobre placa com protuberâncias quadradas para Reynolds 517 a 1302.	65

Figura 48 – Posicionamento da sonda no escoamento.....	66
Figura 49 – (a) Sinal temporal e (b) espectro de frequência no escoamento sobre protuberâncias quadradas para $Re \approx 946$	67
Figura 50 – Curva de frequência de emissão de vórtices em função do número de Reynolds.	68
Figura 51 – Tipos de carenagens utilizadas nos experimentos com protuberâncias quadradas.....	69
Figura 52 – Frequência versus Re para diferentes configurações da sonda sobre a placa.....	70
Figura 53 – Alta e baixa frequências captadas pela sonda Anemométrica para $Re \approx 1559$	71
Figura 54 – Número de Strouhal em função do número de Reynolds.....	72
Figura 55 – Imagens do escoamento para Reynolds 10 a 215.	74
Figura 56 – Imagens do escoamento para Reynolds 338 a 533.	75
Figura 57 – Detalhe do escoamento para $Re \approx 461$	76
Figura 58 – Imagens do escoamento para Reynolds 614 a 1149.	77
Figura 59 – Posicionamento da sonda (a) acima da terceira cavidade e (b) acima da segunda protuberância.....	78
Figura 60 – Frequência de emissão de vórtices versus número de Reynolds para as diferentes posições da sonda.....	79
Figura 61 – Número de Strouhal versus número de Reynolds para as diferentes posições da sonda.	80
Figura 62 – Aparato experimental utilizado para calibração de sondas.	87
Figura 63 – Rotâmetro	88
Figura 64 – Perfil de velocidade de um jato livre.....	89
Figura 65 – Curva de calibração da sonda de filme quente.	89
Figura 66 – Sonda “L” e posicionador utilizados para aquisição de dados sem a presença de modelos na seção de testes.	90
Figura 67 – Perfil de velocidade do túnel hidrodinâmico para diferentes velocidades médias.....	91
Figura 68 – Medições de velocidade no centro da seção de testes.....	92

LISTA DE SÍMBOLOS

D	dimensão característica do corpo [m]
f	frequência de emissão de vórtices [s^{-1}]
I	intensidade turbulenta
Q	vazão volumétrica do escoamento [$m^3.s^{-1}$]
t	tempo [s]
T	temperatura do fluido [$^{\circ}C$]
U_{∞}	velocidade da corrente livre [$m.s^{-1}$]
μ	viscosidade dinâmica do fluido [$kg.m^{-1}.s^{-1}$]
ν	viscosidade cinemática do fluido [$m^2.s^{-1}$]
ρ	densidade do fluido [$kg.m^{-3}$]
A_t	área da seção de testes [m^2]
A	amplitude de onda
k	altura da barra [mm]
p	espaçamento entre as barras [mm]
W	largura do obstáculo [cm]
H	altura do obstáculo [cm]
x	coordenada cartesiana x
y	coordenada cartesiana y
z	coordenada cartesiana z

Números Adimensionais

Re	Número de Reynolds
St	Número de Strouhal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Aspectos históricos.....	14
1.2	Motivação	15
1.3	Familiarização com o conteúdo	20
1.4	Objetivos e escopo do trabalho	22
2	TRABALHOS PRECEDENTES	24
3	INSTALAÇÃO E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	35
3.1	Túnel hidrodinâmico.....	35
3.1.1	<i>Descrição da instalação</i>	<i>36</i>
3.1.2	<i>Seção de testes</i>	<i>38</i>
3.1.3	<i>Operação do túnel</i>	<i>42</i>
3.2	Anemometria de fio quente.....	45
3.2.1	<i>Tipos de sensores</i>	<i>46</i>
3.2.2	<i>Anemômetro de temperatura constante (CTA)</i>	<i>48</i>
3.2.3	<i>Curvas de calibração</i>	<i>49</i>
3.3	Visualização de escoamentos	51
3.3.1	<i>Injeção de corantes líquidos</i>	<i>53</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1	Placa plana munida de protuberâncias de seção quadrada.....	58
4.2	Placa plana munida de sobressaltos ondulados	72
5	CONCLUSÃO.....	81
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL	87
A.1	Curva de Calibração.....	87
A.2	Perfil de velocidade e Intensidade turbulenta	90

APÊNDICE B – ANÁLISE DE INCERTEZAS EXPERIMENTAIS	93
B.1 Análise de incerteza para amostras simples	93
B.2 Análise de incerteza das variáveis de interesse.....	96
<i>B.2.1 Comprimento.....</i>	<i>96</i>
<i>B.2.2 Temperatura.....</i>	<i>96</i>
<i>B.2.3 Área.....</i>	<i>96</i>
<i>B.2.4 Viscosidade Cinemática</i>	<i>97</i>
<i>B.2.5. Frequência</i>	<i>98</i>
<i>B.2.6. Vazão</i>	<i>98</i>
<i>B.2.7. Velocidade.....</i>	<i>98</i>
<i>B.2.8. Número de Reynolds.....</i>	<i>99</i>
<i>B.2.9 Número de Strouhal</i>	<i>100</i>

1 INTRODUÇÃO

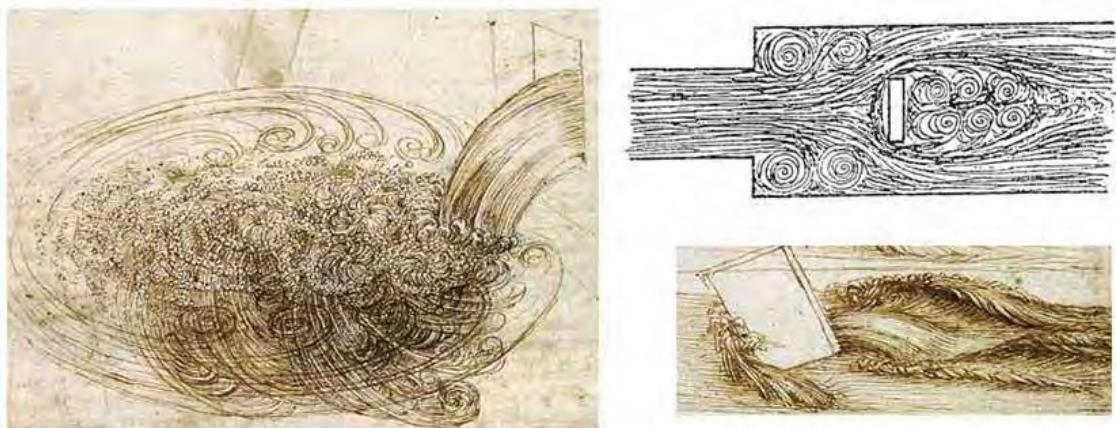
1.1 Aspectos históricos

Grande parte dos processos na natureza e em aplicações industriais envolvem escoamento de fluidos. Pode-se citar como exemplos os escoamentos em máquinas de fluxo, trocadores de calor, motores de combustão interna, sistemas de condicionamento de ar, dispersão de poluentes em rios e na atmosfera, correntes marinhas, furacões, tornados e outros.

Quer pela beleza característica de alguns fenômenos naturais, quer pela importância das aplicações que lhe são inerentes, os escoamentos sempre despertaram a curiosidade e o interesse da humanidade ao longo de sua história. Pinturas espirais, que muito se assemelham a estruturas turbilhonares, apareceram em vários sítios arqueológicos da Europa e da Ásia, permitindo especular que o homem pré-histórico, usando como ferramenta a simples observação da natureza, já havia notado a presença de vórtices e turbulência no movimento dos fluidos.

No século XVI, o movimento dos fluidos não passou despercebido aos olhos e à mente brilhante de Leonardo da Vinci. Seus esboços ricos em detalhes revelam o alto grau de compreensão que este sábio havia adquirido sobre diferentes tipos de escoamentos, onde vórtices e turbulência se faziam presentes, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Desenhos de Leonardo da Vinci retratando as características de diferentes escoamentos.



Fonte: Bartoli *et al.* (2009).

O escoamento de fluidos tornou-se tema de grande interesse entre os pesquisadores a partir do século XIX , principalmente após a divulgação da clássica experiência de Osborn Reynolds, em 1883, evidenciando os diferentes regimes de escoamento possíveis de serem encontrados no interior de um tubo. Neste trabalho, utilizou-se o chamado número de Reynolds, importante parâmetro adimensional que define a transição do regime laminar para o turbulento.

Nos dias de hoje, a turbulência vem sendo investigada por diversos pesquisadores, atuando em centenas de laboratórios ao redor do mundo. Como consequência, os mistérios fenomenológicos que permeiam o movimento turbulento dos fluidos vão sendo, pouco a pouco, desvendados. Entretanto, a formulação de uma teoria unificada capaz de contemplar todas as facetas do problema, resiste a genialidade humana e insiste em permanecer como um dos grandes desafios que ainda resta à física moderna. Nas últimas décadas, a evolução computacional e a grande disponibilidade de máquinas avançadas em universidades e em centros de pesquisa permitiram que modelos matemáticos fossem implementados para simular diferentes tipos de escoamentos turbulentos e transicionais. Atualmente, a simulação numérica de escoamentos tem um papel de grande importância nos estudos de turbulência, auxiliando na compreensão de fenômenos a ela associados.

1.2 Motivação

Na condição de grande protagonista no cenário tecnológico mundial, a indústria eletrônica tem realizado investimentos crescentes em pesquisa e desenvolvimento, visando o aprimoramento de dispositivos e a concepção de sistemas mais robustos, eficientes e sofisticados. É neste contexto que se inserem muitas das pesquisas relacionadas ao empacotamento e à miniaturização de sistemas eletrônicos.

Se, por um lado, o advento da miniaturização trouxe ganhos estéticos e funcionais a diferentes tipos de aparelhos, por outro lado, também criou novos desafios a serem superados, principalmente nos quesitos confiabilidade e segurança de sistemas.

De fato, o bom funcionamento e a vida útil de um circuito eletrônico estão diretamente associados à eficiência dos mecanismos de remoção do calor gerado

pelos seus componentes. A fabricação de elementos cada vez mais compactos e, ao mesmo tempo, com maior potência, tem agravado os riscos de superaquecimento, causa principal de danos em componentes eletrônicos. Assim, o desenvolvimento de novos dissipadores térmicos e o aprimoramento dos atuais sistemas de remoção do calor representam preocupações constantes no setor eletrônico.

Em algumas situações, componentes eletrônicos podem ser considerados como fontes de calor posicionadas no interior de cavidades, dutos ou canais, ocupados por um fluido de arrefecimento mantido em movimento forçado. Nesses casos, as taxas de transferência de calor dos componentes para o meio circundante mantêm estrita relação com a estrutura do escoamento no interior do sistema. Zonas de estagnação ou de recirculação podem ser prejudiciais ao processo de dissipação térmica, fazendo com que componentes elevem suas temperaturas além de patamares considerados seguros.

Assim sendo, a correta especificação dos parâmetros que caracterizam o escoamento, em função do posicionamento dos elementos geradores de calor no interior do sistema, constitui fator preponderante para o funcionamento seguro de circuitos eletrônicos. A Fig. 2 mostra um exemplo de circuito eletrônico utilizado em computadores.

Figura 2 – Componentes de uma unidade computacional.

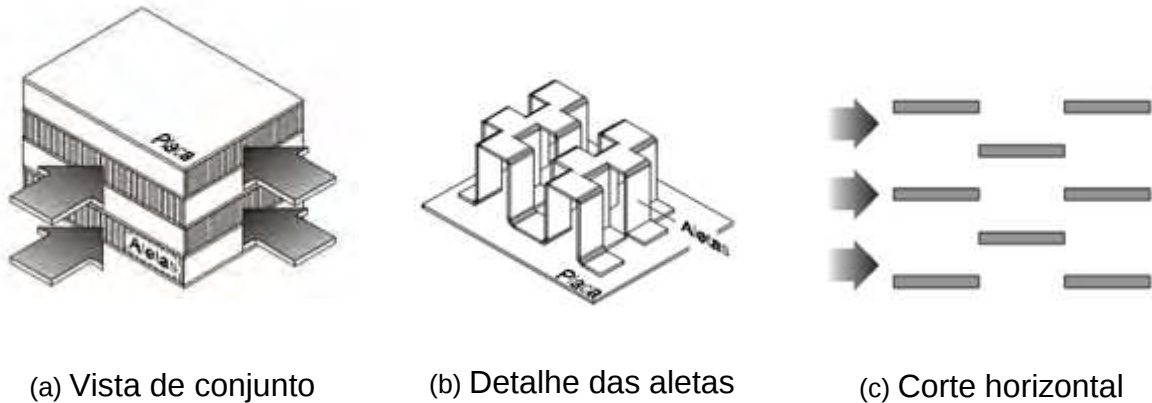


Fonte: ASUS (2013).

A Fig. 3 apresenta outro exemplo de particular interesse em aplicações industriais, onde o escoamento pode ser considerado como ocorrendo no meio de

um feixe de cilindros. Trata-se de um trocador de calor compacto com aletas retangulares interrompidas e dispostas em quincôncio. (LINDQUIST, 2000).

Figura 3 – Trocador de calor compacto de placas paralelas com aletas retangulares interrompidas dispostas em quincôncio.

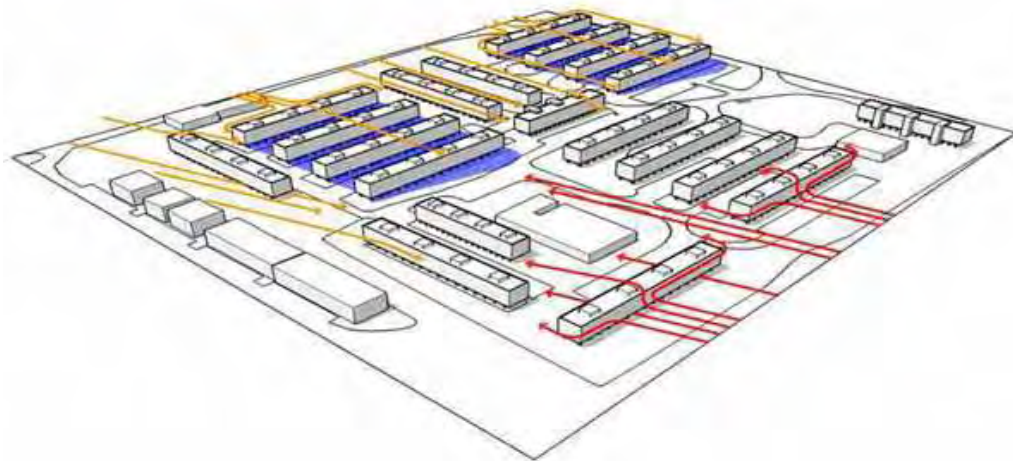


Fonte: Lindquist (2000).

Além de atuarem mecanicamente como elementos de sustentação das placas, as aletas podem favorecer o processo de transferência de calor. Claramente, a forma geométrica destes obstáculos exerce influência preponderante sobre o fenômeno de geração de vórtices, o qual é diretamente responsável pela eficiência do processo de convecção térmica.

O estudo do escoamento de ar em torno de prédios e demais construções é também de grande importância, pois influencia diretamente no planejamento de sua estrutura. A ocupação do solo numa cidade é fundamentalmente caracterizada por elevada densidade edificada e área aberta pavimentada e impermeável, o que contribui para o estabelecimento de um campo mais elevado de temperatura, designado por ilha de calor urbana. Quanto maior a densidade de construção e a ocupação do solo, maiores as atividades antrópicas, e, conseqüentemente, maior a captação e difusão da radiação solar e menor a ventilação no ambiente climático urbano. A Fig. 4 ilustra o escoamento de ar em diferentes direções sobre um conjunto de prédios.

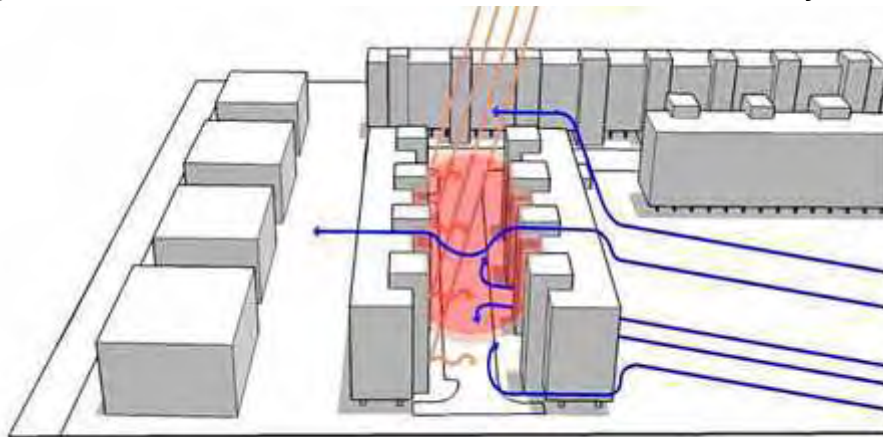
Figura 4 – Escoamento de ar em torno de edifícios.



Fonte: Romero (2011).

Segundo Romero (2011), no ambiente urbano não se encontra uma superfície única que seja representativa de todo o tecido urbano, pois este é composto por diferentes unidades espaciais. Existem, porém, algumas unidades representativas da superfície urbana cujas formas básicas são repetidas pela área urbana. Essas unidades são combinações mais ou menos geométricas de superfícies horizontais e verticais. A Fig. 5 mostra a ilha de calor formada em prédios devido à recirculação de ar.

Figura 5 – Ilha de calor formada devido à zona de recirculação de ar.



Fonte: Romero (2011).

Existe consenso, entre os pesquisadores, da necessidade de buscar diretrizes quantitativas para determinar percentuais recomendáveis para área edificada e para a cobertura vegetal, assim como para fazer recomendações acerca dos limites na relação entre altura de prédios e largura das vias.

De acordo com Tulapurkara *et al.* (2005), o escoamento de ar também influencia as forças e os momentos da estrutura e na circulação de ar dentro e fora de um edifício. Devido a este fato, o conhecimento destas forças e momentos é necessário para realizar seu projeto estrutural. A circulação do ar pode transportar emissões veiculares, poeira, entre outros poluentes para o interior do prédio, além de afetar o conforto de pedestres que estão em sua vizinhança. Entretanto, os efeitos são diferentes quando analisados em uma única construção ou para um grupo de prédios presentes em uma área. Consequentemente, o estudo do escoamento em torno de um único prédio e de uma combinação destes mostra-se relevante. A Fig. 6 mostra um exemplo de edifícios similares construídos em uma mesma região.

Figura 6 – Esplanada dos Ministérios em Brasília-DF.



Fonte: Bacelar (2013).

Nas aplicações da engenharia mecânica e afins, o escoamento em cavidades aparece nos campos automobilístico, naval e aeronáutico, como, por exemplo, sobre a carroceria de veículos terrestres, em cascos de embarcações ou sobre asas e fuselagens de aeronaves, como mostra a Fig. 7.

Figura 7 – Aeronave em voo.



Fonte: Trem... (2013).

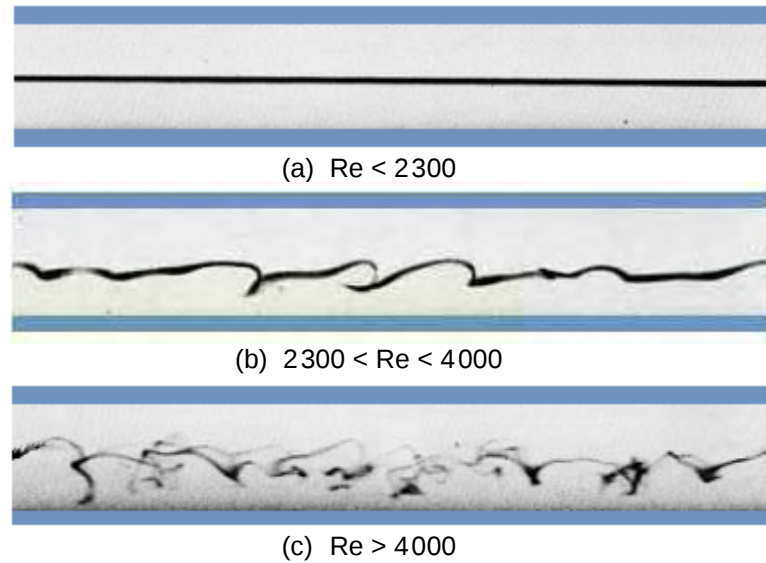
1.3 Familiarização com o conteúdo

Esta seção tem como objetivo uma sucinta explicação das principais equações e métodos que são empregados no presente trabalho. São abordados alguns aspectos históricos e exemplos simplificados para a fácil compreensão dos termos e procedimentos empregados.

Osborne Reynolds, físico irlandês, nasceu em Belfast em 1842 em uma clerical família anglicana. Seus primeiros trabalhos, por volta de 1868 e 1873 se concentraram em estudos e em problemas de eletricidade, magnetismo e eletromagnetismo. Nas décadas seguintes, voltou sua atenção aos trabalhos em mecânica dos fluidos, principalmente em hidrodinâmica.

Em um de seus mais importantes artigos, Reynolds investigou experimentalmente o escoamento de fluidos em dutos e canais e mostrou que existia uma velocidade crítica dependente do diâmetro do tubo e da viscosidade cinemática do fluido, a partir da qual ocorria a mudança no comportamento do escoamento, ou seja, o escoamento passava de um regime laminar para turbulento, conforme mostra a Fig. 8, obtida no Laboratório de Visualização do Departamento de Engenharia Mecânica da Unesp de Ilha Solteira.

Figura 8 – Regimes de escoamento em um duto. (a) laminar, (b) transição, (c) turbulento.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Esse coeficiente encontrado pelo pesquisador, hoje chamado número de Reynolds (Re), é um importante parâmetro adimensional usado em mecânica dos fluidos para se determinar o regime de escoamento de um fluido e é calculado como mostra a Eq. (1):

$$Re = \frac{U_{\infty} \cdot D}{\nu}, \quad (1)$$

onde U_{∞} é a velocidade característica do escoamento, D é o diâmetro do tubo ou comprimento característico do corpo e ν é a viscosidade cinemática do fluido.

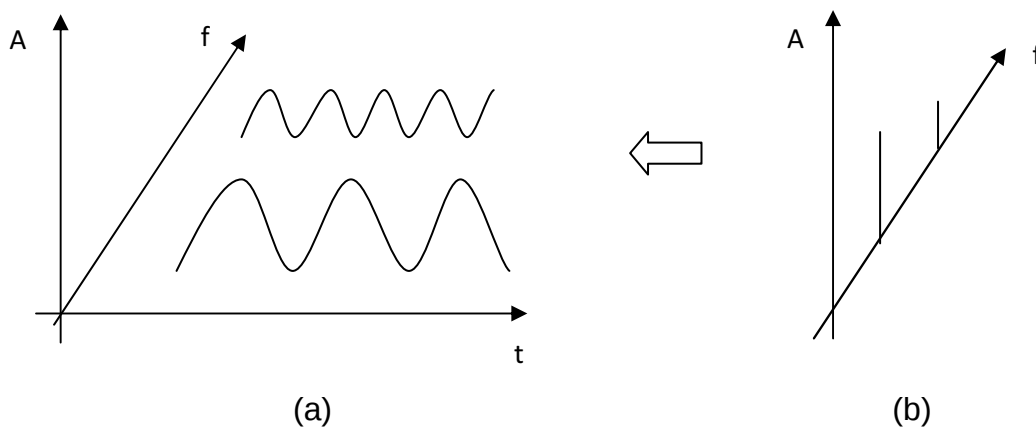
Posteriormente, em 1878, Vincenc Strouhal, um físico tcheco, constatou que o som emitido por um fio exposto ao vento era proporcional a velocidade do vento e inversamente proporcional ao diâmetro do fio. Surgiu então o número de Strouhal, parâmetro adimensional que descreve o mecanismo de um escoamento periódico e que é escrito de acordo com a Eq. (2):

$$St = \frac{f \cdot D}{U_{\infty}}, \quad (2)$$

Onde f é a frequência de emissão de vórtices, D é o comprimento característico do corpo e U_{∞} é a velocidade do escoamento.

Outra importante ferramenta matemática utilizada neste trabalho é a transformada rápida de Fourier ou simplesmente FFT (*Fast Fourier Transform*). Este instrumento matemático realiza a transição de um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência. A Fig. 9(a) mostra um sinal periódico em função do tempo t e da amplitude A . Se a Fig. 9(a) for visualizada no sentido indicado pela seta pode-se facilmente notar que o resultado obtido é a Fig. 9(b), que nada mais é que a FFT do sinal em questão. A aplicação deste método ao sinal adquirido a jusante das protuberâncias permite a obtenção da frequência de emissão de vórtices, necessária ao cálculo do número de Strouhal.

Figura 9 – (a) Sinal periódico no tempo. (b) Espectro de frequência do sinal.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

1.4 Objetivos e escopo do trabalho

Como descrito em seções anteriores, existem inúmeras aplicações para o estudo do escoamento em torno de protuberâncias e no interior de cavidades, principalmente nos estudos relacionados à troca de calor e escoamentos de ar em torno de edifícios e veículos. Embora estes estudos apresentem características próprias, sabe-se que a relação de um com o outro é fortemente dependente. Seja como mecanismo para intensificar a troca térmica entre dois meios ou até mesmo como um dispositivo de controle passivo da camada limite, o estudo do escoamento em torno de diferentes geometrias é de grande importância para o aumento do

rendimento das mais diversas máquinas. É justamente no estudo de tal fenômeno que se concentra o objetivo do presente trabalho.

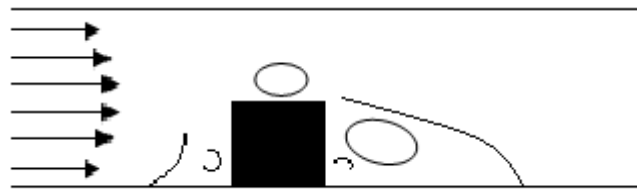
Mais especificamente, o trabalho propõe uma investigação experimental do escoamento sobre uma placa plana munida de protuberâncias quadradas e onduladas posicionadas perpendicularmente ao fluxo principal. Os ensaios são conduzidos em meio líquido para números de Reynolds inferiores a 2 500. Imagens dos padrões de escoamento encontrados são qualitativamente analisadas e comparadas entre as diferentes geometrias. Avalia-se também a influência do número de Reynolds e da geometria do corpo de prova sobre a frequência de emissão de vórtices. Sondas de filme quente são empregadas para medir a velocidade instantânea do escoamento. Os dados adquiridos são então processados para se obter o espectro de frequência por meio de uma FFT (*Fast Fourier Transform*). As informações colhidas são quantitativamente comparadas para cada geometria em função do valor do número de Reynolds.

2 TRABALHOS PRECEDENTES

Martinuzzi e Tropea (1993) estudaram o escoamento em torno de obstáculos prismáticos de seção transversal retangular e tiveram como objetivo a descrição desse tipo de escoamento. O estudo foi baseado em visualizações experimentais com diferentes razões de aspecto (largura e altura) e as mudanças no padrão de escoamento em função da altura e largura foram qualitativamente analisadas.

O escoamento de ar foi investigado através de lâmina de luz laser, filme de óleo e técnicas de visualização cristal violeta. Uma mistura de querosene, óleo e pó de carbono foi utilizada para a visualização em filme de óleo enquanto que para a visualização através de lâmina a laser foram inseridas partículas traçadoras a partir de um gerador de fumaça. A análise das imagens foi feita através de uma câmera de vídeo. As dimensões do canal eram de 3900 mm x 600 mm x 50 mm e o número de Reynolds baseado na altura de canal compreendia a faixa de 80000 a 115000.

Figura 10 – Esquema da geometria do obstáculo no canal de escoamento.



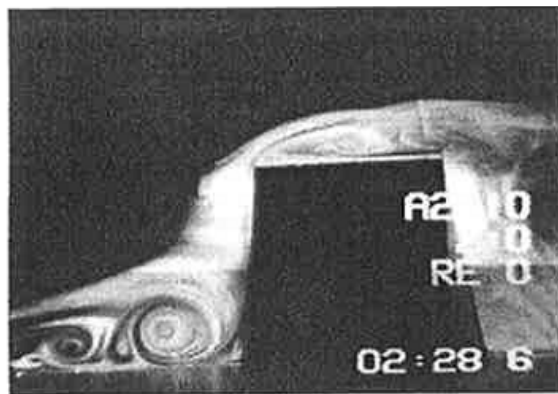
Fonte: Martinuzzi e Tropea (1993).

As imagens dos padrões de escoamento obtidas através da visualização com lâmina de laser mostram que um jato adjacente à parede pode ser observado (Fig. 11(a)) e passa a formar uma série de vórtices (Fig. 11(b)).

Figura 11 – Visualização do escoamento através de lâmina de laser.



(a)



(b)

Fonte: Martinuzzi e Tropea (1993).

Ao investigar o escoamento em torno de obstáculos de diferentes razões de largura/altura (W/H), mostrou-se que existe uma região bidimensional atrás do obstáculo para $W/H > 6$ e a montante da região de recirculação, em frente ao obstáculo, para uma razão de aspecto $W/H > 10$. Pode-se verificar também que para razões de aspecto maiores, a componente de velocidade e o gradiente de pressão na direção transversal do canal são desprezíveis e, portanto, essa região pode ser tratada nominalmente como bidimensional.

Bassan *et al.* (2011) estudaram experimentalmente os vórtices produzidos pelo escoamento em torno de uma protuberância quadrada. O obstáculo é posicionado em uma placa plana lisa e a análise do padrão do escoamento é feita por meio de técnicas de visualização e anemometria de filme quente.

O experimento foi realizado para números de Reynolds até 610, baseado na altura do cilindro, em um túnel hidrodinâmico de baixa turbulência com uma seção de testes de 146 x 146 x 500 mm.

A técnica de visualização empregada foi a injeção direta de corante líquido opaco no escoamento não perturbado através de agulhas hipodérmicas. Uma quantidade suficiente de corante foi injetada para que pudesse colorir o campo de escoamento. Rapidamente a injeção de corante foi interrompida e o fluxo de água limpa lavava todo o campo de escoamento, exceto a esteira do cilindro, pois a velocidade nessa região é significativamente menor do que em outras. Esse procedimento permite ver, por alguns segundos, a bolha de recirculação e a esteira a jusante da protuberância.

Imagens da esteira turbulenta são retratadas na Fig. 12 para diferentes números de Reynolds.

Figura 12 – Vórtices de uma protuberância quadrada sobre uma placa plana.



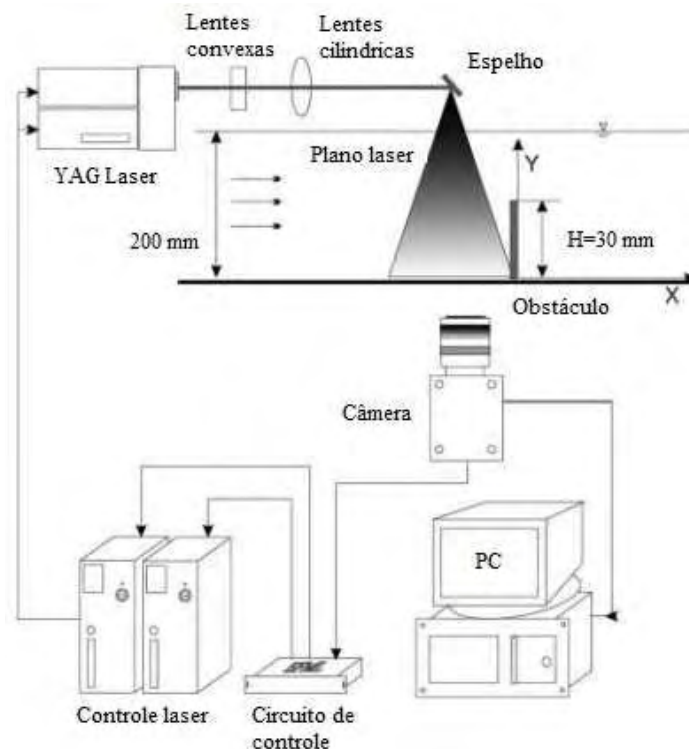
Fonte: Bassan *et al.* (2011).

A visualização de escoamentos através da injeção de corante e medições de filme quente foram realizadas para obter informações qualitativas e quantitativas sobre o escoamento em torno de uma protuberância quadrada transversalmente

posicionada em uma placa plana. Os vórtices foram qualitativamente visualizados por meio de imagens estáticas, enquanto a frequência de emissão de vórtices foi medida por anemometria de filme quente. Apesar da faixa de Reynolds estudada ser diferente, as Figs. 11 e 12 apresentam significativa semelhança com relação à formação e à estrutura de vórtices formados, o que se pode notar principalmente no escoamento a montante da protuberância onde a recirculação é facilmente identificada.

Kim e Lee (2001) investigaram experimentalmente a estrutura do escoamento sobre um obstáculo bidimensional. Os testes foram realizados em um túnel hidrodinâmico com uma seção de teste de 300 x 200 x 1200 mm. O obstáculo de altura $H = 30$ mm foi instalado sobre uma placa a 400 mm da entrada da seção de testes. O campo de velocidade instantâneo e a média dos conjuntos foram medidas utilizando-se a técnica PTV (*Particle Tracking Velocimetry*), a qual fornece a informação do campo de velocidade espacial. A Fig. 13 mostra um esquema do modelo experimental utilizado.

Figura 13 – Diagrama esquemático do modelo experimental.



Fonte: Kim e Lee (2001).

Os campos de velocidade instantâneos e os resultados da visualização mostraram uma variação a montante do escoamento e explicam a existência de nós

e regiões de ponto de sela em frente a superfície do obstáculo. Isso indica que escoamento a montante do obstáculo possui estruturas tridimensionais complexas.

O gradiente de pressão é desprezível para o escoamento em um obstáculo bidimensional, o que não se pode dizer para um obstáculo tridimensional, o qual possui um maior gradiente de pressão. Pode-se notar que parte do escoamento permanece próximo à superfície da protuberância, provocando o descolamento e mudanças do escoamento a montante e fazendo com que a curvatura da linha de corrente aumente em torno do obstáculo.

As intensidades turbulentas aumentam a medida que o escoamento viaja a jusante da protuberância, o que ocorre também com o tamanho da região de alta turbulência. O aumento abrupto que foi observado na intensidade turbulenta e na camada cisalhante próxima ao núcleo do vórtice para uma superfície cilíndrica tridimensional não foi visto em torno do obstáculo bidimensional.

Pôde-se verificar, portanto, que uma protuberância bidimensional causa um complexo padrão de escoamento tridimensional e isso determina a estrutura do escoamento à montante do obstáculo.

Estudos numéricos realizados por Abdel-Shafi e Nishikawa (1993) investigaram o escoamento bidimensional em paredes munidas de protuberâncias. O método empregado foi o BFC (*Boundary Fitted Coordinate*) e a faixa de número de Reynolds abrangida foi de 200 a 3000. As formas das protuberâncias consistiam em uma curva senoidal com um ou dois obstáculos convexos.

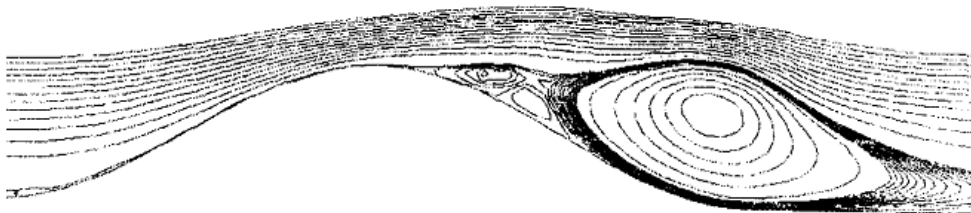
As análises mostraram que com o aumento do número de Reynolds, os vórtices atrás do obstáculo tornam-se maiores e se dividem em duas partes, ou formam vórtices secundários com sentido de rotação anti-horário. As Figs. 14 e 15 mostram os resultados obtidos.

Figura 14 – Linhas de corrente em torno de protuberâncias para $Re = 200$.



Fonte: Abdel-Shafi e Nishikawa (1993).

Figura 15 – Linhas de corrente em torno de protuberância para $Re = 2\,000$.

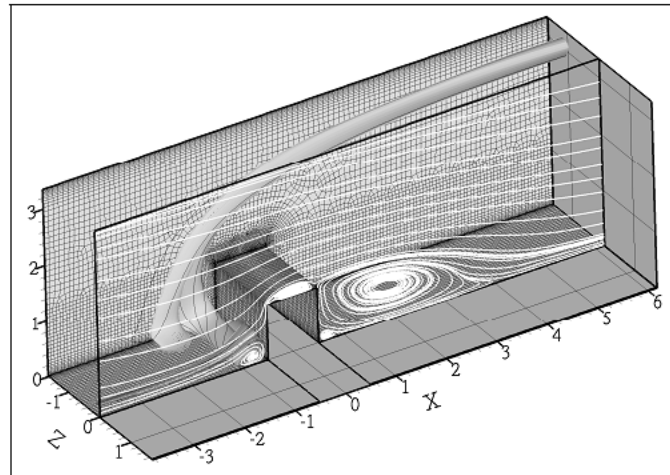


Fonte: Abdel-Shafi e Nishikawa (1993).

Lohász *et al.* (2006) investigaram numericamente o escoamento em um duto de seção quadrada onde sucessivas protuberâncias também de seção quadrada eram posicionadas perpendicularmente à direção da corrente. O número de Reynolds de 40 000 baseado no diâmetro hidráulico do canal (D) e na velocidade média (U) foi definido. Os comprimentos adimensionais que caracterizam a geometria são o tamanho da protuberância ($h/D = 0,3$) e o passo ($p/h = 10$). Lohász *et al.* (2006) também citam que para tal configuração a estrutura do escoamento começa a se repetir depois da quarta protuberância.

Foi também observado que a protuberância induz um escoamento turbilhonar para as paredes laterais antes de afastar-se do obstáculo. Nesse ponto, uma parte do escoamento continua a rotacionar em direção aos cantos superiores enquanto outra parte entra na esteira de recirculação. Essa análise destaca a perturbação induzida pela protuberância. A fenomenologia geral do escoamento sobre uma protuberância em um alto número de Reynolds é ilustrada na Fig. 16.

Figura 16 – Linhas de corrente no plano central ao canal de escoamento.

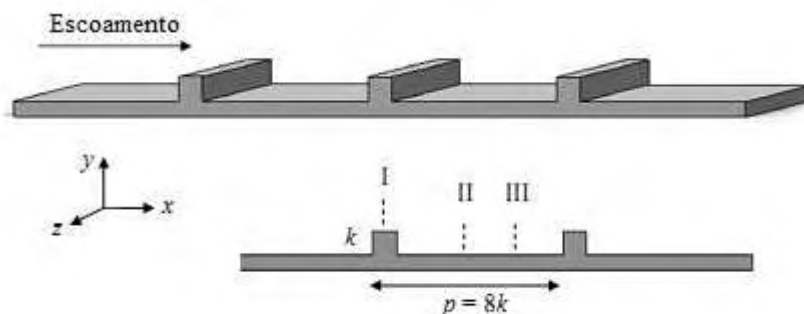


Fonte: Lohász *et al.* (2006).

A forma da esteira é levemente afetada pelas paredes laterais: as imediações das paredes laterais são obviamente influenciadas, entretanto a região central permanece praticamente bidimensional. O fluido pode entrar na esteira apenas através dessa região perturbada, o que poderia ser um resultado importante em termos de transferência de calor.

Estudos conduzidos por Volino *et al.* (2009) investigaram o efeito de rugosidades bidimensionais e tridimensionais sobre a camada limite turbulenta. Os experimentos foram realizados em um túnel hidrodinâmico de seção de testes de 2 m de comprimento, 0,2 m de largura e 0,1 m de altura. A parede da seção foi fabricada em acrílico e barras retangulares foram colocadas transversalmente ao sentido de escoamento como ilustra a Fig. 17.

Figura 17 – Ilustração esquemática das barras bidimensionais.



Fonte: Volino *et al.* (2009).

A altura da barra é de $k = 1,7 \text{ mm}$ e o espaçamento entre elas é de $p = 8k$. Essa geometria foi projetada para se comportar como uma rugosidade do *tipo K*, na

qual a superfície rugosa assume o aspecto de uma lixa, como se material granular houvesse sido depositado sobre ela.

O escoamento para a seção de testes era alimentado por um reservatório cilíndrico de 4000 litros. As bombas enviavam a água para uma seção de condicionamento que consistia em um difusor, colméias, telas e uma contração, a qual precedia a seção de testes. A intensidade turbulenta da corrente livre era menor que 0,5 %.

As medições de velocidade da camada limite foram realizadas através da técnica LDV (*Laser Doppler Velocimetry*), na qual, basicamente, dois feixes laser se cruzam e formam franjas de interferência. Ao passar por essas franjas, as partículas inseridas no fluido refletem a luz que é então recolhida por um sistema ótico. As medições do campo de velocidade foram feitas através da técnica PIV (*Particle Image Velocimetry*) que consiste, basicamente, na obtenção de imagens de partículas traçadoras inseridas no escoamento. Em seguida, o processamento das imagens permite obter o deslocamento das partículas em função do tempo.

Os resultados obtidos para a posição II (Fig. 17) podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros da camada limite.

Parede	x (m)	U_e (m.s ⁻¹)	δ (mm)	u_τ (m.s ⁻¹)	Re_θ ($U_e\theta/\nu$)	Re_τ ($u_\tau\delta/\nu$)	k_s ($k_s.u_\tau/\nu$)	k/δ
Lisa	1,5	1,255	35,2	0,0465	6069	1772	-	-
Rugosidade tridimensional	1,08	1,247	36,8	0,0603	7663	2438	112	0,014
Rugosidade bidimensional	1	0,5	54,6	0,0341	4260	1790	755	0,031

Fonte: Volino *et al.* (2009).

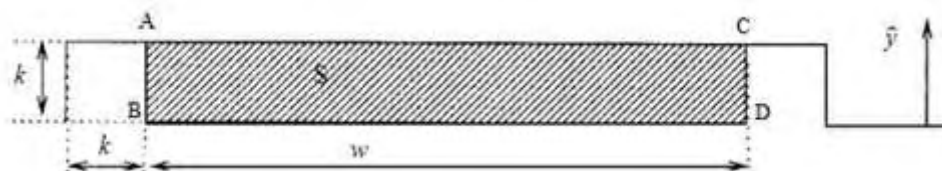
Não houve variação significativa nos resultados das três estações exceto para a região interior de cerca de $3k$ da parede. Para todos os casos, o coeficiente de atrito foi invariante com o número de Reynolds.

Qualitativamente os resultados mostraram que, apesar de apresentarem tamanhos diferentes, estruturas do tipo “grampo de cabelo” estão presentes nas camadas externas em todos os casos. Foi observado também um aumento nas

tensões de Reynolds, mas que não afetava significativamente o escoamento principal.

Simulações Numéricas Diretas (DNS – *Direct Numerical Simulations*) foram realizadas por Leonardi *et al.* (2003) para um escoamento turbulento completamente desenvolvido em um canal contendo em sua parede inferior barras de seção transversal quadrada. As condições de contorno impostas englobavam condição de não escorregamento nas paredes, vazão constante e número de Reynolds 4 200. A Fig. 18 ilustra esquematicamente o modelo estudado.

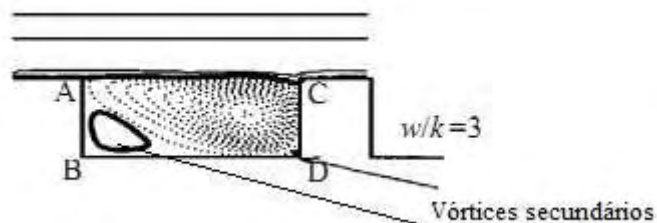
Figura 18 – Ilustração esquemática do modelo.
O escoamento flui da direita para a esquerda.



Fonte: Leonardi *et al.* (2003).

Investigou-se o efeito da razão w/k sobre o comportamento global do escoamento entre as barras e verificou-se que, para $w/k \leq 4$, o descolamento ocorre no bordo de saída do elemento (ponto A – Fig. 18) e o recolamento se dá na parede vertical oposta. A cavidade 'S' é ocupada por região de recirculação com dois vórtices secundários, que giram em sentido oposto ao da zona de recirculação principal, nos cantos 'D' e 'B', como se pode notar na Fig. 19.

Figura 19 – Região de recirculação e vórtices secundários.

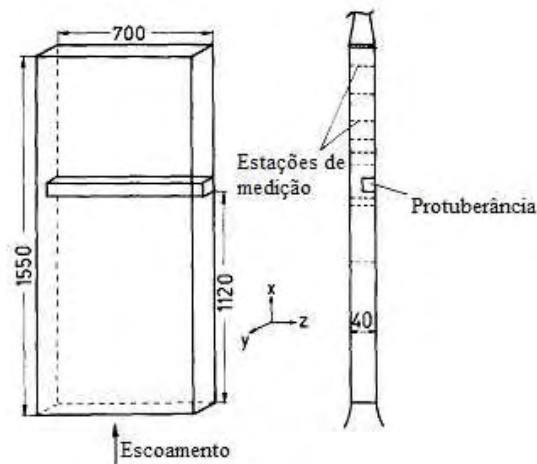


Fonte: Leonardi *et al.* (2003).

Escoamento laminar sobre uma protuberância de seção transversal quadrada foi estudado experimentalmente e numericamente por Onur e Baydar (1992) com o objetivo de obter medições do perfil de velocidades e investigar seu padrão de escoamento.

O canal de ar, mostrado esquematicamente na Fig. 20, foi utilizado para os estudos experimentais. A seção de testes do canal possuía comprimento de 1550 mm e seção transversal de 700 x 40 mm, o que fornece uma razão de aspecto de 17,5:1.

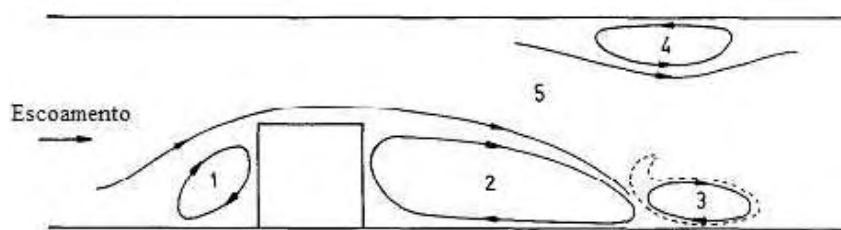
Figura 20 – Aparato experimental.



Fonte: Onur e Baydar (1992).

Utilizou-se injeção de fumaça como técnica de visualização e sucessivas fotografias foram realizadas para $Re = 200$. A Fig. 21 mostra cinco regiões distintas observadas nos experimentos.

Figura 21 – Diagrama esquemático do escoamento em torno da protuberância.



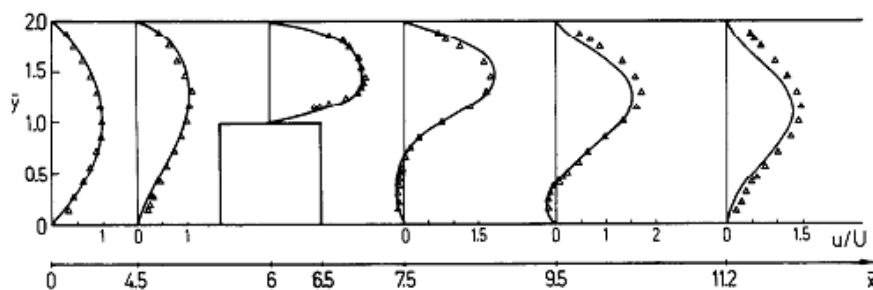
Fonte: Onur e Baydar (1992).

Nota-se que a montante existe uma região estável de recirculação a qual é indicada como região 1. A região de recirculação primária é mostrada como região 2. Esta estrutura sempre existe, mas seu formato e seu tamanho variam de acordo com as características do escoamento. As regiões de recirculação 3 e 4 não são estáveis e são periodicamente varridas pelo escoamento principal, o qual é identificado como região 5.

Embora os estudos de Bassan *et al.* (2011) e Lohász *et al.* (2006) apresentem características muito semelhantes, nota-se que nas Figs. 12 e 16 as regiões 3 e 4 não são identificadas nos escoamento estudados, isso se deve principalmente pela proximidade das paredes laterais no aparato experimental desenvolvido por Onur e Baydar (1992). Devido a essa pequena distância, o fluido desvia do obstáculo quadrado imposto no escoamento e em seguida se “choca” com a parede superior para então voltar a ocupar a seção completa do canal. Esse movimento acaba criando uma zona de recirculação juntamente as paredes superior e inferior, pois nestas regiões o fluido está numa velocidade menor do que o fluido que escoar pela parte central do duto.

As medições de velocidade utilizando-se anemometria de fio quente foram realizadas para números de Reynolds iguais a 200, 400 e 800. Um perfil de velocidade parabólico completamente desenvolvido foi obtido a uma distância de 1000 mm da entrada do canal para toda a faixa de Reynolds estudada. A Fig. 22 ilustra a medição de velocidade realizada no plano central para $Re = 200$.

Figura 22 – Comparação entre perfis de velocidade teórico e experimental.



Fonte: Onur e Baydar (1992).

O estudo do escoamento no interior de canais com protuberâncias é de grande valia para a compreensão de complexos fenômenos relacionados aos padrões de escoamento e ao descolamento da camada limite. Desse modo, diferentes geometrias de protuberâncias devem ser investigadas. Nos trabalhos analisados, os resultados experimentais e numéricos apresentam significativa semelhança. Entretanto, ensaios relacionando diferentes técnicas experimentais para análise dos padrões de escoamento com a emissão de vórtices são relativamente escassos na literatura consultada, tornando esse tipo de estudo de fundamental importância.

3 INSTALAÇÃO E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 Túnel hidrodinâmico

Para a realização dos experimentos, utilizou-se um túnel hidrodinâmico vertical com o intuito de investigar experimentalmente o escoamento sobre uma placa munida de protuberâncias. Os ensaios foram conduzidos empregando-se técnicas de visualização de escoamento e anemometria de fio quente com o objetivo de colher dados qualitativos e quantitativos a respeito do movimento do fluido sobre tal geometria.

A utilização de túneis hidrodinâmicos deve-se a sua facilidade de trabalho, seu baixo custo de operação e manutenção e, principalmente, as facilidades de visualização em meio líquido. Vórtices, recirculações, jatos, esteiras e descolamentos podem se tornar visíveis, com grande nitidez e clareza, com o emprego de partículas sólidas dispersas, filetes de tinta injetados no escoamento ou pequenas bolhas gasosas em suspensão na corrente livre. Além disso, escoamentos uniformes de baixa velocidade e com baixa intensidade turbulenta podem ser gerados com mais facilidade neste tipo de instalação.

Escoamentos uniformes com baixa intensidade turbulenta e pequenos números de Reynolds não podem ser facilmente obtidos na maioria dos túneis aerodinâmicos. A possibilidade da aquisição de imagens de escoamentos com elevada definição torna este tipo de instalação uma excelente ferramenta de trabalho para o desenvolvimento de pesquisas e para aplicações didáticas (LINDQUIST, 2000).

Os túneis hidrodinâmicos também são frequentemente empregados para a realização de ensaios de visualização, conduzidos exclusivamente para ilustrar ou tornar evidentes aspectos específicos de escoamentos estudados quantitativamente em túneis aerodinâmicos ou simulados numericamente.

De modo geral, a velocidade máxima do escoamento produzido por um túnel hidrodinâmico é menor do que a alcançada em túneis aerodinâmicos típicos, o mesmo valendo para as dimensões da seção de testes. Este fato contribui para a limitação dos números de Reynolds dos escoamentos tipicamente obtidos em túneis hidrodinâmicos. Em contrapartida, a viscosidade cinemática da água é

aproximadamente 15 vezes menor do que a do ar, compensando parcialmente esta limitação, em termos dos números de Reynolds possíveis de serem obtidos.

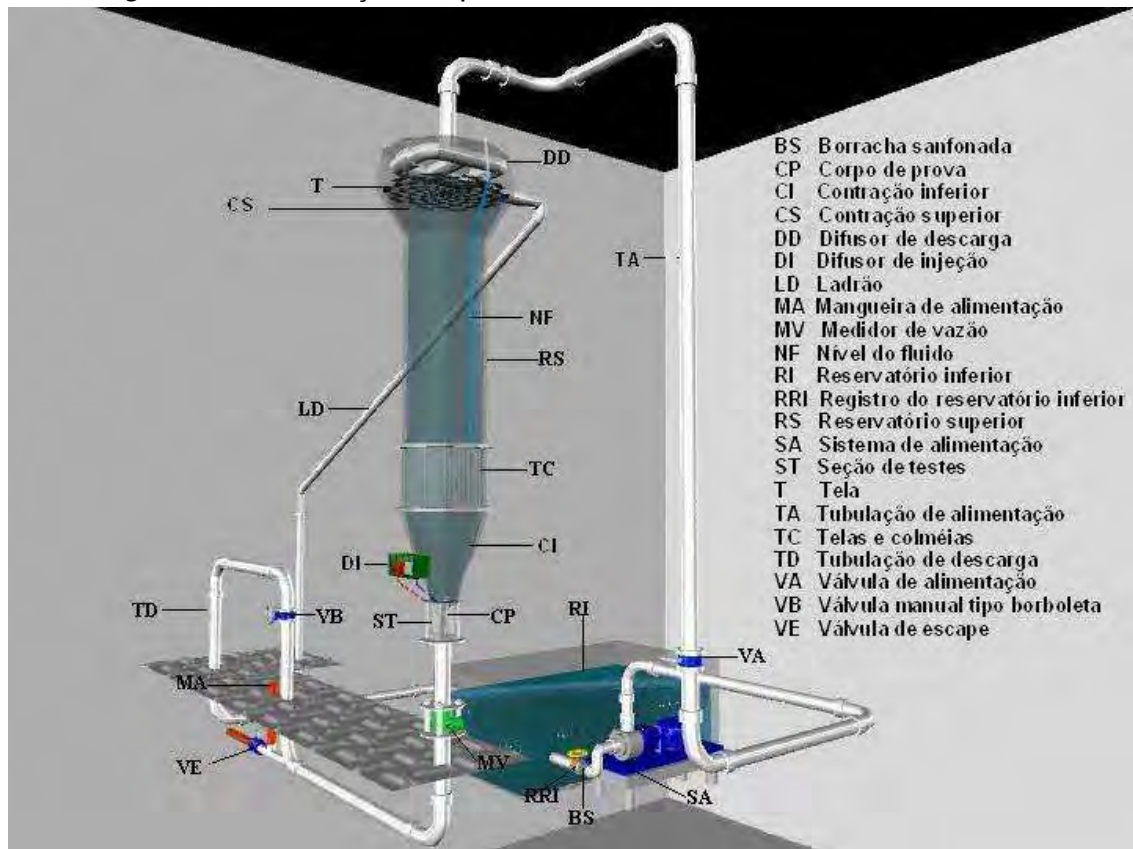
Outros tipos de escoamento também são estudados preferencialmente em túneis hidrodinâmicos, como é o caso de escoamentos com densidade estratificada, em função da facilidade de estratificação em meio líquido. Num túnel aerodinâmico, a estratificação da densidade em uma seção do escoamento pode ser conseguida através do aquecimento de uma parede e do resfriamento da parede oposta. Em túneis hidrodinâmicos, ao contrário, níveis razoáveis de estratificação e de velocidade podem ser obtidos, com baixa difusibilidade entre as camadas estratificadas.

Em síntese, os túneis hidrodinâmicos apresentam-se como uma ferramenta importante para um laboratório de pesquisa experimental em mecânica dos fluidos, ao lado de outras instalações experimentais complementares, tais como os canais e os túneis aerodinâmicos.

3.1.1 Descrição da instalação

A Fig. 23 ilustra esquematicamente o aparato experimental, o qual é composto por um reservatório superior (RS) munido de tela (T), telas e colméias (TC), uma contração inferior (CI), uma contração superior (CS), sistema de verificação de nível do fluido (NF), uma seção de testes (ST), corpo de prova (CP), um medidor de vazão magnético (MV), uma válvula do tipo borboleta (VB), que permite o controle da vazão do escoamento no interior da seção de testes, e a tubulação de descarga (TD).

Figura 23 – Ilustração esquemática do túnel hidrodinâmico vertical.



Fonte: Bassan (2011).

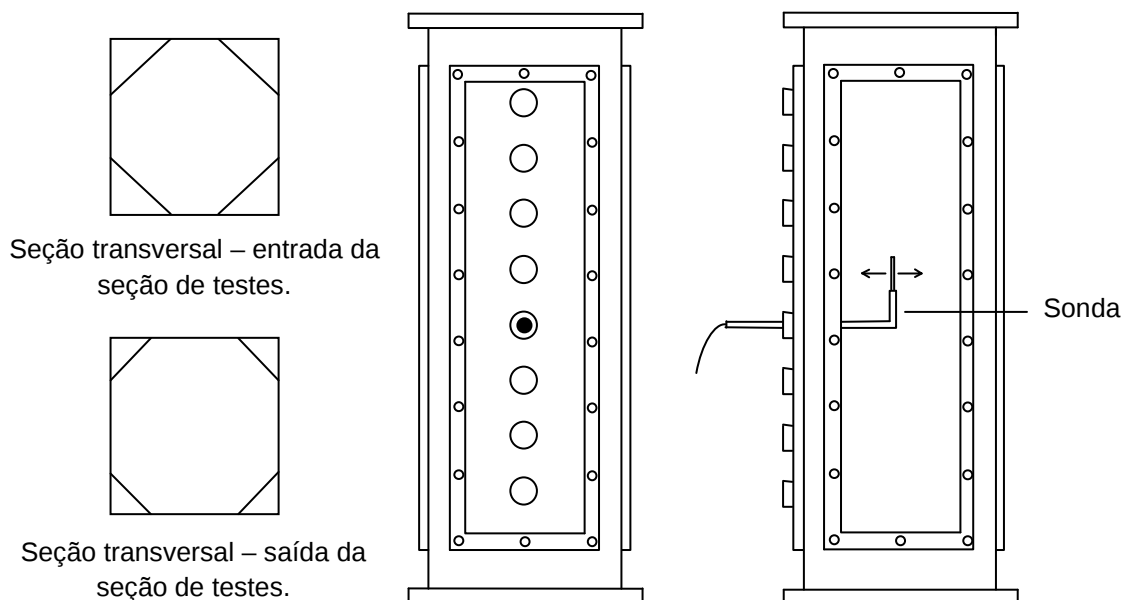
Logo abaixo da válvula manual tipo borboleta (VB), na tubulação do subsolo, encontram-se uma mangueira de alimentação (MA) e uma válvula de escape (VE). O ladrão (LD) situado no topo do túnel limita o nível no reservatório superior, evitando assim, o transbordamento.

Completando a instalação, o sistema de abastecimento (SA) é composto por um registro do reservatório inferior (RRI) de 3 polegadas seguido de uma borracha sanfonada (BS) para atenuar vibrações na parede do reservatório inferior, na qual posteriormente está inserida uma bomba centrífuga que é instalada na sala de máquinas, ao lado do laboratório, no subsolo. Na tubulação de alimentação (TA) é inserida uma válvula do tipo borboleta (VB), localizada no interior do laboratório, seguindo a tubulação em sua parte superior, dispõe de um difusor de descarga (DD), que funciona basicamente como um chuveiro de alta vazão.

3.1.2 Seção de testes

A seção de testes do túnel possui seção transversal quadrada de cantos cortados de 146×146 mm e 500 mm de comprimento. Construída integralmente em alumínio aeronáutico 4050, a seção de testes possui quatro amplas janelas de observação, construídas em acrílico cristal, que as tornam particularmente adequadas para a realização de ensaios de visualização de escoamentos. Detalhes da seção teste são identificados na Fig. 24.

Figura 24 – Montagem experimental da seção de testes.



Fonte: Adaptado de Lindquist (2000).

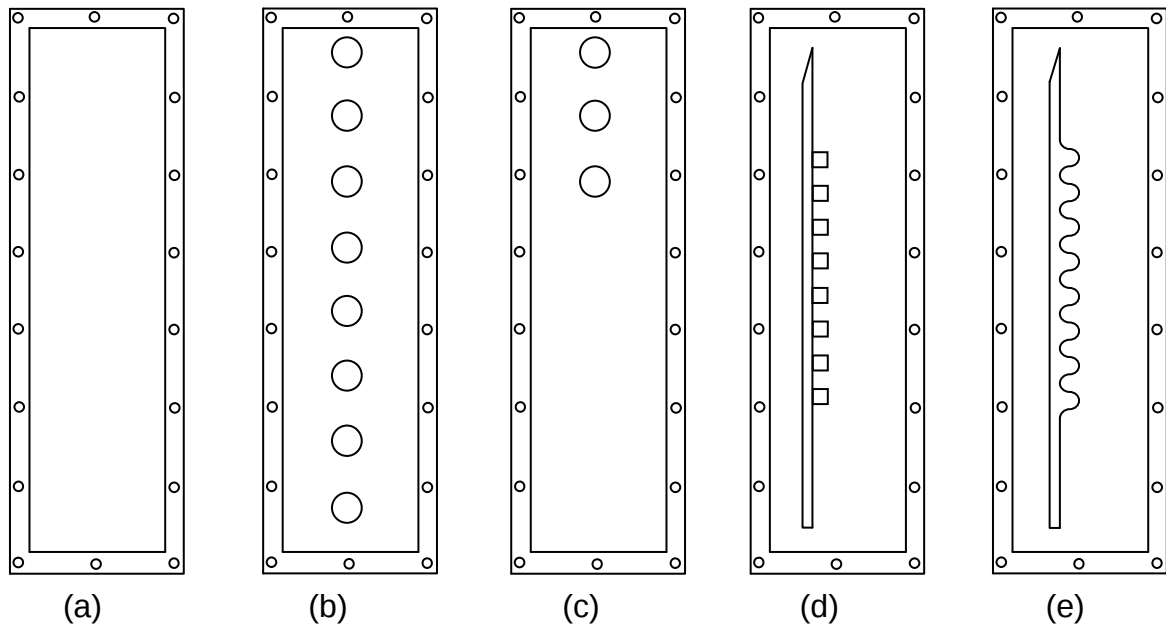
Cada canto interno da seção de testes é ocupado por um prisma de seção transversal triangular, que se estende ao longo de todo o seu comprimento, conferindo-lhe o formato quadrado de cantos cortados. Esses prismas afunilam-se em direção à jusante, de tal forma que o volume útil da seção de testes seja ligeiramente divergente, com o objetivo de atenuar o efeito do crescimento da camada limite sobre o perfil de velocidades. Tal prática de ajustar a área da seção de testes por meio de prismas instalados nas arestas da seção é aplicada convencionalmente em túneis aerodinâmicos de baixa velocidade. Assim, a área da seção transversal da seção de testes varia entre $177,2 \text{ cm}^2$, na entrada, e $192,5 \text{ cm}^2$,

na saída, os modelos de ensaio são fixados na seção de testes em uma área equivalente a cerca de 182 cm².

As quatro janelas da seção de testes são fixadas por parafusos de aço inoxidável à estrutura metálica da seção, com vedação feita por meio de anel de borracha do tipo *o-ring* de 4 mm de diâmetro e também por silicone comercial. Essa configuração permite fácil e rápida substituição das janelas por outras com características mais adequadas à realização de um determinado ensaio e garantem uma boa vedação, mesmo após repetidas operações de retirada e colocação das janelas. Em geral, as janelas são confeccionadas em chapas de acrílico transparente com 12 mm de espessura e boa qualidade óptica, de forma a permitir a visualização do escoamento no interior da seção de testes. Através de orifícios existentes em algumas janelas, podem-se introduzir agulhas para a injeção de corantes no escoamento, assim como fios metálicos para a geração de bolhas de hidrogênio, sondas de filme quente e outros dispositivos de medição.

No presente trabalho, quatro diferentes tipos de janelas foram utilizados para a realização dos ensaios propostos. Todas as janelas foram fabricadas em chapa de acrílico transparente com 12 mm de espessura. A janela anterior possui a configuração mais simples e consiste de uma janela lisa, como ilustrado na Fig.25(a). As Figs. 25(b) e (c), mostram as janelas laterais esquerda e direita, respectivamente, enquanto as Figs. 25(d) e (e) mostram a janela frontal com as duas diferentes configurações de ensaio para o trabalho proposto.

Figura 25 – Janelas utilizadas na seção de testes do túnel hidrodinâmico.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

As janelas laterais podem apresentar duas diferentes configurações. Para os ensaios de anemometria de fio quente e injeção de corante líquido, foi utilizada uma janela lateral com 8 orifícios, conforme ilustrado na Fig. 25(b). A Fig. 25(c) mostra a configuração com três furos laterais, que também pode ser empregada para a injeção de corantes líquidos. Bujões metálicos juntamente com um anel de borracha são colocados para a vedação caso os furos não sejam utilizados.

A Fig. 26 mostra a placa de acrílico com oito protuberâncias de seção quadrada usadas nos experimentos, bem como um detalhe de sua estrutura.

Figura 26 – Imagem do corpo de prova com protuberâncias de seção quadrada.
(a) Vista geral e (b) vista em detalhes.



(a)



(b)

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Com a mesma simetria adotada nas protuberâncias quadradas, construiu-se também uma placa corrugada com sobressaltos ondulados, Fig. 27, com o objetivo de analisar e comparar o padrão de escoamento entre esses dois tipos de configuração.

Figura 27 – Imagem do corpo de prova com protuberâncias onduladas. (a) Vista geral e (b) vista em detalhes.



(a)

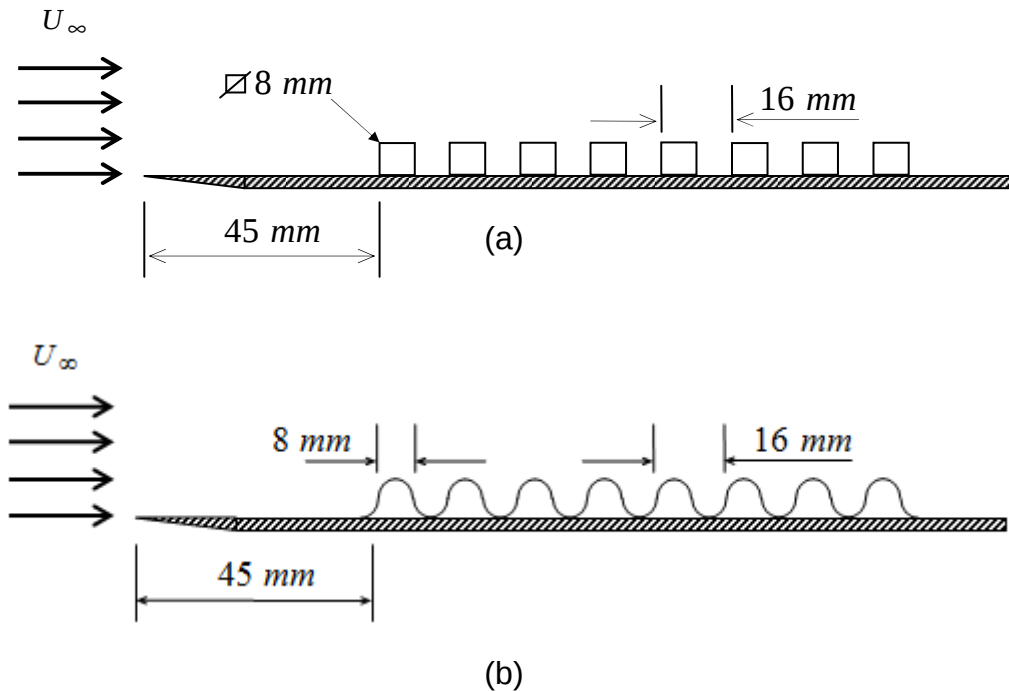


(b)

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Como pode ser visualizado nas Fig. 26 e 27, os corpos de prova foram confeccionados em acrílico de boa qualidade ótica. As placas, os sobressaltos, bem como as saliências para fixação das placas nas janelas laterais da seção de teste foram diretamente usinados em um torno CNC disponível na oficina do Departamento de Engenharia Mecânica. As principais dimensões e o sentido de incidência do escoamento sobre as placas são mostrados na Fig. 28.

Figura 28 – Características dos corpos de prova utilizados nos ensaios. (a) Protuberâncias de seção quadrada e (b) sobressaltos ondulados.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

3.1.3 Operação do túnel

Antes de iniciar os ensaios, a caracterização da instalação experimental é um passo necessário. As informações obtidas nesta etapa, além de atestar a qualidade do projeto e da construção e fornecer subsídios para a sua eficiente utilização, possibilitam também a correta interpretação dos resultados obtidos em experimentos posteriores. No Anexo A são apresentados alguns testes realizados no túnel hidrodinâmico vertical, sem a presença de modelos na sua seção de testes, objetivando a determinação de algumas de suas características importantes.

Para iniciar os testes, é necessário primeiramente o enchimento do túnel até o nível da seção de testes a uma vazão aproximada de 50 litros por hora, a qual é realizada pela mangueira de alimentação (MA – Fig. 23) para evitar o surgimento de bolhas na seção. Em seguida, a uma vazão aproximada de 1000 litros por hora, o fluido chega até os dispositivos de homogeneização do escoamento. Após ultrapassar esse nível onde estão as telas e colméias, o difusor de descarga (DD – Fig. 23) é acionado e o enchimento se dá a uma vazão ainda mais elevada até alcançar a contração superior (CS – Fig. 23).

Dois são os modos de operação do túnel hidrodinâmico em questão: o modo contínuo e o modo *blow-down*. No modo contínuo, o reservatório superior do túnel é continuamente abastecido e as válvulas de alimentação são reguladas para que se mantenha o nível constante. Este modo de operação é mais indicado para a realização de ensaios em que se deseja que as condições de ensaio permaneçam constantes ao longo do tempo. Podem ser realizados ensaios com duração virtualmente ilimitada, mantendo-se a velocidade média do escoamento no interior da seção de testes praticamente constante com o decorrer do ensaio.

Por outro lado, no modo *blow-down*, o sistema de abastecimento é desligado após o enchimento do reservatório superior. Para iniciar os ensaios é preciso, portanto, manter o fluido em repouso por algum tempo para eliminar suas instabilidades e, em seguida, dar início aos experimentos. O tempo de repouso varia de acordo com a vazão que se deseja ensaiar, quanto menor a vazão, maior o tempo de repouso. Diferentemente do que acontece no modo contínuo, a duração dos ensaios é limitada pela capacidade de armazenamento do reservatório superior e a velocidade média do escoamento decresce continuamente com o passar do tempo, à medida que o nível do fluido diminui.

Em trabalhos anteriores, notou-se a necessidade de impedir a incidência solar no laboratório, visto que a variação de temperatura influenciava nas medições com anemometria e nos padrões de escoamento. Devido a esse fato, as janelas do laboratório foram cobertas por uma película reflexiva de alumínio comercial denominada *isofoil* com o intuito de refletir a energia radiante. Adicionalmente, foi instalado um sistema de ar-condicionado instalado no laboratório, garantindo melhor operação do aparato experimental, mantendo a temperatura do ambiente constante.

A Fig. 29 mostra uma imagem do Laboratório de Visualização de Escoamentos do Departamento de Engenharia Mecânica. Em primeiro plano, vê-se o túnel hidrodinâmico.

Figura 29 – Laboratório de Visualização de Escoamentos.



Fonte: Bassan (2011).

3.2 Anemometria de fio quente

Diferentes setores de nossa sociedade utilizam de diversos instrumentos destinados a medir o deslocamento, velocidade ou quantidade de um determinado fluido. Esta movimentação de diferentes substâncias faz parte do nosso modo de vida, sendo a medição de sua velocidade importante para a análise e síntese de diversos produtos de engenharia. Estações de tratamento de água e esgoto, postos de combustíveis, supermercados, refinarias, escolas, indústrias e mais uma infinidade de outros exemplos, fazem o uso de tais instrumentos, seja ele para medir simplesmente o consumo de água numa residência, quanto avaliar a quantidade de gás natural que entra numa usina termoeletrica. Estas características revelam a grande versatilidade da anemometria de fio quente como instrumento de pesquisa para mecânica dos fluidos e exemplificam a preferência deste equipamento por diversos laboratórios, túneis de vento, centros de pesquisa e indústrias espalhadas ao redor do mundo. A Fig. 30 mostra aplicação de anemometria nas maquetes de uma plataforma de petróleo, Fig. 30(a), e de uma cadeia de montanhas, Fig. 30(b).

Figura 30 – Aplicação de anemometria no estudo do escoamento em maquetes: (a) plataforma de petróleo e (b) cadeia de montanhas.



Fonte: Eguti (2005).

Praticamente todos os sistemas de medição da velocidade de fluidos realizam uma operação de comparação, baseada num princípio físico bem definido e adequado ao fluido de trabalho, sendo este o propósito principal de uma medição.

Dentre dezenas de instrumentos diferentes destinados a medir a velocidade de fluidos, os medidores tipo térmicos destacam-se por apresentarem melhor precisão em relação a outros instrumentos que utilizam outro princípio físico como, por exemplo, os medidores de turbina, ultra-sônicos, etc. Dentro da classe de medidores térmicos, destacam-se aqueles que operam pelo balanço de energia e os chamados convectivos, como expõe Eguti (2005).

3.2.1 Tipos de sensores

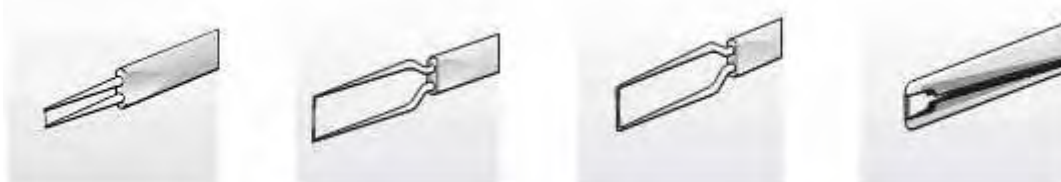
A escolha do sensor de fio quente depende de vários fatores intrínsecos ao fluido de trabalho e ao tipo de escoamento. Basicamente, devem-se levar em consideração os seguintes critérios:

- Tipo de fluido (água, ar, gás, sangue, óleo, etc.);
- Grau de liberdade (1, 2 ou 3 dimensões);
- Faixa de velocidade esperada (baixa, alta velocidades, supersônico, etc.);
- Resolução espacial requerida (nível de turbulência, camada limite, etc.);
- Risco de contaminação (sonda protegida, sonda de platina, etc.);
- Espaço disponível para medição (tamanho do prolongador, haste, etc.);

Moraes (2003) cita três principais tipos de transdutores térmicos utilizados em mecânica dos fluidos experimental; sendo que eles se distinguem especialmente pelo método de controle da corrente elétrica que passa pelo sensor. O mais difundido modo de operação é, sem dúvida, o anemômetro de temperatura constante (CTA – *Constant Temperature Anemometer*), onde a corrente do sensor sofre variações de acordo com a velocidade do fluido, de modo a manter a sua resistência e temperatura constantes. Utilizado em menor escala está o anemômetro de corrente constante. Como o próprio nome sugere, a corrente da ponte é constante, permitindo que a temperatura e resistência se alterem de acordo com a mudança da velocidade. De uso um pouco mais restrito, o anemômetro de fio quente pulsátil é uma solução engenhosa para quantificar não só a direção da componente de velocidade, mas também o seu sentido.

O sensor de fio quente é constituído de um corpo de material cerâmico, onde estão fixas duas agulhas. O elemento sensível é em geral um fio de tungstênio de 5 μm de diâmetro e 1,25 mm de comprimento, soldado à extremidade de cada agulha. Existe uma grande variedade de sensores dedicados a diferentes aplicações; elas divergem basicamente pelo número de elementos sensíveis, pela posição das agulhas, e pelo tipo de material do fio ou tipo de recobrimento. As sondas unidimensionais são as mais comuns e devem ser posicionadas de forma que o filamento permaneça perpendicular ao escoamento, enquanto que suas hastes e suportes devem permanecer, preferencialmente, paralelos com à direção do escoamento. Alguns exemplos de sensores são ilustrados na Fig. 31.

Figura 31 – Diferentes tipos de sondas unidimensionais utilizadas em anemometria.



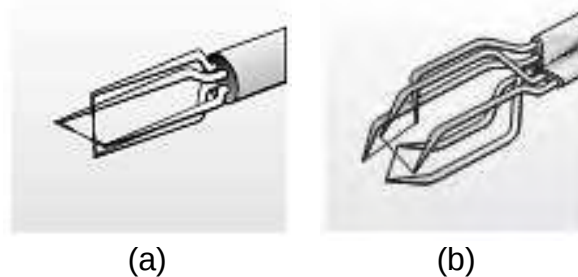
Fonte: Jorgensen (2002).

Sondas tipo “X”, ilustrada na Fig. 32(a) são capazes de decompor a velocidade do escoamento em duas direções ortogonais, quando o escoamento atravessa uma região cônica de $\pm 45^\circ$ em relação ao eixo axial da sonda.

Os sensores de três dimensões, conforme ilustrado na Fig. 32(b), também são chamados de tri - axiais ou *split probe*. São utilizados para operação em duas

dimensões, sua área de atuação é limitada a um cone de $\pm 70^\circ$ em relação ao eixo axial da sonda. Para decomposição do vetor velocidade em três componentes ortogonais, a resolução espacial é normalmente definida em uma esfera de diâmetro ligeiramente inferior ao comprimento de um dos filamentos.

Figura 32 – Sondas de fio quente (a) tipo “X” para duas dimensões e (b) ortogonal para três dimensões.



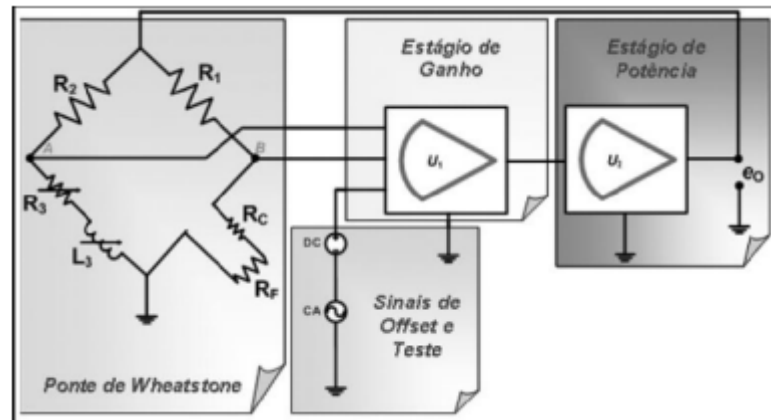
(a) (b)
Fonte: Jorgensen (2002).

3.2.2 Anemômetro de temperatura constante (CTA)

Uma configuração típica da ponte CTA é apresentada na Fig. 33. Essencialmente, quatro níveis compõem o sistema de compensação de temperatura:

1. A Ponte de Wheatstone, onde o estímulo sobre o sensor é transformado em um sinal elétrico;
2. Um estágio de ganho, onde a diferença de tensão entre os dois braços da ponte é amplificada;
3. Inserção de uma tensão de referência ou de sinal de teste;
4. Um estágio de potência, onde a corrente necessária para reequilibrar a ponte é gerada.

Figura 33 – Componente do circuito de controle de uma ponte CTA.



Fonte: Moraes (2003).

Inicialmente, quando a ponte está balanceada, nenhuma voltagem é lida entre os extremos da mesma. Qualquer variação do escoamento no ponto onde o sensor está exposto irá influenciar a temperatura do sensor, causando um resfriamento ou aquecimento à medida que a velocidade aumenta ou diminui. A resistência resultante da variação de temperatura provoca o surgimento de uma voltagem entre os dois braços da ponte, que é então enviada a um amplificador. A saída desse amplificador é aplicada ao topo da ponte de tal modo que a temperatura original seja recuperada através do aumento ou diminuição da corrente que passa pelo sensor. Assim, a velocidade local instantânea do escoamento pode ser determinada, medindo-se a diferença de tensão na saída do circuito que alimenta a sonda e realizando-se, em seguida, a conversão desse sinal elétrico em velocidade, com o auxílio de uma correlação. É dito, então, que esse sistema opera em malha fechada, pois o sinal que alimenta a ponte é função da tensão de desbalanceamento.

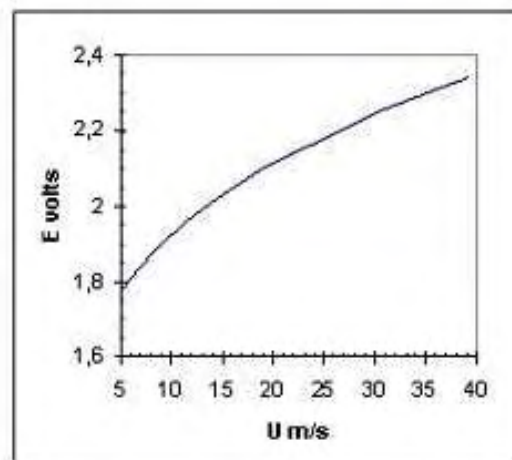
3.2.3 Curvas de calibração

O objetivo principal do processo de calibração de anemômetros de fio quente consiste em determinar, com a maior precisão possível, a relação entre o sinal de saída do instrumento (em Volts) e a propriedade física que está sendo medida, em geral a velocidade do fluido (em m/s, por exemplo). Todos os anemômetros de fio quente devem ser calibrados de forma a permitir sua correta utilização na medida da velocidade de fluidos e na determinação da direção do escoamento.

A calibração de uma sonda de fio quente pode ser dispensada quando o anemômetro for utilizado na investigação do domínio da frequência como, por exemplo, na medida da frequência de emissão de vórtices de um escoamento que incide sobre um cilindro.

Existem várias técnicas de calibração de sondas como os métodos estáticos e dinâmicos, os quais não são abordados neste trabalho. Contudo, uma maneira mais simples de se realizar a calibração de sondas de fio quente consiste em obter uma série de dados da tensão de saída do anemômetro, em função de cada valor conhecido da velocidade do escoamento incidente na sonda. Desta forma, pode-se determinar a chamada curva de calibração, ajustando um polinômio ou uma equação de uma curva conhecida, aos dados do escoamento, obtendo, assim, seus coeficientes de ajuste. A Fig. 34 mostra um exemplo típico de uma curva de calibração de anemômetros de fio quente.

Figura 34 – Relação entre a saída (Volts) e a velocidade (m/s).



Fonte: Jorgensen (2002).

A Fig. 35 mostra os equipamentos utilizados no presente trabalho, que se baseia na plataforma *StreamLine 90N10*, produzida pela *Dantec Measurement Technology*. Esse aparato possui três módulos *CTA 90C10*, que permitem a medição simultânea de até três componentes da velocidade local e instantânea. Os dados são coletados em uma placa conversora analógico/digital (A/D) *NI-DAQmx 8.7.1* (16 bits), da *National Instruments*. Uma sonda simples de fio reto, modelo *Dantec 55R11*, composta por um fio de quartzo e recoberta com 2 μm de espessura de filme de tungstênio foi utilizada nos experimentos. O aplicativo computacional

para ajuste e configuração da sonda e para aquisição dos dados é o *StreamWare*, próprio da *Dantec*.

Figura 35 – Aparelhos utilizados para processamento de dados colhidos pela sonda de fio quente.



Fonte: Bassan (2011).

3.3 Visualização de escoamentos

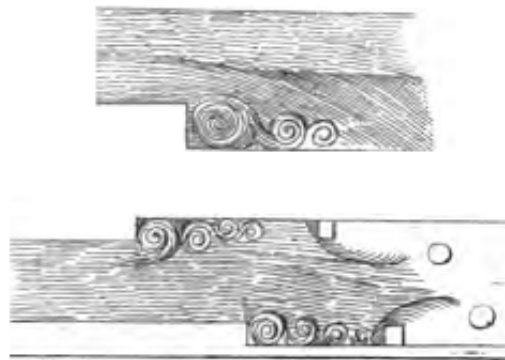
Capaz de processar um enorme conjunto de informações num pequeno intervalo de tempo, o sentido da visão constitui uma ferramenta extremamente eficiente e rápida de comunicação e análise. Uma única imagem pode condensar uma grande quantidade de dados, facilitando sobremaneira a análise e a compreensão de fenômenos físicos. O conjunto de técnicas utilizado cientificamente para gerar imagens, tratá-las e interpretá-las é conhecido como visualização. Embora pareça simples, o uso das técnicas de visualização exigem competência para que as informações presentes no fenômeno físico sejam bem capturadas e interpretadas.

No caso específico da mecânica dos fluidos, a visualização foi, durante longo tempo, a única ferramenta disponível para o estudo e a descrição de escoamentos. Grandes sábios do passado, tais como Da Vinci, Galileu, Bernoulli e Pascal, usaram intensivamente a visualização de escoamentos em suas reflexões e descobertas

acerca do movimento dos fluidos. Em época um pouco mais recente, Reynolds, Mach, Prandtl e Roshko valeram-se desta importante técnica experimental, para interpretar fenômenos e gerar conhecimento no campo da dinâmica dos fluidos.

Nos dias atuais, apesar da nítida evolução de outros métodos de análise, a visualização de escoamentos ainda ocupa lugar de destaque no estudo de problemas associados ao transporte de massa, quantidade de movimento e energia. As técnicas de visualização hoje existentes são bastante numerosas, envolvendo diferentes níveis de sofisticação. Além disso, novos métodos são desenvolvidos a cada ano, e as técnicas tradicionais são constantemente aprimoradas. A Fig. 36 mostra um desenho de da Vinci com vórtices a jusante de uma expansão brusca e de um corpo rombudo.

Figura 36 - Esboços de Da Vinci mostrando vórtices formados no escoamento em uma expansão brusca e em torno de obstáculos.



Fonte: Bianchi (2009).

As vantagens da visualização de escoamentos em meio líquido são reconhecidas pela maioria dos pesquisadores que atuam na área. Existe uma grande variedade de técnicas de visualização possíveis de serem implementadas em túneis hidrodinâmicos, a maioria das quais envolvendo a introdução de traçadores líquidos, sólidos ou gasosos no seio do fluido. Essas três técnicas serão descritas separadamente a seguir abordando-se com maior ênfase a injeção de corantes líquidos, visto que esta foi a técnica utilizada no presente trabalho.

3.3.1 Injeção de corantes líquidos

A injeção de traçadores líquidos tem sido exaustivamente utilizada no estudo de diversos tipos de escoamento, devido, sobretudo, à sua facilidade de implementação e ao seu baixo custo operacional.

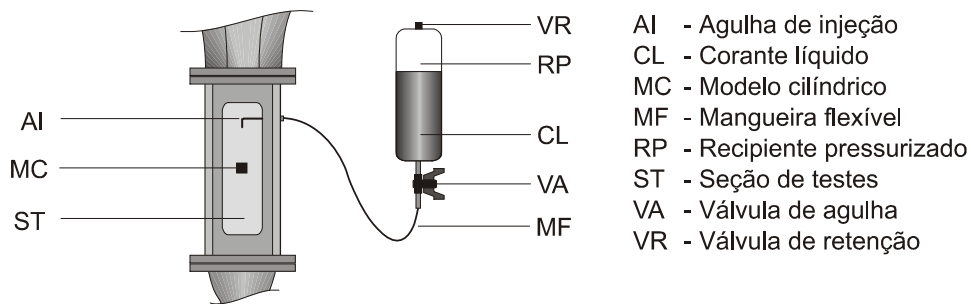
O processo de injeção pode ser efetuado através de orifícios existentes na superfície do modelo ensaiado ou, ainda, com o auxílio de uma agulha posicionada no interior do escoamento. Em ambos os casos, a injeção do filete de corante deve ocorrer de forma a introduzir a menor perturbação possível no escoamento. Assim, a velocidade e a pressão de injeção devem ser controladas e mantidas em valores próximos àqueles encontrados no escoamento, a fim de que o filamento de tinta se mantenha nítido e estável.

Embora existam tintas fabricadas especialmente para a visualização de escoamentos, os traçadores líquidos mais frequentemente utilizados são os corantes alimentícios e os corantes para pintura, solúveis em água.

Segundo Werlé (1973), outras substâncias são utilizadas com relativa frequência, tais como o leite, anilina, nanquim e permanganato de potássio, esses produtos são geralmente diluídos numa solução de água e álcool. No entanto, a utilização de alguns destes traçadores exige cuidados especiais, posto que os de origem orgânica favorecem a proliferação de microorganismos no fluido de trabalho, enquanto outros podem aderir às janelas de observação, prejudicando a nitidez da imagem. No presente trabalho, utilizou-se como traçador uma solução aquosa de pigmento para tinta à base de PVA, que possui grande poder de tingimento e baixo custo, podendo ser facilmente encontrado no mercado.

A Fig. 37 mostra um dispositivo para injeção de corantes líquidos constituído por um reservatório pressurizado ligado, por intermédio de uma mangueira flexível, a uma agulha dobrada em forma de cotovelo. Uma válvula do tipo agulha, operada manualmente, faz o controle da vazão de corante para dentro do escoamento principal. A agulha de injeção é introduzida no interior da seção de testes através de uma de suas janelas e sua extremidade fica posicionada a montante do modelo ensaiado.

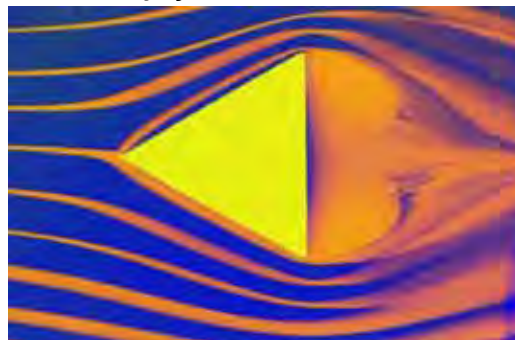
Figura 37 - Dispositivo para injeção de corantes líquidos.



Fonte: Lindquist (2000).

A Fig. 38 mostra o escoamento ao redor de um elemento triangular visualizado com o uso de um sistema que utiliza múltiplas agulhas de injeção.

Figura 38 - Visualização do escoamento ao redor de corpo triangular utilizando injeção de corantes.



Fonte: Alé (2013).

O diâmetro da agulha de injeção é um fator importante a ser considerado, pois a esteira que se forma à jusante da própria agulha pode introduzir perturbações indesejáveis sobre o escoamento investigado.

Como forma de eliminar este problema, nas visualizações efetuadas ao longo deste trabalho utilizou-se uma agulha retrátil, que permitisse injetar corante sobre o modelo de testes e, logo em seguida, pudesse ser recolhida para junto da parede da seção de testes. Nestas condições, o corante, injetado em abundância sobre a superfície do corpo sólido, permanece retido apenas na camada limite do modelo, nas regiões de descolamento e recirculação, e na sua esteira, sendo lavado rapidamente nas demais regiões do escoamento, onde a velocidade se mostra mais elevada. Decorridos alguns instantes da injeção, a perturbação causada pela presença da agulha à montante do corpo, assim como pela injeção do corante, é convectada pelo escoamento, possibilitando observar, com nitidez, alguns

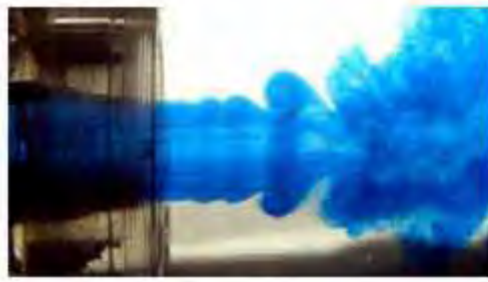
fenômenos que ocorrem junto ao modelo e na sua esteira. Esta técnica também conhecida como *dye wash* é indicada, ainda, para escoamentos com baixos números de Reynolds, onde a perturbação induzida pela agulha é ainda maior.

A correta iluminação do objeto constitui, sem dúvida alguma, outro importante passo para a obtenção de uma imagem de boa qualidade. Além disso, deve existir perfeita sintonia entre os sistemas de iluminação e de captura utilizados, o que nem sempre pode ser conseguido facilmente. Com efeito, os foto-sensores eletrônicos são incapazes de registrar com fidelidade absoluta aquilo que é observado pela visão humana. Em vista disso, na maioria dos trabalhos experimentais envolvendo a visualização de fenômenos físicos, uma série de testes preliminares deve ser realizada, até que se obtenham imagens exploráveis cientificamente.

Em geral, uma iluminação branca, difusa e em contraluz, proveniente de holofotes dispostos a uma distância conveniente da seção de testes, mostra-se absolutamente adequado para o tipo de trabalho realizado, produzindo uma iluminação com alta temperatura de cor, a um custo moderado.

No caso específico da captura de imagens para visualização de escoamentos o trabalho de Vieira e Mansur (2010) apresenta uma série de recomendações. A iluminação em contraluz (onde as fontes de luz encontram-se apontadas diretamente para a câmera) pode produzir excelentes resultados para a técnica de injeção de corantes líquidos, como apresentado na Fig. 39, onde um jato livre axissimétrico descarregando em meio quiescente é visualizado por duas diferentes técnicas de injeção de corante. Na Fig. 39(a), o corante é misturado ao fluido a montante do bocal de descarga, ao passo que na Fig. 39(b) a injeção é feita com o auxílio de uma fina agulha hipodérmica (de 0,7 mm de diâmetro externo), posicionada próximo à parede interna do bocal. Em todos os casos, as imagens fornecem uma série de informações sobre a topologia do escoamento, permitindo o reconhecimento de estruturas turbilhonares típicas e regiões de intensa atividade turbulenta.

Figura 39 - Jato livre axissimétrico em meio quiescente, visualizado com o auxílio de duas técnicas de injeção de corante e iluminação contraluz.



(a) Injeção global



(b) Injeção parietal

Fonte: Vieira e Mansur (2010).

Os melhores resultados, sem sombra de dúvidas, foram obtidos com a injeção de corantes líquidos com iluminação em contraluz.

As novas iluminações frias por meio de lâmpadas do tipo fluorescente e LED geralmente apresentam uma boa temperatura de cor aliado a uma baixa emissão de calor. Os filmes fotográficos químicos podem exigir altas intensidades luminosas para sensibilização da imagem. Por exemplo, o trabalho de Mansur *et al.* (1996) utilizou 6 kW de intensidade luminosa em lâmpadas incandescentes gerando um alta emissão de calor que necessitava ser dissipada por interferir no experimento causando convecção na seção de testes, principalmente para os ensaios a velocidade reduzida. Felizmente, as atuais câmeras digitais modernas de nível profissional e semi-profissional podem operar com uma relativa baixa intensidade luminosa com baixo nível de ruídos (grão fino).

As imagens estáticas, do presente trabalho, foram capturadas com uma câmera *Nikon D90 DSLR* de 12,3 Mpixel equipada com uma objetiva *Nikkor Medical* macro de 120 mm de distância focal. O emprego de obturadores fechados garante uma boa profundidade de campo facilitando o ajuste de foco e relativamente altas velocidades de obturação são necessárias para obtenção de imagens nítidas. Uma objetiva do tipo Macro Medical é projetada para aplicação em câmeras fotográficas que utilizavam filmes químicos do tipo 35 mm do tipo *full frame* (24×36 mm) em fotografia macro de cirurgia médica. Esse tipo de objetiva pode ser adaptada para ser utilizada em uma moderna câmera digital *DSLR* permitindo a obtenção de boas fotografias macro com uma mínima distorção. Vale a pena ressaltar que todas as operações de captura de imagens realizadas no laboratório, as câmeras fotográficas operam necessariamente em modo manual e as funções de foco automático e de

controle automático de obturador e diafragma são desligadas. Dessa forma, antes do início dos ensaios propriamente dito, realiza-se o ajuste de foco por diferentes técnicas de focagem manual descritas nos manuais de fotografia. A fotometria da cena é realizada utilizando-se o próprio fotômetro da câmera para ajuste preciso do obturador e diafragma.

A câmera *Nikon D90* opera com um sensor do tipo *CMOS* de 23,6×15,8 mm de tamanho. A objetiva *Nikkor Medical* opera em *full frame* (24×36 mm) o que gera um fator de escala de aproximadamente 1,5 aumentando a distância focal da objetiva de 120 para 180 mm.

Câmeras *DSLR* com obturadores de cortina são uma boa opção de captura de imagens em visualização de escoamentos. Infelizmente, a maioria das câmeras digitais até então fabricadas tinham uma estimativa de vida útil do obturador de apenas aproximadamente 30 000 disparos obrigando os profissionais de fotografia a trocas frequentes de equipamento. Tal fato deve-se a política de obsolescência programada aplicada pela indústria do setor. A opção pela aquisição da câmera *Nikon D90* é que esse tipo de câmera apresenta um obturador de alta precisão e com uma vida útil acima de 100 000 disparos, o que implica em uma alta vida útil do equipamento.

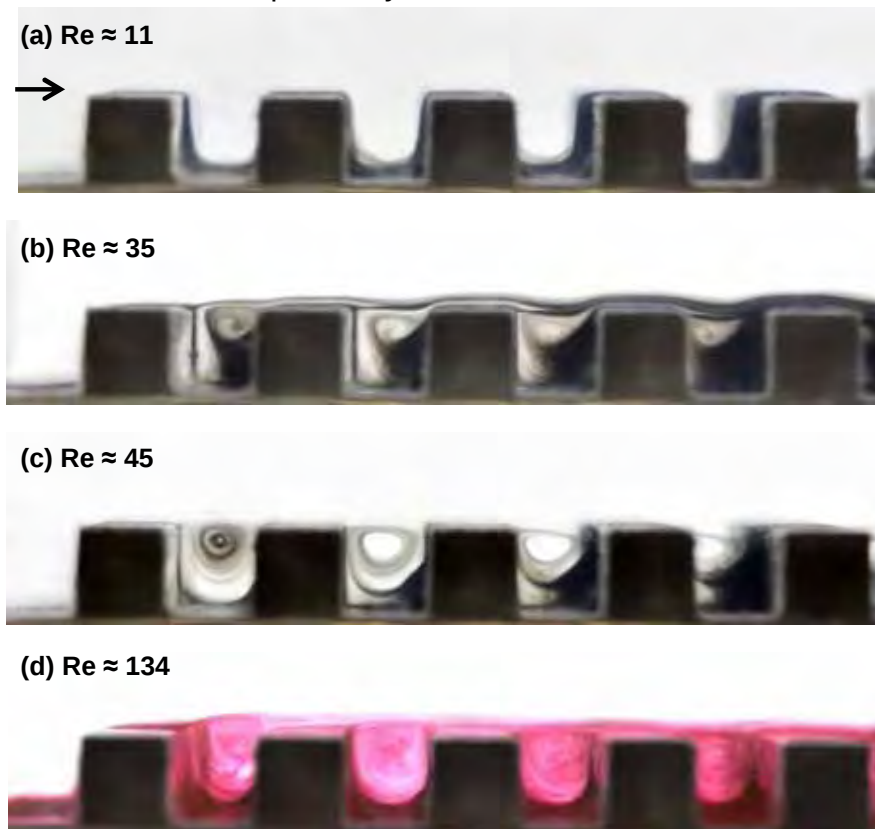
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados obtidos no presente trabalho. Para cada caso investigado são mostradas imagens do escoamento, curvas de frequência de emissão de vórtices *versus* Reynolds e curvas de Strouhal *versus* Reynolds. As imagens obtidas por meio de injeção de corantes líquidos possuem caráter qualitativo e permitem identificar diferentes padrões de escoamento. Por outro lado, os resultados quantitativos oriundos das medições de frequência de emissão de vórtices são adquiridos por meio de anemometria de filme quente e, adicionalmente, permitem a caracterização do escoamento em estudo.

4.1 Placa plana munida de protuberâncias de seção quadrada

A Fig. 40 mostra imagens do escoamento sobre uma placa plana munida de protuberâncias quadradas posicionadas perpendicularmente ao fluxo principal.

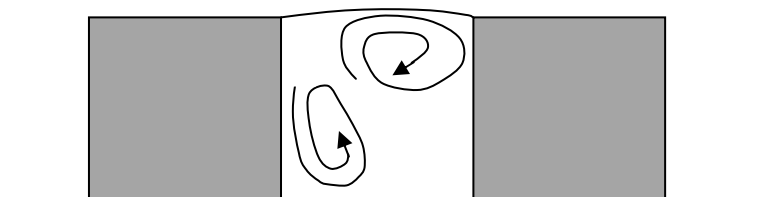
Figura 40 – Imagens do escoamento sobre protuberâncias quadradas para Reynolds 11 a 134.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

O escoamento flui da esquerda para a direita, como indicado pela seta na Fig. 40(a). Nesta imagem, é possível visualizar que o corante contorna quase que perfeitamente os obstáculos e que o descolamento é muito pequeno. Este fato ocorre devido à baixíssima velocidade do escoamento, ou seja, os efeitos viscosos são predominantes. Por outro lado, na Fig. 40(b) o aumento da velocidade faz com que ocorra o descolamento da camada limite no bordo superior direito da primeira protuberância e, além disso, notam-se três regiões distintas no interior de cada cavidade. A primeira região é formada por um vórtice de sentido horário que ocorre devido à diferença de velocidade existente entre o fluxo principal e a menor velocidade no interior da cavidade. A segunda é a região que se estende desde o canto inferior esquerdo ao canto superior esquerdo onde não é possível visualizar a presença de corante, uma vez que este foi “lavado” pelo movimento do fluido. Pode-se afirmar que essa região apresenta uma recirculação no sentido anti-horário visto que seu movimento deve ser contrário ao da primeira região, como ilustra a Fig. 41.

Figura 41 – Recirculações presentes nas cavidades para $Re \approx 35$.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Identifica-se também uma terceira região onde ocorre grande concentração de corante localizada na parte inferior direita da cavidade. Nesta região, a velocidade do fluido é extremamente baixa, isso faz com o que o corante permaneça evidente por um período de tempo maior do que em outras áreas da cavidade.

Apesar de retratarem escoamentos de diferentes números de Reynolds, as Fig. 40(c) e 40(d) evidenciam comportamentos semelhantes, tanto para o descolamento da camada limite quanto para as recirculações no interior das cavidades. Em ambos os casos observa-se que o descolamento ocorre próximo ao bordo superior direito das protuberâncias, entretanto a espessura da camada cisalhante é levemente maior na Fig. 40(d). Com relação às recirculações, constata-se que as cavidades são preenchidas por inteiro por apenas um vórtice de sentido horário, e que este se apresenta em fase de formação nas cavidades da Fig. 40(c),

enquanto se apresenta estável em todas as cavidades da Fig. 40(d). Para os valores de número de Reynolds até então avaliados e devido às características descritas, as protuberâncias se comportam, segundo Perry *et al.* (1969), como rugosidades do tipo “d”, ou seja, as recirculações presentes no interior das cavidades são estáveis, a emissão de vórtices no escoamento principal é desprezível e o fluido escoava com perturbações relativamente pequenas sobre as cristas dos elementos. Outro fator importante é que o padrão de escoamento é primeiramente estabelecido na primeira cavidade, isso possivelmente se deve ao fato da energia cinética ser maior nessa cavidade do que nas outras subsequentes.

O aumento da velocidade do escoamento na seção de testes faz com que os vórtices e recirculações apresentem diferentes características em relação às descritas nos casos anteriores, como ilustra a Fig. 42. Para o número de Reynolds igual a 228, Fig. 42(a), há uma diminuição no tamanho do vórtice principal no interior das cavidades concomitantemente com o surgimento de um vórtice secundário anti-horário localizado na parte inferior esquerda de cada cavidade. Esse processo ocorre de forma similar ao exposto pela Fig. 40(b) e descrito pela Fig. 41. Além disso, o vórtice principal ocupa uma região que se estende além do nível dos obstáculos, apresentando também uma camada cisalhante mais espessa e evidente. É possível notar ainda o início da formação da bolha de recirculação a montante da primeira saliência, bem como a mudança do ponto de descolamento da camada limite, o qual se torna mais próximo do bordo superior esquerdo da primeira protuberância devido ao aumento da velocidade do escoamento.

Figura 42 – Imagens do escoamento sobre protuberâncias quadradas para Reynolds 228 a 758.

(a) $Re \approx 228$



(b) $Re \approx 321$



(c) $Re \approx 451$



(d) $Re \approx 567$



(e) $Re \approx 642$



(f) $Re \approx 758$

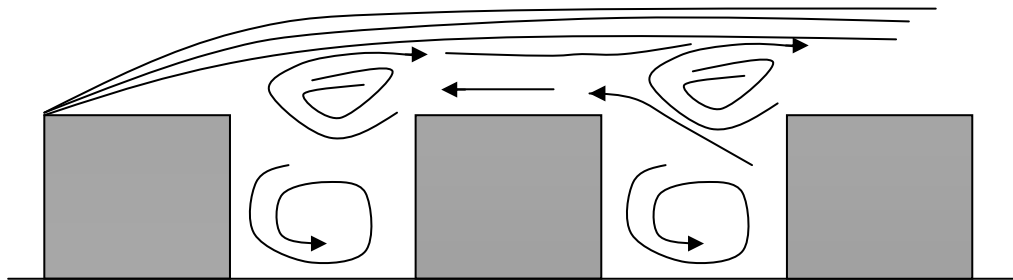


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Duas regiões de recirculação com características singulares são identificadas na Fig. 42(b). A primeira região é formada por um vórtice de sentido horário que está localizado acima de cada cavidade. Já no espaço entre as protuberâncias identifica-se uma região de recirculação anti-horária, diferentemente do que acontece com o padrão de escoamento apresentado na Fig. 40, onde os vórtices principais, em sua maioria, apresentavam sentido de rotação horário. Esse fenômeno ocorre devido à

presença de um fluxo reverso na camada cisalhante o qual, por sua vez, acontece provavelmente em razão de um diferente gradiente de pressão no interior da camada limite. A Fig. 43 ilustra esquematicamente as regiões anteriormente descritas.

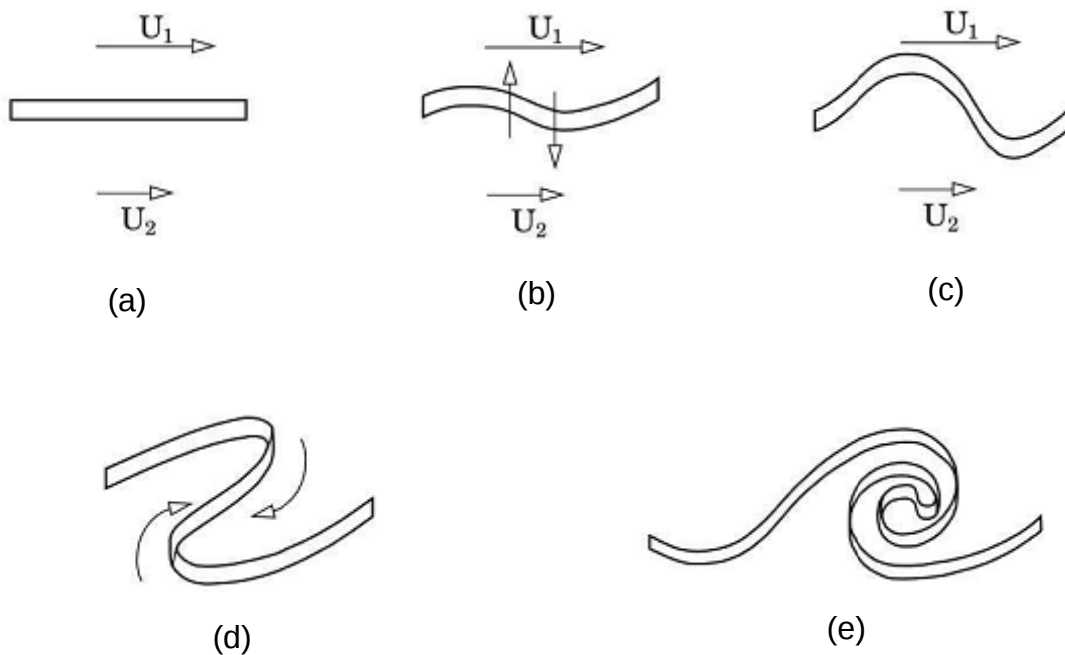
Figura 43 – Recirculações presentes para $Re \approx 321$.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A Fig. 42(c) mostra o início do desenvolvimento da instabilidade de Kelvin-Helmholtz que ocorre quando é perturbada a interface entre duas camadas de velocidades diferentes. Segundo Mendonça (2003), as perturbações são produzidas a montante e crescem ou decrescem enquanto se propagam na direção do escoamento, ou seja, possuem natureza convectiva. Esta instabilidade é uma consequência do desequilíbrio entre as forças de inércia e de pressão. Sua análise independe dos efeitos viscosos, os quais são importantes apenas a números de Reynolds muito baixos e que contribuem para a estabilização da camada cisalhante. Este estágio do mecanismo de transição à turbulência é devido à característica inflexional do perfil de velocidade. De acordo com Martinez (2006), o desenvolvimento da instabilidade de Kelvin-Helmholtz resulta numa camada de vorticidade, Fig. 44 (a - c), de comprimento de onda λ , que se enrola, Fig. 44(d), formando as estruturas coerentes de Kelvin-Helmholtz com vorticidade perpendicular ao escoamento médio, Fig. 44(e). Este tipo de instabilidade ocorre com frequência na natureza e em aplicações industriais.

Figura 44 – Formação da Instabilidade de Kelvin-Helmholtz.



Fonte: Martinez (2006).

Identifica-se ainda para o escoamento mostrado na Fig. 42(c) a presença de fluxo reverso e a formação de vórtices acima das cavidades. Entretanto, estes vórtices possuem uma forma mais achatada e as recirculações entre as protuberâncias são delimitadas na parte superior pelo escoamento contracorrente. A Fig. 45 mostra um escoamento análogo ao da Fig 42(c), com as recirculações acima dos obstáculos mais facilmente identificadas.

Figura 45 – Escoamento para $Re \approx 445$.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

É importante destacar que esse fenômeno ocorre somente nas duas primeiras cavidades e que, no restante da placa corrugada as instabilidades de Kelvin-Helmholtz são predominantes, como ilustra a Fig. 46.

Figura 46 – Escoamento sobre uma placa plana munida de protuberâncias quadradas para $Re \approx 451$.

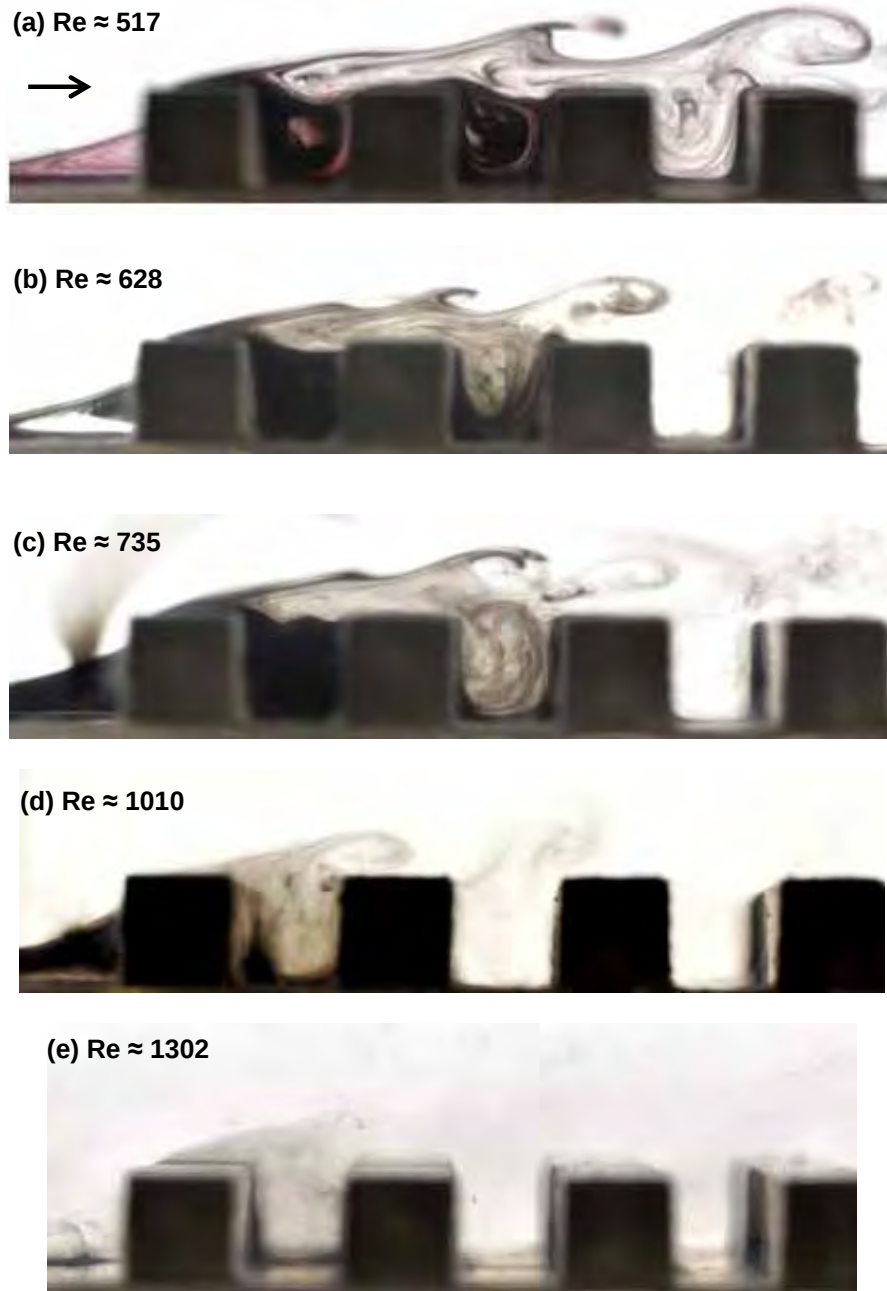


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Analisando-se as Fig. 42(d), (e) e (f) é possível identificar características muito similares em relação ao padrão de escoamento. As cavidades apresentam em seu interior uma única recirculação de sentido anti-horário, aspecto completamente oposto ao descrito na Fig. 40(c) para baixo número de Reynolds. Isso possivelmente ocorre em razão do fluxo reverso ainda se fazer presente no interior da camada limite, o que implica diretamente no sentido de rotação das recirculações no interior das cavidades. Pode-se ainda notar com clareza que à medida que a velocidade do escoamento aumenta, mais antecipadamente ocorre a formação das instabilidades de Kelvin-Helmholtz. Além disso, a diminuição de corante ao longo do escoamento é facilmente percebida com o aumento da velocidade do fluido uma vez que a característica turbulenta do escoamento cria fortes e numerosos gradientes locais, o que torna o processo de difusão molecular mais eficiente.

A Fig. 47 mostra com maiores detalhes o escoamento para números de Reynolds 517 a 1 302 sobre as primeiras protuberâncias. Nota-se que nas Fig. 47(a) e (b), ao contrário do que ilustra a Fig. 42(c), as recirculações acima das cavidades não apresentam formas definidas mesmo para um valor próximo de número de Reynolds e esse padrão é mantido na imagem seguinte, Fig. 47(c). Nota-se também na Fig. 47(c) a formação de um vórtice na parede oposta da seção de teste, mas que não gera influência no escoamento principal. Aumentando-se ainda mais a velocidade do fluido na seção de testes, a visualização do escoamento por meio da técnica de injeção de corantes torna-se inviável, pois o movimento turbulento do fluido dissipa rapidamente o corante e a identificação de estruturas turbilhonares é altamente dificultada, como pode ser visto nas Fig. 47(d) e (e).

Figura 47 – Detalhes do escoamento sobre placa com protuberâncias quadradas para Reynolds 517 a 1302.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Os resultados obtidos por meio da anemometria de filme quente para a placa munida de protuberâncias quadradas são apresentados a seguir. Como descrito em seções anteriores, a calibração da sonda para aquisição da frequência de emissão de vórtices não se faz necessária, uma vez que o estímulo induzido pelo vórtice sobre o filamento da sonda independe do valor da velocidade do escoamento. A Fig. 48 ilustra o momento exato em que um vórtice atravessa o filamento da sonda. O corante injetado no escoamento auxilia apenas no correto posicionamento do

aparato, indicando a posição onde a emissão de vórtices está ocorrendo. Para a realização das medições, a injeção de corante é interrompida para não influenciar na aquisição dos dados.

Figura 48 – Posicionamento da sonda no escoamento.

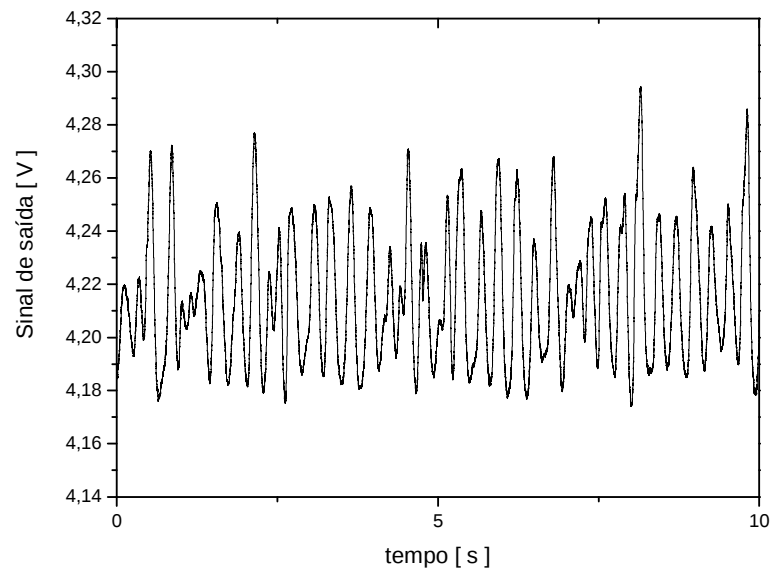


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

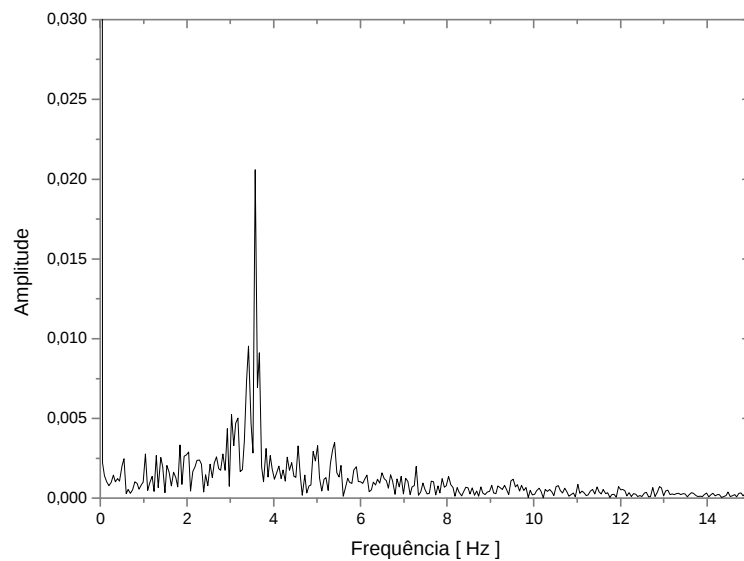
A título de exemplificação, a Fig. 49 apresenta o sinal temporal e o espectro de frequência obtidos em um dos ensaios conduzidos em laboratório para $Re = 946$. O sinal digital adquirido é mostrado na Fig. 49 (a), onde a variação de tensão é mostrada em função do tempo. As variações ocorrem de acordo com a flutuação de velocidade do fluido, pois o anemômetro faz as compensações necessárias a fim de manter a resistência e a temperatura da sonda constantes.

Para a obtenção da frequência de Strouhal, que caracteriza o fenômeno de emissão alternada de vórtices, aplicou-se a transformada rápida de Fourier (FFT) ao sinal digital adquirido, obtendo-se então o espectro de frequência mostrado pela Fig. 49(b). O pico identificado na imagem indica a energia do vórtice captada pelo anemômetro e a frequência com que ele atravessa o filamento da sonda.

Figura 49 – (a) Sinal temporal e (b) espectro de frequência para $Re \approx 946$ no escoamento sobre protuberâncias quadradas.



(a)



(b)

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

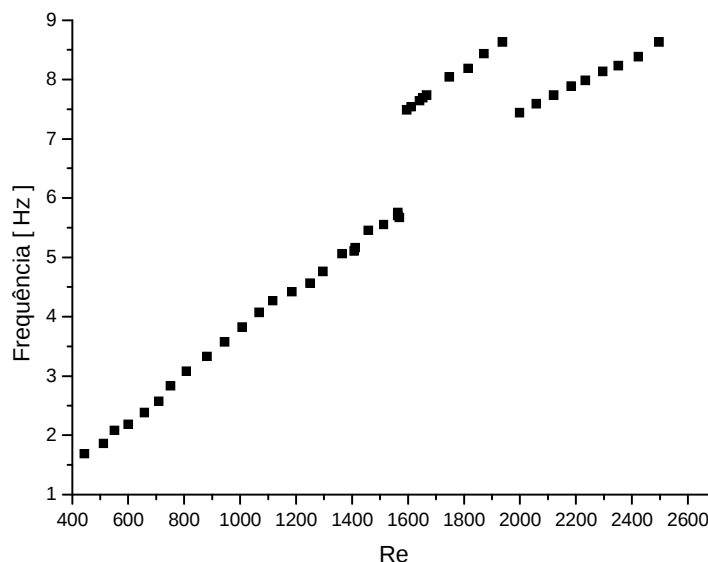
Com o intuito de investigar a frequência de emissão de vórtices sobre a placa, vários ensaios foram conduzidos para diferentes valores de número de Reynolds.

Primeiramente, a válvula de alimentação (VA - Fig. 23), e a válvula manual tipo borboleta (VB - Fig. 23), são ajustadas para que a vazão permaneça constante durante a realização dos ensaios. Em seguida, com o auxílio da injeção de corante é

possível identificar a região de desprendimento dos vórtices e então posicionar a sonda de filme quente, assim como ilustrado pela Fig. 48. Para cada valor do número de Reynolds é necessário a aquisição e o processamento do sinal para enfim realizar a FFT e descobrir a frequência de desprendimento de vórtices. A Fig. 50 mostra a curva obtida a partir de $Re \approx 445$ até $Re \approx 2500$. Todos os pontos da curva foram obtidos com a sonda posicionada levemente acima da terceira cavidade, sendo ajustada em um raio de poucos milímetros de acordo com a localização dos vórtices para cada velocidade do escoamento.

Identifica-se na Fig. 50, para a faixa de número de Reynolds entre 445 e 1600, um comportamento linear em que o aumento da velocidade é proporcional ao aumento da frequência de emissão de vórtices. Esta linearidade é mantida na segunda região, entretanto notam-se duas descontinuidades que ocorrem para números de Reynolds aproximadamente iguais a 1600 e 2000. Esse fenômeno acontece porque um novo padrão de escoamento provavelmente se desenvolve e a frequência de desprendimento de vórtices é subitamente aumentada e, em seguida, reduzida.

Figura 50 – Curva de frequência de emissão de vórtices em função de Reynolds.



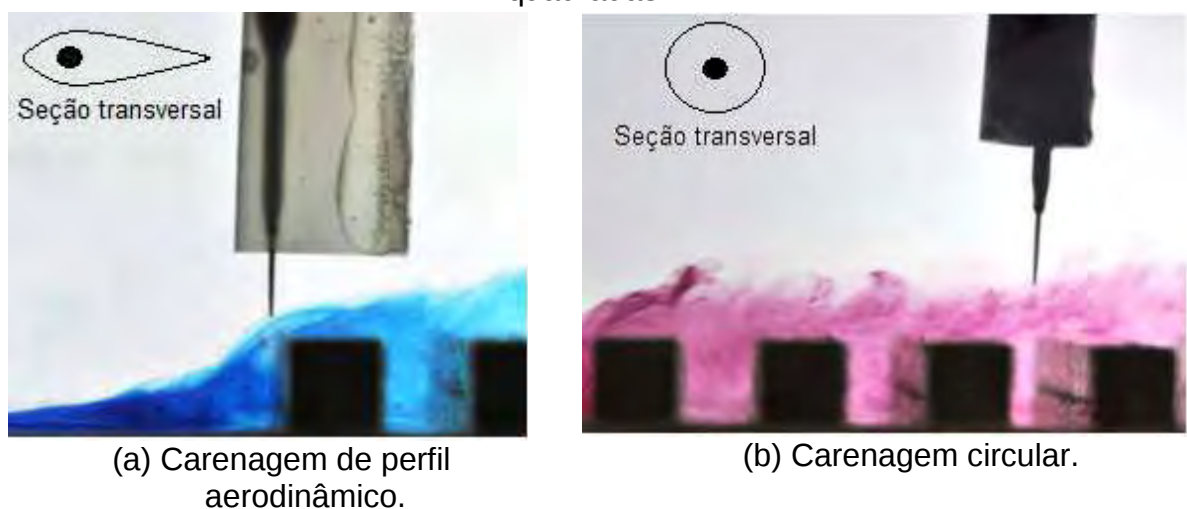
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Para verificar a precisão dos resultados alcançados, dois locais foram utilizados para captura de novos sinais, o primeiro acima da protuberância 1 e o

segundo acima da cavidade 3. Adicionalmente, dois diferentes tipos de carenagem foram colocados em torno da haste da sonda para eliminar dúvidas em relação à sua vibração, induzida pelo escoamento do fluido, e a coleta dos dados. A primeira carenagem foi um perfil aerodinâmico que envolvia toda a circunferência da haste, possibilitando a passagem do fluido sem maiores perturbações. A outra carenagem consistia de um cilindro circular de 10 mm de diâmetro que também era envolto na haste. Seu principal objetivo era alterar os valores da frequência de vórtices emitidos pela haste e, assim como o perfil aerodinâmico, garantir que os dados coletados eram advindos somente do escoamento.

A Fig. 51 mostra a utilização das carenagens para diminuir as perturbações incidentes na haste durante a aquisição dos sinais pelo anemômetro de filme quente. A Fig. 51(a) apresenta a carenagem de perfil aerodinâmico enquanto que na Fig. 51(b) pode ser vista a carenagem circular.

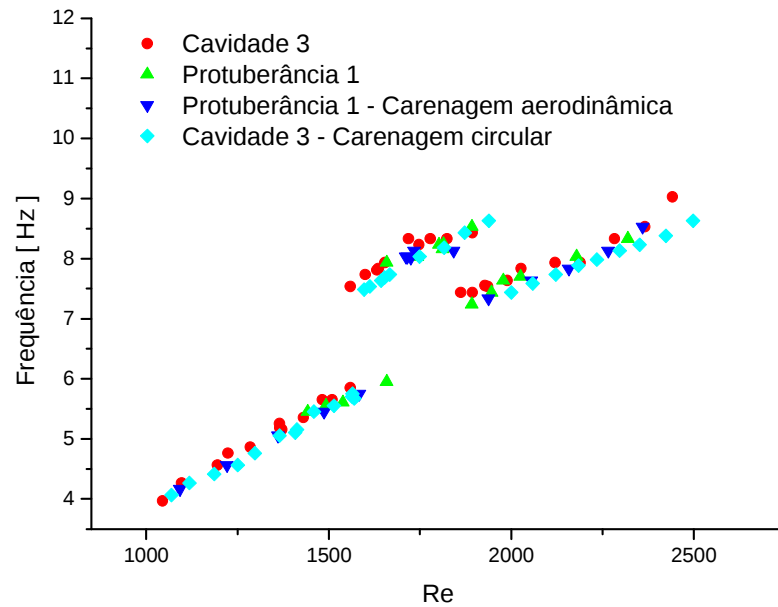
Figura 51 – Tipos de carenagens utilizadas nos experimentos com protuberâncias quadradas.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A Fig. 52 mostra os resultados dos ensaios que foram conduzidos com o objetivo de investigar o escoamento nas regiões em que as discontinuidades estão presentes. Os valores obtidos para as frequências oscilam em uma nuvem de pontos com comportamento semelhante, ou seja, as discontinuidades para Reynolds 1600 e 2000 se mantiveram presentes. Pode-se comprovar ainda que a haste da sonda não influenciava durante a aquisição de sinais.

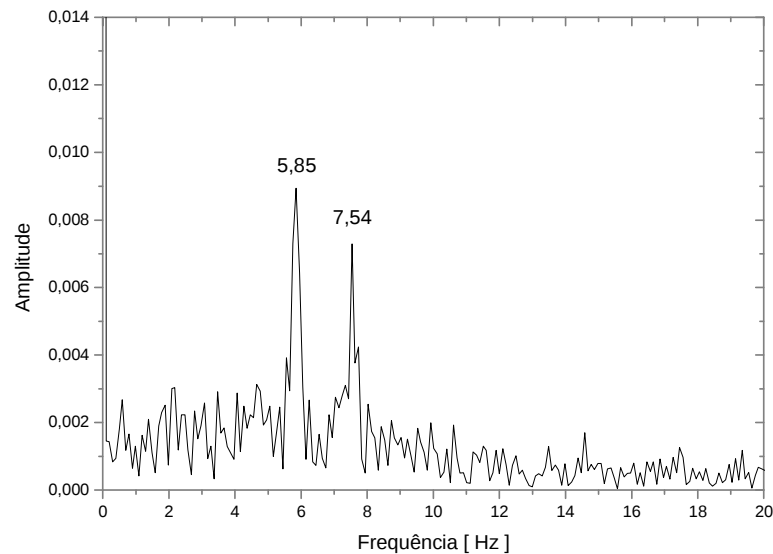
Figura 52 – Frequência *versus* Re para diferentes configurações da sonda sobre a placa.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Em uma das medições na região de descontinuidade foi possível visualizar, num mesmo sinal, a presença dos picos de alta e baixa frequências. Provavelmente, os dois picos também coexistam para valores de números de Reynolds próximos a 2000, mas devido às pequenas amplitudes envolvidas, a dificuldade de se captar esse tipo de sinal é elevada. A Fig. 53 indica as duas frequências coexistentes e seus respectivos valores.

Figura 53 – Alta e baixa frequências captadas pela sonda anemométrica para $Re \approx 1559$.

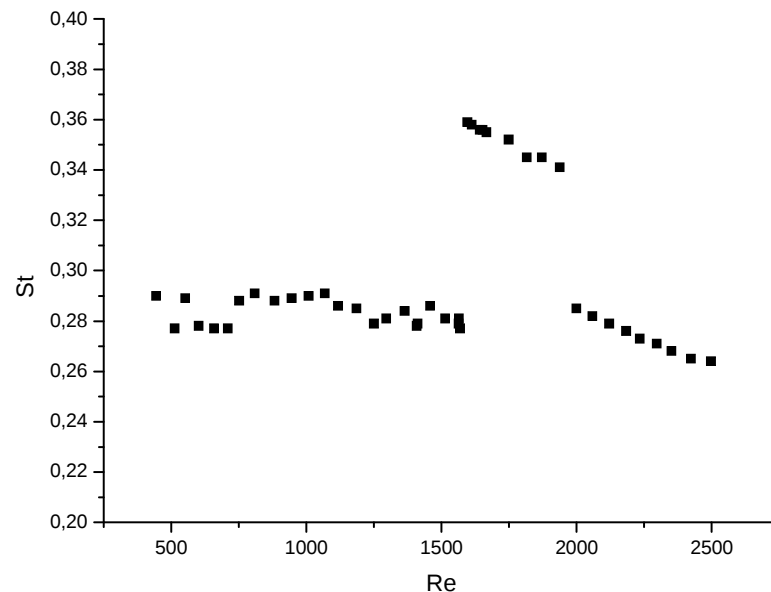


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

De posse dos valores de frequência expostos na Fig. 50, pode-se calcular o número de Strouhal através da equação 2 e analisá-lo em função do número de Reynolds. A curva obtida é mostrada na Fig. 54 e se caracteriza pela existência de três regiões distintas.

Nota-se que na primeira região, a frequência de desprendimento de vórtices oscila levemente, indicando que há proporcionalidade no aumento da velocidade do fluido com a emissão de vórtices. Por outro lado, na segunda região ($Re \approx 1600$) pode-se concluir que o aumento da frequência ocorre de forma abrupta em relação à velocidade da corrente livre, o que leva a um salto nos valores de Strouhal. As frequências se mantêm neste patamar elevado, porém com uma leve diminuição em relação à velocidade, como pode ser visto pela inclinação formada pelos pontos. Por volta de $Re \approx 2000$, novamente ocorre uma diminuição considerável do número de Strouhal, e os valores voltam a seguir o patamar da primeira região. Entretanto, nota-se que a velocidade do fluido cresce numa taxa maior em comparação com a emissão de vórtices, o que leva novamente a um declínio nos valores de Strouhal.

Figura 54 – Número de Strouhal em função do número de Reynolds.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Padrões de descontinuidades na curva Strouhal *versus* Reynolds foram também encontrados por Lindquist *et al.* (1998). Contudo, os estudos foram concentrados em cilindros isolados de razão de forma 2:1, em que as descontinuidades estavam presentes na faixa de Reynolds entre 450 e 550, devido a uma alteração no padrão de escoamento. O comportamento do número de Strouhal de cilindros retangulares com diversas razões de forma foi também alvo de estudos numéricos e experimentais de Okajima (1982). Entretanto, ele somente constatou a ocorrência de descontinuidades em cilindros de razão de forma 2:1 e 3:1.

Tais estudos indicam a possibilidade de uma grande influência do número de obstáculos no comportamento do escoamento. Provavelmente, a mudança no padrão de emissão de vórtices é causada por alterações significativas na camada limite, como por exemplo, no seu descolamento e na presença de diferentes instabilidades nesta faixa de Reynolds estudada.

4.2 Placa plana munida de sobressaltos ondulados

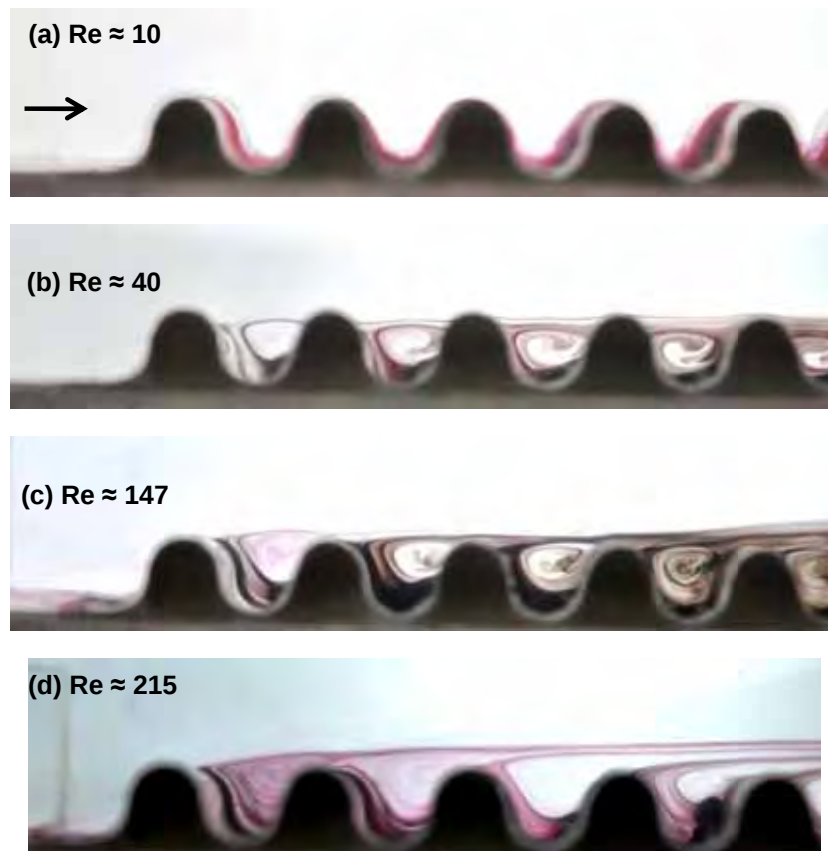
A seguir são apresentados os resultados obtidos para o escoamento sobre uma placa plana munida de protuberâncias onduladas posicionadas

perpendicularmente ao fluxo principal. Em todas as imagens o escoamento flui da esquerda para a direita, como indicado pelas setas existentes nas figuras. As características qualitativas e quantitativas do escoamento são comparadas com os resultados descritos anteriormente para a placa plana com protuberâncias quadradas.

A Fig. 55(a) mostra o escoamento contornando quase que perfeitamente as ondulações presentes na placa. Assim como na Fig. 40(a), a velocidade do fluido é extremamente baixa e os efeitos viscosos são predominantes. Apesar de apresentarem características iguais, o tempo de espera para se visualizar o escoamento sem as perturbações causadas pela injeção do corante é levemente inferior ao da placa com obstáculos quadrados. Isto ocorre, pois as protuberâncias onduladas possuem contornos mais suaves e o fluido se estabiliza de maneira mais rápida. A Fig. 55(b) mostra que um pequeno aumento na velocidade do fluido faz com que um suave descolamento da camada limite seja visto na parte superior das protuberâncias, delimitando as recirculações existentes nas cavidades. Adicionalmente, nota-se no interior das concavidades a presença de um vórtice principal de sentido horário que se estende desde o ponto de descolamento até o ponto recolamento da camada limite, no obstáculo subsequente. Na região inferior esquerda, é possível visualizar um vórtice secundário de rotação anti-horária, pois como já explicado anteriormente, seu sentido de rotação é diretamente influenciado pelo vórtice principal. Este vórtice é análogo ao mostrado na Fig. 40(b) e descrito pela Fig. 41.

Conforme observado durante os ensaios, é importante salientar que para números de Reynolds relativamente baixos (até $Re \approx 350$), o padrão de escoamento é primeiramente estabelecido nas primeiras cavidades e, depois de alguns minutos, este padrão se repete nas cavidades seguintes.

Figura 55 – Imagens do escoamento para Reynolds 10 a 215.



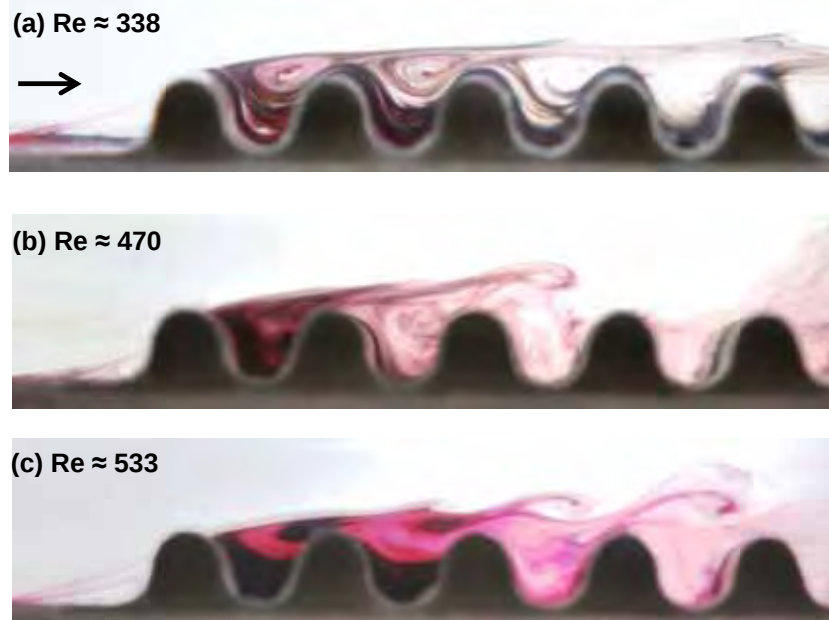
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Apesar do aumento da velocidade do fluido, o padrão de escoamento descrito pela Fig 55(c) apresenta grande semelhança com a Fig. 55(b). As principais características que diferem as imagens são o aumento do tamanho dos vórtices principais e secundários e os pontos de descolamento e recolamento da camada limite, os quais se tornam mais próximos das cristas dos elementos devido ao aumento de velocidade do fluido. O comportamento das recirculações no interior das cavidades difere do padrão descrito na Fig. 40(d), visto que a presença de um único vórtice na cavidade foi constatado apenas para um número de Reynolds mais elevado, como mostra a Fig. 55(d). Nesta imagem é possível ainda visualizar que não há o recolamento da camada limite e que o vórtice ocupa uma região que se estende desde o vale da concavidade até alguns milímetros acima das protuberâncias. Este comportamento apresenta uma pequena divergência com os resultados obtidos numericamente por Abdel-Shafi e Nishikawa (1993), onde o vórtice no interior da cavidade é menor e a camada limite volta a recolar na ondulação seguinte. As diferenças possivelmente ocorrem em razão de aspectos experimentais como número de protuberâncias e a distância entre elas.

Aumentando-se levemente a velocidade do escoamento, é possível verificar que o vórtice principal eleva-se ainda mais em relação às protuberâncias. Esse processo ocorre concomitantemente com o surgimento de um vórtice de rotação horária que surge na região inferior da cavidade, como pode ser visto com maior detalhe na primeira cavidade da Fig. 56(a), onde a região com menos corante indica o movimento do fluido. Ademais, na área a montante da primeira saliência identifica-se o início da formação da bolha de recirculação que aparece devido ao descolamento da camada limite, que ocorre quando o fluido “sente” a presença dos obstáculos a sua frente e muda sua trajetória para contorná-los.

Alcançando-se agora $Re \approx 470$, Fig. 56(b), as instabilidades no escoamento sobre as protuberâncias se intensificam. Entretanto, as regiões de fluxo reverso e a presença de instabilidades de Kelvin-Helmholtz apenas tornam-se evidentes na Fig. 56(c), mostrando que este padrão de escoamento, assim como na Fig. 45, também aparece sobre a placa munida de saliências onduladas, porém a um número de Reynolds mais elevado.

Figura 56 – Imagens do escoamento para Reynolds 338 a 533.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A Fig. 57 mostra maiores detalhes do escoamento antes de alcançar o padrão descrito pela Fig. 56(c). O interior da cavidade é, em sua maioria, ocupado por um vórtice de sentido anti-horário, ao passo que a região superior direita da concavidade é ocupada por um vórtice de sentido horário que aparece devido ao

início do fluxo reverso. Este escoamento de sentido oposto é o principal responsável pela formação dos vórtices que estão acima das cavidades na Fig. 56(c).

Figura 57 – Detalhe do escoamento para $Re \approx 461$.

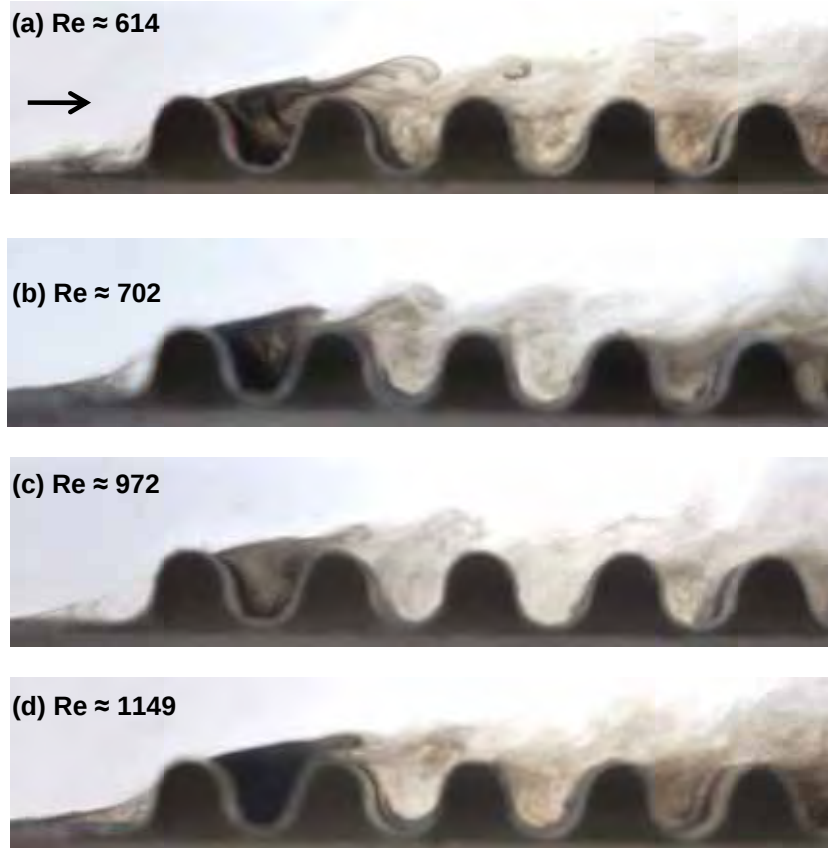


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

As características do escoamento mostradas na Fig. 58 apresentam grande semelhança com as do escoamento sobre obstáculos quadrados mostrado na Fig. 47. Como poder ser visto, o corante é primeiramente “lavado” nas últimas concavidades, processo completamente oposto ao descrito nas imagens para baixos números de Reynolds. Isto ocorre, pois as instabilidades formadas no início dos obstáculos possuem natureza turbulenta, ou seja, são altamente dissipativas e espalham o corante no restante do escoamento em poucos segundos.

Apesar das características aleatórias da turbulência, é possível constatar a presença de instabilidades de Kelvin-Helmholtz, Fig. 58(a) e (b), que se formam numa região cada vez mais próxima ao primeiro obstáculo, à medida que a velocidade do fluido aumenta.

Figura 58 – Imagens do escoamento para Reynolds 614 a 1149.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

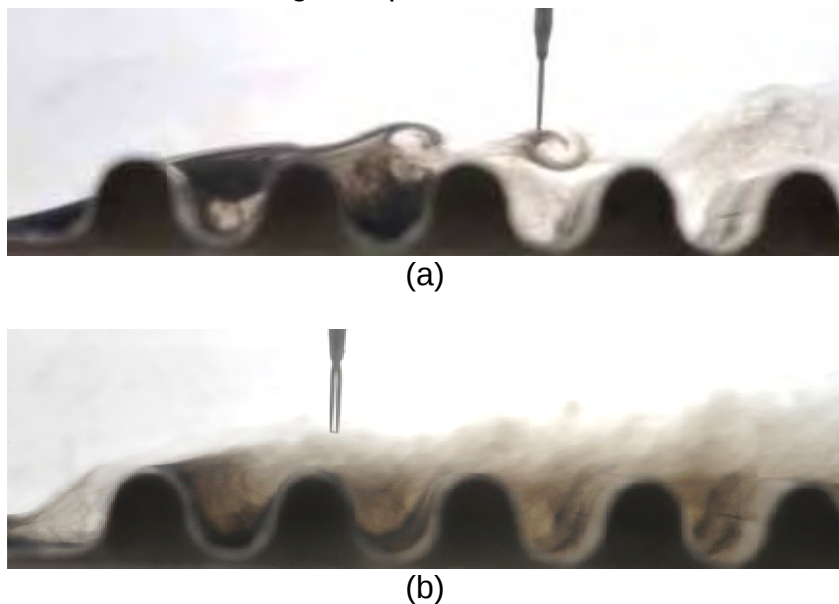
A visualização e a identificação de estruturas turbilhonares tornam-se cada vez complexas conforme o aumento da velocidade do fluido na seção de testes, Fig. 58 (c) e (d). A dificuldade em se observar as características do escoamento ocorre, pois a injeção de corante não acontece de forma contínua, e sim com injeção a montante do corpo de prova e posterior retirada da agulha para que o fluido “lave” as regiões dos obstáculos e evidencie o padrão de escoamento. Deste modo, garante-se que a velocidade do corante injetado não seja maior que a do escoamento e que não haja algum tipo de perturbação induzida pela agulha, o que levaria a uma falsa interpretação dos resultados.

Os resultados obtidos através de anemometria de filme quente para placa munida de protuberâncias onduladas serão a seguir apresentados.

A Fig. 59 mostra as diferentes disposições da sonda utilizadas para a captação dos dados do escoamento. Num primeiro momento, a sonda foi posicionada acima da terceira cavidade, Fig. 59(a), uma vez que a emissão de vórtices se concentrava nessa região, facilitando a aquisição e a identificação da frequência de Strouhal. Em seguida, em consequência do aumento da velocidade do

fluido na seção de testes, a captação do sinal ficou prejudicada, pois o desprendimento de vórtices passou a ocorrer próximo a crista do segundo obstáculo. Em virtude desta mudança no padrão de escoamento, o posicionamento da sonda foi levemente alterado de acordo com as aberturas existentes na parede lateral da seção de testes, Fig. 59(b), permitindo que o estímulo induzido pelo vórtice sobre o filamento da sonda pudesse ser melhor captado.

Figura 59 – Posicionamento da sonda (a) acima da terceira cavidade e (b) acima da segunda protuberância.

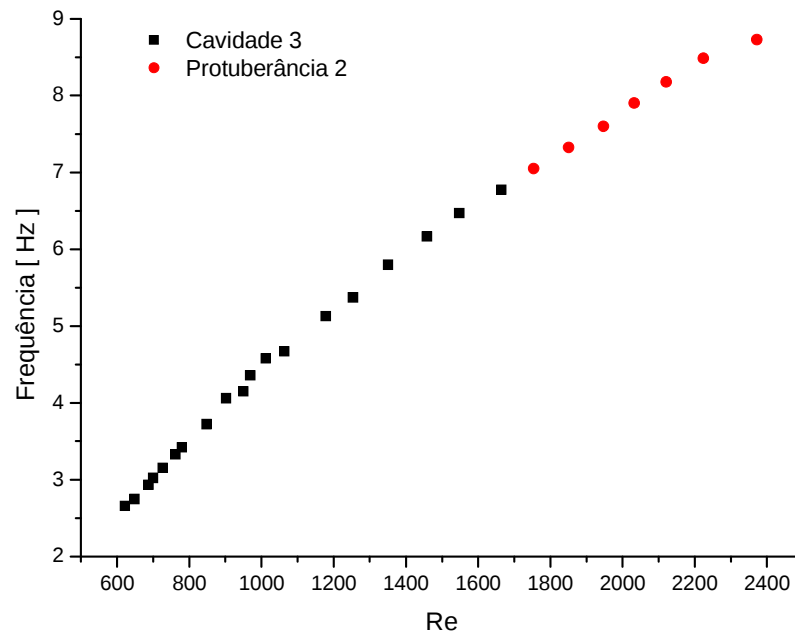


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Assim como realizado nos experimentos sobre a placa provida de protuberâncias quadradas, a injeção de corante tem apenas a função de evidenciar a região de emissão de vórtices. Durante a aquisição de dados, a injeção é interrompida para não influenciar nas medições.

Depois de adquiridos e processados, os sinais anemométricos geraram a curva mostrada na Fig. 60. Pode-se inferir que a frequência de emissão de vórtices cresce proporcionalmente ao número de Reynolds. Diferentemente do exposto na Fig. 50, não houve nenhuma região de declínio ou aumento súbito da frequência, mesmo para as regiões onde a sonda teve seu posicionamento alterado. Isso mostra que, apesar dos padrões de escoamento serem diferentes nesta faixa de número de Reynolds, o comportamento da emissão de vórtices sobre as protuberâncias se mantém constante.

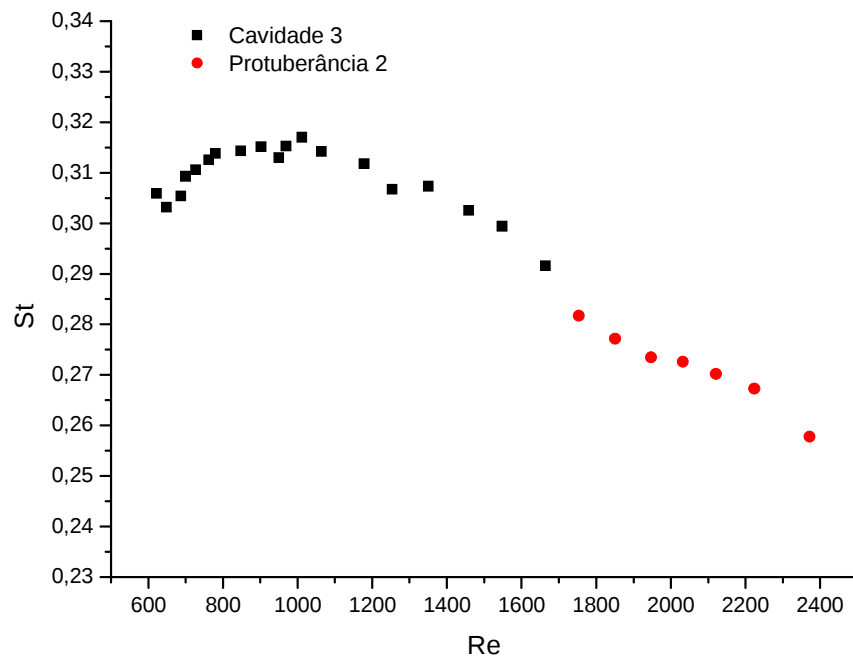
Figura 60 – Frequência de emissão de vórtices *versus* número de Reynolds para as diferentes posições da sonda.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Por meio da Eq. (2) e dos valores das frequências mostrados na Fig. 60, o número de Strouhal pode ser calculado e analisado em função do número de Reynolds, como mostra a Fig. 61. Num primeiro instante, nota-se um suave aumento do número de Strouhal. Nesta faixa, que se estende até $Re \approx 800$, a frequência de emissão de vórtices cresce numa taxa mais acelerada em relação à velocidade do fluido não perturbado. A partir deste ponto, há um equilíbrio entre o aumento da frequência de desprendimento de vórtices e da velocidade do escoamento, visto que o número de Strouhal apresenta pequenas oscilações. Esta característica pode ser observada até aproximadamente $Re \approx 1100$, a partir do qual um novo comportamento é identificado. Este último padrão é completamente oposto a primeira região descrita e indica que a velocidade do fluido cresce num patamar maior em relação à frequência de emissão de vórtices, o que leva a um decaimento no número de Strouhal.

Figura 61 – Número de Strouhal *versus* número de Reynolds para as diferentes posições da sonda.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Através dos resultados expostos no presente trabalho, foi possível constatar que o escoamento sobre as placas munidas de obstáculos quadrados e ondulados apresenta diferentes características. Os dados adquiridos evidenciaram que as particularidades de cada caso ocorrem não só em termos qualitativos, conforme analisado pelas imagens apresentadas, mas também quantitativos, por meio da análise e interpretação dos parâmetros adimensionais que governam o problema.

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho investigou-se experimentalmente o escoamento sobre duas placas planas, uma munida de protuberâncias quadradas e outra provida de saliências onduladas. Ambos os obstáculos foram posicionados perpendicularmente à corrente livre, onde foram investigadas diversas regiões de recirculações, vórtices e instabilidades, além do comportamento da curva Strouhal *versus* Reynolds para cada caso estudado.

Ao longo de todo o trabalho, duas técnicas foram basicamente empregadas: a anemometria de filme quente e a visualização de escoamentos. A primeira delas foi utilizada, primeiramente, para a caracterização do escoamento no túnel hidrodinâmico vertical e, em seguida, na determinação da frequência de emissão de vórtices nas regiões de interesse ao longo dos corpos de prova. A segunda, por sua vez, apresentou-se como ferramenta de análise qualitativa, permitindo a identificação de padrões de escoamento bem como auxiliando no posicionamento da sonda acima das protuberâncias.

O método usado para a visualização de escoamentos foi a injeção de uma solução aquosa de corante líquido tipo PVA. O corante líquido foi injetado no interior do canal por meio de agulhas retráteis. Tais agulhas influenciam diretamente no escoamento gerando uma esteira turbulenta que se forma a jusante da própria agulha. A fim de eliminar essa perturbação, utilizou-se um método conhecido como *dye wash*, que consiste na injeção de corante no seio do canal com posterior retirada da agulha para as proximidades das paredes laterais da seção de testes, deixando apenas que o corante seja lavado pelo fluido de trabalho.

De um modo geral, os principais parâmetros investigados como a velocidade do fluido e a geometria dos obstáculos mostraram exercer grande influência sobre os padrões de escoamento. Os resultados obtidos foram, sempre que possível, comparados com os dados da literatura, apresentando em algumas ocasiões características semelhantes.

Nos experimentos realizados por meio de anemometria de filme quente em elevados números de Reynolds, as características qualitativas do escoamento não puderam ser profundamente investigadas. Esta limitação ocorreu devido às altas velocidades empregadas e, com isso, o corante se difundia com grande rapidez no seio do escoamento, não permitindo a visualização das particularidades do

movimento do fluido. Para eliminar esta barreira nos estudos realizados, a utilização de uma câmera filmadora com capacidade de captar no mínimo 150 quadros por segundo seria necessária, pois auxiliaria nas investigações do comportamento do fluido.

5.1 Sugestões para futuros trabalhos

Em virtude da complexidade envolvida no estudo do escoamento sobre uma placa plana com protuberâncias, dificilmente um estudo experimental poderia abordar a totalidade de suas inúmeras peculiaridades. Desse modo, o presente trabalho concentrou sua atenção na visualização de escoamentos, utilizando-se de corante líquido tipo PVA como agente visualizador. No decorrer dos ensaios em laboratório bem como durante a análise e interpretação dos resultados, surgiram ideias para futuros trabalhos, que poderiam ser implementadas como uma extensão dos estudos aqui desenvolvidos. As mais pertinentes são apresentadas a seguir.

- modificar o comprimento característico das protuberâncias para a identificação de possíveis novas estruturas;
- ensaiar placas munidas de protuberâncias de diferentes geometrias como, por exemplo, de seção triangular e de seção quadrada com arestas superiores chanfradas;
- variar a distância entre o início da placa e o início dos obstáculos;
- utilizar válvulas de controle automático, para maior precisão no controle de vazão;
- capturar vídeos através de uma câmera com aquisição de 150 quadros por segundo;
- realizar novos furos nas janelas laterais para permitir o acesso de duas sondas ao escoamento;
- analisar a influência da turbulência residual da corrente livre, com a introdução de grelhas de diferentes tramas na entrada da seção de testes;
- verificar a influência da rugosidade superficial do corpo de prova;
- investigar a mudança no padrão da curva $St \times Re$ para protuberâncias quadradas;

- verificar o efeito da transferência de calor sobre o padrão de escoamento.
- investigar a presença de vibrações no corpo de prova e na instalação experimental.

REFERÊNCIAS

ABDEL-SHAFI, N. Y.; NISHIKAWA, N. Numerical analysis of flows over walls with protuberances. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 46-47, p. 275-281, 1993.

ALÉ, J. V. **Desenvolvimento de equipamentos didáticos para visualização de fluxo**. Porto Alegre: PUCRS/Laboratório de Sistemas Fluidomecânicos, 2013. Disponível em: <<http://www.em.pucrs.br/lsvm/Visualiza/trab-viz-cobenge.htm>>. Acesso em: 15 jan. 2013.

ASUS. **P7P55D PRO motherboard**. Taipé, 2013. Disponível em: <http://www.asus.com/Motherboards/Intel_Socket_1156/P7P55D_PRO>. Acesso em: 15 jan 2013.

BACELAR, J. **Guia geográfico - Brasil turismo**. Curitiba, 2013. Disponível em: <<http://www.brasil-turismo.com/distrito-federal/imagens/esplanada.htm>>. Acesso em: 15 jan. 2013.

BARTOLI, G.; BORSANI, A.; BORRI, C.; PROCINO, L.; VEZZOSI, A. Leonardo, the wind and the flying sphere. In: EUROPEAN AND AFRICAN CONFERENCE ON WIND ENGINEERING – EACWE, 5., 2009, Florence. **Proceedings...** Florence Atsugi: IAWE, 2009. 12 p.

BASSAN, R. A.; MANSUR, S. S.; VIEIRA, E. R. D. R.; VIEIRA, E. D. R. Flow structure around a square section cylindrical protuberance mounted on a smooth flat plate. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES – DINCON, 10., 2011, Águas de Lindóia. **Anais...** Rio Claro: DINCON, 2011. p. 273-276.

BASSAN, R. A.; MANSUR, S. S.; VIEIRA, E. D. R. Visualização experimental de escoamentos no interior de canais munidos de protuberâncias parietais. In: CONGRESSO IBERO AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA – CIBEM, 10., 2011, Porto. **Anais...** Porto: FEUP, 2011.

BIANCHI, P. **Leonardo da Vinci e as enchentes**. [S.l.]: A Engenharia e você, 20 mar. 2009. Disponível em: <<http://aengenhariaevoce.blogspot.com.br/2009/03>>. Acesso em: 15 jan. 2013.

CARVALHO, G. B. **Estudo experimental do escoamento em torno de cilindros circulares em movimento de rotação**. 2003. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.

EGUTI, C. C. A. **Desenvolvimento de um circuito eletrônico experimental de anemômetro de fio quente**. 2005. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

JORGENSEN, F. E. **How to measure turbulence with hot-wire anemometers: a practical guide**. Skovlunde: Dantec Dynamics, 2002.

KIM, H. B.; LEE, S. J. Time-resolved velocity field measurements of separated flow in front of a vertical fence. **Experiments in Fluids**, Heidelberg, v. 31, n. 3, p. 249-257, 2001.

LEONARDI, S.; ORLANDI, P.; SMALLEY, R. J.; DJENIDI, R.; ANTONIA, R. A. Direct numerical simulations of turbulent channel flow with transverse square bars on one wall. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 491, p. 229-238, Sept. 2003.

LINDQUIST, C.; MANSUR, S. S.; VIEIRA, E. D. R. Estudo experimental do escoamento ao redor de cilindros circulares: uma aplicação aos trocadores de calor compactos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS, 7., 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABCM, 1998.

LINDQUIST, C. **Estudo experimental do escoamento ao redor de cilindros de base quadrada e retangular**. 2000. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2000.

LOHÁSZ, M. M.; RAMBAUD, P.; BENOCCI, C. Flow features in a fully developed ribbed duct flow as a result of MILES. **Flow, Turbulence and Combustion**, Dordrecht, v. 77, n. 1-4, p. 59-76, 2006.

MANSUR, S. S.; VIEIRA, E. D. R.; ESPERANÇA, G. A. S. Visualização experimental do escoamento ao redor de cilindros de base quadrada posicionados transversalmente ao fluxo livre. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS, 6., 1996, Florianópolis. **Anais...** Rio de Janeiro: ABCM, 1996. v. 2, p. 1103-1108.

MARTINEZ, D. M. V. **Transição à turbulência na camada de mistura estavelmente estratificada utilizando Simulação Numérica Direta e Simulação de Grandes Escalas**. 2006. 152 f. Tese de (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2006.

MARTINUZZI, R.; TROPEA, C. The flow around surface-mounted, prismatic obstacles placed in a fully developed channel flow. **Journal of Fluid Engineering**, New York, v. 115, n. 1, p. 85-92, 1993.

MENDONÇA, M. T. Estabilidade de escoamentos laminares: teoria linear. In: SILVEIRA NETO, A. da; MANSUR, S. S. (Eds.). **Turbulência**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas - ABCM, 2003. p. 245-304. (Coleção Cadernos de Turbulência, v. 2).

MORAES, C. C. F. **Anemômetro a fio quente**. Natal: Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2003.

MOFFAT, R. J. Describing the uncertainties in experimental results. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Philadelphia, v. 1, n. 1, p. 3-17, 1998.

OKAJIMA, A. Strouhal numbers of rectangular cylinders. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v.123, p. 379-398, Oct. 1982.

ONUR, H. S.; BAYDAR, E. Laminar channel flow over a square step. **International Journal of Engineering Science**, Philadelphia, v. 30, n. 9, p. 1109-1116, 1992.

PERRY, A. E.; SCHOFIELD, W. H.; JOUBERT, P. N. Rough wall turbulent boundary layers. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v. 37, pt. 2, p. 383-413, 1969.

ROMERO, R. A. B. Correlação entre o microclima urbano e a configuração do espaço residencial de Brasília. **Fórum Patrimônio**, Belo Horizonte, v. 4, n. 1, p. 9-22, 2011.

TREM de pouso. In: WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre. [S.l.]: Wikimedia, 2013. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Trem_de_pouso>. Acesso em: 15 jan. 2013.

TULAPURKARA, E. G.; GOWDA, B. H. L.; CHAUKAR, J. S. Mean velocity field around prismatic bodies in tandem arrangement. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 93, n. 10, p. 777-796, 2005.

VIEIRA, E. D. R.; MANSUR, S. S. Fotografia em mecânica dos fluidos. In: _____. (Eds.). **Turbulência**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas - ABCM, 2010. p. 325-378. (Coleção Cadernos de Turbulência, v. 7).

VOLINO, R. J.; SCHULTZ, M. P.; FLACK, K. A. Turbulence structure in a boundary layer with two-dimensional roughness. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v. 635, p. 75-101, 2009.

WERLÉ, H. Hydrodynamic flow visualization. **Annual Review of Fluid Mechanics**, Palo Alto, v. 5, p. 361-382, 1973.

APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

A.1 Curva de calibração do anemômetro

Como já descrito anteriormente, a calibração da sonda tem como principal objetivo obter a melhor relação possível entre o sinal de saída do instrumento e a propriedade física que está sendo medida. A calibração foi realizada em um módulo do Laboratório de Visualização de Escoamentos especialmente construído para tal função e que permite a obtenção de um jato livre em um meio quiescente. O aparato é constituído por uma seção de estabilização composto por telas e colméias seguida de uma contração que se liga a seção de testes de superfície livre. Após a seção de testes encontra-se a seção de descarga que alimenta um recipiente ligado a uma bomba centrífuga que faz a realimentação do sistema. A Fig. 62 mostra o módulo utilizado para a calibração.

Figura 62 – Aparato experimental utilizado para calibração de sondas.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Entre a bomba de alimentação e a seção de estabilização encontra-se um rotâmetro, Fig. 63, que realiza a medição de vazão.

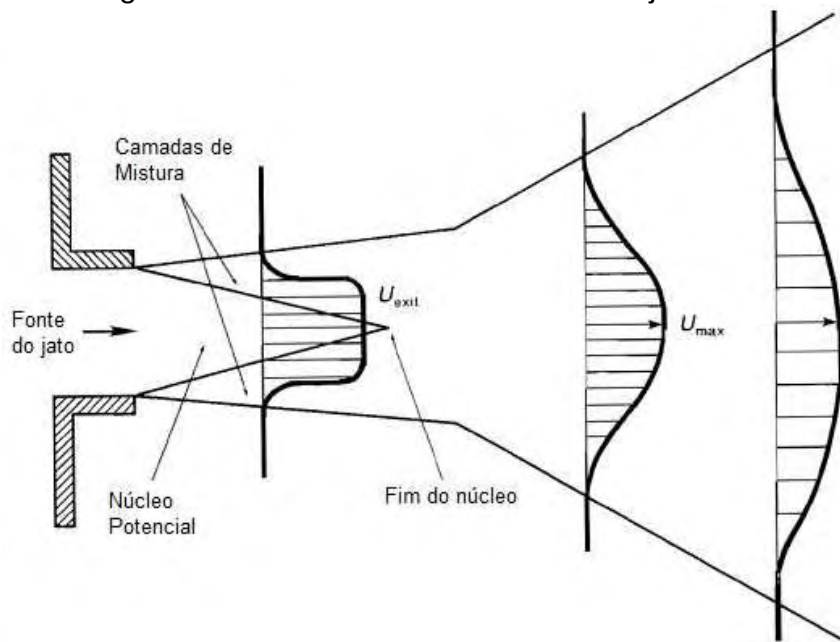
Figura 63 – Rotâmetro.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Um perfil de velocidade de um jato livre em meio quiescente é mostrado na Fig. 64. O núcleo potencial, indicado na figura, desaparece rapidamente, a uma distância de cerca de um diâmetro da saída. Para os experimentos de calibração realizados, a sonda foi posicionada próxima à saída do jato, com uma distância significativamente menor que o diâmetro da tubulação. Portanto, assumiu-se que o perfil de velocidade do jato na região onde estava posicionada a sonda era um perfil retangular, semelhante ao ilustrado na Fig. 64. Assim, a velocidade do fluido pode ser calculada dividindo-se a vazão volumétrica, indicada pelo rotâmetro, pela área da seção de saída do jato livre, que corresponde a $506,71 \text{ mm}^2$.

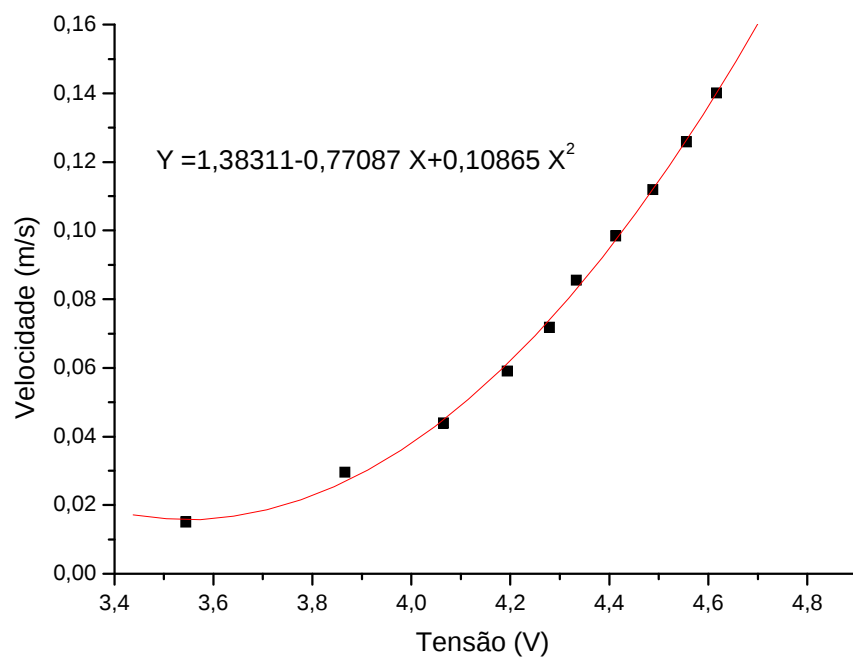
Figura 64 – Perfil de velocidade de um jato livre.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A curva de calibração com os dados de saída da sonda (tensão) e as correspondentes velocidades é mostrada na Fig. 65. Com a equação apresentada no gráfico pode-se calcular os valores de velocidade do escoamento a partir dos sinais de tensão adquiridos pela sonda.

Figura 65 – Curva de calibração da sonda de filme quente.

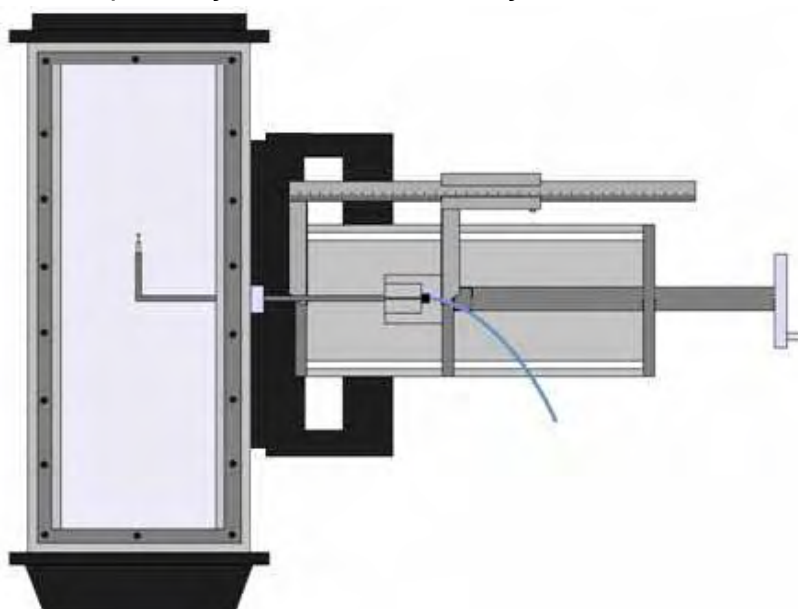


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A.2 Perfil de velocidade e intensidade turbulenta

Após a calibração, a sonda foi instalada na seção de testes do túnel hidrodinâmico acoplada a um suporte em “L” que, por sua vez, foi fixado em um posicionador. Este dispositivo, de operação manual, foi construído no próprio laboratório e possui um paquímetro de 250 mm para efetuar a medição da posição da sonda de filme quente no interior da seção de testes. O conjunto de equipamentos está representado na Fig. 66.

Figura 66 – Sonda “L” e posicionador utilizados para aquisição de dados sem a presença de modelos na seção de testes.

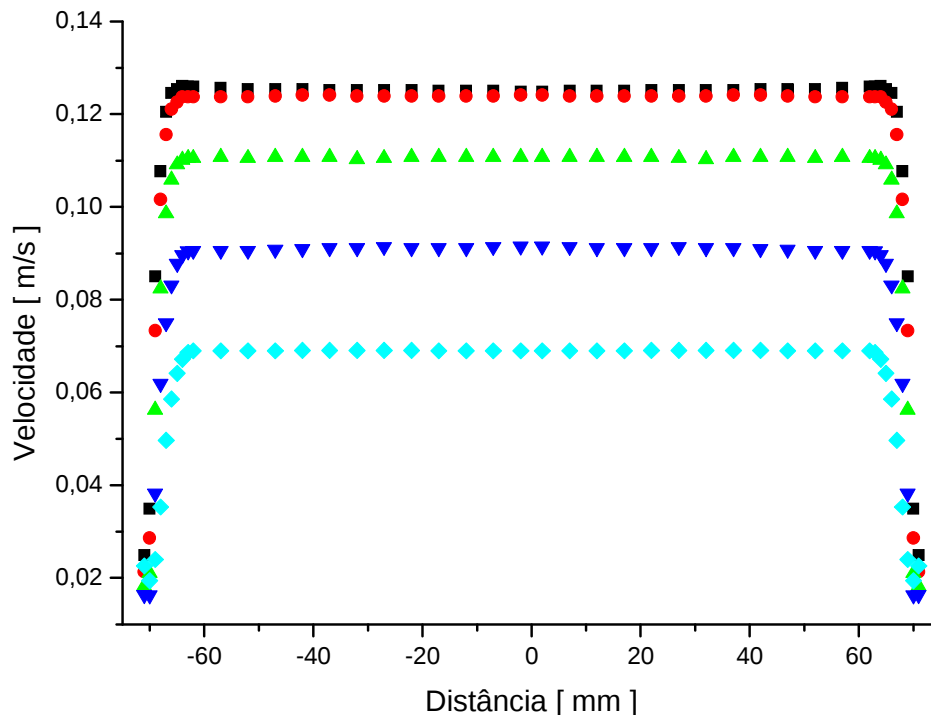


Fonte: Dados da pesquisa do autor.

As medições anemométricas foram realizadas variando-se a posição da sonda ao longo do eixo horizontal da seção de testes, desde uma janela lateral até a outra. A variação da posição da sonda para os pontos próximos às janelas laterais foi de 1 mm enquanto que, para as demais posições, essa variação foi de 5 mm.

Após a conversão dos dados de tensão para velocidade, através da equação de calibração, foi possível construir o perfil de velocidade da seção de testes do túnel hidrodinâmico para diferentes velocidades médias, como pode ser observado na Fig. 67.

Figura 67 – Perfil de velocidade do túnel hidrodinâmico para diferentes velocidades médias.



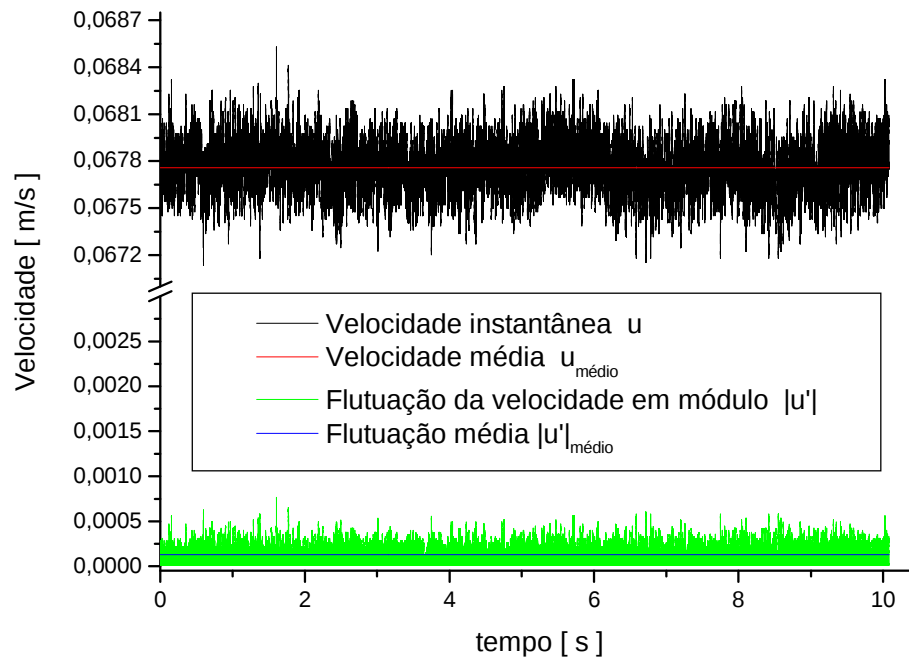
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Através dos dados mostrados na Fig. 67 é possível concluir que o túnel hidrodinâmico utilizado nos ensaios é uma importante ferramenta na investigação e estudo dos fenômenos que envolvem escoamento de fluidos. Isso se deve ao fato de o perfil de velocidade desenvolvido ser quadrado e apresentar uma camada limite com poucos milímetros de espessura, o que proporciona o estudo do escoamento em torno das mais variadas geometrias com grande confiabilidade de resultados.

Os dados adquiridos para o cálculo da intensidade turbulenta foram coletados com o túnel operando em regime contínuo e com a sonda posicionada no centro da seção de testes. A intensidade turbulenta pode ser definida como sendo a razão entre energias cinéticas das flutuações com as do campo médio.

O gráfico da Fig. 68 representa a velocidade instantânea da corrente livre não perturbada com sua respectiva média temporal. Adicionalmente, na parte inferior do gráfico, o módulo das flutuações de velocidade e sua média são também apresentados.

Figura 68 – Medições de velocidade no centro da seção de testes.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

A intensidade turbulenta I do túnel hidrodinâmico, dada em porcentagem, pode ser calculada pela Eq. (3):

$$I = \frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{u}} \times 100 \quad (3)$$

onde u' é a flutuação da velocidade instantânea e $\bar{u}$ é a velocidade média do escoamento no centro da seção de testes. Com os dados obtidos através da anemometria de filme quente, a intensidade turbulenta calculada foi menor que 0,24%, ou seja, o túnel apresenta pequenas flutuações de velocidade viabilizando o estudo de escoamentos turbulentos.

APÊNDICE B - ANÁLISE DE INCERTEZA EXPERIMENTAL

Em um experimento para a medição de fenômenos físicos existe o sistema que realizará a medida e o operador que realizará a leitura da grandeza física, na interação entre o meio e o sistema de medição pode ocorrer modificação de propriedades ocasionando uma interferência que será sentida pelo operador.

A diferença entre o valor real e o valor medido é chamada de erro de medição. Porém, dificilmente se conhece o valor real, a não ser quando se está calibrando um instrumento ou quando se está comparando dados já encontrados. Portanto, é difícil encontrar o erro, o que se encontra é o que pode ser o erro. Assim, nasce a definição de incerteza experimental, que é mais adequada em experimentos, pois ela considera, segundo Moffat (1998), o possível valor do erro na medida. Em outras palavras, pode-se dizer que seria o intervalo dentro do qual se espera que o valor real esteja.

A idéia de valor exato é geralmente muito abstrato já que ele dificilmente será alcançado. Em experimentos em engenharia o que ocorre com frequência então é um valor (melhor estimativa) acompanhado da incerteza.

Experimentos em mecânica dos fluidos e em transferência de calor são tratados como amostragem simples pelo fato dos dados serem obtidos por uma única medição ou o processo de medição ser repetida algumas poucas vezes. O tratamento para amostragem simples pode ser encontrada no trabalho de Moffat (1988) e será a referência deste estudo.

B.1 Análise de incerteza para amostragem simples

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

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

$$X_i = X_i(\text{medido}) \pm \delta X_i \quad (4)$$

onde δX_i (medido) representa a leitura realizada e δX_i representa 2σ , sendo σ o desvio padrão da população de possíveis medidas das quais a única amostra X_i foi tirada.

Esta representação deve ser interpretada no seguinte sentido:

A melhor estimativa de X_i é δX_i (medido);

Existe uma incerteza em X_i que pode ser tão grande quanto $\pm \delta X_i$;

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

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

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

$$R = R(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N) \quad (5)$$

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

$$\delta R_{X_i} = \frac{\partial R}{\partial X_i} \delta X_i \quad (6)$$

A derivada parcial de R em relação à X_i é conhecida como coeficiente de sensibilidade do resultado R em relação à variável X_i . Quando diversas variáveis independentes são utilizadas no cálculo do resultado, os termos individuais são

combinados formando a equação básica da análise das incertezas, representada por:

$$\delta R = \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial R}{\partial X_i} \delta X_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

Cada termo representa a contribuição feita pela incerteza de uma variável (δX_i) para a incerteza global do resultado (δR). Todos os termos possuem a mesma forma: a derivada parcial de R em relação à X_i , multiplicada pela incerteza desta variável. A Equação (7) é válida quando as seguintes condições são observadas:

Cada uma das medições é independente das demais;

A incerteza de cada variável é expressa com a mesma probabilidade;

Se fossem realizadas repetidas medições de cada variável, sua dispersão apresentaria dispersão Gaussiana.

Na maioria das situações, a incerteza global de um resultado é dominada por apenas alguns de seus termos. Os termos da Eq. (7) que são menores do que o maior termo por um fator de 3 ou mais, geralmente, podem ser ignorados.

Em muitas aplicações, deseja-se que a incerteza de um resultado seja expressa como uma fração deste. Quando a expressão do resultado pode ser escrita na forma de um produto, tal como a Eq. (8), a incerteza relativa pode ser encontrada diretamente. Isto é, se:

$$R = X_1^a X_2^b X_3^c \dots X_N^m \quad (8)$$

então,

$$\frac{\delta R}{R} = \left[\left(a \frac{\delta X_1}{X_1} \right)^2 + \left(b \frac{\delta X_2}{X_2} \right)^2 + \dots + \left(m \frac{\delta X_N}{X_N} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

Esta é a forma natural e conveniente de calcular a incerteza relativa do resultado, quando se conhece a incerteza relativa das variáveis envolvidas. Neste caso, os expoentes de X_i são os coeficientes de sensibilidade dos termos da Equação (9).

B.2 Análise de incerteza das variáveis de interesse

B.2.1 Comprimento

As dimensões da seção de testes foram medidas com o auxílio de um paquímetro *Mitutoyo* 0,01 – 150mm. A incerteza associada às medições realizadas por meio deste instrumento é de $\delta X = 0,05$ mm.

B.2.2 Temperatura

A temperatura da água é um parâmetro que exerce uma grande influência sobre as suas propriedades, tais como a viscosidade e a densidade. A temperatura foi medida com o auxílio de um termômetro digital Minipa, modelo MT-401A. Esse termômetro utiliza como elemento sensor um termopar do tipo K, e mede temperaturas na faixa de -50°C a 750°C , com incerteza de 0,75% do valor da leitura + 1°C .

B.2.3 Área

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

$$A = B \cdot C \quad (10)$$

onde B é a largura e C é o comprimento da seção de testes, cujo ambos os valores são 0,146m. A incerteza associada ao cálculo da área pode ser estimada por:

$$\frac{\delta A}{A} = \left[\left(\frac{\delta B}{B} \right)^2 + \left(\frac{\delta C}{C} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

portanto a incerteza relativa da área da seção de testes é de 0,05%.

B.2.4 Viscosidade Cinemática

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

$$\nu(T) = \frac{\mu(T)}{\rho(T)} \quad (12)$$

Na literatura existem diversas correlações bem estabelecidas para a viscosidade absoluta e a densidade da água em função da temperatura. Para o cálculo da viscosidade cinemática da água, foram utilizadas as correlações listadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Correlações para o cálculo da viscosidade cinemática da água.

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

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

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

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = \left[\left(\frac{\delta\mu}{\mu} \right)^2 + \left(-\frac{\delta\rho}{\rho} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

Para faixas de temperatura na qual foram realizados os ensaios, entre 20 e 30 °C, a incerteza relativa da viscosidade cinemática da água é de $\pm 0,3\%$.

B.2.5. Frequência

A frequência de emissão dos vórtices, ou frequência de Strouhal, foi determinada aplicando-se a transformada discreta de Fourier ao sinal temporal da velocidade, adquirido num determinado ponto do escoamento. A incerteza na determinação da frequência de Strouhal pode ser estimada com base no valor da resolução da frequência, como exposto por Carvalho (2003):

$$\delta f = \frac{F}{N} \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad (14)$$

sendo que F é a frequência de amostragem e N é a quantidade de amostras do sinal adquirido. Nos ensaios de anemometria conduzidos para a determinação da frequência de emissão dos vórtices, o sinal de velocidade foi adquirido num bloco com 131072 pontos, a uma taxa de 6,6 kHz. Assim, sua incerteza pode ser estimada como $\delta f = 0,05 \text{ s}^{-1}$.

B.2.6. Vazão

A vazão do escoamento no canal hidrodinâmico é medida com o auxílio de um medidor de vazão eletromagnético *Yokogawa*, modelo AXF100G. Segundo a especificação do fabricante, este instrumento possui uma incerteza na medição de vazão de 0,35%.

B.2.7. Velocidade

A velocidade da corrente livre no interior da seção de testes é calculada com base na leitura de vazão do medidor de vazão eletromagnético, assumindo um perfil de velocidade uniforme. Assim,

$$V_{\infty} = \frac{Q}{A} \quad (15)$$

onde Q é a vazão volumétrica indicada pelo medidor de vazão e A é a área transversal da seção de testes. A incerteza associada ao cálculo da velocidade da corrente livre é estimada por Carvalho (2003)

$$\frac{\delta V_{\infty}}{V_{\infty}} = \left[\left(\frac{\delta Q}{Q} \right)^2 + \left(-\frac{\delta A}{A} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

A Tabela 3 apresenta valores típicos das incertezas das velocidades da corrente livre para diferentes vazões.

Tabela 3 - Valores típicos da incerteza da velocidade da corrente livre.

Re	Q (m ³ /h)	V _∞ (m/s)	δV _∞ /V _∞
110	0,77	0,01	11,7%
1009	6,91	0,10	1,3%
2498	17,11	0,26	0,5%

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

B.2.8. Número de Reynolds

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

$$Re = \frac{V_{\infty} \cdot D}{\nu} \quad (17)$$

onde D é a altura da protuberância, cujo o valor é 8 mm.

A incerteza do número de Reynolds pode ser calculada como:

$$\frac{\delta Re}{Re} = \left[\left(\frac{\delta V_{\infty}}{V_{\infty}} \right)^2 + \left(\frac{\delta h}{h} \right)^2 + \left(-\frac{\delta \nu}{\nu} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

A Tabela 4 apresenta valores das incertezas dos números de Reynolds para diferentes valores de velocidades.

Tabela 4 – Valores típicos da incerteza do número de Reynolds.

$V_{\infty}(\text{m/s})$	Re	$\delta\text{Re}/\text{Re}$
0,01	110	11,9%
0,10	1009	2,8%
0,26	2498	2,5%

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

B.2.9 Número de Strouhal

O número de Strouhal representa a frequência adimensional de emissão de vórtices no escoamento e pode ser escrito como

$$St = \frac{f \cdot D}{V_{\infty}} \quad (19)$$

Na qual f é a frequência de emissão de vórtices, D é o comprimento característico e V é a velocidade da corrente livre. A incerteza associada ao cálculo do número de Strouhal pode então ser estimada por:

$$\delta St = \left[\left(\frac{B}{V_{\infty}} \delta f \right)^2 + \left(\frac{f}{V_{\infty}} \delta D \right)^2 + \left(\frac{-fB}{V_{\infty}^2} \delta V_{\infty} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

Para o mesmo caso apresentado anteriormente, exceto para $\text{Re} = 110$ onde não há a emissão de vórtices, são apresentados valores típicos da incerteza do número de Strouhal, resumidos da Tabela 5.

Tabela 5 – Valores típicos da incerteza do número de Strouhal.

Re	St	$\delta\text{St}/\text{St}$
1 009	0,29	1,96%
2 498	0,26	1%

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

