AMANARA POTYKYTĀ DE SOUSA DIAS VIEIRA

Estudo de estrutura turbulenta gerada por tanque de grade oscilante observada por PIV

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências (Hidráulica e Saneamento).

ORIENTADOR: Prof. Dr. Woodrow Nelson Lopes Roma
VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos, SP
2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE
TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRONICO, PARA
FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Atendimento ao Usuário do Serviço de Biblioteca - EESC/USP

Vieira, Amanara Potykytã de Sousa Dias.

V658e Estudo de estrutura turbulenta gerada por tanque de
grade oscilante observada por PIV. / Amanara Potykytã de
Sousa Dias Vieira; orientador Woodrow Nelson Lopes Roma.
São Carlos, 2012.

Dissertação - Mestrado (Programa de Pós-Graduação e
Área de Concentração em Engenharia Hidráulica e
Saneamento)- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2012.

1 - Turbulência isotrópica. 2. Tanque com grade
oscilante. 3. PIV. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **AMANARA POTYKYTĀ DE SOUSA DIAS VIEIRA**.

Título da dissertação: "Estudo da estrutura turbulenta gerada por tanque de grade oscilante observada por PIV".

Data da defesa: 15/06/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Woodrow Nelson Lopes Roma (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Associado **Rodrigo de Melo Porto**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Milton Dall'Aglío Sobrinho**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-campus de Ilha Solteira)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Prof. Titular **Edson Cezar Wendland**

Suplente do Presidente da Comissão de Pós-Graduação em Exercício:

Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

32010243
Serviço de Pós-Graduação
15/06/2012
Assinado

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pela minha vida e pelas oportunidades que tem me dado.

Aos meu pais, Rui Vieira de Souza e Maria Irenilda de Sousa Dias, pelo amor, carinho e por me darem estrutura para seguir meus planos.

Ao meu orientador, Woodrow Nelson Lopes Roma, por compartilhar parte do seu conhecimento comigo durante estes dois anos de mestrado e me orientar neste trabalho.

À indústria ANDRITZ HYDRO INEPAR DO BRASIL S.A. por disponibilizar os equipamentos do sistema PIV durante a realização dos experimentos;

Ao meu amigo, Narumi Abe, por esclarecer várias dúvidas que tive durante a realização deste trabalho.

Ao técnico do Laboratório de Fenômenos de Transporte, Roberto Cezar Bergamo, pelo apoio e manutenção dos instrumentos necessários.

À USP e ao Departamento de Hidráulica e Saneamento pelo acolhimento e infra-estrutura.

À Maria Auxiliadora de C. Altieri Pin e Pavlovna Damião Rocha Bueno pela ajuda e esclarecimentos em assuntos administrativos.

Por fim agradeço à CAPES e ao CNPQ pela concessão de bolsa durante o meu mestrado.

Resumo

Um regime ou fluxo turbulento pode ser definido simplificadaamente como uma forma de escoamento no qual o movimento de um fluido ocorre de forma aparentemente aleatória. A natureza caótica desse tipo de regime não possibilita que o problema seja abordado de modo determinístico, conseqüentemente, não pode ser descrito através de expressões analíticas para descrever seu campo de velocidades. Apesar de ser impossível estudar o movimento de cada partícula, pode-se visualizar o problema de forma macroscópica.

Utilizando-se de simplificações e generalizações pode-se fazer uso de estudos numéricos em uma tentativa de encontrar uma face determinística do fenômeno, como por exemplo, verificação da isotropia e homogeneidade. A turbulência com estas características é um regime em que as componentes da velocidade no espaço e as velocidades em diferentes pontos do escoamento apresentam parâmetros estatísticos semelhantes. Tais condições não existem na prática, mas pode-se construir equipamentos que produzem escoamentos que se aproximam desta condição. Este trabalho consistiu na verificação das condições de turbulência isotrópica e homogênea em um tanque de grade oscilante. Foi utilizado o método de trilhagem de partículas por fotografia estereoscópica, PIV (*particle imaging velocimeter*), para observar e quantificar a turbulência gerada. Observou-se a turbulência gerada por 8 velocidades diferentes de oscilação da grade. Os resultados mostraram que o tanque em estudo aproximou-se de condições homogêneas, porém sua isotropia não pôde ser afirmada.

O tanque com grade oscilante foi eficiente na geração de turbulência, reproduzindo o fenômeno real e colaborando para o seu estudo. Também foi realizado uma análise sobre a eficácia do método de velocimetria com o uso de PIV, que mostrou ser adequado para a observação de campos de velocidades de um escoamento, com limitações quanto à região periférica da área alvo.

Palavras chave: turbulência isotrópica, tanque com grade oscilante e PIV.

Abstract

Turbulence or turbulent flow can be defined in a simplified way as a flow with random movement. The chaotic behavior of this regime does not allow a deterministic approach, therefore, it can not be described by analytical formulas for the velocity field. Although it is impossible to study the movement of each particle, the problem can be studied in a macroscopic way.

Simplifications and generalizations can be used in numerical studies in an attempt to find a deterministic view of the phenomenon, for example, checking the isotropy and homogeneity. The turbulence with these characteristics is a regime in which the components of velocity in space and velocity at different points of the flow have similar statistical parameters. Such conditions do not exist in practice, but equipment can be built in order to produce flow approaching the condition. This work consisted of verifying the conditions of homogeneous isotropic turbulence in a tank with oscillating grid. It was used the method of particle tracking by stereoscopic photography, PIV (particle imaging velocimetry), to observe and quantify the generated turbulence. It was observed turbulence generated by 8 different speeds of oscillation of the grid. The results showed that the tank approached homogeneous conditions, but its isotropy can not be affirmed.

The tank with an oscillating grid was efficient in the generation of turbulence, reproducing a real phenomenon and contributing to its study. Analysis was also conducted on the effectiveness of velocimetry method using PIV, shown to be suitable for observation of a flow velocity field with limitations on the peripheral region of the target area.

Keywords: isotropic turbulence, oscillating grid tank and PIV.

LISTA DE FIGURAS

1	Esboço de imprevisibilidade em experimentos turbulentos	23
2	Verificação das condições de isotropia	24
3	Turbulência homogênea	24
4	Sensor de um anemômetro de fio quente	27
5	Sonda ótica	28
6	Micro ADV	29
7	Exemplo da imagem de partículas inseridas na água	31
8	Campo de vetorização	32
9	Deslocamento de partículas na matriz	36
10	Estrias em imagens	36
11	Erro na associação das imagens da partícula	37
12	Conjunto de polias	43
13	Inversor de frequência	44
14	Sistema gerador de turbulência	44
15	Grade	45
16	Equipamento para geração de oscilações	45
17	Gráfico para controle de dispersão	47
18	Sistema de velocimetria por imagens	49
19	Câmera digital Speed Sense 9020	49
20	Grid para calibração em 3D	50
21	Laser integrante do sistema PIV	50
22	Vetorização do deslocamento das partículas	51
23	Gráfico da homogeneidade com presença de zeros	55
24	Mapa cromático com presença de zeros na periferia	55
25	Mapa cromático com 18,25(a) e 38(b) oscilações da grade por minuto	56
26	Mapa cromático com 57,25(a) e 95,5(b) oscilações da grade por minuto	56
27	Mapa cromático com 118(a) e 135,25(b) oscilações da grade por minuto	56
28	Mapa cromático com 154,25(a) e 175(b) oscilações da grade por minuto	57

29	Homogeneidade com 18,25 e 38 oscilações da grade por minuto	57
30	Homogeneidade com 57,25 e 95,5 oscilações da grade por minuto	57
31	Homogeneidade com 118 e 135,25 oscilações da grade por minuto	58
32	Homogeneidade com 154,25 e 175 oscilações da grade por minuto	58
33	Quantificação da isotropia com 18,25(a) e 38(b) oscilações da grade por minuto	60
34	Quantificação da isotropia com 57,25(a) e 95,5(b) oscilações da grade por minuto	61
35	Quantificação da isotropia com 118(a) e 135,25(b) oscilações da grade por minuto	62
36	Quantificação da isotropia com 154,25(a) e 175(b) oscilações da grade por minuto	63
37	Comparação entre dados experimentais e dois Modelos de decaimento da turbulência	64
38	Decaimento da turbulência com 18,25(a) e 38(b) oscilações da grade por minuto	65
39	Decaimento da turbulência com 57,25(a) e 95,5(b) oscilações da grade por minuto	65
40	Decaimento da turbulência com 118(a) e 135,25(b) oscilações da grade por minuto	66
41	Decaimento da turbulência com 154,25(a) e 175(b) oscilações da grade por minuto	66

LISTA DE TABELAS

1	Número de Reynolds para diferentes regimes de escoamento interno a dutos. Adaptado de (PORTO, 2006)	19
2	Tanques com grade oscilante encontrados na literatura	40
3	Homogeneidade	59
4	Isotropia	63

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	Taxa de dissipação de energia
μ	Média comum dos valores
ν	Viscosidade cinemática
ρ	Massa específica do fluido
σ	Desvio padrão
C	Constante relativa à geometria da grade
F_i	Componente instantânea das forças de campo
f	Frequência da oscilação da grade(Hz)
g	Aceleração gravitacional (m/s^2)
i	Posição(linha) em uma matriz
j	Posição(coluna) em uma matriz
k	Coeficiente de reaeração
M	<i>Mesh</i>
n	Quantidade de elementos
p	Pressão estática instantânea (Pa)
Re	Número de Reynolds
RMS_u	Raiz quadrada da média quadrática da componente da velocidade turbulenta no eixo x
RMS_v	Raiz quadrada da média quadrática da componente da velocidade turbulenta no eixo y
RMS_w	Raiz quadrada da média quadrática da componente da velocidade turbulenta no eixo z
S	Amplitude da oscilação da grade (cm)
t	Instante do tempo
$\bar{u}$	Média dos valores
u	Componente da velocidade no eixo x
v	Componente da velocidade no eixo y
w	Componente da velocidade no eixo z
V_{RMS}	Raiz quadrada da média quadrática da flutuação turbulenta
$\bar{V}$	Velocidade média
$\vec{V}$	Velocidade turbulenta
V'	Flutuação da velocidade
x	Eixo no espaço
y	Eixo no espaço
z	Eixo no espaço e expoente nos Modelos de decaimento
z	Distância do ponto de medição da velocidade ao centro de oscilação da grade (cm)
$\nabla \cdot \vec{V}$	Tensões de Reynolds (tensões viscosas)

$\mathbb{R}$	Números reais
$\mathbb{N}$	Números naturais
$\forall$	Para todo
∂	Derivada parcial
$k - \varepsilon$	Modelo de turbulência

LISTA DE SIGLAS

ADV	<i>Acoustic Doppler velocimeter</i>
CCD	Dispositivo de carga acoplada (<i>Charge-coupled device</i>)
DPIV	Velocimetria por imagens digitais de partículas (<i>Digital particle image velocimeter</i>)
LDA	Anemometria por laser Doppler (<i>Laser Doppler anemometry</i>)
LDV	Velocimetria por laser Doppler (<i>Laser Doppler velocimetry</i>)
PIV	Velocimetria por imagem de partículas (<i>Particle image velocimeter</i>)
RMS	Valor quadrático médio (<i>Root mean square</i>)
RPM	Rotações por minuto
OPM	Oscilações por minuto

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	8
1 Introdução	15
2 Objetivos	17
2.1 Objetivos Gerais	17
2.2 Objetivos Específicos	17
3 Turbulência	19
3.1 Conceito	19
3.2 Características da Turbulência	21
3.3 Problema de fechamento da turbulência	25
3.4 Métodos para medida de turbulência	27
3.4.1 Anemometria a fio ou filme quente	27
3.4.2 Sonda Ótica	28
3.4.3 MicroADV	28
3.4.4 PIV	29
3.5 Medida de turbulência na superfície	30
3.6 Velocimetria por imagens de partículas (PIV)	30
3.7 Geração de turbulência isotrópica e homogênea	38
4 Materiais e métodos	43
4.1 Geração de turbulência	43
4.2 Tratamento estatístico	45
4.3 Velocimetria	48
4.4 Análise de dados	51
5 Resultados e discussões	54
5.1 Homogeneidade	54
5.2 Isotropia	60
5.3 Decaimento da turbulência	64

6	Conclusões	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
	Anexo A - Matlab script para verificação da isotropia	75
	Anexo B - Matlab script para verificação da homogeneidade	79
	Anexo C - Matlab script para comparar modelos de decaimentos de turbulencia	81
	Anexo D - Matlab script para gerar mapas cromáticos	84

1 Introdução

A compreensão dos fenômenos que rodeiam o ser humano aguça sua curiosidade e é necessária à sua sobrevivência. Por exemplo, a compreensão das estações do ano foi usada para conhecer a época de migração dos animais e consequentemente a temporada de caça. O advento da agricultura só foi possível conhecendo o período chuvoso.

A necessidade de informação permanece nos dias atuais com importância intensificada. Se a previsão do tempo foi importante para a colheita de uma pequena civilização no passado, hoje em dia ela influencia a produção de alimentos em escala global. Controladores de comportas em represas também precisam de dados precisos sobre a meteorologia, populações ribeirinhas podem ser avisadas em casos de catástrofes e até mesmo a bolsa de valores sofre variações com o clima.

O conhecimento sobre o escoamento de fluídos na forma turbulenta é fundamental para o entendimento de fenômenos físicos que são de interesse do homem. Este conhecimento pode ser usado na elaboração de modelos climáticos para previsão de ventos e furacões, para o projeto de aeronaves, para estudos que envolvam troca gasosa entre meios, para elaboração de modelos de circulação de sangue, para o entendimento do transporte de sedimentos etc. Em nível astronômico, a turbulência é a causa do campo magnético da Terra e responsável pelas explosões solares.

A transferência gasosa na interface ar-água interfere em operações como oxidação, hidrogenação e fermentação biológica, fenômenos ligados a indústrias e atividades relacionadas à engenharia química.

Na área ambiental e sanitária um dos interesses pelo regime turbulento existe por causa da sua importância no fenômeno de reaeração física da água. O nível de oxigênio na água representa a capacidade de um corpo hídrico assimilar uma carga orgânica. A reposição natural de oxigênio na água pode ocorrer com a produção fotossintética de oxigênio pelas algas ou de

forma física. A reaeração física depende da concentração de oxigênio nos dois meios (ar e água) e da turbulência na superfície da água.

Apesar da importância e abrangência do assunto, a turbulência ainda não é um fenômeno compreendido completamente. Isso se deve principalmente à sua natureza caótica, fazendo com que a previsão do seu comportamento esteja longe de ser trivial. Há mais de um século, estudiosos visam classificar, encontrar padrões e determinar leis para o regime turbulento.

Com o passar dos anos, o problema foi abordado por diversas frentes de estudo. Novas técnicas de instrumentação permitiram que se passasse da observação visual com uso de corantes, a medições usando sensores, até o desenvolvimento da velocimetria com lasers e câmeras de alta velocidade. Observações que outrora eram feitas em córregos e canais de concreto podem ser feitas, hoje em dia, em caixas de acrílico transparentes, permitindo a condução da pesquisa em ambiente controlado e quase livre de interferências. Outro aspecto importante foi a melhoria na velocidade de processamento e armazenamento dos computadores, facilitando a obtenção de respostas de simulação e de cálculos numéricos.

Naturalmente, o aprimoramento da tecnologia e a obtenção de dados de maior qualidade levaram à tentativas de caracterizar e até mesmo equacionar o regime turbulento. Experimentos foram feitos visando observar não só as regiões de turbulência, mas também das zonas de decaimento. Valores empíricos como o número de Reynolds e outras características como isotropia e homogeneidade também são observadas para descrever melhor o fenômeno.

O estudo do regime turbulento é um tema que está longe de ser esgotado. Tendo em vista as recentes contribuições existentes na parametrização e equacionamento da turbulência, além dos avanços nas tecnologias de instrumentação, torna-se evidente a necessidade de validação desses estudos por pesquisadores independentes.

Neste trabalho serão observadas as características turbulentas experimentalmente, visando uma melhor compreensão do fenômeno turbulência.

2 Objetivos

2.1 Objetivos Gerais

- Observar características da turbulência gerada por um tanque com grade oscilante verificando a existência de isotropia e homogeneidade;
- Comparar o decaimento da turbulência observado no tanque utilizado com alguns modelos de decaimento existentes na literatura.

2.2 Objetivos Específicos

- Levantar as técnicas de velocimetria mais utilizadas para fins de medição de turbulência;
- Estudar os conceitos inerentes ao funcionamento e operação do PIV.

3 Turbulência

Este capítulo traz uma revisão histórica sobre os estudos relevantes para o desenvolvimento do trabalho. Adiante será explicado o conceito de turbulência, suas características, formas mais utilizadas para a geração de turbulência e meios para medir o fenômeno. A seção PIV traz uma revisão sobre a velocimetria por imagens.

3.1 Conceito

Um escoamento pode ser classificado como turbulento ou laminar de acordo com sua estrutura interna. O primeiro a estudar quantitativamente a estrutura interna dos escoamentos foi Osborne Reynolds, em 1883. O início deste estudo deu-se através da experiência conhecida como experiência de Reynolds, que consiste na injeção de um corante líquido na posição central de um escoamento de água interno a um tubo circular de vidro transparente (ROMA, 2006). De acordo com o comportamento observado, o escoamento foi classificado em laminar, de transição e turbulento (Tabela 1).

Tabela 1: Número de Reynolds para diferentes regimes de escoamento interno a dutos. Adaptado de (PORTO, 2006)

Tipo de regime	Número de Reynolds
Laminar	$Re < 2000$
Transitório	$2000 < Re < 4000$
Turbulento	$Re > 4000$

No estudo de Reynolds, o escoamento comportou-se como se o fluxo ocorresse em lâminas no regime laminar, pois o corante líquido permaneceu na posição central do escoamento sem misturar-se (visualmente). No regime turbulento houve a mistura do corante ao fluido. Reynolds percebeu que para escoamentos em dutos cilíndricos há um valor resultante da relação entre velocidade média do escoamento, diâmetro do duto e viscosidade cinemática que representa a transição entre regime laminar e turbulento do escoamento, este valor é denominado

número de Reynolds crítico. Examinando o escoamento sob a luz de uma descarga elétrica, ele observou a existência de turbilhões.

O número de Reynolds é uma relação entre forças de inércia e de atrito. Havendo prevalência das forças de inércia, ocorre amplificação das perturbações existentes no escoamento, provocando novas perturbações que são novamente amplificadas (ROMA, 2006).

Rodi (1980) descreve a turbulência como sendo um movimento altamente aleatório do fluido, não permanente e tridimensional. Markatos (1986) adiciona à descrição anterior a não-linearidade e qualifica o movimento como rotacional, intermitente, desordenado, difuso e dissipativo.

Feghali (1974) diz que o predomínio das forças de inércia sobre as de viscosidade rompe a estabilidade do escoamento, dando lugar a um regime complexo de movimento, no qual as grandezas físicas em todos os pontos da massa fluida variam a cada instante. Este fenômeno, denominado turbulência, acarreta uma mistura contínua de matéria, como foi demonstrado pela difusão do corante na experiência de Reynolds.

De acordo com Porto (2006), o escoamento laminar, pela própria natureza física do processo de transferência individual de moléculas entre lâminas adjacentes ao escoamento, permite um tratamento analítico da tensão de cisalhamento e, conseqüentemente, do fator de atrito, com comprovação experimental. No escoamento turbulento, agrupamentos de moléculas animadas com velocidade de perturbação se transportam, de forma caótica, para camadas adjacentes do fluido, produzindo forças tangenciais de muito maior intensidade.

Segundo Giorgetti (2008), em um regime turbulento o movimento de cada partícula não é regular e previsível mesmo quando as partículas movimentam-se em média para uma mesma direção. Em um escoamento laminar, a tensão superficial consegue conter as perturbações internas. Giorgetti (2008) cita a teoria das pequenas perturbações de Tollmien e Schlichting, dizendo que abaixo do número de Reynolds crítico o escoamento é estável quanto às perturbações, isto é, as forças viscosas são maiores do que as forças de inércia associadas às perturbações. Entretanto, acima do número de Reynolds crítico, o escoamento é instável e as perturbações eventuais são prontamente amplificadas e difundidas.

Hinze (1959) observou a aleatoriedade da turbulência, mas ao mesmo tempo a possibilidade de descrever algumas de suas variáveis de forma estatística, por isso definiu o movimento turbulento de um fluido como a condição irregular do escoamento no qual várias quantidades apresentam variação aleatória em tempo e espaço, mas das quais valores médios podem ser obtidos estatisticamente.

Para Lesieur (1997) a definição anterior era imprecisa, então ele definiu que a turbulência deveria preencher três requisitos:

- Necessita ser imprevisível, no sentido que uma pequena incerteza em um tempo inicial é de tal forma ampliada que impossibilita uma previsão determinística precisa de sua evolução;
- Tem que satisfazer a propriedade de crescente mistura, isto é, a turbulência tem de ser capaz de misturar quantidades transportadas muito mais rapidamente do que se somente a difusão molecular estivesse atuando;
- Precisa envolver uma ampla escala de comprimentos de ondas espaciais.

3.2 Características da Turbulência

Algumas características da turbulência são irregularidade, alta difusibilidade, número de Reynolds elevado, tridimensionalidade, dissipatividade, continuidade e imprevisibilidade. Estas características estão presentes em qualquer escoamento turbulento. Cada uma destas características será descrita a seguir.

- **Irregularidade:** É difícil descrever o comportamento turbulento, por isso muitos consideram o regime turbulento completamente aleatório, sendo assim irregular. Porém é possível descrever estruturas coerentes da turbulência com ferramentas estatísticas, neste ponto a turbulência mostra sua face determinística;
- **Difusibilidade:** O processo de mistura é muito maior no regime turbulento do que no laminar. Isto ocorre devido aos grandes gradientes de concentração e flutuações térmicas

existentes no regime turbulento, o que impulsiona o processo de difusão molecular. Os gradientes são altos por causa do transporte de grande quantidade de fluido para diferentes regiões do escoamento, o que ocasiona taxas crescentes de transferência de movimento, massa e calor;

- **Elevado número de Reynolds:** Número de Reynolds elevado significa que as forças de inércia prevaleceram sobre as forças viscosas de um fluido em um escoamento. As forças viscosas fazem o escoamento permanecer com suas moléculas unidas e com uma direção e sentido predominante, enquanto as forças de inércia amplificam perturbações iniciais;
- **Tridimensionalidade:** No regime turbulento as partículas fluidas rotacionam, o que é chamado de vorticidade. Segundo Neto (2004), a vorticidade é gerada através do processo de estiramento de vórtices (escoamento giratório com linhas de corrente em padrão espiral ou circular), um mecanismo tridimensional;
- **Dissipatividade:** Toda energia injetada em um escoamento em regime turbulento tende a decair em turbilhões menores. Sendo assim, um regime turbulento só se mantém se for inserida energia continuamente no sistema. Ondas existentes em um escoamento que não dissipam não são consideradas turbulentas;
- **Continuidade:** As menores escalas de turbulência são muitíssimo maiores que a escala molecular, podendo-se adotar a hipótese do contínuo em sua descrição (JANZEN, 2003);
- **Imprediscibilidade:** Um fenômeno é dito impredicível quando o homem é incapaz de reproduzi-lo da mesma forma. A turbulência amplifica pequenas perturbações, então mesmo quando se tenta reproduzir em laboratório um dado experimento controlando condições iniciais, qualquer mínima alteração é amplificada, gerando resultados diferentes (Figura 1).

Apesar da irregularidade e aleatoriedade associadas ao fenômeno turbulento, é possível encontrar padrões através da estatística. Algumas considerações que facilitam o estudo do fenômeno podem ser feitas dando características especiais a regimes turbulentos.

Figura 1: Esboço de imprevisibilidade em experimentos turbulentos

- **Isotropia:** Isotropia é o nome dado a uma situação em que estatisticamente não há variação do escoamento com a rotação, ou seja, as componentes tridimensionais das variáveis são iguais. Barra (2002) comenta que por ser a classe mais simples de turbulência, onde é necessário o menor número de parâmetros e relações, a turbulência isotrópica tem sido largamente estudada para melhor entendimento de suas características e de sua relação com processos de mistura de fluidos, mistura entre fluidos e sólidos, dispersão em meio turbulento e trocas gasosas entre ar e água (Figura 2);
- **Homogeneidade:** Homogeneidade é o nome dado a uma situação em que as características do regime turbulento não variam havendo uma translação, ou seja, se forem observados vários pontos em uma seção do escoamento, todos estes pontos terão características semelhantes (Figura 3).

É importante lembrar que na prática não é possível gerar um escoamento totalmente homogêneo e isotrópico.

Barra (2002) diz que a existência de características comuns a todos os escoamentos turbulentos permite que a compreensão da turbulência isotrópica e homogênea esclareça questões referentes às formas mais complexas de turbulência.

Figura 2: Verificação das condições de isotropia

Figura 3: Turbulência homogênea

3.3 Problema de fechamento da turbulência

Para descrever o escoamento de um fluido utilizam-se equações obtidas a partir das leis da conservação de massa e da quantidade de movimento. Para escoamentos em geral é possível chegar à Equação da Continuidade (Equação 1) a partir da lei da conservação da massa e à Equação de Navier-Stokes a partir da conservação da quantidade de movimento. Estas equações utilizam valores instantâneos.

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1)$$

Sendo,

u : Componente da velocidade no eixo x ;

v : Componente da velocidade no eixo y ;

w : Componentes da velocidade no eixo z ;

x : Eixo no espaço;

y : Eixo no espaço;

z : Eixo no espaço.

Em uma descrição analítica de um escoamento turbulento é necessário substituir os valores instantâneos por valores médios mais a sua flutuação, o que gera equações mais complexas. Porém o escoamento médio se comporta da mesma maneira que o escoamento laminar. Sendo assim, seria necessário a inserção de forças adicionais que considerariam os efeitos da turbulência, estas forças são chamadas de forças aparentes. Reynolds propôs aproximações conhecidas como tensões de Reynolds ou aparentes, que estão associadas a estas forças (Equação 2).

$$\begin{aligned}
(df_x)_{ap} &= \frac{\partial(\sigma_{xx})_{ap}}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{xy})_{ap}}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{xz})_{ap}}{\partial z} \\
(df_y)_{ap} &= \frac{\partial(\tau_{yx})_{ap}}{\partial x} + \frac{\partial(\sigma_{yy})_{ap}}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{yz})_{ap}}{\partial z} \\
(df_z)_{ap} &= \frac{\partial(\tau_{zx})_{ap}}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{zy})_{ap}}{\partial y} + \frac{\partial(\sigma_{zz})_{ap}}{\partial z}
\end{aligned} \tag{2}$$

Reynolds inseriu as tensões aparentes na Equação de Navier-Stokes (Equação 3).

$$\begin{aligned}
\rho \frac{du}{dt} &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \\
\rho \frac{dv}{dt} &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \\
\rho \frac{dw}{dt} &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right]
\end{aligned} \tag{3}$$

Sendo,

ρ : Massa específica do fluido;

g : Aceleração gravitacional;

p : pressão estática;

ν : viscosidade cinemática;

$\nabla \cdot \vec{V}$: Tensões de Reynolds (tensões viscosas).

As tensões de Reynolds, ou produto de flutuações de velocidade em diferentes direções, representam o transporte de quantidade de movimento em um escoamento turbulento. Porém a solução destas tensões conduzem a cálculos mais complexos que geram mais incógnitas do que equações, não sendo possível ainda fechar o equacionamento do movimento turbulento.

3.4 Métodos para medida de turbulência

Alguns métodos de velocimetria podem ser utilizados para observação de turbulência com o intuito de compreender o aspecto quantitativo do seu comportamento. Segundo Boillot e Prasad (1996), algumas das primeiras medidas de velocidade foram feitas com o tubo de Pitot. Em 1920 houve a introdução de anemômetros a fio quente. Tanto a velocimetria utilizando tubo de Pitot quanto a anemometria de fio quente são métodos intrusivos, pois ambos os métodos exigem a inserção de uma sonda no fluxo, o que ocasiona interferências. As medições utilizando estas técnicas são pontuais. Em 1984 foi inventado o PIV, um método de velocimetria menos intrusivo e que consegue obter informações de vários pontos simultaneamente.

3.4.1 Anemometria a fio ou filme quente

Segundo Almeida (2006), o anemômetro é um instrumento utilizado para medir velocidade de fluidos. Um fio ou filme aquecido eletricamente é o sensor da informação desejada (Figura 4). O fio/filme troca calor com o fluido em que está inserido, alterando sua resistência elétrica. A troca de calor depende da temperatura e velocidade do fluido. O calor perdido pelo fio/filme é medido e está relacionado à velocidade do escoamento, possibilitando o cálculo da velocidade. O ideal para o funcionamento do anemômetro seria um fio tão longo e fino que sua presença não afetasse os dados desejados.

Figura 4: Sensor de um anemômetro de fio quente

3.4.2 Sonda Ótica

A sonda ótica foi proposta por Roma (1988). Segundo Pereira (2002), o funcionamento da sonda baseia-se na refração ótica da luz. A sonda capta a variação da luz causada pelo movimento da interface ar/água e gera um sinal elétrico proporcional a este movimento ou deformação. O sensor ótico consiste em duas partes conectadas, o emissor e o receptor de luz. O emissor de luz é composto por uma lâmpada incandescente e refletor parabólico. O receptor de luz é constituído por um foto transistor submerso na água. O foto transistor gera um sinal elétrico que é digitalizado e coletado por um registrador de dados. A partir deste ponto, os dados podem ser lidos, tratados e analisados.

Figura 5: Sonda ótica

3.4.3 MicroADV

O micro ADV ou ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) é uma sonda ultrasônica que utiliza ondas sonoras para obter as componentes da velocidade em um volume. O volume de controle do instrumento é de $0,1 \text{ cm}^3$ e localiza-se a 5 cm do sensor. O micro ADV pode medir desde velocidades menores que 1 mm/s até velocidades maiores que 2,5 m/s e a aquisição de dados ocorre a frequências de até 50 Hz (Figura 6).

Figura 6: Micro ADV

O micro ADV é composto por um emissor de ultra-som, três receptores (correspondentes às direções x , y e z) e um módulo eletrônico de processamento. O emissor gera um sinal que é refletido pelas partículas presentes no meio líquido para os receptores e utilizado para calcular o sinal *Doppler*. Através deste as componentes da velocidade são calculadas.

Beya et al. (2011) usaram um micro ADV para medir a turbulência gerada por gotas de chuva. As medidas não são feitas na superfície. Existe a limitação da amostra ter de estar a 5 cm do sensor e este ter de estar submerso. Os valores observados foram coletados a uma distância entre 0,031 e 0,151 m da superfície. Para estudos que visam calcular a taxa de transferência de massa seria necessária a medida da turbulência na superfície, que é a camada limite da troca.

3.4.4 PIV

Adrian (2005) cita como peculiaridades da turbulência a abrangência de escalas físicas e sua aleatoriedade, o que dificulta a determinação da direção do fluxo. Uma técnica de medição de turbulência deve ser capaz de medir uma ampla escala de comprimento e velocidade. O PIV é um método de velocimetria que utiliza imagens de partículas capturadas em um intervalo de tempo determinado. Nunes (2005) destaca que a técnica PIV trata-se de uma medição de campo, onde partículas referentes a um volume de interesse terão seu vetor velocidade validado. Deste modo, as grandezas diferenciais em relação às coordenadas espaciais como vorticidade, tensões

normais e tensões cisalhantes e também as grandezas integrais em relação às coordenadas espaciais, como circulação, fluxo de massa por unidade de profundidade, função do tipo potencial e corrente, dentre outras, passaram a ser então possíveis de serem mensuradas. O funcionamento do sistema será melhor explicado adiante.

3.5 Medida de turbulência na superfície

Na literatura, encontram-se trabalhos que visam medir a turbulência próximo à superfície, porém a medida de turbulência diretamente na superfície ainda não é uma realidade devido a limitações nos métodos de medida, que são perturbados pela presença da superfície ou interferem no fenômeno pela presença no meio. Seguindo essa tendência, Kiefhaber et al. (2011) afirmam que medidas de turbulência próximas à superfície livre ainda carecem de instrumental adequado. Eles desenvolveram e construíram um instrumento ótico melhorado para a medição da inclinação e estatísticas de altura de ondas gravitacionais, capilares e curtas, geradas pelo vento no oceano.

Com base na literatura recente sobre a troca de gases na superfície livre entende-se que essa ainda é uma área com dificuldades de avanço, seja devido à introdução de elementos que perturbam o escoamento ou de perturbação nas medidas causadas pela presença das tensões superficiais.

Essa situação, que ainda perdura, já motivara, em 1988, o desenvolvimento de sonda utilizando o fenômeno da refração ótica para quantificar a turbulência na superfície da água, na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), (ROMA, 1988).

3.6 Velocimetria por imagens de partículas (PIV)

Os requisitos básicos para um sistema PIV são:

- Uma seção transparente para o ensaio;
- Uma fonte de luz (laser);

- Um meio de gravação (câmeras CCD, filme, placa holográfica etc.);
- Um meio para processamento das imagens adquiridas pelas câmeras.

O PIV digital veio com o advento de câmeras que poderiam gravar duas imagens em rápida sucessão, transferindo e armazenando a primeira imagem em um chip, onde depois é gravada também a segunda imagem. Normalmente o intervalo entre a aquisição das duas imagens pelas câmeras é ajustável. O laser ilumina um plano de partículas, que refletem esta luz. O deslocamento de partículas esféricas inseridas no fluido é observado através das imagens adquiridas pelas câmeras. Um exemplo da movimentação das esferas refletidas pode ser visto na Figura 7.

Figura 7: Exemplo da imagem de partículas inseridas na água

As partículas utilizadas devem ser pequenas o suficiente para seguir o fluxo na presença de acelerações locais, ter pequenas seções transversais para espalhamento de luz e possuir densidade semelhante à do fluido em estudo para que o movimento das mesmas seja coerente com o escoamento. O *software* processa o deslocamento médio de um grupo de partículas. A imagem

é dividida em várias áreas menores. Como são conhecidas as variações de posição e tempo, torna-se possível determinar a direção, sentido e intensidade do vetor velocidade média de cada sub-área da imagem. O vetor resultante de cada sub-área é o que aparece no mapa de vetores (Figura 8).

Figura 8: Campo de vetorização

O PIV 2D possui o inconveniente de projetar partículas do espaço (3D) em uma imagem (2D), através da observação de apenas uma câmera. O PIV 3D associa as imagens de duas ou mais câmeras, permitindo ao *software* calcular mais precisamente as três componentes da velocidade.

O processo de velocimetria por imagens de partículas depende da distribuição das partículas no fluido, iluminação e qualidade na captura das imagens. A qualidade do processamento das imagens está relacionado principalmente à amostragem. A partir deste ponto é feita a análise e obtido o resultado.

Componentes do PIV

Os componentes principais em um sistema PIV são as partículas, câmeras, laser e o computador/*software*.

- Partículas: Normalmente são de vidro revestido com prata, alumínio e gotas de óleo. Possuem diâmetro entre 10 e 100 micrômetros;
- Câmera: Câmeras CCD, digitais, com capacidade para capturar pares de imagens com intervalo de tempo muito curto, tornando possível ao computador associar uma imagem com a outra, determinando a velocidade da partícula presente na imagem;
- Laser: É usado para emitir um feixe de luz quase plano (verticalmente), necessário para iluminar a seção em que as partículas movimentam-se;
- Computador: Realiza a análise do deslocamento da partícula no intervalo de tempo entre as duas fotos e controla o *timing* do disparo da câmera e do laser.

As partículas devem preencher dois requisitos: devem ser capazes de seguir o fluxo sem deslizamento excessivo e ser eficientes espalhadoras da luz do laser, pois quanto menor esta eficiência, mais potente deverá ser o laser ou a sensibilidade das câmeras, elevando custos. As partículas variam de acordo com o fluido a ser estudado. Nunes (2005) diz que a diferença de densidade entre a partícula e o fluido em escoamento determina que o empuxo e a força gravitacional não sejam iguais, o que prejudica o primeiro requisito ou pode causar sedimentação das partículas. Também observa-se que quanto menor o diâmetro da partícula, menor será a ação da viscosidade do fluido sobre a dinâmica da partícula. Logo quanto menor o diâmetro da partícula e quão mais semelhante for sua densidade em relação à do fluido, mais a velocidade da partícula corresponderá à velocidade do escoamento. Boillot e Prasad (1996) explicam que normalmente o PIV funciona melhor quando a concentração de partículas é baixa, pois isto aumenta a distância entre as partículas, reduzindo erros causados pela sobreposição de partículas. Sobre o método de aquisição e armazenamento das imagens Boillot e Prasad (1996) falam que embora o filme fotográfico supere os sensores CCD em termos de resolução, ele perde gravemente em termos de conveniência, pois o tempo de resposta, gravação, desenvolvimento e digitalização do filme é muito mais longo. Os sensores CCD permitem que esse processo ocorra em poucos segundos. Outra vantagem é que a sensibilidade do CCD é maior do que a do filme, possibilitando o uso de um laser menos potente.

Segundo Nunes (2005) o CCD é um sensor eletrônico capaz de converter fótons gerados pelo objeto em cargas elétricas, formando uma imagem. As cargas acumuladas são transformadas em tensão, gerando a informação que pode ser transmitida. O sensor CCD é composto por vários sensores, sendo cada um associado a um pixel da imagem. O sensor fica disponível à absorção de fótons durante o tempo de obturação. Após este tempo, a carga acumulada é eliminada e dá-se início à uma nova integração de carga para a formação de uma nova imagem. Dependendo da arquitetura do sensor CCD um fóton incidente em uma região intermediária a dois pixels pode não ser detectado, o que poderia causar erros consideráveis na medição, dependendo do tamanho das partículas. O fator de preenchimento do sensor é maior quanto menor for a área não sensível.

O laser é amplamente utilizado na velocimetria por imagens de partículas devido à pouca divergência, maior resolução espacial e emissão. Nunes (2005) diz que genericamente o laser pode ser dividido em três partes principais: o material de excitação, a fonte de energia e o arranjo ótico. O material de excitação consiste em um gás, um semiconductor ou um sólido. A fonte é responsável em fornecer energia para a excitação dos elétrons dos átomos que compõem o material. O arranjo ótico forma uma cavidade ressonante que confina a radiação gerada amplificando-a até que esta seja extraída. As fontes de laser podem funcionar de forma contínua ou pulsada. Na forma contínua estão relacionadas a aplicações que exigem alta energia e/ou potência média. O laser pulsado requisita alta potência instantânea e baixa energia.

Desenvolvimento histórico

O conceito de uma técnica de velocimetria por imagem de partículas pode ser compreendido em uma ação rotineira como observar o deslocamento de uma folha em um rio. Sabendo-se o deslocamento da folha e o tempo levado para atingir este deslocamento, é possível calcular a velocidade do escoamento. O diferencial do PIV moderno é que podem ser feitas medições mais precisas e em diversos pontos simultaneamente.

Williams (2010) diz que as primeiras observações relacionadas à turbulência foram feitas por Leonardo DaVinci, que desenhou detalhadamente estruturas presentes no fluxo da água. Williams (2010) atribui o primeiro uso de visualização de fluxo a Ludwig Prandtl, que em 1904

projetou um túnel de água conduzida manualmente onde o fluxo podia ser analisado, mas ainda de forma qualitativa.

Segundo Adrian (2005) em 1977 três diferentes grupos de pesquisa ((BARKER; FOURNEY, 1977), (DUDDERAR; SIMPKINS, 1977) e (GROUSSON; MALLICK, 1977)) demonstraram a viabilidade da aplicação do laser *speckle* no estudo de fluidos. Em 1984, Adrian (1984) introduziu um método para a análise quantitativa de fluxo, conhecido como velocimetria por imagem de partículas (PIV).

Qualidades e desvantagens

Como qualidades o PIV apresenta as seguintes características:

- O método não interfere no fluxo (ADRIAN, 2005);
- Mede a velocidade em uma seção
- Observa as três componentes da velocidade no espaço;
- Alta velocidade de processamento de dados permite a geração de um grande número de pares de imagens que, em um computador de mesa podem ser analisados em tempo real ou em um momento posterior, ou seja, uma grande quantidade de informação pode ser adquirida (ADRIAN, 2005).

As desvantagens e erros possíveis são:

- Pode haver sobreposição de algumas partículas (BOILLOT; PRASAD, 1996);
- Por causa dos limites das pequenas áreas em que a imagem está dividida, o deslocamento de uma partícula pode não ser representado por inteiro. Na Figura 9 observam-se três partículas. O deslocamento da partícula verde não será contabilizado no cálculo do deslocamento do grupo de partículas, pois ela ultrapassou os limites existentes na matriz;
- Partículas inadequadas para o fluido, com densidades muito baixas, podem "escorregar", ou seja, deslocar-se exageradamente em comparação à velocidade do fluxo. No caso oposto, partícula com densidades muito elevadas podem sedimentar em velocidades mais baixas (BOILLOT; PRASAD, 1996);

Figura 9: Deslocamento de partículas na matriz

- Tempo muito curto de duração do pulso do laser pode dificultar a observação do deslocamento das partículas. No caso oposto, tempo longo pode causar o aparecimento de estrias nas imagens ao invés de pontos nítidos, como pode ser visto na Figura 10 (BOILLLOT; PRASAD, 1996);

Figura 10: Estrias em imagens

- Associação errada pelo *software* de uma partícula da primeira imagem com outra partícula da segunda imagem, resultando um vetor velocidade errado (Figura 11).

Figura 11: Erro na associação das imagens da partícula

Incertezas

Estas incertezas são provenientes de erros que podem ser divididos em dois grupos principais: erros sistemáticos e erros aleatórios. Os erros sistemáticos constituem uma função que perturba igualmente uma sequência de medidas, sendo em muitos casos, difíceis de serem determinados. Os erros aleatórios, por outro lado, perturbam de maneira diferente cada medida efetuada, proporcionando oscilações dos seus valores. Dentre cada um desses grupos há os erros possíveis de se determinar, os quais originam incertezas quantificáveis, e os que não, os quais originam incertezas não-quantificáveis (NUNES, 2005).

Dentre as incertezas não quantificáveis estão o não paralelismo entre o plano do laser e o sensor CCD, a resposta em frequência da partícula, a velocidade do grupo das partículas e a distorção ótica por refração.

O paralelismo entre o plano de laser e o sensor CCD é de difícil obtenção. A intensidade de inclinação entre um plano e outro pode ser determinada mediante o ângulo formado pela normal de um dos planos e a linha de visada. No entanto, este tipo de erro sistemático em geral não influencia de forma determinante a medida. Segundo Almeida (1997), para que este ângulo prejudique a medida em 1% é necessário que possua um valor de $8,1^\circ$. Experimentalmente, através da utilização de um simples nível, é factível a obtenção de ângulos muito menores. Por este fato despreza-se esta incerteza.

A velocidade medida do escoamento, conforme comentado anteriormente, corresponde à velocidade da partícula. Esta última, quando dentro de um meio viscoso possui um tempo de

resposta quando submetida a alguma excitação devido à força viscosa. Devido a sua ocorrência indiscriminada em toda parte do escoamento, trata-se de um erro sistemático.

No PIV a velocidade obtida corresponde à velocidade de um grupo. Desta forma há um erro inerente ao fato de posteriormente impor que esta velocidade esteja relacionada a uma coordenada específica. Devido à natureza da turbulência, é possível concluir que isto constitui um erro aleatório, diferindo em cada área de interesse (grupo). É possível minimizar este erro aumentando a resolução da imagem.

Devido à interface fluido/acrílico/ar é esperado que a posição da imagem da partícula capturada sofra um desvio devido à refração do laser, pois as velocidades naturais de propagação no meio são diferentes. Devido à geometria do tanque ao posicionamento das câmeras, a distorção por refração é um erro sistemático que possui uma dependência espacial, sendo mais intensa nas extremidades do quadro capturado e menos intensa nas posições centrais. Estes efeitos na parte central da seção são considerados irrelevantes.

3.7 Geração de turbulência isotrópica e homogênea

Na literatura encontramos dois equipamentos usados para gerar turbulência quase isotrópica em laboratório, o túnel de ar e água e o tanque com grade oscilante. A turbulência quase isotrópica elimina algumas das variáveis existentes na descrição do fenômeno turbulento, por isso esse tipo de turbulência é objeto de estudo de vários pesquisadores.

Túnel de ar ou água

O primeiro equipamento é um túnel preenchido com ar ou água, onde há uma grade de barras sólidas perpendicular ao escoamento. Alguns pesquisadores preferem o ar como fluido por este facilitar a geração de turbulência. Há desenvolvimento de jatos ainda atrás da grade e esteiras enquanto o escoamento passa pela mesma grade. Após uma certa distância da fonte de geração da turbulência, as tensões de cisalhamento tornam-se desprezíveis e a turbulência decai. À jusante, neste decaimento, está a região em que o regime turbulento é considerado homogêneo e isotrópico para fins de pesquisa.

Os túneis costumavam gerar escoamentos com relações de homogeneidade e isotropia variando de 1,05 a 1,35. A isotropia de um escoamento é maior quanto mais próximo de 1 for o valor, pois a unidade demonstra que em macro escala as características daquele escoamento se repetem. Comte-Bellot e Corrsin (1966) mostraram que essa relação poderia diminuir (aproximando-se ainda mais de condições isotrópicas) se houvesse uma contração de 1,27 vezes na área da seção transversal do túnel. Mas Townsend (1976) diz que os erros apresentados em experimentos sem a contração não afetam significativamente as conclusões do trabalho.

Como aspectos negativos o túnel de vento possui o fato de normalmente ocupar um grande espaço, já que se trata de um túnel ou canal, o que dificulta seu uso em laboratório. Outra desvantagem é que neste equipamento não há a geração de turbulência "pura", pois existe também o próprio escoamento principal do fluido, o que insere mais variáveis ao equacionamento e dificulta o estudo da turbulência e de fenômenos ligados a ela, como troca gasosa em interface ar-água, dispersão e mistura de fluidos.

Mesmo com estas desvantagens o túnel de ar ou água ainda é utilizado, principalmente em pesquisas na área aeronáutica. Valente e Vassilicos (2011) citam vários estudos em que túneis de ar com grades foram usados para geração de turbulência isotrópica e estudo do decaimento desta.

Tanque com grade oscilante

O tanque com uma ou mais grades oscilantes é um equipamento para geração de turbulência isotrópica. É construído com material transparente possibilitando a visualização do movimento do fluido. A turbulência resulta de oscilações da grade, geradas por um motor externo ao tanque. As condições de quase isotropia e homogeneidade dependem diretamente das dimensões da grade oscilante, frequência e amplitude das oscilações e posicionamento da grade no interior do tanque preenchido com o fluido (normalmente água). A Tabela 2 apresenta as características dos tanques de grade oscilante encontrados na literatura.

Tabela 2: Tanques com grade oscilante encontrados na literatura

Trabalho	Dimensões do tanque		Grade			Oscilação		Técnica de medição
	Área(cm ²)	Altura(cm)	Mesh(cm)	Barras(cm ²)	Solidez(%)	Ampl.(cm)	Freq.(Hz)	
Bouvard e Dumas (1967)	67,5 x 67,5	100	Placa perfurada 4,55(diâmetro dos furos)		-	0 - 8	-	Anem. de filme quente
Thompson e Turner (1975)	25,4 x 25,4	46	5	1 x 1 0,952*	-	1 - 1,45	2,78 - 5	Anem. de filme quente
Hopfinger e Toly (1976)	67,5 x 67,5 80 x 80	100	5 10	1 x 1 2 x 2	-	4 - 9	2 - 6	Anem. de filme quente
McDougal (1979)	25,4 x 25,4	46	5	1 x 1	-	1	1 - 10	LDV
Dickey et al. (1984)	62 x 62	76	5	1*	-	6	3,5 - 4,5	Streak Photography
Pankow e Asher (1984)	8,5 x 8,5	30	1,6	0,32 x 0,32	-	-	-	-
Brumley e Jirka (1987)	50 x 50	40	6,35	1,3 x 1,3	36	1,3 - 15	0,5 - 5	Anem. de filme quente
Roma (1988)	50 x 50	80		1 x 1	-	10	-	Sonda ótica
Nokes (1988)	25,4 x 25,4	60	5	1 x 1	-	0,77 - 4,9	4	-
Atkinson e Wolcott (1990)	120 x 30	40	5	1 x 1	-	1	3;4;5	LDA
Matsunaga et al. (1991)	100 x 25	40	5	1 x 1	-	4;8	2 - 6	Anem. de filme quente
Chu e Jirka (1992)	50 x 50	40	6,35	1,3 x 1,3	36	2,4 - 10,1	1,28 - 2,56	Anem. de filme quente
Silva e Fernando (1992)	26 x 26	60	6,2 4,76 2,93	0,9 x 0,9	27 36 50	1 - 5	0,85 - 2,1	LDV
Silva e Fernando (1994)	25,4 x 25,4 45,7 x 45,7	47 45,7	7,97 4,76 2,93	0,9 x 0,9 1,2 x 1,9	27 36 50	-	0,85 - 2,1	LDV
Casson et al. (1994)	-	-	3,18	0,635 x 0,635	-	1,91 0,64	0,25 0,75	LDV
Srdic et al. (1996)	36 x 36	58	5	1 x 1	-	0 - 5,5	0 - 5	LDV
Brunk et al. (1996)	40 x 20	100	1,27	0,267*	37,6	0,5 - 4	2 - 8	ADV
Voropayev e Fernando (1996)	16*	25	0,318 0,180	0,071* 0,051*	-	0,045 - 0,45	2 - 40	ADV
Lyn (1997)	25,4 x 25,4	48	4,8	0,95 x 0,95	-	5	4,6	PIV
Kit et al. (1997)	47 x 47	45	8	1,93 x 1,93	42	3,2	2,15 - 4,3	Anem. de filme quente
Shy et al. (1997)	15 x 15	30	3	0,6 x 0,6	36,9	2	1 - 10	LDV
Silva e Fernando (1998)	150 x 27	46	4,76	1 x 1	-	0,4 - 1,5	3 - 5	LDV
Brunk et al. (1998)	40 x 20	25	1,27	0,267*	37,6	0,5 - 4	0 - 8	ADV
Liem et al. (1999)	11,5 x 11,5	15	0,92 1,1 1,38	0,32* 0,48* 0,64*	-	13,5	-	LDA
Hibbs e Gulliver (1999)	50 x 50	50	6,4	1,77 x 1,77	-	4	2 - 6	-
Matsunaga et al. (1999)	100 x 25 25 x 25	40 60	5	1 x 1	-	4 - 8	2 - 6	Anem. de filme quente
Jensen et al. (1999)	40 x 20	100	1,27	0,267*	37,6	0,2 - 8,5	0,5 - 4	ADV
Barry et al. (2001)	52 x 48	60	5	1 x 1	-	52	-	-
Cheng e Law (2001)	50 x 50	100	5	1 x 1	36	4	1 - 4	DPIV
Goldburg et al. (2001)	-	-	4,66	1 x 1	-	1,25	4,5	DPIV
Janzen (2003)	50 x 50	115	4,1 5,1	1 x 1	38,6 32	0 - 10	0 - 4	DPIV
Righetto (2008)	50 x 50	100	-	1 x 1	-	10	-	-
Zhou e Cheng (2009)	50 x 50	100	5	1 x 1	-	5,2	2 - 3	DPIV
*Seção circular								

Os estudos com tanques de grade oscilante existem desde a década de 60. A solidez da grade, relação entre a área horizontal (sólida) ocupada pela grade e a área total da superfície do tanque, é um parâmetro importante e costuma ser o ponto de partida para o dimensionamento de tanques com grade oscilante. Segundo Corrsin (1963) a estrutura de jatos e esteiras formados pela grade ficam instáveis se a solidez da grade for superior a 40%. Shy et al. (1996) concluíram que com frequências acima de $8Hz$ a relação entre frequência e intensidade turbulenta não é linear. Vale ressaltar que não existem dimensões padronizadas na construção dos tanques, porém as dimensões não variam muito, pois os pesquisadores buscam construir equipamentos semelhantes para comparação de resultados.

Yan et al. (2007) dizem que os tanques de grade oscilante são interessantes em estudos sobre a estrutura turbulenta, a transferência de massa em interfaces (ar-água, por exemplo), o arrastamento e suspensão de sedimentos e outros problemas de engenharia ambiental.

Os resultados experimentais no trabalho de Cheng e Law (2001) mostraram que as flutuações da velocidade medidas acima das barras da grade são mais altas do que as flutuações medidas acima da parte aberta, isto para regiões próximas à grade.

Janzen (2003) diz que a turbulência gerada tende a possuir propriedades isotrópicas e homogêneas em regiões mais distantes à grade, porém a isotropia sofreu influência de escoamento secundário em seu trabalho. Cheng e Law (2001) afirmam que a homogeneidade só pode ser alcançada a partir de pontos a 3 *mesh* (espaçamento entre as barras) de distância do ponto médio de oscilação da grade. Condições de isotropia e homogeneidade ocorrem a certa distância do centro de oscilação, por isso pesquisadores estudam como se dá a variação da velocidade no espaço. Thompson e Turner (1975) dizem que a velocidade turbulenta gerada em um tanque com grade oscilante varia no espaço obedecendo a equação 4:

$$\vec{V} = 1,4 \cdot f \cdot S^{2,5} \cdot z^{-1,5} \quad (4)$$

Sendo,

u : velocidade resultante;

f : frequência de oscilação da grade em Hz;

S : amplitude de oscilação da grade;

z : distância do ponto de medição da velocidade ao centro de oscilação da grade.

Segundo Hopfinger e Toly (1976), existe influência da geometria do tanque na velocidade do decaimento. Os autores modificaram a equação, adicionando um novo parâmetro (Equação 5).

$$\vec{V} = C \cdot S^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot f \cdot z^{-1} \quad (5)$$

Sendo,

C : constante relativa à geometria da grade. Para relações entre *Mesh* (distância entre as barras) e espessura das barras igual a 5, C vale 0,25;

M : *Mesh*, razão entre distância entre as barras da grade e a espessura da barra.

Além do parâmetro novo, existe divergência entre as duas equações com relação ao expoente de z . Alguns pesquisadores acreditam que este expoente pode não ter um valor fixo. Os resultados adquiridos neste trabalho serão comparados às duas equações.

Percebe-se que não há concordância entre os dois modelos sobre o valor do expoente de z . George (1988) sugere que este expoente não seja uma constante, mas seja função das condições iniciais como número de Reynolds, *Mesh*, solidez, etc. Mohamed e Larue (1990) consideram que o expoente é uma constante, pois a dependência deste expoente a condições iniciais poderia ser determinada. Porém o coeficiente da equação que descreve o decaimento é função das condições iniciais.

Schulz e Chaudhry (1998) criaram um modelo de decaimento derivado do modelo $k-\epsilon$ para um fluxo resultante de duas grades oscilantes.

4 Materiais e métodos

Neste capítulo descreve-se os materiais empregados e a metodologia proposta para o cumprimento dos objetivos. Um tanque de grade oscilante foi utilizado para geração de turbulência. Foram realizados diversos ensaios com diferentes oscilações e suas velocidades foram medidas através do sistema PIV. Em posse dos dados obtidos, realizou-se a análise dos dados. Os detalhes de cada etapa são descritos nas seções seguintes.

4.1 Geração de turbulência

A primeira etapa do trabalho consistiu em criar distúrbios na água com diferentes velocidades. Foi utilizado o tanque prismático montado por Righetto (2008). O tanque possui base de $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ e 1 m de altura. O tanque foi preenchido com água e uma pequena quantidade de partículas revestidas de prata (utilizada para velocimetria) e o nível foi mantido em aproximadamente 55 cm .

Uma grade foi instalada no tanque, acoplada a um sistema de biela-manivela. O sistema é montado em um conjunto de polias (Figura 12) e é movido através de um motor elétrico. A rotação do motor faz com que a grade oscile verticalmente de acordo com o comprimento e raio da biela-manivela.

Figura 12: Conjunto de polias

Para variar as rotações do motor instalou-se um inversor de frequência (WEG)(Figura 13) e para medir a rotação utilizou-se um contador digital.

Figura 13: Inversor de frequência

A Figura 14 representa o esquema de oscilações da grade dentro do tanque. Com a oscilação da grade o fluido é forçado a passar através dela gerando jatos que movimentam a massa de fluido e se propagam até a superfície, provocando as oscilações turbulentas.

Figura 14: Sistema gerador de turbulência

A grade oscilante tem barras de seção $10 \times 10 \text{ mm}$, montadas em forma de malha quadrada, com barras de 5 cm de espaçamento. A grade possui $49 \times 49 \text{ cm}$ de medidas externas e 27,98% de solidez (Figura 15). Ela está localizada a 16 cm do fundo e movimenta-se com 10 cm de amplitude.

A Figura 16 ilustra o sistema completo utilizado no experimento. Foram realizados ensaios com oito frequências de oscilação da grade pré-determinadas: 18,25; 38; 57,25; 95,5; 118; 135,25; 154,25; e 175 opm . Para cada frequência, foram feitos 4 ensaios.

Figura 15: Grade

Figura 16: Equipamento para geração de oscilações

4.2 Tratamento estatístico

A velocidade turbulenta, variável em estudo neste trabalho, é a soma da velocidade média e a flutuação da velocidade em torno do seu valor médio, ou seja:

$$\vec{V} = \bar{V} + V' \quad (6)$$

Sendo,

$\vec{V}$: Velocidade turbulenta;

V' : Flutuação da velocidade;

$\bar{V}$: Velocidade média.

Neste trabalho foi utilizado um tanque de grade oscilante para a geração de turbulência. Neste tipo de tanque, todo o movimento é resultado das oscilações da grade, não existindo portanto, outra fonte de escoamento. Como o sistema é estático, a velocidade turbulenta se confunde com a flutuação da velocidade, eliminando a variável velocidade média existente em um escoamento comum, i.e. a velocidade turbulenta (Equação 6) pode ser simplificada como:

$$\vec{V} = V' \quad (7)$$

Sendo,

$\vec{V}$: Velocidade turbulenta;

V' : Flutuação da velocidade.

Devido ao seu comportamento caótico, as velocidades turbulentas precisam ser estudadas através de agrupamentos médios, pois apesar de cada posição no espaço euclidiano possuir comportamento aleatório, padrões de pequenas massas emergem em pequenos agrupamentos. Entretanto, a média simples não é um bom indicador para análise dos dados, pois a ocorrência dos componentes vetoriais das flutuações com sentidos opostos tendem os resultados da média tenderem a zero. Portanto, faz-se necessário o uso de medidas que utilizem valores absolutos, considerando a magnitude da velocidade turbulenta, como o RMS (*root mean square*), que é a raiz quadrada da média quadrática, como visto na equação 8:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V'^2} \quad (8)$$

Sendo,

V_{RMS} : Raíz quadrada da média quadrática da flutuação turbulenta;

V' : Flutuação turbulenta;

n : Número de elementos, neste caso número de instantes no tempo.

Através do valor RMS calcula-se o valor efetivo da curva formada pela intensidade turbulenta relacionada às flutuações instantâneas de velocidade, sendo possível comparar os resultados.

A isotropia existe quando a razão entre os valores efetivos da curva de cada componente da velocidade de um ponto ao longo do tempo se aproxima da unidade.

$$\frac{RMS_u}{RMS_v} \cong 1$$

$$\frac{RMS_v}{RMS_w} \cong 1 \quad (9)$$

$$\frac{RMS_w}{RMS_u} \cong 1$$

Sendo,

RMS_u : Raiz quadrada da média quadrática da componente da velocidade turbulenta no eixo x ;

RMS_v : Raiz quadrada da média quadrática da componente da velocidade turbulenta no eixo y ;

RMS_w : Raiz quadrada da média quadrática da componente da velocidade turbulenta no eixo z ;

A homogeneidade de uma turbulência pode ser comprovada quando a razão entre os valores RMS de vários pontos da seção se aproxima da unidade. Em cada ponto é considerada a média RMS da velocidade resultante ao longo do tempo.

$$RMS_{ponto1} \cong RMS_{ponto2} \cong RMS_{ponto3} \dots \cong RMS_{ponton} \quad (10)$$

Sendo,

RMS : Raiz quadrada da média quadrática.

Para verificar se as amostras possuem valores próximos foi utilizado neste trabalho um gráfico de desvio-padrão de grandes amostras (mais que 30 exemplares) (LEME, 1965).

O gráfico usado para o controle de dispersão das amostras é o apresentado na Figura 17.

Figura 17: Gráfico para controle de dispersão

No gráfico é apresentado a média dos valores dos pontos que serão lançados no mesmo e os limites inferiores e superiores de três zonas de confiabilidade. O gráfico de controle de dispersão utilizado neste trabalho é normalmente utilizado na estatística industrial. Leme (1965) diz que gráficos de controle permitem estabelecer certos limites entre os quais se encontram a média, o desvio-padrão e a frequência relativa de uma amostra, caso esta tenha sido extraída de uma certa população. Desta forma, é possível reconhecer se uma amostra pertence ou não àquela população.

Sendo o desvio padrão representado pela Equação 11:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum [(x_i - \bar{u})^2]}{n - 1}} \quad (11)$$

Onde,

σ : Desvio padrão;

x_i : Valor do elemento x no instante i ;

$\bar{u}$: Média dos valores;

n : Número de elementos.

A média comum dos valores é representada pela Equação 12.

$$\bar{u} = \sum \frac{x_i}{n} \quad (12)$$

Sendo,

$\bar{u}$: Média dos valores;

x_i : Valor do elemento x no instante i ;

n : Número de elementos.

O gráfico possui 3 zonas de confiabilidade. Se 68,2% das amostras estiverem inseridas na zona I, isso mostra que existe controle no processo. A zona I é delimitada pelo próprio σ .

4.3 Velocimetria

As velocidades foram adquiridas com um PIV digital estereoscópico. O PIV utilizado pertence à indústria **ANDRITZ HYDRO INEPAR DO BRASIL S.A.**, localizada em Araraquara e foi disponibilizado de março a novembro de 2010. Neste período, o equipamento esteve no Laboratório de Fenômenos de Transporte da Escola de Engenharia de São Carlos. A Figura 18 mostra o esquema de montagem do PIV no tanque.

Figura 18: Sistema de velocimetria por imagens

Calibração

Para que o PIV funcionasse de modo adequado foi necessário realizar a calibração do instrumento. A calibração consistiu em mapear formas geométricas já conhecidas pelo software para o correto cálculo das distâncias e profundidades. Uma placa de cerâmica com 20 cm^2 de área e contendo numa das faces um arranjo de furos de 2 mm de diâmetro foi colocada no tanque. As imagens da placa são capturadas pelas duas câmeras digitais CCD Speed Sense 9020 (Figura 19) no sentido do plano criado pelo laser e em alguns ângulos determinados pelo *software*. A placa foi inclinada para a direita, esquerda, cima e baixo em ângulos de 10° a 30° (Figura 20) conforme instruções do manual, e foram adquiridas fotos de calibração para cada uma dessas posições, para que o software fosse calibrado para reconhecer as distâncias nos eixos x , y e z .

Figura 19: Câmera digital Speed Sense 9020

Figura 20: Grid para calibração em 3D

Aquisição dos dados

Cada câmera capturava 1024 pares de imagens. O intervalo de tempo entre a obtenção do par de fotos era de 0,001 s, sendo que este tempo é regulável. Observando o deslocamento dos grupos de partículas neste tempo conhecido, era possível gerar um mapa de vetores velocidade bidimensional. Fazendo-se a correlação entre os mapas bidimensionais gerados pelas informações de cada câmera, era possível gerar um mapa tridimensional. Nas imagens observou-se o deslocamento de partículas inseridas na água. Estas imagens foram processadas pelo pacote de *softwares* DynamicStudio, versão 2.30, que é o responsável pela geração dos mapas de vetorização que expõem a intensidade, direção e sentido do movimento gerado pelas oscilações.

O *software* é o coração do sistema de medidas, sendo responsável por ativar o laser (Figura 21), que emitia pulsos no momento da captura das imagens.

Figura 21: Laser integrante do sistema PIV

O software é também responsável pelo controle das imagens capturadas e foi ajustado para que as câmeras de alta velocidade registrassem 1024 fotos no intervalo de tempo escolhido para a observação. Para o processamento das imagens obtidas o software as divide em sub-áreas de pequenas dimensões, e calcula a velocidade de cada partícula na sub-área e em seguida

calcula a média delas, obtendo um vetor representativo das velocidades naquela área. Cada sub-área possui várias partículas em movimento, como é mostrado na Figura 22. Cada vetor existente no mapa de vetores representa, portanto, a velocidade e direção média do grupo de partículas contidas na pequena área.

Figura 22: Vetorização do deslocamento das partículas

Os mapas de vetorização apresentam os vetores resultantes dos pares de imagens obtidas nas câmeras 1 e 2 para cada ensaio. Os vetores representam a velocidade, mostrando o deslocamento das partículas ao longo do tempo.

4.4 Análise de dados

Com a velocimetria por imagem de partículas foram realizadas as medidas das velocidades turbulentas, com suas três coordenadas, em função do tempo. Dos dados obtidos analisou-se as relações existentes entre diferentes pontos do escoamento turbulento gerado no tanque. O software DynamicStudio foi utilizado para processar e determinar as velocidades para os diferentes ensaios. Para a análise dos dados, foram usadas as médias das velocidades dos 4 ensaios para cada frequência. O *software* gera como saída uma planilha com as três componentes da velocidade de cada ponto da seção considerada. O programa dividiu a seção de ensaio em uma matriz com 66 linhas e 53 colunas. Cada ponto da matriz representa a velocidade de um grupo de partículas existentes naquela região.

Sub-rotinas foram desenvolvidas no ambiente Matlab com a finalidade de calcular a isotropia, homogeneidade e decaimento da turbulência das planilhas geradas.

Homogeneidade

Uma sub-rotina foi elaborada para observar a existência de controle do processo. Para fins deste trabalho, controle do processo em turbulência significa comportamento semelhante

da intensidade turbulenta no espaço, ou seja, uma turbulência homogênea. A listagem da sub-rotina é apresentada no Anexo B.

A homogeneidade de uma turbulência consegue ser comprovada quando a razão entre os valores RMS de vários pontos da seção se aproxima da unidade.

$$RMS_{ponto1} \cong RMS_{ponto2} \cong RMS_{ponto3} \dots \cong RMS_{ponton} \quad (13)$$

O gráfico de controle de dispersão possui limites impostos por três zonas de confiabilidade, conforme apresentado na revisão bibliográfica deste trabalho. Nos resultados referentes à homogeneidade apresentados optou-se por mostrar apenas os limites impostos por uma das zonas.

Para melhor visualização dos vetores de velocidade, desenvolveu-se uma sub-rotina (Anexo D) para criação de mapas cromáticos, também conhecidos como mapas termais. Estes gráficos representam os resultados em tons que variam de azul a vermelho. Valores menores são representados por cores mais “frias” (azul) e valores maiores são representados por cores mais “quentes” (vermelho). Este tipo de gráfico é útil para a visualização do escoamento, podendo-se com ele determinar o comportamento das intensidades turbulentas na região espacial observada.

Isotropia

A sub-rotina criada para observar a existência de isotropia na turbulência gerada no interior do tanque começa com o cálculo da média quadrática das componentes da velocidade ao longo do tempo (Equação 14).

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{\Sigma(u, v, w)^2}{n}} \quad (14)$$

Sendo: n o número de elementos da série; u , v e w : componentes vetoriais ao longo do eixo x , y e z ;

A razão entre as médias das componentes da velocidade deve se aproximar-se de 1 (Equação 15). Neste trabalho impôs-se o limite superior 1,2 e inferior 0,83, seguindo valores propostos por Barra (2002).

$$\begin{aligned}\frac{RMS_u}{RMS_v} &\cong 1 \\ \frac{RMS_v}{RMS_w} &\cong 1 \\ \frac{RMS_w}{RMS_u} &\cong 1\end{aligned}\tag{15}$$

Decaimento da turbulência

O movimento oscilatório da grade faz com que os gradientes de velocidade sejam mais intensos no fundo do tanque, devido à sua localização. Uma sub-rotina foi desenvolvida para observar como se dá a variação da intensidade turbulenta desde próximo à grade até a superfície da seção observada e comparar os dados observados com os modelos de decaimento propostos por Thompson e Turner (1975) e Hopfinger e Toly (1976). A sub-rotina é listada no Anexo C.

A sub-rotina foi preparada de modo a apresentar os valores de intensidade turbulenta medidos e confrontá-los com os modelos de decaimento. Os modelos são função da frequência de oscilação e de características estruturais da grade, logo há uma curva espacial de cada modelo para cada frequência de oscilação.

Para conseguir observar o decaimento da turbulência foram calculados primeiramente os valores RMS de cada ponto da matriz, transformando as 1024 matrizes (1024 instantes no tempo) em uma única matriz de dados. Comparou-se cada coluna da matriz com os modelos. Após isto calculou-se a média das intensidades turbulentas em cada linha, gerando uma única coluna de dados e comparou-se esta única coluna aos modelos. Os dados também foram normalizados entre 0 e 1, assim como os modelos. Desta forma foi possível comparar os modelos de decaimento com cada coluna da matriz e com uma única coluna média e perceber qual forma apresenta melhor as informações. A normalização do resultado possibilitou observar se os dados experimentais e os modelos seguem a mesma tendência.

A matriz ou seção de interesse é dividida em 66 linhas e 53 colunas, resultando 3498 pontos. Estes pontos podem ser afetados pela tensão superficial da própria superfície da água ou pelas paredes do tanque, ocasionando erros nas medidas. Por isso em todas as sub-rotinas listadas acima existiu a opção de retirar partes da matriz, removendo pontos existentes nas regiões periféricas.

5 Resultados e discussões

Este trabalho teve como objetivo observar características comportamentais da turbulência gerada em um tanque com grade oscilante. Estas características são homogeneidade, isotropia e decaimento. Os resultados das atividades desenvolvidas são apresentados neste capítulo. Cada seção apresenta os resultados de cada atividade e suas respectivas discussões.

5.1 Homogeneidade

A homogeneidade da turbulência é a não variação da intensidade turbulenta entre um ponto e outro no espaço observado. Para apresentar os resultados referentes à homogeneidade da turbulência no tanque foram elaborados gráficos de controle de dispersão. Este tipo de gráfico consegue mostrar a existência ou não de um controle no processo (turbulência) impondo limites na variação dos dados. Estes limites são função do desvio padrão das amostras (resultados experimentais).

Nos gráficos são apresentados os valores da média RMS das intensidades turbulentas resultantes de cada ponto no decorrer do tempo. Optou-se por expor graficamente somente os limites da zona I pois a grande maioria dos pontos foram localizados neste intervalo.

Através dos gráficos verificou-se a existência de diversos pontos com valores nulos de RMS para todas as rotações medidas, demonstrando um possível erro na velocimetria desses pontos. Dois destes gráficos são mostrados na Figura 23.

A localização desses pontos foi feita com o auxílio de mapas cromáticos. A sub-rotina criada para geração dos mapas encontra-se no Anexo D deste trabalho. Estes mapas são apresentados da forma como a seção observada do tanque é vista, o eixo x variando da primeira à última coluna da matriz e o eixo y variando da primeira à última linha. A Figura 24 ilustra o mapa cromático de duas rotações distintas. Pode-se observar que as regiões definidas pelos pontos de velocidade nula estão localizadas nas periferias da seção de estudo. A falha na medição ocorre devido a limitação do software do PIV em relacionar grupo de partículas nas extremidades das imagens.

Após a determinação da causa dos pontos nulos, decidiu-se pela remoção destes valores. Foram removidas uma coluna do lado esquerdo, duas colunas do lado direito e uma linha superior, resultando em uma matriz com 3250 pontos.

Conforme esperado, o mapa mostrado na Figura 25 é predominantemente azul pois representa o comportamento do fluido em baixas oscilações (18, 25 e 38 opm). As maiores velocidades são encontradas na parte inferior da matriz, local mais próximo à grade.

Figura 23: Gráfico da homogeneidade com presença de zeros

Figura 24: Mapa cromático com presença de zeros na periferia

As Figuras 26 e 27 apresentam tons variando do azul ao vermelho, demonstrando maiores intensidades turbulentas. É possível observar que os valores maiores encontram-se mais próximos à grade geradora de turbulência.

Na Figura 28 predomina o vermelho, consequência da maior intensidade turbulenta gerada.

Observou-se então a existência de homogeneidade na turbulência gerada pelo tanque.

Em todos os gráficos é possível observar que a maioria dos pontos está inserida entre os limites da zona I.

Figura 25: Mapa cromático com 18,25(a) e 38(b) oscilações da grade por minuto

Figura 26: Mapa cromático com 57,25(a) e 95,5(b) oscilações da grade por minuto

Figura 27: Mapa cromático com 118(a) e 135,25(b) oscilações da grade por minuto

Figura 28: Mapa cromático com 154,25(a) e 175(b) oscilações da grade por minuto

Figura 29: Homogeneidade com 18,25 e 38 oscilações da grade por minuto

Figura 30: Homogeneidade com 57,25 e 95,5 oscilações da grade por minuto

Figura 31: Homogeneidade com 118 e 135,25 oscilações da grade por minuto

Figura 32: Homogeneidade com 154,25 e 175 oscilações da grade por minuto

A Tabela 3 apresenta os resultados em porcentagem. A homogeneidade existe quando os pontos inseridos dentro dos limites da zona I igualam-se ou superam 68,2% dos pontos. A homogeneidade foi observada para todas as rotações medidas no tanque. A maior porcentagem de pontos fora dos limites (24%) ocorre quando a grade oscila a 175 opm. A menor porcentagem de pontos fora dos limites da zona I ocorre para 18,25 opm.

Tabela 3: Homogeneidade

Rotações(rpm)	Zona	Pontos fora dos limites (3250)	Pontos fora dos limites(%) (3250)
18,25	I	154	5
	II	0	0
	III	0	0
38	I	486	15
	II	0	0
	III	0	0
57,25	I	669	21
	II	0	0
	III	0	0
95,5	I	577	18
	II	0	0
	III	0	0
118	I	632	19
	II	0	0
	III	0	0
135,25	I	647	20
	II	0	0
	III	0	0
154,25	I	699	22
	II	0	0
	III	0	0
175	I	772	24
	II	0	0
	III	0	0

5.2 Isotropia

A isotropia é a não variação rotacional da intensidade turbulenta, ou seja as componentes da velocidade no espaço são semelhantes. Os gráficos a seguir mostram o valor da razão entre as médias RMS das componentes U e V , U e W e V e W para os pontos existentes na matriz. A isotropia foi calculada de duas maneiras, considerando os 3498 pontos iniciais e considerando somente a matriz corrigida. A divisão da média RMS das componentes da velocidade deve aproximar-se de 1 para ser considerada isotrópica, mostrando que a turbulência não varia rotacionalmente. Considerou-se um intervalo com limite superior de 1,2 e limite inferior de 0,83, valores adotados por Barra (2002), como dito na metodologia deste trabalho.

Na Figura 33(a), parte da razão entre os valores RMS das componentes U e V (x/y), representada pela cor azul, encontra-se inserida nos limites impostos. As razões entre as médias RMS de U/W e V/W apresentam a maioria dos pontos fora dos limites. Pode-se dizer que para a velocidade 18,25 as componentes U e V possuem comportamento isotrópico. Na Figura 33(b) a razão entre os RMS das componentes U e V apresenta a maioria dos pontos dentro dos limites, mostrando também comportamento isotrópico. Porém é possível observar que quando a componente W é inserida nos cálculos estes valores distanciam-se muito dos limites impostos. Isto ocorre porque a componente W , que está na direção z (vertical), sofre maior influência com o movimento da grade. A proximidade da superfície e a tensão superficial podem interferir nos valores de W . Isto porque a superfície interfere nas medidas e a tensão superficial causa interferência na própria velocidade.

Figura 33: Quantificação da isotropia com 18,25(a) e 38(b) oscilações da grade por minuto

A partir da Figura 34(a), a razão entre os valores RMS das componentes U e V começam a extrapolar os limites. Esta tendência é vista nas medidas realizadas para valores maiores de oscilações da grade. Assim como nos gráficos anteriores, na Figura 34(b), a razão entre os valores RMS das componentes U/W e V/W na maioria dos pontos está fora dos limites. A razão entre os RMS das componentes U/V apresenta comportamento isotrópico próximo a superfície, onde o sistema possui velocidade baixa e os valores de U são próximos aos de V .

Figura 34: Quantificação da isotropia com 57,25(a) e 95,5(b) oscilações da grade por minuto

As Figuras 35(a) e (b) e 36(a) apresentaram comportamento similar. Somente a razão dos valores RMS das componentes U/V dos primeiros pontos estão dentro dos limites. As razões entre os valores de V/W e U/W permanecem distantes. Na Figura 36(b) a maioria dos pontos está fora dos limites impostos para uma turbulência isotrópica. Na velocidade 175 a razão entre as componentes V/W começam a inserir-se nos limites.

A Tabela 4 apresenta os resultados referentes à isotropia.

As razões entre os valores RMS das componentes das intensidades turbulentas para maiores velocidades de oscilação da grade (95,5; 118; 135,25; 154,25 e 175 rpm) ficaram, em sua maioria, fora dos limites impostos, mesmo desconsiderando as razões que envolvem a componente W . A quantidade de pontos fora dos limites para a razão entre os valores RMS das componentes U e V variou de 27% para 57,25 opm (melhor resultado) a 93% dos pontos fora do limite para 175 opm (pior resultado). Observou-se que para todas as rotações o tanque aproximou-se de um comportamento isotrópico nas regiões superficiais e tendeu mais à isotropia em baixas velocidades da grade.

Figura 35: Quantificação da isotropia com 118(a) e 135,25(b) oscilações da grade por minuto

É possível observar que a remoção de áreas periféricas da imagem não contribuiu para a melhora do resultado da isotropia. Isto deve ocorrer porque a isotropia não está aqui relacionada com a qualidade da imagem e dos dados e sim com parâmetros estruturais do tanque e grade. Os zeros existentes anteriormente na periferia da imagem estavam acrescentando pontos isotrópicos aos resultados.

Figura 36: Quantificação da isotropia com 154,25(a) e 175(b) oscilações da grade por minuto

Tabela 4: Isotropia

Rotação(rpm)	Componentes	Pontos fora dos limites (3250)	Pontos fora dos limites(%) (3250))
18,25	U e V	1187	37
	U e W	3250	100
	V e W	3250	100
38	U e V	1079	33
	U e W	3250	100
	V e W	3250	100
57,25	U e V	865	27
	U e W	3250	100
	V e W	3250	100
95,5	U e V	2093	64
	U e W	3250	100
	V e W	3250	100
118	U e V	2514	77
	U e W	3250	100
	V e W	3250	100
135,25	U e V	2384	73
	U e W	3250	100
	V e W	3250	100
154,25	U e V	2454	76
	U e W	3250	100
	V e W	3250	100
175	U e V	3025	93
	U e W	3250	100
	V e W	2355	72

5.3 Decaimento da turbulência

Os próximos resultados mostram o decaimento da turbulência na seção de escoamento observada do tanque. Estes resultados foram comparados com dois modelos de decaimento de turbulência encontrados na literatura, o modelo de Thompson e Turner (1975) e o modelo de Hopfinger e Toly (1976).

Em um primeiro momento optou-se por colocar no gráfico o decaimento de cada coluna da matriz observada e as curvas representantes dos dois modelos de decaimento de turbulência, como observa-se na Figura 37.

Figura 37: Comparação entre dados experimentais e dois Modelos de decaimento da turbulência

Após a obtenção dos resultados experimentais e cálculo de velocidades turbulentas para cada modelo, observou-se que o modelo de Thompson e Turner (1975) ficou muito distante dos resultados experimentais. Além disso, este modelo demonstra uma curva de decaimento com inclinação mais acentuada. O grande distanciamento entre do modelo de Thompson e Turner (1975) causa uma atenuação na escala, interferindo na visualização dos dados. Portanto, optou-se pela omissão da curva desse modelo. O modelo de Hopfinger e Toly (1976) aproximou-se mais dos dados experimentais, porém não é possível afirmar que este modelo se adequa aos dados. Para verificar se os dados experimentais e o modelo de Hopfinger e Toly (1976) seguem a mesma tendência normalizou-se todas estas informações entre 0 e 1.

Outro problema observado é que a plotagem de várias curvas de decaimento dificulta a visualização do decaimento da turbulência. Por isso considerou-se melhor plotar apenas uma coluna representando uma média do decaimento.

Para fins de padronização de dados com as atividades anteriores, a matriz de pontos do escoamento foi redimensionada, ficando com 65 linhas e 50 colunas.

Nas Figuras 38(a) e (b), 39(a) e (b) e 40(a) é possível observar a existência de decaimento da turbulência nos dados experimentais. O modelo de Hopfinger e Toly (1976) segue a mesma tendência dos resultados.

Figura 38: Decaimento da turbulência com 18,25(a) e 38(b) oscilações da grade por minuto

Figura 39: Decaimento da turbulência com 57,25(a) e 95,5(b) oscilações da grade por minuto

Na Figura 40(b) o decaimento se dá menos acentuado que nas rotações anteriores e o modelo não segue a mesma tendência dos dados experimentais.

Nas Figuras 41(a)e(b) também observa-se o decaimento da turbulência nos dados experimentais e a mesma tendência entre os dados e o modelo de Hopfinger e Toly (1976).

Conforme esperado, o modelo de Hopfinger e Toly (1976) está mais próximo do resultados experimentais do que o modelo de Thompson e Turner (1975), devido ao parâmetro de correção M (*Mesh*) existente no primeiro modelo. A constante C existente no modelo de Hopfinger e Toly (1976) também está relacionada à geometria da grade.

Figura 40: Decaimento da turbulência com 118(a) e 135,25(b) oscilações da grade por minuto

Figura 41: Decaimento da turbulência com 154,25(a) e 175(b) oscilações da grade por minuto

6 Conclusões

Este trabalho utilizou um tanque (base de $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ e 1 m de altura) de grade oscilante para tentar gerar uma turbulência homogênea e isotrópica. Este regime turbulento é um tipo mais simples de turbulência e sua compreensão poderia levar posteriormente à compreensão da turbulência em níveis ainda mais complexos. Para observar e quantificar a turbulência foi utilizado um método de trilhagem de partículas por fotografia estereoscópica iluminado por laser, PIV (*particle imaging velocimeter*).

Com as informações adquiridas pelo PIV foi possível observar se a turbulência gerada no tanque era isotrópica e homogênea. Atentou-se também ao decaimento da turbulência na seção selecionada.

Foi possível notar que o PIV não funciona bem nas regiões periféricas da imagem. Isto porque o PIV precisa relacionar a posição da partícula na primeira imagem com sua posição na segunda imagem para calcular a velocidade. Por isso nas regiões periféricas da matriz a ligação entre as duas imagens fica prejudicada, já que a próxima imagem pode estar fora da área observada. A observação da turbulência na superfície continua sendo uma dificuldade, pois esta região é afetada pela tensão superficial e pela superfície. A concentração ideal de partículas não foi observada com exatidão, este parâmetro foi controlado visualizando-se a qualidade das imagens. O laser utilizado para iluminar a seção do escoamento era pulsado. O tempo entre os pulsos do laser, já definido pelo programa, era de $0,1 \text{ s}$ e o valor padrão do software mostrou-se adequado já que as partículas apareciam como circunferências nítidas nas imagens.

Em seu trabalho Janzen (2003) diz que a turbulência gerada em um tanque com grade oscilante tende a possuir propriedades isotrópicas e homogêneas em regiões mais distantes da grade. Neste presente trabalho a turbulência teve comportamento homogêneo em toda a seção observada, ou seja, a intensidade turbulenta apresentou comportamento semelhante em todos os pontos da matriz, pois seguindo Janzen, a seção de medida era afastada da grade oscilante. Quanto à isotropia, não é possível afirmar que o tanque de grade oscilante utilizado gera uma turbulência isotrópica. A afirmação só seria possível se as três componentes da intensidade turbulenta tivessem apresentado comportamento análogo.

Próximo à grade a componente W , componente da velocidade no eixo z , é a mais afetada pelas oscilações, ficando com valores muito maiores que as outras duas componentes. O módulo da velocidade W deve variar no espaço entre o centro de oscilação da grade e a superfície. A isotropia do sistema poderia ocorrer em uma região entre a grade e a superfície. Neste trabalho a área observada estava muito próxima à superfície. Seria interessante para a observação de isotropia selecionar mais regiões entre a grade e a superfície para medidas de intensidade turbulenta.

Os resultados experimentais de Cheng e Law (2001) afirmam que a homogeneidade só pode ser alcançada a partir de pontos a 3 *mesh* (espaçamento entre as barras) de distância do ponto médio de oscilação da grade. A seção de escoamento observada neste trabalho dista 16 cm do centro de oscilação da grade e o espaçamento entre as barras é de 5 cm, logo os pontos observados distam 3 *mesh* do centro de oscilação.

A turbulência gerada no tanque decai na seção observada (a seção está localizada entre a grade oscilante e a superfície livre da água). Este decaimento segue a mesma tendência que Modelo de Hopfinger e Toly (1976). Embora a tendência do modelo de Hopfinger e Toly (1976) esteja coerente com os dados experimentais, o modelo não se adequa aos dados. Neste trabalho ficou mais fácil a visualização do decaimento colocando no gráfico apenas uma curva de decaimento ao invés de uma curva para cada coluna da matriz. Essa única curva representa a média da intensidade turbulenta em cada linha da matriz, resultando uma coluna.

Considerando a revisão bibliográfica realizada e os resultados experimentais deste trabalho pode-se dizer que o tanque de grade oscilante é um bom equipamento para reprodução da turbulência em laboratório e geração de regimes turbulentos com características homogêneas. O PIV também mostrou ser eficiente na observação de campos de velocidade, apesar de limitações na região periférica.

Referências

- ADRIAN, R. Scattering particle characteristics and their effect on pulsed laser measurements of fluid flow- speckle velocimetry vs particle image velocimetry. *Applied optics*, v. 23, p. 1690, 1984.
- ADRIAN, R. J. Twenty years of particle image velocimetry. *Experiments in fluids*, 2005.
- ALMEIDA, J. A. *Sistemas de velocimetria por imagens de partículas*. Tese (Doutorado) — PUC-RJ, 1997.
- ALMEIDA, W. R. M. de. *Anemômetro baseado no método de trânsito: Estudo comparativo de arquiteturas, avaliação de incertezas e implementação*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Maranhão, 2006.
- ATKINSON, J. F.; WOLCOTT, S. B. Interfacial mixing driven by mean shear and oscillating grid. *Journal of hydraulic engineering*, 1990.
- BARKER, D. B.; FOURNEY, M. E. Measuring fluid velocities with speckle patterns. *Opt Lett*, v. 1, p. 135–137, 1977.
- BARRA, L. *Estudo da estrutura turbulenta em escoamentos gerados por grades oscilantes*. Dissertação (Mestrado) — EESC-USP, 2002.
- BARRY, M. E. et al. Measurements of diapycnal diffusivities in stratified fluids. *Journal of fluid mechanics*, 2001.
- BEYA, J.; PEIRSON, W.; BANNER, M. Rainfall-generated, near surface turbulence. In: *Gas Transfer at Water Surface*. [S.l.]: Kyoto University Press, 2011. p. 90–103.
- BOILLOT, A.; PRASAD, A. Optimization procedure for pulse separation in cross-correlation piv. *Experiments in fluids*, Springer, v. 21, n. 2, p. 87–93, 1996.
- BOUVARD, M.; DUMAS, H. Application de la methode de fil chaud a la mesure de la turbulence dans l'eau. *La Houille Blanche*, 1967.
- BRUMLEY, B. H.; JIRKA, G. H. Near-surface turbulence in a grid stirred tank. *Journal of fluid mechanics*, 1987.
- BRUNK, B. et al. Modeling natural hydrodynamic system with a differential-turbulence column. *Journal of Hydraulic*, 1996.
- BRUNK, B. K.; KOCH, D. L.; LION, L. W. Observations of coagulation in isotropic turbulence. *Journal of fluid mechanics*, 1998.

- CASSON, L. W.; LAWLER, D. F.; BOGARD, D. G. Spectral analysis of fluid flow in oscillating grid reactor. *Journal of engineering mechanics*, 1994.
- CHENG, N. S.; LAW, A. W. K. Measurements of turbulence generated by oscillating grid. *Journal of hydraulic engineering*, 2001.
- CHU, C. R.; JIRKA, G. H. Turbulent gas flux measurements below the air-water interface of a grid-stirred tank. *Heat mass transfer*, 1992.
- COMTE-BELLOT, G.; CORRSIN, S. The use of contraction to improve the isotropy of grid-generated turbulence. *Journal of fluid mechanics*, 1966.
- CORRSIN, S. Turbulence: Experiments methods. *Handbuch der physik, Stromungs mechanik*, 1963.
- DICKEY, T. D.; BLAYNE, H.; HURST, D. H. E. A laboratory technique for investigating the relationship between gas transfer and fluid turbulence. *Gas transfer at water surface*, 1984.
- DUDDERAR, T.; SIMPKINS, P. Laser speckle photography in a fluid medium. *Nature*, v. 270, p. 45–47, novembro 1977.
- FEGHALI, J. P. *Mecânica de fluidos*. [S.l.]: Livros técnicos e científicos editora S.A., 1974.
- GEORGE, W. K. The decay of homogeneous turbulence. *In transport phenomena in turbulent flows*, 1988.
- GIORGETTI, M. F. *Fundamentos de fenômenos de transporte para estudantes de engenharia*. [S.l.]: São Carlos, 2008.
- GOLDBURG, W. I. et al. Turbulence in a free surface. *Physical review*, 2001.
- GROUSSON, R.; MALLICK, S. Study of flow pattern in fluid by scattered laser light. *Appl. Opt.*, v. 16, p. 2334–2336, 1977.
- HIBBS, D. E.; GULLIVER, J. S. Dissolution rate coefficients for surface slicks on rivers. *Water researches*, 1999.
- HINZE, J. O. *Turbulence: An introduction to its Mechanism and Theory*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1959.
- HOPFINGER, E. J.; TOLY, J. A. Spatially decaying turbulence and its relation to mixing across density interfaces. *Journal of Fluid Mechanics*, 1976.
- JANZEN, J. G. *Detalhamento das propriedades turbulentas em água agitada por grades oscilantes*. Dissertação (Mestrado) — EESC-USP, 2003.

- JENSEN, A. et al. Simulating entrainment and particle fluxes in stratified estuaries. *Journal of enviromental engineering*, 1999.
- KIEFHABER, D. et al. Improved optical instrument for the measurement of water wave statistics in the field. In: *GTWS 2010*. [S.l.]: Kyoto University Press, 2011.
- KIT, E. L. G.; STRANG, E. J.; FERNANDO, H. J. S. Measurements of turbulence near shear-free density interfaces. *Journal of fluid mechanics*, 1997.
- LEME, R. A. da S. *Curso de estatística elementos*. [S.l.]: Ao livro técnico S.A., 1965.
- LESIEUR, M. *Turbulence in fluids*. [S.l.]: Kluwer Academic Publisher, 1997.
- LIEM, L. E.; SMITH, D. W.; STANLEY, S. J. Turbulent velocity in flocculation by means of grids. *Journal of enviromental engineering*, 1999.
- LYN, D. A. A piv studying of oscillating-grid flow. experimental and numerical flow visualization and laser anemometry. *Fluids engineering division (ASME)*, 1997.
- MARKATOS, N. C. The mathematical modelling of turbulent flows. *Applied mathematical modelling*, v. 10, 1986.
- MATSUNAGA, N.; SUGIHARA, Y.; KOMATSU, T. A numerical simulation of oscillating-grid turbulence by using the $k - \varepsilon$ model. *Enviromental hydraulics*, 1991.
- MATSUNAGA, N. et al. Quantitative properties of oscillating-grid turbulence in a homogenous fluid. *Fluid dynamic research*, 1999.
- MCDUGAL, T. J. Measurements of turbulence in a zero-mean-shear mixed layer. *Journal of fluid mechanics*, 1979.
- MOHAMED, M.; LARUE, J. The decay power law in grid-generated turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge Univ Press, v. 219, n. 1, p. 195–214, 1990.
- NETO, A. da S. *Turbulência nos fluidos aplicada*. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2004.
- NOKES, R. I. On entrainment rate across a density interface. *Journal of fluid mechanics*, 1988.
- NUNES, R. P. *Projeto e implementação de um sistema de instrumentação eletro-eletrônica para caracterização de escoamentos através de processamento digital de imagens*. Dissertação (Mestrado) — UFRGS, 2005.
- PANKOW, J. F.; ASHER, W. E. Carbon dioxide transfer at the gas/water interface as function of system turbulence. *Gas transfer at water surfaces*, 1984.

- PEREIRA, C. E. *Estudo de parâmetros turbulentos e sua relação com o coeficiente de reeração com o uso da técnica fotográfica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2002.
- PORTO, R. de M. *Hidráulica básica*. [S.l.]: Rima, 2006.
- RIGHETTO, M. M. *Desenvolvimento e calibração de um tanque de reaeração equipado com grade oscilante*. Dissertação (Mestrado) — USP, 2008.
- RODI, W. Turbulence models and their application in hydraulics. *Ed. IAHR, Delft*, 1980.
- ROMA, W. N. L. *Medida dos parâmetros de turbulência superficial e sua interrelação com o coeficiente de reaeração*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 1988.
- ROMA, W. N. L. *Fenômenos de transporte para engenharia*. São Carlos: Rima, 2006.
- SCHULZ, H. E.; CHAUDHRY, F. H. Uma aproximação para turbulência gerada por grades oscilantes. In: *Primeira escola de transição e turbulência*. [S.l.: s.n.], 1998.
- SHY, S. S.; JANG, R. H.; TANG, C. Y. Simulation of turbulent burning velocities using aqueous autocatalytic reactions in a near-homogeneous turbulence. *Combustion and flame*, 1996.
- SHY, S. S.; TANG, C. Y.; FANN, S. Y. A nearly isotropic turbulence generated by a pair of vibrating grids. *Experimental thermal and fluid science*, 1997.
- SILVA, I. P. D. D.; FERNANDO, H. J. S. Some aspects of mixing in a stratified turbulent patch. *Journal of fluid mechanics*, 1992.
- SILVA, I. P. D. D.; FERNANDO, H. J. S. Oscillating grids as a source of nearly isotropic turbulence. *Physics Fluids*, 1994.
- SILVA, I. P. D. D.; FERNANDO, H. J. S. Experiments on collapsing turbulent regions in stratified fluids. *Journal of fluidmechanics*, 1998.
- SRDIC, A.; FERNANDO, H. J. S.; MONTENEGRO, L. Generation of nearly isotropic turbulence using two oscillating grids. *Experiments in fluids*, 1996.
- THOMPSON, S. M.; TURNER, J. Mixing across an interface due to turbulence generated by an oscillating grid. *Journal of Fluid Mechanics*, 1975.
- TOWNSEND, A. A. The structure of turbulent shear flow. In: _____. New York: Cambridge University Press, 1976. cap. 3.
- VALENTE, P. C.; VASSILICOS, J. C. Dependence of decaying homogeneous isotropic turbulence on initial conditions. *Journal Fluid Mechanics*, 2011.

- VOROPAYEV, S. I.; FERNANDO, H. J. S. Propagation of grid turbulence in homogeneous fluids. *Physics of fluids*, 1996.
- WILLIAMS, S. *3-D Visualization of a Zero-Pressure Gradient Turbulent Boundary Layer*. Tese (Doutorado) — Auburn University, 2010.
- YAN, J. et al. Oscillating-grid turbulence and its applications: a review. *Journal of Hydraulic Research*, 2007.
- ZHOU, Q.; CHENG, N.-S. Experimental investigation of single particle settling in turbulence generated by oscillating grid. *Chemical engineering journal*, v. 149, p. 289–300, 2009.

Anexo A - Código MatLab desenvolvido para verificar a isotropia da turbulência gerada pelo tanque

```
1 function importfile(baixo, cima, esquerda, direita)

2 linhas = 66
3 colunas = 53

4 clc
5 disp 'Executando o programinha. Aguarde...';
6 tempoinicio = cputime;

7 arquivos = dir ('3d*.csv');

8 [total, temp] = size(arquivos);

9 for i = 1:total
10     arquivo = importdata(arquivos(i).name);
11     vetores3D(:, :, i) = arquivo.data(:, 5:7);
12 end

13 vetores3D=power(vetores3D,2);

14 vetorRMS = [0];
15 for i=1:total
16     vetorRMS = vetorRMS + vetores3D(:, :, i);
17 end

18 vetorRMS = vetorRMS/total;

19 vetorRMS = power(vetorRMS, 0.5);

20 xy = vetorRMS(:,1)./vetorRMS(:,2);
21 xz = vetorRMS(:,1)./vetorRMS(:,3);
22 yz = vetorRMS(:,2)./vetorRMS(:,3);

23 xy = reshape(xy, colunas, linhas)';
```

```

24 xz = reshape(xz, colunas, linhas)';
25 yz = reshape(yz, colunas, linhas)';

26 xy = xy (baixo+1:end-cima, esquerda+1:end-direita);
27 xz = xz (baixo+1:end-cima, esquerda+1:end-direita);
28 yz = yz (baixo+1:end-cima, esquerda+1:end-direita);

29 elements = numel(xy)

30 xy = reshape(xy', elements, 1);
31 xz = reshape(xz', elements, 1);
32 yz = reshape(yz', elements, 1);

33 x = 1:elements;
34 x = x';
35 scatter(x, xy);
36 hold on;
37 scatter(x, xz);
38 scatter(x, yz);
39 legend('x_{RMS}/y_{RMS}', 'x_{RMS}/z_{RMS}', 'y_{RMS}/z_{RMS}');
40 p=plot([0, elements],[0.83, 0.83]);
41 set(p,'Color', 'black', 'LineWidth', 1)
42 q=plot([0, elements],[1.2, 1.2]);
43 set(q,'Color', 'black', 'LineWidth', 1)
44 hold off;

45 saveas(gcf, 'isotropia.png');

46 xyout = sum(xy<0.83) + sum(xy>1.2);
47 xzout = sum(xz<0.83) + sum(xz>1.2);
48 yzout = sum(yz<0.83) + sum(yz>1.2);

49 fprintf('%d de %d fora da faixa em xy. Fator: %.2f\n', xyout,
elements, xyout/elements);
50 fprintf('%d de %d fora da faixa em xz. Fator: %.2f\n', xzout,
elements, xzout/elements);
51 fprintf('%d de %d fora da faixa em yz. Fator: %.2f\n', yzout,
elements, yzout/elements);

```

```
52 tempofim = cputime - tempoinicio;  
53 fprintf('Prontinho! Tempo de execucao: %.2f min', tempofim/60);  
54 end
```

Anexo B - Código MatLab desenvolvido para verificar a homogeneidade da turbulência gerada pelo tanque

```
1 function importfile(baixo, cima, esquerda, direita)

2 linhas = 66;
3 colunas = 53;

4 tempoinicio = cputime;

5 arquivos = dir ('3d*.csv');

6 [total, temp] = size(arquivos);

7 for i = 1:total
8     arquivo = importdata(arquivos(i).name);
9     vetores3D(:, :, i) = arquivo.data(:, 5:7);
10 end

11 vetoressq = vetores3D.^2;
12 vetorsum(:, 1, :) = vetoressq(:, 1, :) + vetoressq(:, 2, :) + vetoressq(:, 3, :);

13 info = vetorsum(:, 1, 1);
14 info = info * 0;
15 for i=1:total
16     info = info + vetorsum(:, 1, i);
17     info=sqrt(info/total);
18 end

19 info = reshape(info, colunas, linhas)';
20 info = info (baixo+1:end-cima, esquerda+1:end-direita);

21 element = numel(info);
22 info = reshape(info', element, 1)';

23 media = mean(info);
24 desvio = std(info);
```

```

25 x = 1:element;
26 x = x';

27 zonau1=media+desvio;
28 zonad1=media-desvio;
29 zonau2=media+(desvio + (1.96^desvio)/sqrt(2*(element-1)));
30 zonad2=media-desvio - (1.96^desvio)/sqrt(2*(element-1));
31 zonau3=media+desvio + (3.09^desvio)/sqrt(2*(element-1));
32 zonad3=media-desvio - (3.09^desvio)/sqrt(2*(element-1));

33 scatter(x, info);
34 hold on;
35 zul=plot([0, element],[media+desvio, media+desvio]);
36 set(zul,'Color', 'red', 'LineWidth', 1);
37 zdl=plot([0, element],[media-desvio, media-desvio]);
38 set(zdl,'Color', 'red', 'LineWidth', 1);
39 hold off;

40 saveas(gcf, 'homogeneidade.png');

41 zonalout = sum(info<zonad1) + sum(info>zonau1);
42 zona2out = sum(info<zonad2) + sum(info>zonau2);
43 zona3out = sum(info<zonad3) + sum(info>zonau3);

44 fprintf('%d de %d fora da faixa em zona1. Fator: %.2f\n', zonalout,
element, zonalout/element);
45 fprintf('%d de %d fora da faixa em zona2. Fator: %.2f\n', zona2out,
element, zona2out/element);
46 fprintf('%d de %d fora da faixa em zona3. Fator: %.2f\n', zona3out,
element, zona3out/element);

47 tempofim = cputime - tempoinicio;

48 fprintf('Prontinho! Tempo de execucao: %.2f min', tempofim/60);
49 end

```

Anexo C - Código MatLab desenvolvido para comparar o decaimento da turbulência gerada pelo tanque com os modelos de Thompson e Turner (1975) e de Hopfinger e Toly (1976)

```
1 function importfile(baixo, cima, esquerda, direita)

2 clc
3 disp 'Executando o programinha. Aguarde...';
4 tempoinicio = cputime;

5 linhas=66;
6 colunas=53;
7 oscilacoes=175;
8 amplitude=0.1;
9 C=0.25;
10 mesh=0.05;

11 tempoinicio = cputime;

12 arquivos = dir ('3d*.csv');

13 [total, temp] = size(arquivos);

14 for i = 1:total
15     arquivo = importdata(arquivos(i).name);
16     vetores3D(:, :, i) = arquivo.data(:, 5:7);
17 end

18 vetoressq = vetores3D.^2;
19 vetorsum(:, 1, :) = vetoressq(:, 1, :) + vetoressq(:, 2, :) + vetoressq(:, 3, :);

20 info = vetorsum(:, 1, 1);
21 info = info * 0;
22 for i=1:total
23     info = info + vetorsum(:, 1, i);
24     info=sqrt(info/total);
```

```

25 end

26 elements = numel(info);
27 info = reshape(info, colunas, linhas)';
28 info = info (baixo+1:end-cima, esquerda+1:end-direita);

29 ui=[];
30 for i=0:linhas-1
31     z=(0.16+(0.2/65)+i*(0.2/65));
32     ui=[ui; 1.4*(oscilacoes/60)*amplitude^2.5*z^(-1.5)];
33 end

34 ui2=[];
35 for i=0:65
36     z=(0.16+(0.2/65)+i*(0.2/65));
37     ui2=[ui2; C*amplitude^1.5*mesh^0.5*(oscilacoes/60)*z^(-1)];
38 end

39 info = info';
40 info = sum(info);
41 info = info'

42 info = info ./ (colunas - esquerda - direita)

43 xmin=min(min(info));
44 xmax=max(max(info));
45 info=bsxfun(@minus,xmax, info)
46 info=info./(xmax-xmin)
47 info=bsxfun(@minus,1,info)

48 xmin=min(min(ui2));
49 xmax=max(max(ui2));
50 ui2=bsxfun(@minus,xmax, ui2)
51 ui2=ui2./(xmax-xmin)
52 ui2=bsxfun(@minus,1,ui2)

53 plot(info)
54 hold on

```

```
55 q=plot(ui2);
56 set(q,'Color','red','LineWidth',3)
57 hold off

58 saveas(gcf,'decaimento.png');

59 tempofim = cputime - tempoinicio;
60 fprintf('Prontinho! Tempo de execucao: %.2f min', tempofim/60);
61 end
```


Anexo D - Código MatLab desenvolvido para os mapas cromáticos

```
1 function importfile(varargin)

2     lin_inf = 1;
3     lin_sup = 0;
4     col_esq = 1;
5     col_dir = 1;

6     optargin = numel(varargin);

7     if optargin == 1
8         lin_sup = varargin{1};
9         lin_inf = varargin{1};
10        col_esq = varargin{1};
11        col_dir = varargin{1};
12    end

13    if optargin == 2
14        lin_sup = varargin{1};
15        lin_inf = varargin{1};
16        col_esq = varargin{2};
17        col_dir = varargin{2};
18    end

19    if optargin == 4
20        lin_sup = varargin{1};
21        lin_inf = varargin{2};
22        col_esq = varargin{3};
23        col_dir = varargin{4};
24    end

25    arquivos = dir ('3d*.csv');

26    [total, temp] = size(arquivos);

27    for i = 1:total
28        arquivo = importdata(arquivos(i).name);
```

```

29     vetores3D(:, :, i) = [arquivo.data(:, 1:2) arquivo.data(:, 8)];
30 end

31 matrixlines = vetores3D(end, 1, end) + 1;
32 matrixcolumns = vetores3D(end, 2, end) + 1;

33 pega dimensoes da matriz 1D
34 [lin col] = size(vetores3D(:, :, 1));

35 vmedia = zeros(lin, col);
36 for i=1:total
37     vmedia = vmedia + vetores3D(:, :, i);
38 end
39 vmedia = vmedia/total;

40 y = vetores3D(:, 1, 1);
41 x = vetores3D(:, 2, 1);
42 z = vmedia(:, 3);

43 x = reshape(x, matrixcolumns, matrixlines)';
44 y = reshape(y, matrixcolumns, matrixlines)';
45 z = reshape(z, matrixcolumns, matrixlines)';

46 x = x(lin_sup+1:end-lin_inf, col_esq+1:end-col_dir);
47 y = y(lin_sup+1:end-lin_inf, col_esq+1:end-col_dir);
48 z = z(lin_sup+1:end-lin_inf, col_esq+1:end-col_dir);

49 newtotallines = numel(x)

50 x = reshape(x, 1, newtotallines)';
51 y = reshape(y, 1, newtotallines)';
52 z = reshape(z, 1, newtotallines)';

53 F = TriScatteredInterp(x, y, z);
54 [qx qy] = meshgrid(min(x):1:max(x), min(y):1:max(y));
55 qz = F(qx, qy);
56 [ch, ch] = contourf(qx, qy, qz, 100);
57 set(ch, 'edgecolor', 'none');
58 saveas(gcf, 'cromatico.png');

```