ESTUDO DA ESTRUTURA TURBULENTA EM ESCOAMENTOS GERADOS POR GRADES OSCILANTES

LEONARDO BARRA SANTANA DE SOUZA

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

ORIENTADOR: Prof. Tit. Harry Edmar Schulz

São Carlos
2002

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP**

S729e Souza, Leonardo Barra Santana de
Estudo da estrutura turbulenta em escoamentos gerados
por grades oscilantes / Leonardo Barra Santana de Souza.
-- São Carlos, 2002.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2002.
Área: Hidráulica e Saneamento.
Orientador: Prof. Tit. Harry Edmar Schulz.

1. Grades oscilantes. 2. Turbulência. 3. Velocimetria
à laser. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **LEONARDO BARRA SANTANA DE SOUZA**

Dissertação defendida e julgada em 29-05-2002 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Assoc. **HARRY EDMAR SCHULZ (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Tit. **WOODROW NELSON LOPES ROMA**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **ANTENOR RODRIGUES BARBOSA JUNIOR**
(Universidade Federal de Ouro Preto/UFOP)

Aprovado

Profª. Associada **MARIA DO CARMO CALLJURI**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia (Hidráulica e Saneamento) e
Vice-Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC em
exercício

Dedico este trabalho
aos meus pais, João e Honorina,
e ao meu irmão Leandro.

AGRADECIMENTOS

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, mantenedora da bolsa de estudos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pelo auxílio-pesquisa 2000/13953-6.

Ao professor titular Harry Edmar Schulz, por sua orientação e principalmente pela confiança no meu trabalho.

Ao professor titular Woodrow Nelson Lopes Roma, pela colaboração constante e pelo incentivo.

Ao professor Dr. Antenor Rodrigues Barbosa Junior, pela contribuição quando da participação na banca.

Aos professores Swami Marcondes Villela e Ruth Gouvêa Duarte, por toda ajuda, incentivo e acima de tudo, carinho e amizade.

À Jaqueline, pelo amor, companheirismo, paciência ...

Ao amigo Johannes, pela colaboração na execução dos experimentos.

Ao meu irmão Leandro Barra Santana de Souza, pela colaboração no desenvolvimento do programa computacional, criado para a obtenção dos resultados finais desta pesquisa.

À Elena L. Palloni Gonçalves, bibliotecária da EESC, pela correção das referências bibliográficas.

A todos da Oficina Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo (EESC - USP), em especial ao técnico Adolfo, pelas sugestões e construção do tanque em acrílico.

Ao técnico Osni, pela colaboração no projeto inicial do equipamento.

À Coordenação, aos professores, funcionários e colegas do Programa de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento da EESC, pelos ensinamentos, pelo incentivo e, principalmente, pela amizade.

Ao FINEP e ao CNPq, que incentivaram a execução desta pesquisa através do convênio FINEP / PRONEX "Desenvolvimento e Otimização de Sistemas não-Convencionais de Tratamento de Águas Residuárias Constituídos de Reatores Biológicos e Físico-Químicos Dispostos em Série".

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
TABELA.....	v
LISTA DE SÍMBOLOS	vi
RESUMO	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA	2
2.1 Estudo da turbulência.....	2
2.2 Turbulência isotrópica.....	4
2.3 Características da turbulência isotrópica.....	5
2.4 Busca da turbulência isotrópica em laboratório.....	8
2.5 Túneis de ar e água.....	9
2.6 Tanque de grade oscilante.....	11
2.7 Dimensões do tanque e parâmetros de forma da grade.....	12
2.8 Amplitude e frequência de oscilação da grade.....	13
2.9 Turbulência quase-isotrópica no tanque.....	14
2.10 Medição da turbulência.....	15
2.11 Tanques encontrados na literatura.....	18
2.12 Tanque de grade oscilante do SHS-EESC-USP.....	23
3 OBJETIVO	25
4 MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1 Materiais.....	26
4.1.1 Construção do tanque de grade oscilante.....	26
4.1.1.1 Tanque em acrílico.....	29
4.1.1.2 Grade.....	30
4.1.1.3 Mecanismo de oscilação da grade.....	32
4.1.1.4 Vedação entre tanque e compartimentos.....	36
4.1.2 Instalação do equipamento.....	38
4.1.3 Equipamento de medição de velocidade turbulenta.....	40
4.2 Metodologia experimental.....	45
4.2.1 Localização das regiões de estudo no tanque.....	45

4.2.2	Definição de frequência e amplitude de oscilação da grade.....	46
4.2.3	Obtenção dos campos de velocidade turbulenta.....	48
4.2.4	Tensões médias de Reynolds.....	50
4.2.5	Caracterização da turbulência gerada.....	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5.1	Campos instantâneos de velocidade.....	51
5.2	Campos médios de velocidade.....	53
5.3	Campos de velocidade turbulenta.....	55
5.3.1	Distribuição horizontal de $\mathbf{u}$, $\mathbf{w}$ e $\mathbf{i}$	55
5.3.2	Característica da turbulência isotrópica: $\mathbf{w} / \mathbf{u} = 1$	59
5.3.3	Tensões de Reynolds.....	60
5.3.4	Decaimento espacial da turbulência.....	61
6	CONCLUSÕES	64
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65
	ANEXO.....	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
	APÊNDICE	

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - Franjas de interferência na intersecção dos feixes de laser.....	17
FIGURA 02 - Tanque gerador de turbulência do trabalho de ROMA (1988)....	23
FIGURA 03 - Mecanismo biela-manivela de oscilação da grade, no trabalho de ROMA (1988).....	24
FIGURA 04 - Ligação da grade pela parte superior do tanque, comumente apresentada na literatura.....	27
FIGURA 05 - Esquema básico de um mecanismo (sistema) de oscilação com haste inferior movimentando a grade.....	27
FIGURA 06 - Vista geral do tanque em seu desenho de projeto, em AutoCad..	28
FIGURA 07 - Tanque em acrílico, parafusado e vedado com silicone.....	29
FIGURA 08 - Cortes nas barras para montagem da grade.....	30
FIGURA 09 - Projeto da grade.....	31
FIGURA 10 - Montagem da grade.....	32
FIGURA 11 - Placas oscilantes montadas no interior dos compartimentos.....	33
FIGURA 12 - Vista superior da instalação de uma placa oscilante em um compartimento.....	33
FIGURA 13 - Projeto do sistema biela-manivela, para movimentação vertical das placas oscilantes.....	34
FIGURA 14 - Motor elétrico de 4 hp.....	35
FIGURA 15 - Painel de controle de rotação do motor.....	35
FIGURA 16 - Conjunto de redução em funcionamento.....	36
FIGURA 17 - Sistema de vedação entre os compartimentos laterais e o tanque com a grade.....	36
FIGURA 18 - Projeto do isolamento entre o tanque e os compartimentos laterais.....	37
FIGURA 19 - Equipamento instalado.....	38
FIGURA 20 - Registros de esfera de 3/4” para esvaziamento do tanque e dos compartimentos laterais.....	39
FIGURA 21 - Apoio na parte superior do tanque, com madeira e borracha para se evitar vibrações consideráveis.....	39

FIGURA 22 - Produção de luz pelo equipamento laser.....	41
FIGURA 23 - Plano de luz iluminando as partículas no interior do tanque.....	41
FIGURA 24 - Câmera instalada para obtenção das imagens do movimento do fluido.....	42
FIGURA 25 - Calibração da câmera feita com uma régua graduada.....	43
FIGURA 26 - Realização de um experimento, com a câmera conectada ao microcomputador com o programa Visiflow.....	44
FIGURA 27 - Tacômetro digital sendo usado para a medição da rotação do eixo que movimenta a grade.....	44
FIGURA 28 - Plano 1: região sobre a barra central da grade.....	45
FIGURA 29 - Plano 2: região entre barras da grade.....	46
FIGURA 30 - Regiões de estudo.....	47
FIGURA 31 - Procedimento para obtenção dos campos de velocidade turbulenta, $\mathbf{u}$ e $\mathbf{w}$	48
FIGURA 32 - Campo instantâneo de velocidade, para a POS 1 e frequência de 1 Hz.....	52
FIGURA 33 - Campo instantâneo de velocidade, para a POS 1 e frequência de 2 Hz.....	52
FIGURA 34 - Campo médio de velocidade para frequência de 1 Hz.....	54
FIGURA 35 - Campo médio de velocidade para frequência de 2 Hz.....	54
FIGURA 36 - Localização dos vetores usados na representação da distribuição horizontal da velocidade turbulenta.....	56
FIGURA 37 - Distribuição horizontal de $\mathbf{u}$, $\mathbf{w}$ e $\mathbf{i}$, para frequência de 1Hz.....	57
FIGURA 38 - Distribuição horizontal de $\mathbf{u}$, $\mathbf{w}$ e $\mathbf{i}$, para frequência de 2Hz.....	58
FIGURA 39 - Relação $\mathbf{w} / \mathbf{u}$ para frequências de 1 Hz e 2 Hz.....	60
FIGURA 40 - Tensões de Reynolds para frequências de 1 Hz e 2 Hz.....	61
FIGURA 41 - Decaimento espacial da turbulência na região do Plano 1.....	62
FIGURA 42 - Decaimento espacial da turbulência na região do Plano 2.....	62
FIGURA 43 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 1 e frequência 3 Hz	66
FIGURA 44 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 1 e frequência 4 Hz	66
FIGURA 45 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 2 e frequência 1 Hz	67

FIGURA 46 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 2 e frequência 2 Hz	67
FIGURA 47 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 2 e frequência 3 Hz	68
FIGURA 48 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 2 e frequência 4 Hz	68
FIGURA 49 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 3 e frequência 1 Hz	69
FIGURA 50 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 3 e frequência 2 Hz	69
FIGURA 51 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 3 e frequência 3 Hz	70
FIGURA 52 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 3 e frequência 4 Hz	70
FIGURA 53 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 4 e frequência 1 Hz	71
FIGURA 54 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 4 e frequência 2 Hz	71
FIGURA 55 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 4 e frequência 3 Hz	72
FIGURA 56 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 4 e frequência 4 Hz	72
FIGURA 57 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 5 e frequência 1 Hz	73
FIGURA 58 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 5 e frequência 2 Hz	73
FIGURA 59 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 5 e frequência 3 Hz	74
FIGURA 60 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 5 e frequência 4 Hz	74
FIGURA 61 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 6 e frequência 1 Hz	75
FIGURA 62 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 6 e frequência 2 Hz	75
FIGURA 63 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 6 e frequência 3 Hz	76
FIGURA 64 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 6 e frequência 4 Hz	76
FIGURA 65 - Campo médio de velocidade para Pos 1 e frequência 3 Hz.....	77
FIGURA 66 - Campo médio de velocidade para Pos 1 e frequência 4 Hz.....	77
FIGURA 67 - Campo médio de velocidade para Pos 2 e frequência 1 Hz.....	78
FIGURA 68 - Campo médio de velocidade para Pos 2 e frequência 2 Hz.....	78
FIGURA 69 - Campo médio de velocidade para Pos 2 e frequência 3 Hz.....	79
FIGURA 70 - Campo médio de velocidade para Pos 2 e frequência 4 Hz.....	79
FIGURA 71 - Campo médio de velocidade para Pos 3 e frequência 1 Hz.....	80
FIGURA 72 - Campo médio de velocidade para Pos 3 e frequência 2 Hz.....	80
FIGURA 73 - Campo médio de velocidade para Pos 3 e frequência 3 Hz.....	81
FIGURA 74 - Campo médio de velocidade para Pos 3 e frequência 4 Hz.....	81
FIGURA 75 - Campo médio de velocidade para Pos 4 e frequência 1 Hz.....	82
FIGURA 76 - Campo médio de velocidade para Pos 4 e frequência 2 Hz.....	82

FIGURA 77 - Campo médio de velocidade para Pos 4 e frequência 3 Hz.....	83
FIGURA 78 - Campo médio de velocidade para Pos 4 e frequência 4 Hz.....	83
FIGURA 79 - Campo médio de velocidade para Pos 5 e frequência 1 Hz.....	84
FIGURA 80 - Campo médio de velocidade para Pos 5 e frequência 2 Hz.....	84
FIGURA 81 - Campo médio de velocidade para Pos 5 e frequência 3 Hz.....	85
FIGURA 82 - Campo médio de velocidade para Pos 5 e frequência 4 Hz.....	85
FIGURA 83 - Campo médio de velocidade para Pos 6 e frequência 1 Hz.....	86
FIGURA 84 - Campo médio de velocidade para Pos 6 e frequência 2 Hz.....	86
FIGURA 85 - Campo médio de velocidade para Pos 6 e frequência 3 Hz.....	87
FIGURA 86 - Campo médio de velocidade para Pos 6 e frequência 4 Hz.....	87
FIGURA 87 - Distribuição horizontal de u , w e i , para o Plano 1 e frequência 3 Hz....	88
FIGURA 88 - Distribuição horizontal de u , w e i , para o Plano 1 e frequência 4 Hz....	89
FIGURA 89 - Distribuição horizontal de u , w e i , para o Plano 2 e frequência 1 Hz....	90
FIGURA 90 - Distribuição horizontal de u , w e i , para o Plano 2 e frequência 2 Hz....	91
FIGURA 91 - Distribuição horizontal de u , w e i , para o Plano 2 e frequência 3 Hz....	92
FIGURA 92 - Distribuição horizontal de u , w e i , para o Plano 2 e frequência 4 Hz....	93
FIGURA 93 - Relação w / u para o Plano 1 e frequências de 3 Hz e 4 Hz.....	94
FIGURA 94 - Relação w / u para o Plano 2 e frequências de 1, 2, 3 e 4 Hz.....	95
FIGURA 95 - Tensões de Reynolds para o Plano 1 e frequências 3 Hz e 4 Hz.....	96
FIGURA 96 - Tensões de Reynolds para o Plano 2 e frequências de 1, 2, 3 e 4 Hz.....	97

TABELA

TABELA 01 - Parâmetros de tanques de grades oscilantes encontrados na literatura.....	19
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

v	- velocidade turbulenta, cm/s
$u', v' \text{ e } w'$	- componentes da velocidade turbulenta nos eixos x, y e z, cm/s
V	- velocidade instantânea, cm/s
$U, V \text{ e } W$	- componentes da velocidade instantânea nos eixos x, y e z, cm/s
$\bar{V}$	- velocidade média, cm/s
$\bar{U}, \bar{V} \text{ e } \bar{W}$	- componentes da velocidade média nos eixos x, y e z, cm/s
i	- intensidade turbulenta ou velocidade turbulenta média, cm/s
$u, v \text{ e } w$	- componentes da intensidade turbulenta nos eixos x, y e z, cm/s
M	- espaçamento entre as barras da grade, cm
f	- frequência de oscilação da grade, Hz
S	- amplitude de oscilação da grade, cm
z	- distância do ponto até o centro de oscilação da grade, cm
C	- constante que depende da geometria da grade
d	- dimensão da seção transversal da grade (lado ou diâmetro), cm

RESUMO

Este trabalho representa o início de uma série de pesquisas que visam o estudo da turbulência e de sua relação com processos de mistura e trocas gasosas entre ar e água, através de experimentos com grades oscilantes. Seu objetivo foi o projeto e a construção de um tanque de grade oscilante, equipamento que gera turbulência com intensidade controlável. Após a construção do tanque, experimentos para medições de velocidade turbulenta foram feitos, com uso de uma técnica de velocimetria a laser. Uma grade de 9x9 barras foi usada na agitação do fluido, com uma amplitude de oscilação de 3 cm, para 4 diferentes frequências de oscilação. Adquiriu-se 9600 imagens do movimento do fluido, em 6 regiões do tanque, para a obtenção dos campos de velocidade turbulenta, calculados através do software **Visiflow** e de um programa computacional desenvolvido neste trabalho. Os gráficos criados a partir dos campos possibilitaram a observação do decaimento espacial da turbulência e da região de sua produção. Os campos médios de velocidade mostraram-se bem inferiores aos campos instantâneos, indicando a existência de baixo escoamento médio do fluido. As condições de isotropia e a homogeneidade espacial da turbulência são mais aproximadas à medida que se afasta da grade. A intensidade turbulenta produzida é diretamente relacionada com a frequência de oscilação. O número de imagens para a obtenção de uma média representativa da velocidade turbulenta neste equipamento parece ser dependente da frequência de oscilação da grade. Isto aponta para a necessidade de estabelecer corretamente as condições para os cálculos estatísticos em escoamentos turbulentos.

Palavras-chave: grades oscilantes, turbulência , velocimetria a laser.

ABSTRACT

This work presents the project and construction of a tank with an oscillating grid, equipment which provides for the experimental studies of turbulence and its relation to mixing processes and gas transfer across fluid interface. Experiments were carried out with the use of digital particle image velocimetry technique, to investigate the properties of the produced turbulence. A grid made of 9x9 square bars was used to stir the water, with a stroke of 3 cm and 4 different oscillation frequencies. A number of 9600 images were acquired, in 6 regions of the tank, for the generation of the turbulent velocity fields through the software **Visiflow** and a computational program developed in this work. The results showed that the current equipment, with a new concept for the grid oscillation system, can be conveniently useful for studies in this research field. Average velocity fields appeared to be considerably smaller than the instantaneous velocity fields, which leads to the existence of nearly-stationary turbulence in the water volume. Nearly-isotropic turbulence and spatial homogeneity were approximate as the measurements distanced from the grid. The turbulent intensity was directly dependent on the oscillation frequency. The spatial decay of the turbulence and the region near the grid where it is produced could also be observed. The number of images necessary for the calculus of reliable root-mean-square turbulent velocities seems to be dependent on the oscillation frequency of the grid. It results in the necessity of establishing correct statistical analysis of turbulent flows.

Keywords: oscillating grids, turbulence, digital particle image velocimetry

1 INTRODUÇÃO

Grande quantidade de processos importantes em águas paradas e correntes, que influem em sua qualidade, dependem diretamente das trocas gasosas entre ar e água. Devido ao importante papel desempenhado pelos gases solúveis nos corpos de água, são necessárias avaliações da transferência de gases tóxicos, orgânicos e inorgânicos, entre os meios aéreo e aquático. Para a qualidade da água, por exemplo, o oxigênio representa importante papel, uma vez que o mesmo supre necessidades bioquímicas de processos que nela ocorrem. Já para questões climáticas, o gás carbônico, entre outros compostos, desempenha papel central, pois as trocas existentes deste gás entre o ar e os oceanos (cerca de $\frac{3}{4}$ da superfície terrestre) representam importante fator na definição do clima no planeta. De acordo com o artigo O PERIGO vem do Ártico (2001), 14% de todo o gás carbônico existente na Terra está armazenado nas geleiras do solo Ártico, que vêm se derretendo devido ao calor anormal dos últimos anos. Isto representa centenas de gigatons deste gás, contra cerca de 6 gigatons de poluentes anualmente produzidos pela atividade industrial humana. O desconhecimento da troca destes gases na interface ar-água gera incertezas quanto a previsões de qualidade da água e condições climáticas do planeta.

Em Hidráulica Ambiental, as transferências de gases entre ar e água tornam-se cada vez mais importantes, motivo da proposta deste trabalho. Para simular condições de escoamento turbulento, regime no qual acontece a maioria das situações encontradas no ambiente, construiu-se um tanque de grade oscilante, equipamento cada vez mais presente em pesquisas que estudam turbulência e seu papel na transferência de gases entre fluidos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Estudo da turbulência

“A compreensão e a modelagem dos fenômenos turbulentos têm desafiado a imaginação e a criatividade dos cientistas e engenheiros por muito tempo. A própria definição de turbulência é um assunto em aberto, sendo-lhe usualmente atribuída uma série de características próprias para sua identificação.” (SCHULZ, 2001, p.XV)

Turbulência, palavra originada do latim *turbulentia*, entre outras tem as conotações de *agitação, desordem, motim* (FERREIRA, 1999). Para HOUAISS & VILLAR (2001), turbulência é "*movimento de um fluido em que há flutuação irregular, aleatória, da velocidade e pressão locais.*" Menos geral que a primeira, também esta segunda definição não tem rigor científico.

TAYLOR & KARMAN (1937) definiram turbulência como sendo *um movimento irregular que geralmente acontece em fluidos, gases ou líquidos, quando estes escoam próximos a superfícies sólidas ou mesmo quando camadas adjacentes de um mesmo fluido escoam umas sobre as outras.* Para a ocorrência deste fenômeno, diferentes partes do fluido precisam ter movimentos também diferentes, com necessidade de o escoamento apresentar condições de irregularidade. Estas características de irregularidade impedem a descrição, em detalhes, do movimento de um escoamento turbulento como função do tempo e do espaço. Contudo, parece possível a descrição de variáveis do movimento do fluido, como por exemplo, velocidade, pressão e temperatura, em função de valores médios obtidos de suas flutuações. Turbulência então parece ser não um fenômeno totalmente irregular, pois pode ser tratada de forma estatística. Desta forma, surge nova definição para turbulência: *o movimento turbulento de um fluido é condição irregular do escoamento no qual várias quantidades apresentam variação aleatória em tempo e espaço, mas das quais valores médios podem ser obtidos estatisticamente.* HINZE (1959)

A grande causa desta busca em desvendar os mistérios da turbulência, a começar por sua própria definição, vem do valor prático desse desafio: estudos de muitos problemas técnicos, industriais e ambientais que envolvem turbulência a cada vez requerem melhores e mais precisas soluções, que incluam características detalhadas do movimento turbulento em questão. Existe, então, a necessidade de avanço no entendimento da turbulência, para que esses problemas reais que a envolvem possam ser modelados com melhor representação. Como usualmente é comentado em trabalhos de investigação nessa linha de pesquisa, o aprimoramento da simulação em laboratório desses problemas é função do avanço no entendimento da turbulência e do progresso da computação, que disponibiliza processadores capazes de simular um fluido em movimento turbulento e calcular suas variáveis, em níveis consideráveis de velocidade e precisão.

HUNT et al. (2001) apresentam uma revisão do desenvolvimento das pesquisas em turbulência nas últimas décadas, principalmente nos anos 90, baseada em trabalhos realizados no Isaac Newton Institute, Cambridge - UK, entre janeiro e junho de 1999. A partir dessa revisão, esse trabalho busca resposta para a questão: existem vários ou apenas um problema de turbulência? A pergunta resume a possibilidade de haver ou não características comuns da turbulência em suas diferentes manifestações, de ser possível universalizar esse fenômeno e suas propriedades (estatisticamente analisadas) para todos os tipos de escoamento turbulento plenamente desenvolvido. Os autores mostraram que, por um lado, pesquisas apresentam evidências e melhores explicações dinâmicas – embora sem teorias completas – para a ocorrência em todos os escoamentos turbulentos de aspectos qualitativos similares, referentes à micro-escala. Por outro lado, além de aspectos qualitativos referentes à macro-escala (grandes turbilhões) divergirem entre um tipo de escoamento e outro, aspectos quantitativos da micro-escala de alguma forma dependem da grande-escala do escoamento. Assim, com evidências favoráveis à não-universalidade, as conclusões obtidas são que o progresso conseguido nos últimos anos para melhor

entendimento da turbulência é indiscutível, porém, ainda estão distantes respostas completas para o fenômeno. Devido à atual ênfase em estudos específicos para os diferentes tipos de escoamento, tem havido diversidade de conceitos e modelos para representação da turbulência.

Esta diversidade esclarece a tendência dos pesquisadores em criar especialidades para estudo das diversas formas de ocorrência do fenômeno físico da turbulência. As diferenças entre um escoamento e outro – como as propriedades do fluido e sua velocidade, a superfície sobre a qual ele escoar, as condições de contorno e a forma com que a turbulência é gerada (escoamento sobre superfície rugosa, mudança de direção do escoamento, sólido imerso no escoamento, etc) – têm separado pesquisas e formulado teorias, modelos e métodos computacionais de simulação, cada qual apresentado com suas restrições de uso e validado para determinados tipos de escoamento ou formas de produção de turbulência.

Dentro deste universo de problemas, o estudo da turbulência isotrópica, uma de suas formas relativamente fácil de ser analisada matematicamente se comparada às demais (DAVIES, 1972), compreende uma linha de pesquisa que iniciou-se há mais de meio século e tem apresentado grande número de trabalhos dedicados ao entendimento das propriedades da turbulência.

2.2 Turbulência isotrópica

O estudo de turbulência isotrópica teve início com TAYLOR (1935b) que a definiu como condição em que todos os valores médios das funções de variáveis de escoamento deveriam ser independentes de translação, rotação e reflexão dos eixos de referência. Desde então, por ser a classe mais simples de turbulência, onde é necessário o menor número de parâmetros e relações para descrevê-la, a turbulência isotrópica tem sido largamente estudada para melhor entendimento de suas características e de sua relação com processos

de misturas de fluidos, misturas entre fluidos e sólidos, dispersão em meio turbulento e trocas gasosas entre ar e água. Além disso, a existência de características comuns a todos os escoamentos turbulentos permite que a compreensão da turbulência isotrópica esclareça questões referentes às formas mais complexas de turbulência. (TOWNSEND, 1976)

2.3 Características da turbulência isotrópica

A relativa simplicidade do equacionamento da turbulência isotrópica pode ser explicada a partir de alguns conceitos gerais de turbulência, com a velocidade como variável em estudo. A velocidade é a variável comumente trabalhada no estudo das propriedades da turbulência. Sua determinação vetorial (magnitude, direção e sentido) em vários pontos, combinada com ou mesmo obtida a partir de algum método de visualização do escoamento, permite uma boa descrição do movimento do fluido.

Parte-se então do conceito fundamental de velocidade turbulenta, como sendo a flutuação da velocidade em torno de seu valor médio. O valor da velocidade turbulenta é obtido de:

$$v' = V - \bar{V} \quad (1)$$

onde v' é a velocidade turbulenta, V é a velocidade instantânea, e $\bar{V}$ é a velocidade média, em algum ponto do escoamento.

Adotando-se como referência o sistema cartesiano de coordenadas e trabalhando com três componentes da velocidade no espaço tem-se, para os eixos x , y e z , respectivamente:

$$u' = U - \bar{U} \quad (2)$$

$$v' = V - \bar{V} \quad (3)$$

$$w' = W - \bar{W} \quad (4)$$

Mas a velocidade turbulenta não é estudada em sua forma instantânea. A análise de um escoamento turbulento não pode ser feita a partir de apenas uma flutuação da velocidade que ocorre em determinado instante. Por ser um movimento caótico (irregular), a turbulência requer tratamento estatístico, a partir de valores médios de suas variáveis em estudo. Assim, da mesma forma que é importante a obtenção da velocidade média a partir de valores instantâneos de velocidade, da forma

$$\bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n} \quad (5)$$

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad (6)$$

$$\bar{W} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{n} \quad (7)$$

(onde n é o número de medidas obtidas para a velocidade instantânea), também é necessário tratar a velocidade turbulenta a partir de seu valor médio. Porém, a média simples das flutuações instantâneas, calculada como para a velocidade, seria igual a zero. Isto é, usando-se o eixo x como referência, as flutuações positivas (quando $U > \bar{U}$) e as negativas (quando $U < \bar{U}$) seriam adicionadas e se anulariam (o mesmo acontecendo nos eixos y e z). Para solução deste problema, DRYDEN & KUETHE (1930) apud HINZE (1959) introduziram para a média das flutuações instantâneas um conceito que desde então se tornou convenção. A velocidade turbulenta média passou a ser obtida a partir da raiz quadrada da média quadrática das flutuações, ou seja:

$$u = \sqrt{u'^2} \quad (8)$$

$$v = \sqrt{v'^2} \quad (9)$$

$$w = \sqrt{w'^2} \quad (10)$$

sendo:

$$\overline{u'^2} = \frac{\sum_{i=1}^n u'^2}{n} \quad (11)$$

$$\overline{v'^2} = \frac{\sum_{i=1}^n v'^2}{n} \quad (12)$$

$$\overline{w'^2} = \frac{\sum_{i=1}^n w'^2}{n} \quad (13)$$

A velocidade turbulenta média geralmente é apresentada como u_{RMS} , v_{RMS} e w_{RMS} , do inglês *Root Mean Square*. Observa-se que as notações u , u' , U e $\bar{U}$, não seguem uma convenção única, sendo diferentes para cada trabalho. HINZE (1959), por exemplo, utiliza u' não para a flutuação instantânea, mas para a média das flutuações. O mesmo acontece para as componentes da velocidade nos eixos y e z .

Baseando-se nestes conceitos, apresenta-se duas características importantes da turbulência isotrópica:

- Todas as componentes da velocidade turbulenta média em um ponto são iguais. Isto significa que

$$u = v = w \quad (14)$$

A simplificação apresentada acima no sistema cartesiano pode também ser feita em qualquer sistema de eixos adotado. Esta vantagem para o equacionamento da turbulência foi recentemente comentada por SCHULZ (2001, p.5) “... o fato de considerar principalmente a turbulência isotrópica permite que as questões evidentes de tridimensionalidade possam ser elegantemente desviadas utilizando o ponto de vista da simetria esférica. Então, por exemplo, uma escala de comprimento tem o mesmo valor em qualquer direção e operações de cálculo passam a ser simplificadas considerando apenas um elemento diferencial (em vez de três).”

- Como as flutuações são aleatórias no espaço, não existe relação entre suas componentes em diferentes eixos de coordenadas. Portanto, a média das tensões de cisalhamento, também conhecidas como tensões de Reynolds, é igual a zero. O equacionamento é dado por.

$$\overline{u' \cdot v'} = 0 \quad (15)$$

$$\overline{u' \cdot w'} = 0 \quad (16)$$

$$\overline{v' \cdot w'} = 0 \quad (17)$$

É importante salientar que o cálculo da média da velocidade turbulenta pode ser feito de diferentes maneiras. Sua média pode ser temporal ou espacial. No caso da turbulência isotrópica (interesse deste trabalho), as médias são temporais, obtidas com uma descrição Euleriana do escoamento, onde as velocidades medidas referem-se a pontos fixos, cujas posições no espaço não variam com o tempo.

2.4 Busca da turbulência isotrópica em laboratório

Com os objetivos de se entender turbulência e relacioná-la aos diferentes processos de transporte de calor e massa que ocorrem em fluidos, ao longo dos anos, pesquisadores têm construído diferentes equipamentos na busca da produção de turbulência isotrópica. Porém, apesar de todo o esforço, esta turbulência só pode ser aproximada, e segundo SRDIC et al. (1996), sua perfeita isotropia é apenas hipotética e nunca atingida em escoamentos reais ou experimentos. Desta forma, a turbulência gerada em pesquisas é chamada quase-isotrópica¹.

A produção de turbulência quase-isotrópica em laboratório é conseguida com diferentes equipamentos que têm características particulares e apresentam vantagens e desvantagens entre si. Provavelmente, os equipamentos mais explorados ao longo da história

do estudo da turbulência isotrópica têm sido os túneis de ar e água, utilizados por pesquisadores por mais de meio século. Por outro lado, tanques de grades oscilantes, também chamados tanques de grelhas oscilantes, têm sido a cada vez mais empregados em pesquisas atuais sobre turbulência isotrópica.

2.5 Túneis de ar e água

Ao longo de décadas, a aproximação experimental de turbulência isotrópica usualmente tem sido feita através de escoamento em túneis de água e, especialmente, de vento, fluido este preferido em relação à água, segundo TOWNSEND (1976), por permitir a obtenção de escoamento turbulento com maior facilidade. Nesses túneis, é colocada, em posição perpendicular ao escoamento, uma grade formada por uma malha de barras sólidas. Segundo COMTE-BELLOT & CORRSIN (1966), o uso de grade imersa em um escoamento para obtenção de turbulência relativamente simples teve início mesmo antes dos estudos de TAYLOR (1935b) sobre turbulência isotrópica, com o trabalho de SIMMONS & SALTER (1934), seguido pelo de TAYLOR (1935b) e os trabalhos de medição de turbulência de DRYDEN et al. (1937), CORRSIN (1942), BATCHELOR & TOWNSEND (1947, 1948), BAINES & PETERSON (1951), TSUJI & HAMA (1953), GRANT & NISBET (1957) e WYATT (1955), entre outros.

Nesse tipo de equipamento, a geração da turbulência e suas características são assim explicadas por DE SILVA & FERNANDO (1994): a turbulência é gerada atrás da grade pelo desenvolvimento de jatos (parte do escoamento que passa entre as barras) e de esteiras (parte do escoamento que se depara com elas), que são, ainda, fortalecidos pela presença das tensões de cisalhamento. Se a grade obedece a certos parâmetros de forma, estes jatos e esteiras se fundem uns aos outros a uma certa distância à jusante de onde foram originados (grade). Nessa região, as tensões de cisalhamento se tornam desprezíveis e tem início o

¹ Turbulência quase-isotrópica: do inglês *nearly-isotropic turbulence*.

decaimento da turbulência. A região de transição entre o desenvolvimento do escoamento turbulento e o decaimento da turbulência não é bem definida, mas se localiza, segundo HINZE (1959), aproximadamente 20M à jusante da origem da turbulência, sendo M (*Mesh*) o espaçamento entre as barras da grade. Seguindo-se adiante, no sentido do escoamento, chega-se à região onde a turbulência é considerada praticamente homogênea em planos perpendiculares ao escoamento, com a razão entre as velocidades turbulentas axial (no sentido do escoamento) e transversal (em qualquer eixo perpendicular ao escoamento) variando entre 1,05 e 1,35. Forçosamente, esta turbulência é dita isotrópica, para fins de pesquisa.

Porém, COMTE-BELLOT & CORRSIN (1966) mostraram que essa razão entre as velocidades turbulentas axial e transversal, ocorrida provavelmente a 40M ou 50M à jusante da grade, poderia estar mais próxima da unidade se o escoamento passasse por contração de 1,27 vezes na área da seção transversal do túnel. Isso implicaria em melhor validade de comparação entre experimentos de túneis com grades e teorias de turbulência isotrópica. Contudo, mesmo após esse trabalho, experimentos seguintes foram feitos com produção de turbulência isotrópica em túneis sem contração. Segundo TOWNSEND (1976), os erros apresentados em experimentos sem a contração não afetam significativamente as conclusões dos trabalhos.

Durante décadas, experimentos com túneis de ar e água têm sido úteis ao estudo e ao equacionamento da turbulência, em particular da turbulência isotrópica. Todavia, esses equipamentos possuem certas características físicas que interferem de forma negativa no estudo da turbulência por eles próprios gerada. Uma dessas características diz respeito às dimensões desses equipamentos. Por se tratar de túneis ou canais, um considerável espaço do laboratório é ocupado por esses equipamentos. Como exemplo, tem-se os equipamentos dos trabalhos de COMTE-BELLOT & CORRSIN (1966) com mais de 12 m de comprimento, de BUDWIG et al. (1985) com 4,2 m, de ITSWEIRE et al. (1986) com 5 m, e

de MOHAMED & LA RUE (1990) com 6,71 m. Uma outra característica dos túneis e canais é a impossibilidade da geração de turbulência pura no equipamento, isto é, não é possível gerar turbulência sem que haja escoamento do fluido. Isto significa que o estudo isolado da turbulência e de sua influência em outros fenômenos estudados em Mecânica dos Fluidos e Fenômenos de Transportes – tais como dispersão em meio turbulento, transferência gasosa na interface ar-água, mistura de fluidos, etc. – fica comprometido pela existência de outras variáveis, indesejáveis, pertencentes ao escoamento. SRDIC et al. (1996) comentam que devido ao rápido decaimento da turbulência, o uso de túneis no estudo de certos aspectos da turbulência isotrópica, como a dispersão, se torna impraticável sem o comprometimento de sua precisão e versatilidade.

Paralelamente aos vários trabalhos de geração e medição de turbulência quase-isotrópica utilizando túneis de ar e de água, pesquisadores têm recorrido a outro equipamento na busca dessa forma de turbulência em laboratório. Representando uma boa alternativa para eliminar as características indesejáveis apresentadas pelos túneis, o tanque de grade oscilante é um equipamento mais compacto, que gera turbulência de intensidade controlável, com velocidade média do fluido praticamente nula (sem existência de escoamento médio) e apresenta um volume bem definido de controle do fluido (geralmente água). O tanque de grade oscilante tem sido a cada vez mais utilizado em pesquisas que envolvem geração, estudo e aplicação de turbulência.

2.6 Tanque de grade oscilante

Embora o trabalho de ROUSE (1939) seja, segundo CHENG & LAW (2001), o primeiro a utilizar um tanque de grade oscilante para geração de turbulência em laboratório, encontram-se na maior parte da literatura os trabalhos das décadas de 60 e 70 como pioneiros na utilização deste equipamento. BOUVARD & DUMAS (1967), THOMPSON &

TURNER (1975), e HOPFINGER & TOLY (1976) geralmente são os primeiros trabalhos citados nos estudos mais recentes envolvendo tanques de grade oscilante.

Este equipamento consiste em um tanque usualmente construído com material transparente (vidro ou acrílico) para melhor visualização do experimento. Dentro desse tanque, imersa no fluido que se deseja estudar, existe uma malha de barras, de seção retangular ou circular, formando uma grade (ou mais de uma, e neste caso é denominado tanque de grades oscilantes). Essa grade, posicionada normalmente em um plano horizontal a uma certa distância abaixo da superfície do líquido, é oscilada verticalmente por um equipamento externo ao tanque. Parâmetros como frequência e amplitude de oscilação, bem como seção transversal das barras da grade, espaçamento entre elas e seu comprimento, devem obedecer a certos valores limites para que seja atingida a produção da turbulência quase-isotrópica no tanque.

2.7 Dimensões do tanque e parâmetros de forma da grade

Na literatura, as dimensões do tanque e os parâmetros de forma da grade não têm sido padronizados, apesar de também não divergirem consideravelmente. Pesquisas mais recentes têm mantido formas do tanque e dimensões da grade, e mesmo reutilizado equipamentos de outros trabalhos (tanques, grades, e o mecanismo de oscilação das grades). O uso de grades semelhantes às do trabalho de THOMPSON & TURNER (1975) é preferido pelos pesquisadores, o que permite comparações de resultados, formulações para turbulência e conclusões de diferentes trabalhos. Embora ainda existam trabalhos que em seus experimentos façam uso de grades consideravelmente diferentes destas, chega-se à conclusão que essas diferenças afastam a isotropia da turbulência gerada no tanque. A falta de isotropia é devido ao fato de certos parâmetros de forma da grade terem influência direta nas características da turbulência gerada no tanque.

Em seu trabalho com escoamento através de uma grade fixa, CORRSIN (1963) concluiu que somente quando a solidez da grade é suficientemente baixa, os jatos formados atrás das grades se fundem sem mudar sua direção. Quando a solidez é alta, os jatos se juntam e se tornam instáveis. Segundo HOPFINGER & TOLY (1976), a solidez acima da qual essa instabilidade é observada é aproximadamente de 40%. Entende-se como solidez a relação entre a área horizontal ocupada pelas barras da grade e a área total da superfície do tanque.

Talvez devido às limitações de espaço ou de material, ou mesmo devido à busca de dimensionamento ótimo que venha a padronizar este equipamento, diferentes medidas para os tanques são encontradas. Apesar de existirem referências a tanques de seção circular na literatura, como o de VOROPAYEV & FERNANDO (1996), com 16 cm de diâmetro e 25 cm de altura, e de seção retangular (ATKINSON & WOLCOTT, 1990), os tanques de seção quadrada são, sem dúvida, os mais utilizados.

2.8 Amplitude e frequência de oscilação da grade

Na obtenção da turbulência quase-isotrópica no fluido do equipamento, amplitude e frequência de oscilação da grade no tanque são duas variáveis importantes, tanto quanto as medidas do tanque e da grade,. THOMPSON & TURNER (1975) em seu trabalho concluíram que a variação espacial da velocidade turbulenta, também conhecida como decaimento espacial da turbulência, é função de certas variáveis do equipamento. Nesta pesquisa, não se levando em consideração a forma da grade, 50% de seus dados se ajustaram bem à equação:

$$u = 1,4 \cdot f \cdot S^{2,5} \cdot z^{-1,5} \quad (18)$$

onde:

u - velocidade RMS no plano horizontal;

f - frequência de oscilação d grade em Hz;

S - amplitude de oscilação da grade;

z - distância do ponto de medição da velocidade à origem virtual da turbulência (centro de oscilação da grade).

Posteriormente, HOPFINGER & TOLY (1976) introduziram a distância entre barras, M (*Mesh*), como variável importante neste equacionamento, da forma:

$$u = C \cdot S^{3/2} \cdot M^{1/2} \cdot f \cdot z^{-1} \quad (19)$$

onde C é uma constante que depende da geometria da grade, igual a 0,25 para $\frac{M}{d} = 5$, como foi o caso do seu trabalho. A variável d corresponde à espessura das barras (de seção quadrada) que formam a grade.

Comparando-se as equações (18) e (19), nota-se que há divergências em relação ao expoente de z , com o trabalho de HOPFINGER & TOLY (1976) apresentando um decaimento mais lento para a componente horizontal da velocidade turbulenta. Um grande número de trabalhos com tanques de grades oscilantes estudam a definição desse expoente. Explora-se também a possibilidade desse expoente não ser constante e de não haver, então, apenas uma lei de decaimento da turbulência.

2.9 Turbulência quase-isotrópica no tanque

As equações (18) e (19) expressam a busca de pesquisadores ao entendimento da turbulência no tanque de grade oscilante. Estes equacionamentos relacionam a velocidade turbulenta horizontal u e a distância, expressa por z , entre o ponto de medição desta velocidade e a origem da turbulência (assumida como o centro de oscilação da grade), e mostram o decaimento da velocidade turbulenta à medida que suas medições se afastam da grade, obviamente se mantidos constantes os demais parâmetros, S , M e f . Esta

característica, conhecida como decaimento da turbulência, é importante para localização e quantificação da turbulência no interior do volume de controle desse equipamento.

A turbulência gerada próxima à grade não é considerada quase-isotrópica. Nessa região, o alto grau de agitação do fluido, induzido pela oscilação da grade em apenas uma direção, é formado por jatos e vórtices que preferencialmente seguem a direção vertical. À medida que se distanciam da grade, os efeitos da viscosidade da água resultam na conversão da energia cinética do escoamento em calor, o que faz do movimento turbulento um dissipador de energia. Se não existir uma fonte contínua de energia em todo o volume de água do tanque, agindo como gerador de turbulência, esta energia decairá com o aumento de z . Juntamente com este decaimento e resultante também dos efeitos viscosos do fluido, há transferência de quantidade de movimento das partículas de uma direção para outra. Então o movimento turbulento se assemelha nas diferentes direções, e as características estatísticas da turbulência praticamente não têm preferência de direção. Gera-se assim turbulência quase-isotrópica, a uma certa distância da grade oscilante. Esta forma de turbulência, admitida como isotrópica, facilita seu equacionamento e o estudo de sua relação com os fenômenos de transporte que ocorrem no fluido.

2.10 Medição da turbulência

O estudo teórico do movimento turbulento em um fluido é tarefa complexa. A verificação de modelos, novos conceitos e idéias, relacionados a algum movimento turbulento, é facilitada quando se inclui no estudo alguma técnica de medição e visualização da velocidade turbulenta.

A região de medição da velocidade no interior do tanque geralmente está compreendida em algum local entre a grade (caso esteja posicionada em plano horizontal) e a superfície do fluido. Uma vez definida a região de interesse do estudo, podem ser empregadas diferentes técnicas de medição de velocidade, cada qual com seu respectivo

equipamento. Por representar a flutuação da velocidade em torno de seu valor médio, a velocidade turbulenta requer apuradas técnicas de medição, que utilizem equipamentos com precisão compatível com a escala de velocidade turbulenta no tanque de grade oscilante. Ao longo da história deste equipamento, três técnicas de medição se destacaram e foram largamente utilizadas. A apresentação destas técnicas segue a ordem cronológica de seu surgimento e, atualmente, todas elas são usadas.

- Anemometria de filme quente (*Hot-film Anemometry*)

Esta técnica utiliza um elemento diminuto (filme ou película), aquecido eletricamente. Um circuito eletrônico é usado para manter constante a temperatura deste elemento e sentir a taxa de aquecimento. Esta taxa pode ser relacionada, através de calibração à velocidade de escoamento, que por outro lado resfria o filme. Como a massa térmica do filme é muito pequena, a sua resposta às flutuações de velocidade do escoamento é muito rápida. Por esse motivo, o anemômetro de filme quente é utilizado para medições de quantidades turbulentas.

- *Laser Doppler Velocimetry* - LDV

O surgimento desta técnica representou grande avanço na área de medições em escoamento. Medidas de velocidade turbulenta feitas com este equipamento são diretas e não requerem calibração. O volume de água necessário para medição em um ponto é muito pequeno (algo em torno de um cubo com 0,2 mm de lado), e sua maior vantagem em relação à anemometria de filme quente está no fato de nenhum instrumento precisar ser inserido no escoamento (técnica não-intrusiva). A necessidade de transparência no canal do escoamento, para passagem do feixe de luz do laser, o custo e a complexidade do equipamento são inconvenientes dessa técnica. (DOEBELIN, 1990)

Em resumo, esta técnica consiste em focalizar dois feixes de laser, com mesmo comprimento de onda, em um ponto onde se deseja medir a velocidade, formando franjas de

interferência (faixas de alta e baixa intensidade de luz) no volume de intersecção dos feixes, como é mostrado na FIGURA 01.

FIGURA 01 - Franjas de interferência na intersecção dos feixes de laser.

Quando uma partícula carregada pelo fluido passa através desta franja, ela reflete a luz do laser. Um fotodetector capta essa luz refletida, cuja intensidade varia com frequência igual à velocidade da partícula dividida pelo espaçamento da franja. Admitindo-se que a velocidade da partícula seja igual à do fluido, e fazendo-se uma série de medições em vários pontos, obtém-se uma boa descrição do escoamento e da variação de sua velocidade turbulenta.

- *Particle Image Velocimetry - PIV*

Esta técnica ótica também não-intrusiva mede velocidade em uma seção bidimensional de escoamentos, e não apenas em um ponto, como na técnica LDV. Na técnica PIV, um equipamento laser emite um feixe de luz que, expandido na forma de um plano, é introduzido no escoamento. Uma câmera fotográfica, localizada perpendicularmente ao plano de luz, é utilizada na aquisição de fotos das partículas presentes no fluido, que estão se movendo e sendo iluminadas no interior desta folha. Se o intervalo de tempo entre as fotos é conhecido e se em cada foto uma partícula está em uma posição, a velocidade dessa partícula pode ser calculada. Através de duas fotos consecutivas, divide-se o espaço percorrido pela partícula pelo intervalo de tempo entre as fotos. Como

existe um grande número de partículas presentes no fluido (partículas naturais ou traçadores inseridos no fluido), uma análise de correlação faz o reconhecimento das mesmas partículas nas diferentes fotos. Com a obtenção dos vetores velocidade em diversos pontos em um plano do fluido, um campo de velocidades é obtido.

A análise de correlação, o cálculo das velocidades e a obtenção do campo são efetuados por um software. No caso da aquisição de fotos ser feita por câmera fotográfica digital, essa técnica é chamada *Digital Particle Image Velocimetry* (DPIV), e o tempo para obtenção dos campos de velocidade é consideravelmente reduzido (as fotos são diretamente transferidas da câmera para o computador e analisadas pelo software).

2.11 Tanques encontrados na literatura

Devido à inexistência de padronização para tanque de grade oscilante, com definição de sua forma, dimensões, geometria e movimento da grade, foi feita uma revisão neste sentido, resumida na TABELA 1. Esta trás, também, a técnica de medição de velocidade turbulenta empregada.

TABELA 01 - Parâmetros de tanques de grades oscilantes encontrados na literatura

TRABALHO	DIMENSÕES DO TANQUE		GRADE		OSCILAÇÃO		TÉCNICA DE MEDIÇÃO
	Área (cm ²)	Altura (cm)	Barras (cm ²)	Mesh (cm)	Amplitude (cm)	Frequência (Hz)	
BOUVARD & DUMAS (1967)	67,5 x 67,5	100	placa perfurada 4,55 (diâm. furos)		0 - 8	-	Anemometria de filme quente
THOMPSON & TURNER (1975)	25,4 x 25,4	46	1,0 x 1,0 0,952 (diâm.)	5	1 1,4; 1,45	3,33 2,78; 5	Anemometria de filme quente
HOPFINGER & TOLY (1976)	67,5 x 67,5 80 x 80	100	1,0 x 1,0 2,0 x 2,0	5 10	4 9	2 - 6	Anemometria de filme quente
McDOUGAL (1979)	25,4 x 25,4	46	1,0 x 1,0	5	1	1 - 10	LDV
BRUMLEY & JIRKA (1987)	50 x 50	40	1,3 x 1,3	6,35	1,3 - 15	0,5 - 5	Anem. filme quente
NOKES (1988)	25,4 x 25,4	60	1,0 x 1,0	5	0,77 - 4,9	4	-
ATKINSON & WOLCOTT (1990)	120 X 30	40	1,0 X 1,0	5	1	3; 4; 5	*LDA
MATSUNAGA et al. (1991)	100 x 25	40	1,0 X 1,0	5	4; 8	2 - 6	Anem. filme quente
DE SILVA & FERNANDO (1992)	26 X 26	60	0,9 x 0,9	2,93; 4,76; 6,2	0,85; 2,1	1 - 5	LDV
DE SILVA & FERNANDO (1994)	25,4 x 25,4 45,7 x 45,7	47 45,7	0,9 x 0,9 1,2 x 1,9	4,76 7,97	0,85 ; 2,1	0 - 7	LDV
CASSON et al. (1994)	-	-	0,635 x 0,635	3,18	1,91 0,64	0,25 0,75	LDV
SRDIC et al. (1996)	36 X 36	58	1,0 X 1,0	5	0 - 5,5	0 - 5	LDV

TABELA 01 - Parâmetros de tanques de grades oscilantes encontrados na literatura

TRABALHO	DIMENSÕES DO TANQUE		GRADE		OSCILAÇÃO		TÉCNICA DE MEDIÇÃO
	Área (cm ²)	Altura (cm)	Barras (cm ²)	Mesh (cm)	Amplitude (cm)	Frequência (Hz)	
VOROPAIEV & FERNANDO (1996)	16 (diâm.)	25	0,071 0,071 0,051	0,318 0,0,635 0,18	0,045 - 0,45	2 - 40	Câmera filmadora
BRUNK et al. (1996)	20 x 40	100	0,267 (diâm.)	1,27	0,5 - 4	1 - 8,5	**ADV
LYN (1997) apud CHENG & LAW (2001)	25,4 X 25,4	48	0,95 X 0,95	4,8	5	4,6	PIV
KIT et al. (1997)	47 x 47	45	1,93 x 1,93	8	3,2	2,15; 2,9; 4,3	Anem. filme quente
SHY et al. (1997)	15 x 15 30 x 30	30 60	0,6 x 0,6	3	2	1 - 10	LDV
DE SILVA & FERNANDO (1998)	150 x 27	46	1 x 1	4,76	0,4 - 1,5	3 - 5	LDV
BRUNK, B. K. et al (1998)	20 x 40	25	0,267 (diâm.)	1,27	0,5 - 4	0 - 8	ADV
LIEM et al. (1999)	11,5 x 11,5	15	0,32; 0,48; 0,64 (diâm)	0,92; 1,1; 1,38; 18,3	13,5	0,037; 0,48; 0,26; 0,37; 0,48	LDA
HIBBS & GULLIVER (1999)	50 x 50	50	1,77 1,77	6,4	4	2 - 6	-
BARRY et al. (2001)	52 x 48	60	1 x 1	5	52	-	-
CHENG & LAW (2001)	50 X 50	100	1,0 X 1,0	5	4	1 - 4	DPIV

*LDA = Laser Doppler Anemometry

*ADV = Acoustic Doppler Velocimetry

Apresenta-se comentários de algumas particularidades referentes aos trabalhos citados:

THOMPSON & TURNER (1975) e NOKES (1988), usaram tanques de mesma seção transversal e grades idênticas às de TURNER (1968), parâmetros que proporcionaram geração de turbulência com características desejadas.

HOPFINGER & TOLY (1976) utilizaram a mesma grade de TURNER (1968), porém em tanque construído por BOUVARD & DUMAS (1967), que utilizaram uma placa perfurada, e não uma grade, como tornou-se comum nos trabalhos seguintes. Sua grade distava 45 cm do fundo do tanque, para reduzir os movimentos secundários gerados junto às paredes. Foram realizados experimentos preliminares com a grade instalada a uma distância de 20 cm do fundo, e seus resultados de velocidade turbulenta mostraram que movimentos secundários formados junto aos cantos modificaram a lei de decaimento.

McDOUGAL (1979) apud CHENG & LAW (2001) concluíram que a turbulência gerada com amplitude de oscilação igual a 1 cm não tinha homogeneidade no plano horizontal e que frequência superior a 7 Hz perdia sua relação com a velocidade turbulenta horizontal u , causando um movimento de circulação do fluido no tanque.

BRUMLEY & JIRKA (1987) projetaram seu tanque para ser isolado o máximo possível de fontes de vibração, para que medições de velocidade turbulenta pudessem ser feitas próximas à superfície do fluido, sem a presença de ondas. A solidez da grade deste trabalho obedeceu ao limite de 40% apresentado por HOPFINGER & TOLY (1976), e teve sua parte sólida ocupando 36% de toda a seção transversal do tanque.

ATKINSON & WOLCOTT (1990) usaram um tanque para estudo de processos de mistura entre fluidos estratificados. Estes processos são importantes para desenvolvimento de modelos de misturas na superfície de corpos de água. Processos de mistura também foram estudados com uso de tanques de grades oscilantes em DE SILVA & FERNANDO (1992) e CASSON et al. (1994).

MATSUNAGA et al. (1991) compararam as propriedades da turbulência gerada por grades oscilantes através de análise numérica com as obtidas em seus experimentos. Os resultados experimentais corroboraram a proposta da solução analítica.

DE SILVA & FERNANDO (1994) utilizaram dois tanques de diferentes tamanhos, com solidez de 36% para a grade do tanque de maiores dimensões e de 27% para a grade do menor tanque. Ambas as grades apresentavam distância de 3 mm de suas extremidades às paredes e distância de 25 cm em relação ao fundo do tanque. Os movimentos secundários apresentados foram muito fracos.

SRDIC et al. (1996) apresentaram nova concepção de montagem da grade em seu tanque de vidro, como alternativa de aproximação da turbulência isotrópica. Duas grades foram imersas verticalmente em um fluido homogêneo (água). As grades, paralelas entre si, não oscilavam em sincronia, e a região central entre as grades apresentou certas propriedades similares àsquelas da turbulência isotrópica. SHY et al. (1997) também realizaram trabalho com duas grades oscilantes.

VOROPAYEV & FERNANDO (1996), como equipamento de oscilação da grade, utilizaram um alto-falante a ela ligado. As distâncias entre as extremidades da grade e as paredes eram menores que 1 mm e, através de diferentes frequências emitidas ao alto-falante, eram obtidas amplitudes muito baixas e altas frequências de oscilação da grade.

BRUNK et al. (1996) projetaram um tanque (reator) com cinco grades oscilantes dispostas em plano vertical para estudo de processos químicos e hidrodinâmicos relacionados à ação de poluentes em ambientes aquáticos naturais.

CHENG & LAW (2001), utilizando a técnica de medição DPIV para o estudo das propriedades da turbulência gerada neste equipamento, apresentaram grande quantidade de medidas de velocidade turbulenta através das componentes horizontal e vertical.

2.12 Tanque de grade oscilante do SHS-EESC-USP

Na literatura brasileira, ROMA (1988) foi o primeiro autor que construiu e utilizou um tanque de grade oscilante. Aliás, seu equipamento é também o único até o presente. Esse autor concentrou sua pesquisa no desenvolvimento de um sensor de turbulência para a camada da superfície de um meio líquido, embasado nos fenômenos de refração ótica na interface de dois meios refringentes. Esse sensor tem como finalidade avaliar o coeficiente de reaeração em montagem de laboratório.

Como as medidas de turbulência no trabalho de ROMA (1988) encontravam-se na superfície do fluido (água), não houve necessidade de construir seu tanque com material transparente, como vidro ou acrílico. O tanque foi construído com chapas de aço pintadas com tinta epóxi para minimizar os efeitos de oxidação. Sua área superficial é 0,50m x 0,50m e, sua profundidade, 0,80 m. Na FIGURA 02 é mostrado esse equipamento.

FIGURA 02 - Tanque gerador de turbulência do trabalho de ROMA (1988).

Foto retirada de seu trabalho original.

Nesse trabalho foram utilizadas três diferentes grades, de acordo com a quantidade de malhas por unidade de área: 100 malhas/m², 256 malhas/m² e 400 malhas/m². Elas foram construídas com barras quadradas de seção 1cm x 1cm, em madeira, coladas com araldite e pintadas com tinta esmalte. Durante os experimentos, a grade oscilava próxima ao fundo do tanque, mantendo uma distância de 0,70 m entre seu centro de oscilação e a superfície do fluido, com amplitude de oscilação de 10 cm.

O sistema de oscilação da grade é composto por um motor de corrente contínua, através do qual várias frequências de oscilação da grade puderam ser testadas, e por um mecanismo biela-manivela, localizado abaixo do tanque, que liga o motor à grade. Esse mecanismo, apresentado na FIGURA 03, permitiu a execução de experimentos com diferentes amplitudes de oscilação da grade, até a decisão por 10 cm. Essa amplitude proporcionou, visualmente na superfície do fluido, turbulência adequada ao desenvolvimento da sonda ótica, objetivo do trabalho.

FIGURA 03 - Mecanismo biela-manivela de oscilação da grade, no trabalho de ROMA.(1988). Foto retirada de seu trabalho original.

O trabalho de ROMA (1988), realizado no Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, deu início a uma linha de pesquisa que visa a aplicação de um método de medida de turbulência, através do uso de sonda ótica para o estudo da reaeração de corpos d'água. Novos trabalhos nessa linha, desde então, para seus experimentos têm utilizado o mesmo tanque de grade oscilante.

3 OBJETIVO

Este trabalho inicia-se com o projeto e a construção de um de um tanque de grade oscilante, de dimensões e geometria tais que possibilitem a geração, em seu volume de água, de turbulência com intensidade controlável. Esse tanque, de soluções inovadoras para a o sistema de movimentação da grade, deve permitir visualização do movimento do fluido no interior de um volume de controle bem definido, uso de grades de diferentes malhas em diferentes frequências e amplitudes de oscilação. Os experimentos realizados no tanque compreenderam medições de velocidade turbulenta com uso de técnica DPIV, ao longo de planos verticais localizados acima da grade oscilante. O objetivo foi avaliar, nesse equipamento, a ocorrência de certas propriedades comuns aos escoamentos turbulentos produzidos por grades oscilantes. Tais características turbulentas referem-se à aproximação de condições de isotropia em determinadas regiões do tanque, à homogeneidade horizontal da turbulência, à ausência de escoamento médio, ao decaimento espacial da turbulência e à relação direta entre a intensidade turbulenta produzida e a frequência de oscilação da grade.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais usados para construção do tanque, os equipamentos e procedimentos experimentais utilizados neste trabalho serão descritos a seguir.

4.1 Materiais

4.1.1 Construção do tanque de grade oscilante

O projeto de construção do tanque de grade oscilante teve início com uma análise crítica dos trabalhos da literatura que usaram equipamentos similares. Os tanques de grades oscilantes (há tanques com uma, duas ou mais grades) pesquisados possuem certas características, referentes à ligação da grade com seu sistema de oscilação, que de alguma forma podem perturbar a busca do movimento turbulento desejado e que não são apresentadas nas publicações dos seus respectivos trabalhos. São dois os tipos de ligação comumente encontrados na literatura. O primeiro consiste em hastes verticais que descem ao tanque e se prendem à grade, mantendo-a suspensa (FIGURA 04). Nessa ligação, buscou-se evitar a quebra da superfície do líquido e a alteração de seu volume devido à entrada e saída das hastes no interior do tanque. Essas características, mesmo minimamente, interferem nos resultados dos experimentos.

O segundo tipo de ligação, ilustrado na FIGURA 05, é composto por apenas uma haste central que atravessa a base do tanque e se liga à grade. Segundo ROMA (2001)², após longo período de funcionamento do seu equipamento com esse sistema de oscilação, ocorreram problemas de vedação no orifício da base do tanque, por onde passa a haste. Por estar suportada apenas por uma haste central, a rigidez das barras deve ser observada, para que não haja considerável flexão das extremidades da grade durante seu movimento.

² ROMA, W. N. L. (2001). (USP. Escola de Engenharia de São Carlos). Comunicação pessoal.

FIGURA 04 - Ligação da grade pela parte superior do tanque, comumente apresentada na literatura. Fonte: CHENG & LAW (2001).

FIGURA 05 - Esquema básico de um mecanismo (sistema) de oscilação com haste inferior movimentando a grade.

O novo conceito para a construção do tanque de grade oscilante do presente trabalho, com novo sistema de oscilação, começou a ser concretizado com seu projeto em AutoCad3D. Quando da apresentação do projeto à Oficina Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, onde o equipamento seria construído, avaliou-se a viabilidade de sua execução e fez-se previsão do seu funcionamento e possíveis problemas que poderiam ocorrer. O projeto aos poucos tomou forma definitiva, após várias modificações e melhorias. Uma visão geral do desenho do equipamento em sua versão final

é apresentada na FIGURA 06. Os detalhes do equipamento serão ilustrados e comentados separadamente.

FIGURA 06 - Vista geral do tanque em seu desenho de projeto, em AutoCad. Duas placas de acrílico externas foram removidas, para visualização da grade no interior do tanque.

4.1.1.1 Tanque em acrílico

Construiu-se um tanque com paredes em acrílico para permitir visualização de seu volume de controle e utilização do equipamento laser para medições de velocidade turbulenta com técnica DPIV. Sua área superficial de 0,5 m x 0,5 m é a mesma encontrada em BRUMLEY & JIRKA (1987), HIBBS & GULLIVER (1999) e CHENG & LAW (2001), e próxima à dos trabalhos de DE SILVA & FERNANDO (1994), KIT et al. (1997) e BARRY et al. (2001). Sua altura de 1,15 m (interna), superior à dos tanques pesquisados, possibilita boa variação da altura de água e estudo de sua influência sobre a turbulência gerada. Ainda não existe padronização desse equipamento.

Para que houvesse boa rigidez do tanque e ele não vibrasse sob o efeito da turbulência gerada, suas paredes foram montadas com placas de acrílico de 2,5 cm de espessura, parafusadas e coladas com silicone para se evitar vazamentos (FIGURA 07). Para alojar a ligação entre a grade e o sistema de oscilação, foram projetados compartimentos laterais ao tanque (dois 'tanques' menores).

FIGURA 07 - Tanque em acrílico, parafusado e vedado com silicone.

4.1.1.2 Grade

Para agitação do fluido e geração do movimento turbulento foi construída uma grade em aço inoxidável, com espaçamento entre os eixos das barras (*Mesh*) de 5,1 cm e área sólida, chamada solidez da grade, de 32% em relação à área superficial do tanque. As barras utilizadas neste trabalho tiveram as mesmas dimensões das barras dos trabalhos de THOMPSON & TURNER (1975), HOPFINGER & TOLY (1976), McDOUGAL (1979), NOKES (1988), SRDIC et al. (1996), VOROPAYEV & FERNANDO (1996) e CHENG & LAW (2001). O espaçamento entre elas foi determinado de forma a se obter solidez inferior a 40% para a grade, necessária à geração da turbulência quase-isotrópica, sem escoamento no tanque (HOPFINGER & TOLY, 1976 apud DE SILVA & FERNANDO, 1994). Para que todas as barras ocupassem um mesmo plano horizontal, foram feitos cortes na forma de ‘dentes’, para formação e soldagem da grade (FIGURA 08). Projeto e montagem estão mostrados nas FIGURAS 09 e 10, respectivamente.

FIGURA 08 - Cortes nas barras para montagem da grade.

FIGURA 09 - Projeto da grade. Barras de comprimento 49,4 cm no interior do tanque (em vermelho) de 50 cm x 50 cm.

Nota-se, no projeto, que a abertura de 4,1 cm entre as barras é igual à distância existente entre as barras das extremidades e as paredes. Este dimensionamento foi baseado na idéia de se usar as paredes como se fossem outras barras. Essa idéia não segue a afirmação de E & HOPFINGER (1986) apud BRUMLEY & JIRKA (1987), que as paredes devem formar planos de simetria, com abertura entre as barras das extremidades e as paredes igual à metade da abertura entre duas barras paralelas. Para se evitar influências negativas das pontas das barras (CHENG & LAW, 2001), sua distância às paredes do tanque foi mantida entre 0,2 e 0,3 cm, variação explicada pela não-uniformidade da espessura das placas de acrílico.

A grade foi instalada no interior do tanque a uma distância de 55 cm do fundo, para que, experimentos de futuros trabalhos possam ser feitos com ‘fundo falso’ para estudos da influência dessa distância sobre a turbulência.

FIGURA 10 - Montagem da grade, com 9 x 9 barras de seção 1 x 1 cm, e espaços de 5,1 cm (entre eixos).

4.1.1.3 Mecanismo de oscilação da grade

O estudo de novo sistema de oscilação da grade buscou evitar a colocação de qualquer parte de sua estrutura no interior do volume de controle. O objetivo foi ter apenas a grade no interior do tanque. Para isso, foram feitos recortes (fendas) em suas paredes, por onde passaram duas barras da grade, mais longas que as demais. Foi cortada uma terceira barra, central, que também atravessa a parede (FIGURA 10), pois após a primeira montagem dessa estrutura, previu-se rigidez suficiente da grade, caso durante sua movimentação, ela fosse sustentada apenas por duas barras laterais. As fendas tiveram comprimento vertical suficiente para permitir a movimentação da grade. Conectados às laterais do tanque dois compartimentos, também em acrílico, abrigaram as extremidades dessas barras e sua ligação com o sistema de oscilação. As barras foram encaixadas e presas às duas ‘placas oscilantes’ em acrílico. Essas placas, que tiveram sua parte inferior chanfrada para menor impacto com a água, ligaram o sistema de oscilação à grade, no interior dos compartimentos. Seu

movimento foi guiado por tiras de teflon, parafusadas a elas e às paredes fixas do tanque. Sua montagem está ilustrada nas FIGURAS 11 e 12.

FIGURA 11 - Placas oscilantes (em acrílico) montadas no interior dos compartimentos. Os detalhes em cor branca são tiras de teflon que guiaram as placas em seu movimento vertical.

FIGURA 12 - Vista superior da instalação de uma placa oscilante em um compartimento.

Uma régua em acrílico, parafusada ao tanque, ajudava o direcionamento do movimento da placa.

Pode-se observar na FIGURA 06 que o projeto de uma estrutura exterior ao tanque, responsável pela movimentação da grade e das placas, foi composta por um motor e um conjunto de rolamentos, mancais, eixos, polias e correias, detalhados a seguir:

Sistema biela-manivela: este mecanismo possibilitou a variação da amplitude de oscilação da grade. O movimento vertical permitido à grade, por este sistema, tem variação de velocidade senoidal, comum nos tanques da maioria dos trabalhos pesquisados. Para se ter uma biela de comprimento regulável, foram adaptadas duas barras de direção de automóvel. Este sistema foi projetado para se obter amplitudes de oscilação da grade entre zero e 10 cm, variação essa determinada pela excentricidade da biela em relação ao eixo de rotação. O projeto deste sistema está ilustrado na FIGURA 13, sem as cotas, para sua simplificação.

FIGURA 13 - Projeto do sistema biela-manivela, para movimentação vertical das placas oscilantes.

Motor e conjunto de redução: um motor elétrico de 4 hp e corrente contínua (FIGURA 14) tinha sua rotação variada, manualmente, através de um painel de controle (FIGURA 15). Através de um conjunto redutor, na razão 5:1, sua rotação máxima de 1700 rpm foi transferida à grade como 340 rpm, suficiente para a maior rotação utilizada nos experimentos (240 rpm). Essa redução, ilustrada na FIGURA 16, foi necessária para evitar-se superaquecimento do motor quando utilizado em baixas rotações.

FIGURA 14 - Motor elétrico de 4 hp.

FIGURA 15 - Painel de controle de rotação do motor.

FIGURA 16 - Conjunto de redução em funcionamento.

4.1.1.4 Vedação entre tanque e compartimentos

A água dos compartimentos foi isolada do interior do tanque através de uma vedação com teflon (FIGURA 17), para que, durante os experimentos, a agitação da água dos compartimentos, causada pelo sistema de oscilação em movimento, não interferisse no volume de controle. Uma tira de teflon, com 0,5 cm de espessura, que ocupou todo o espaço da fenda na parede do tanque, oscilava juntamente com a grade. Uma chapa de aço inoxidável, parafusada na parede de acrílico, alojou o teflon na fenda.

FIGURA 17 - Sistema de vedação entre os compartimentos laterais e o tanque com a grade.

Na FIGURA 18, esse isolamento é apresentado em seu projeto, em partes separadas, para seu melhor entendimento. Observa-se que existe uma pequena fenda vertical, de 0,5 cm de profundidade, localizada atrás do alojamento do teflon. Sua função é permitir o fluxo vertical da água que é comprimida pela tira quando esta se movimenta para cima e para baixo. Na ausência desse compartimento, jatos de água poderiam ser direcionados para dentro do tanque e influenciar os experimentos.

FIGURA 18 - Projeto do isolamento entre o tanque e os compartimentos laterais com a tira de teflon (em amarelo) que se move juntamente com a grade e a chapa de aço inoxidável (em cinza escuro) que a mantém rente à placa de acrílico (em cinza claro). A fenda na placa permite o fluxo da água comprimida durante o movimento do teflon.

4.1.2 Instalação do equipamento

Concluída a construção do equipamento ele foi transportado para o Laboratório de Hidráulica Ambiental do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC – USP, onde foi feito todo o trabalho experimental. Após pintura e fixação do equipamento, através de testes preliminares constatou-se que a estrutura que sustentava o conjunto redutor de rotação vibrava consideravelmente para frequências de oscilação da grade superiores a 3 Hz. Essa estrutura foi então reforçada e a influência de sua vibração nos experimentos pôde ser desprezada. O trabalho final da construção do equipamento está mostrado na FIGURA 19.

Detalhes do projeto do equipamento, completados após a fixação do tanque, devem ser comentados. Registros de esfera foram instalados nas laterais do tanque e dos compartimentos, para seu esvaziamento (FIGURA 20). O tanque de acrílico também recebeu reforço estrutural, para combate à vibração (FIGURA 21).

FIGURA 19 - Equipamento instalado, com a estrutura reforçada para se evitar grandes vibrações durante os experimentos com alta frequência de oscilação da grade.

FIGURA 20 - Registros de esfera de 3/4" para esvaziamento do tanque e dos compartimentos laterais.

FIGURA 21 - Apoio de madeira e borracha na parte superior do tanque, para se evitar vibrações consideráveis.

4.1.3 Equipamento de medição de velocidade turbulenta

Para realização dos ensaios de obtenção de campos de velocidade turbulenta no interior do tanque foram utilizados os seguintes equipamentos:

Laser Oxford, modelo LS20: laser a vapor de cobre, responsável pela produção do plano de luz, inserido no volume de água do tanque para obtenção dos campos. Esse equipamento tinha potência média de 20 Watts a 10 kHz, superior à dos lasers usados em trabalhos similares da literatura. Essa potência era suficiente para dispensar a adição de partículas traçadoras. As partículas ‘naturais’ da água, iluminadas pela luz do laser, já apresentavam boa visualização do movimento do fluido. Os comprimentos de onda de emissão de luz são de 510,6 nm (verde) e 578,2 nm (amarelo), com 1/3 emitido em amarelo e 2/3 em verde. O equipamento levava em média 2 horas para iniciar seu funcionamento e 1 hora para o processo de desligamento. A luz produzida é concentrada em fibra ótica e levada ao ponto de utilização (tanque), onde é convertida em folha de luz de espessura média de 0,3 cm através de um conjunto de lentes esféricas, côncavas e convexas (equipamento *Fiber Sheet*). O laser em funcionamento está ilustrado na FIGURA 22, e o plano de luz iluminando as partículas da água, na FIGURA 23.

FIGURA 22 - Produção de luz pelo equipamento laser.

FIGURA 23 - Plano de luz iluminando as partículas no interior do tanque.

Câmera CCD Kodak Megaplug, modelo ES 1.0: esta câmera fotográfica digital captava as imagens do plano de fluido iluminado pelo laser, em escala de cinza. O controle

de obtenção de imagens era feito via comunicação serial com um computador. Apesar de ter uma velocidade de captação de imagens de 30 exposições (fotos) por segundo, a memória desta câmera permitia uma armazenagem de apenas 16, o que comprometeu a metodologia experimental empregada. A FIGURA 24 mostra a câmera instalada perpendicularmente ao plano de luz do laser, imerso na água.

FIGURA 24 - Câmera instalada próxima a uma lateral do tanque, perpendicularmente ao plano de luz, para obtenção das imagens do movimento do fluido.

Após a instalação da câmera, fazia-se a focalização do plano de luz através do ajuste de seu conjunto de lentes. A calibração deste equipamento foi feita com régua de 10 cm, colocada no interior do tanque, na região de obtenção dos campos de velocidade (FIGURA

25). Com a imagem ao vivo na tela do microcomputador, visualizava-se os 10 cm na régua e calibrava-se a câmera.

FIGURA 25 - Calibração da câmera feita com régua graduada.

Sistema computacional: as fotos capturadas pela câmera eram armazenadas em sua memória e enviadas para o disco rígido do microcomputador com processador Pentium 200 MHz. Este procedimento era gerenciado pela versão atualizada 6.14 do software **Visiflow**, da AEA Technology, adquirido para este trabalho de Mestrado. O programa **Visiflow**, através de técnica DPIV, fazia o tratamento das imagens, para obtenção dos campos de velocidade. O sistema computacional, conectado à câmera fotográfica durante um experimento, é mostrado na FIGURA 26.

FIGURA 26 - Realização de um experimento, com a câmera conectada ao microcomputador com o programa **Visiflow**.

Tacômetro digital: o tacômetro era usado para regulação da frequência de oscilação da grade em cada experimento, com precisão de 0,1:1000 para rotações inferiores a 1000 rpm. Este equipamento também foi adquirido para este trabalho (Figura 27).

FIGURA 27 - Tacômetro digital em uso para medição da rotação do eixo que movimenta a grade

4.2 Metodologia experimental

O procedimento experimental constituiu-se das seguintes etapas:

- localização das regiões de estudo no tanque;
- definição de frequência e amplitude de oscilação da grade;
- obtenção dos campos de velocidade turbulenta;
- cálculo das tensões médias de Reynolds;
- caracterização da turbulência gerada.

4.2.1 Localização das regiões de estudo no tanque

Um dos objetivos deste trabalho foi obter campos de velocidade turbulenta em uma região do tanque. Porém, não era intenção desta pesquisa fazer análise de movimentos secundários que pudessem ter sido gerados pela influência das paredes laterais ou do fundo do tanque. Desta forma, foi escolhida para estudo, a região central do tanque, acima da grade.

Dois planos verticais e paralelos, cada um com 10 cm de base e 30 cm de altura, compreendiam as duas regiões a serem estudadas. O primeiro plano, chamado Plano 1, foi localizado sobre uma barra da grade. O segundo, denominado Plano 2, tinha sua base situada entre duas barras da grade. Como as fotos obtidas com a câmera correspondiam a imagens de 10 cm x 10 cm (dimensionamento determinado para se ter boa resolução das imagens), o Plano 1 foi dividido em três posições: Pos 1, Pos 2 e Pos 3, como ilustrado na FIGURA 28. Da mesma forma, o Plano 2 foi dividido em Pos 4, Pos 5 e Pos 6 (FIGURA 29).

FIGURA 28 - Plano 1: região sobre a barra central da grade.

FIGURA 29 - Plano 2: região entre barras da grade.

4.2.2 Definição de frequência e amplitude de oscilação da grade

Todos os experimentos foram realizados com amplitude de oscilação de 3 cm, e as frequências de oscilação da grade experimentadas foram 1, 2, 3 e 4 Hz. Para que houvesse um estabelecimento da turbulência no interior do tanque, a grade era movimentada durante

10 minutos na frequência do experimento a ser realizado, antes de obter as imagens. O mesmo tempo de 10 min foi empregado no trabalho de DE SILVA & FERNANDO (1994), e as frequências de oscilação foram as mesmas recentemente estudadas por CHENG & LAW (2001), porém com amplitude de 4 cm.

Devido à amplitude de oscilação, as regiões de estudo localizavam-se logo acima da posição mais alta do movimento da grade (FIGURA 30). Isso impedia que a grade fosse capturada nas imagens e seu movimento confundido com o movimento das partículas, durante a geração dos campos de velocidade.

FIGURA 30 - Regiões de estudo logo acima da posição mais alta do movimento da grade. O mesmo posicionamento existiu para o plano das posições POS 4, POS 5 e POS 6.

4.2.3 Obtenção dos campos de velocidade turbulenta

Nesta etapa, uma sequência de passos foi seguida e empregada para as 24 diferentes situações de frequência e posição da câmera fotográfica, experimentadas neste trabalho. Assim, faz-se a descrição desta sequência utilizando apenas uma das situações: posição 1 da câmera (POS 1) e frequência de 1 Hz. A FIGURA 31, auxilia essa descrição.

FIGURA 31 - Procedimento para obtenção dos campos de velocidade turbulenta, u e w.

- Para cada situação, foram tiradas 400 fotos, em grupos de 16, devido à pequena memória de armazenamento da câmera digital. O intervalo de tempo entre duas fotos consecutivas de um mesmo grupo era de 0,033 segundos. Porém, após a obtenção de cada grupo de 16 fotos, eram necessários alguns segundos para que as fotos fossem transferidas para o disco rígido

do computador e a memória da câmera fosse esvaziada para obtenção de novas fotos. Levou-se, em média, 6 minutos para obtenção das 400 fotos de cada situação.

- Através de análise de correlação o programa **Visiflow**, fornecia um campo vetorial instantâneo para cada par de fotos consecutivas. Cada campo era formado por uma malha de 29 x 29 vetores velocidade. Esse campo era disponibilizado em duas formas: gráfica e em planilha do software **Excel**, com posição, magnitude e ângulo de inclinação de cada vetor. Do total de 4800 obtidos, a planilha gerada para um campo vetorial instantâneo é apresentada como exemplo no APÊNDICE deste trabalho.
- Cada vetor instantâneo era decomposto em suas componentes nos eixos x e z (eixos ilustrados na FIGURA 28).

A partir deste passo do procedimento, incluindo-o, os dados não puderam mais ser analisados através do **Visiflow**, que não oferecia operações de cálculo necessárias. Criou-se então, para este trabalho, um programa computacional capaz de decompor todos os 4.036.800 vetores (dos 4800 campos gerados a partir das 9600 fotos obtidas) gerados no software **Visiflow**, e prosseguir com a sequência de cálculos necessária. O programa desenvolvido também auxiliou a otimização da obtenção dos campos de velocidade. As 400 fotos obtidas em cada experimento foram renomeadas pelo programa, para que o **Visiflow** em cada sequência de 16 fotos, pudesse gerar todos os 200 campos de uma só vez, e não apenas 8.

- Tirada a média das componentes instantâneas dos 200 campos, observou-se que a média era temporal, isto é, cada vetor pertencente à malha de 29 x 29 vetores de um campo foi somado apenas aos vetores dos outros campos, pertencentes à mesma posição na malha.
- Subtraiu-se de cada vetor instantâneo, o valor da média obtida para sua posição na malha. Desta forma, para cada situação, foram obtidos 200 campos de $\mathbf{u}'$ e 200 campos de $\mathbf{w}'$.

- Extraiu-se a raiz quadrada da média dos quadrados de $\mathbf{u}'$ e $\mathbf{w}'$, isto é, $\sqrt{\mathbf{u}'^2}$ e $\sqrt{\mathbf{w}'^2}$.
- Foram obtidos 1 campo de $\mathbf{u}$ e um campo de $\mathbf{w}$ para cada situação de posição e frequência ensaiadas.

Toda sequência de cálculos envolvida nesta pesquisa requereu grande esforço de processamento do computador Pentium 200 MHz, pertencente ao Laboratório de Hidráulica Ambiental. Assim, apesar das imagens obtidas nos experimentos terem sido nele armazenadas, a geração dos campos instantâneos pelo programa **Visiflow** e dos campos de velocidade turbulenta através do programa desenvolvido, foi executada em um grupo de computadores Pentium 4, de processamento compartilhado.

4.2.4 Tensões médias de Reynolds

Foram calculadas para cada situação. Seu procedimento de cálculo assemelhou-se àquele ilustrado na FIGURA 31, até obtenção das flutuações instantâneas $\mathbf{u}'$ e $\mathbf{w}'$. A partir de então, foi feita a média do produto destas flutuações, obtendo-se as Tensões de Reynolds - eq. (16).

4.2.5 Caracterização da turbulência gerada

Os dados de $\mathbf{u}$, $\mathbf{w}$, e $\overline{\mathbf{u}' \cdot \mathbf{w}'}$, obtidos através dos experimentos com o tanque de grade oscilante construído, para este trabalho, são apresentados graficamente no capítulo 5. Com base nesses gráficos, analisou-se a ocorrência, no interior do tanque, de duas propriedades da turbulência isotrópica mencionadas no item 2.3, eq. (14) e eq (16). Avaliou-se, também, o procedimento experimental seguido para obtenção dos dados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados obtidos neste trabalho são resumidamente apresentados neste capítulo, através de gráficos. Dentre as 24 situações experimentadas, de posição da câmera e frequência de oscilação da grade, são mostrados apenas os resultados de algumas delas. As discussões e conclusões desses resultados são comuns a todas as demais situações (gráficos no ANEXO). As duas situações exibidas referem-se aos experimentos com frequências de oscilação de 1 Hz e 2 Hz, realizados no Plano 1 (sobre a barra central).

5.1 Campos instantâneos de velocidade

Primeiramente, são apresentados os campos instantâneos de velocidade (campos de $\sqrt{U^2 + W^2}$), obtidos na POS 1. A visualização desses campos permite comparação entre magnitude dos vetores calculados a partir dos experimentos com 1 Hz e 2 Hz. Ambos os campos, os vetores foram normalizados com base em um vetor de 5 mm/s. Em todos os vetores dos campos a cor verde indica que vetores reais foram gerados pelo programa **Visiflow**. Isso significa que, em cada célula do campo, a densidade de partículas iluminadas pelo laser foi suficiente para geração de todos os seus vetores velocidade. Caso houvesse poucas partículas em uma célula, o vetor correspondente seria gerado por interpolação, e apresentado na cor vermelha.

As FIGURAS 32 e 33 mostram, respectivamente para 1 Hz e 2 Hz, os campos instantâneos de velocidade. Comparando-os, pode-se observar aumento da magnitude dos vetores com o aumento da frequência. A maior frequência proporcionava maior agitação do fluido. Este aumento também foi observado quando se elevou a frequência para 3 Hz, e depois para 4 Hz. Nas figuras a seguir, os campos estão apresentados no ambiente do **Visiflow**, programa em que foram gerados.

As diferentes direções dos vetores das duas figuras para a mesma posição do Plano 1, mostram as diferentes trajetórias percorridas pelas partículas do fluido, evidenciando ocorrência do movimento turbulento. Apesar de estar apresentada juntamente com apenas dois campos de velocidade de diferentes frequências, baseada na aleatoriedade do movimento das partículas, a conclusão da ocorrência da turbulência pode ser observada em qualquer sequência de 200 campos instantâneos, de qualquer das 24 situações estudadas. Todos os 4800 campos instantâneos de velocidade estão gravados e disponíveis no computador do Laboratório de Hidráulica Ambiental.

5.2 Campos médios de velocidade

O tanque de grade oscilante é conhecido como um equipamento que gera turbulência sem que haja escoamento médio do fluido. Assim, a magnitude dos vetores dos campos médios ($\sqrt{\overline{U^2} + \overline{W^2}}$), que teoricamente deve ser nula, experimentalmente deve se aproximar ao máximo de zero. Neste trabalho, os campos médios obtidos mostraram vetores com magnitude consideravelmente inferior à dos vetores dos campos instantâneos. Contudo, baseado na intensidade da cor verde nos campos médios para frequências de 1 Hz e 2 Hz (FIGURAS 34 e 35, respectivamente), relacionada à magnitude dos vetores, observa-se que em certas regiões dos campos, a velocidade média se distanciou de zero. Isto leva à conclusão que um maior número de campos instantâneos deve ser obtido nos experimentos, para que o campo médio seja mais homogêneo e mais próximo de zero.

Da mesma forma, nota-se maior magnitude dos vetores do campo médio à medida que se aumenta a frequência de oscilação da grade de 1 Hz para 2 Hz. O mesmo acontece quando se aumenta a frequência para 3 Hz e para 4 Hz, como pode ser visto no ANEXO. Este fato mostra que o número de campos instantâneos, necessários para a obtenção de média representativa do fenômeno, pode ser dependente da frequência adotada no experimento, o que aponta para a necessidade de se estabelecer, corretamente, as condições

ideais para cálculos estatísticos em escoamentos turbulentos, nem sempre presentes em estudos da literatura.

FIGURA 34 - Campo médio de velocidade para frequência de 1 Hz.

FIGURA 35 - Campo médio de velocidade para frequência de 2 Hz.

5.3 Campos médios de velocidade turbulenta

Também chamados de campos de intensidade turbulenta, foram calculados com o programa desenvolvido para este trabalho e não podem ser visualizados. Seus dados são apresentados através dos gráficos a seguir.

5.3.1 Distribuição horizontal de u , w e i

Com o objetivo de analisar a homogeneidade da turbulência gerada, neste item é apresentada a distribuição horizontal das componentes u e w (respectivamente relativas aos eixos x e z da FIGURA 28) e da intensidade turbulenta $i = \sqrt{2 \cdot u^2 + w^2}$. A consideração repetida da componente no eixo x da velocidade média turbulenta é usada para se compensar a falta da componente no eixo y (componente v), não registrada através do método DPIV. Esta consideração baseou-se nas semelhanças de geometria e de movimentação da grade, relativas a estes dois eixos.

Apesar de terem sido calculados todos os vetores das posições POS 1, POS 2 e POS 3 (Plano 1), a distribuição horizontal de u e w foi feita apenas para 7 ‘linhas’ de vetores, com diferentes distâncias em relação ao centro de oscilação da grade (FIGURA 36). A distribuição horizontal de u , w e i , para as demais posições da câmera e frequência de oscilação, também fazem parte do ANEXO deste trabalho.

Na FIGURA 37 são apresentados os gráficos da distribuição horizontal de u , w , e i , para a frequência de 1 Hz. Referentes à frequência de 2 Hz os mesmos gráficos são mostrados na FIGURA 38.

Para comparação dos resultados mostrados nas figuras a seguir com os obtidos para frequências maiores (apresentados no ANEXO), o limite máximo da escala vertical é o mesmo para todas as frequências. Por isto, este limite pode parecer excessivo para os resultados apresentados neste capítulo.

FIGURA 36 - Localização dos vetores usados na representação da distribuição horizontal da velocidade turbulenta. Os campos da figura servem apenas para ilustrar esta localização.

Sobre a barra - 1 Hz

FIGURA 37 - Distribuição horizontal de u, w e i, para o Plano 1 e frequência de 1 Hz.

Sobre a barra - 2 Hz

FIGURA 38 - Distribuição horizontal de u , w e i , para o Plano 1 e frequência de 2 Hz.

Nos seis gráficos acima, apresentam-se distintas apenas as distribuições para $z = 3$ cm e $z = 5$ cm. Para as demais distribuições ($z = 10, 15, 20, 25$ e 30 cm) as linhas que teoricamente seriam separadas, com maior velocidade para as menores distâncias z , misturam-se em todos os gráficos. Apesar das incertezas acerca das médias obtidas, estes gráficos mostram tendência maior à homogeneidade, à medida que se distanciam da grade. Essa tendência, observada neste trabalho, concorda com os resultados experimentais de CHENG & LAW (2001) e com a afirmação de DE SILVA & FERNANDO (1994), sobre a ocorrência de turbulência aproximadamente homogênea a partir de (2-3) M da grade (entre 10 e 15 cm no presente trabalho).

5.3.2 Característica da turbulência isotrópica: $w / u = 1$

Esta relação de w / u , baseada na eq. (14), varia experimentalmente entre 1,1 e 1,2, segundo DE SILVA & FERNANDO (1994). Ilustrados na FIGURA 39, os gráficos mostram que, apesar dos dados obtidos neste trabalho apresentarem valores para esta relação superiores ao limite comentado, eles oscilam em torno da unidade ($w / u = 1$). Novamente, atribui-se à esta irregularidade a falta de campos médios melhores (mais reais), seja para a velocidade, seja para a flutuação (velocidade turbulenta). Os gráficos para as frequências de 3 Hz e 4 Hz no Plano 1 e para todas as frequências no Plano 2 são apresentados no ANEXO.

FIGURA 39 - Relação w/u para o Plano 1 e frequências 1 Hz e 2 Hz.

5.3.3 Tensões de Reynolds

Como já foi comentado no Capítulo 2, as tensões de Reynolds são nulas para turbulência em condições de perfeita isotropia. Na FIGURA 40, os gráficos mostram que a turbulência gerada se torna mais isotrópica à medida que se distancia da grade. Comparando os dois gráficos, observa-se que são maiores as tensões obtidas com frequência de 2 Hz, principalmente as geradas próximas a grade, para $z = 3$ cm e $z = 5$ cm. Esta diferença pode ser resultado da hipótese que a maior frequência de oscilação da grade requer maior número de campos instantâneos para obtenção de média real. Pode-se também incluir como causa desta diferença a necessidade de maior distância z para que estas tensões se aproximem de

zero, para maiores frequências. Em outros termos, quanto maior a frequência de oscilação, mais distantes da grade estarão as regiões com condições quase-isotrópicas.

FIGURA 40 - Tensões de Reynolds para o Plano 1 e frequências 1 Hz e 2 Hz.

5.3.4 Decaimento espacial da turbulência

Os gráficos apresentados nas FIGURAS 41 e 42 mostram a evolução da intensidade turbulenta i , ao longo de z . Diferentemente dos gráficos já apresentados neste capítulo, estes representam as 24 situações de posição da câmera e frequência de oscilação da grade. A intensidade turbulenta representada na FIGURA 41 corresponde àquela gerada no Plano 1 de obtenção de imagens, compreendendo as posições POS 1, POS 2 e POS 3 e todas as

freqüências estudadas (1, 2, 3 e 4 Hz). A FIGURA 42 refere-se ao Plano 2 (mostrado na FIGURA 29) e às mesmas freqüências.

Nestes gráficos, a intensidade turbulenta apresentada é uma média espacial das intensidades para uma mesma altura z . Usando como exemplo o gráfico da FIGURA 37, da distribuição de i ao longo do eixo x , significa que cada conjunto de 29 pontos pertencentes a uma mesma altura z gera apenas um ponto no gráfico abaixo: sua média.

FIGURA 41 - Decaimento espacial da turbulência na região do Plano 1.

FIGURA 42 - Decaimento espacial da turbulência na região do Plano 2.

Analisando os dois gráficos acima, podem ser observadas algumas características da turbulência gerada nos experimentos deste trabalho. A intensidade turbulenta e seu decaimento espacial foram semelhantes para os dois planos estudados (Plano 1 e Plano 2). Existe uma região de geração de turbulência junto à grade oscilante. Esta região é visível para 2 Hz, 3 Hz e 4 Hz, o que não acontece para a frequência de 1 Hz. A geração ocorre até uma distância $z = 5-7$ cm (em relação ao centro de oscilação da grade), quando é ultrapassado o pico da intensidade turbulenta. A partir daí, há decaimento e os mecanismos preponderantes são a difusão e a dissipação da energia cinética turbulenta.

As discontinuidades que ocorreram nos gráficos para as distâncias $z = 12$ cm e $z = 22$ cm são consequências da ordem de obtenção de imagens para diferentes situações de posição e frequência dos experimentos.

Tomando o Plano 1 como exemplo, primeiramente foram capturadas as imagens na POS 1, para todas as 4 frequências. Procedeu-se da mesma forma para POS 2 e POS 3. A união das curvas das 3 posições e de mesma frequência, causou saltos vistos nos gráficos. Conclui-se, com isto, que as imagens referentes a uma determinada frequência devem ser obtidas para todas as posições da câmera. Só então a frequência deve ser alterada para aquisição de novas imagens.

Para melhor definição das curvas experimentais de decaimento espacial da turbulência e melhor comparação com seu equacionamento proposto na literatura, é necessário maior número de imagens do escoamento. Tempo superior ao de 10 min, empregado neste trabalho e no de DE SILVA & FERNANDO (1994), é recomendado antes de cada experimento, para que haja melhor estabelecimento da turbulência no interior do tanque.

6 CONCLUSÕES

- Construiu-se um equipamento adequado para a análise de escoamentos gerados por grades oscilantes. A solução inovadora para o sistema de oscilação da grade, com peças de teflon fazendo o isolamento do volume de controle do tanque, mostrou-se eficiente para longos períodos diários de funcionamento do equipamento.
- O programa computacional desenvolvido para este trabalho mostrou-se indispensável para o cálculo dos campos de velocidade turbulenta, a partir dos campos instantâneos de velocidade gerados pelo software **Visiflow**.
- Os gráficos criados a partir dos campos de intensidade turbulenta possibilitaram observação do decaimento espacial e da região de produção de turbulência. Os campos médios de velocidade mostraram-se muito inferiores aos campos instantâneos, indicando existência de baixo escoamento médio do fluido. Condições de isotropia e homogeneidade espacial da turbulência são mais aproximadas à medida que se afasta da grade. A intensidade turbulenta produzida está diretamente relacionada à frequência de oscilação.
- O número de imagens para obtenção de média representativa da velocidade turbulenta neste equipamento parece ser dependente da frequência de oscilação da grade, algo que não é comentado na literatura.
- A obtenção de 200 campos instantâneos de velocidade para cada situação estudada não foi suficiente para produção de uma boa média. A memória insuficiente da câmera para armazenagem de fotos consecutivas do experimento (armazenava apenas 16 fotos, e não todas as 400) provavelmente afetou também de forma negativa esta média e precisa ser expandida.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estas são sugestões para trabalhos que utilizem este equipamento em pesquisas com turbulência. Para novas medições de velocidade turbulenta com uso de técnica DPIV, podem ser feitas algumas alterações na metodologia, tais como: aquisição de maior número de imagens para obtenção das médias das velocidades, estabelecimento do movimento turbulento no tanque em tempo superior a 10 min e realização dos experimentos com a mesma frequência de oscilação em sequência, para diferentes posições da câmera;

O equipamento construído possibilita:

- experimentos com diferentes grades e amplitudes de oscilação;
- instalação de um fundo falso no tanque, de altura variável, para avaliação de sua influência na turbulência gerada;
- estudos de turbulência gerada por um par de grades oscilantes, a partir da instalação de uma segunda grade no tanque.

ANEXO

Campos instantâneos de velocidade, campos médios de velocidade, distribuição horizontal de $\mathbf{u}$, $\mathbf{w}$ e $\mathbf{i}$, gráficos de $\mathbf{w} / \mathbf{u}$ e de tensões de Reynolds, para diferentes situações de posição da câmera e frequência de oscilação da grade.

Campos instantâneos de velocidade

Apresenta-se nas FIGURAS 43-64 um campo pertencente a cada seqüência de 200 campos instantâneos de velocidade, para cada uma das 22 situações de frequência de posição da câmera e frequência da grade, que não foram ilustradas no Capítulo 5.

FIGURA 43 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 1 e frequência 3 Hz

FIGURA 44 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 1 e frequência 4 Hz

FIGURA 45 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 2 e frequência 1 Hz.

FIGURA 46 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 2 e frequência 2 Hz.

FIGURA 47 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 2 e frequência 3 Hz.

FIGURA 48 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 2 e frequência 4 Hz.

FIGURA 49 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 3 e frequência 1 Hz.

FIGURA 50 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 3 e frequência 2 Hz.

FIGURA 51 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 3 e frequência 3 Hz.

FIGURA 52 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 3 e frequência 4 Hz.

FIGURA 53 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 4 e frequência 1 Hz.

FIGURA 54 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 4 e frequência 2 Hz.

FIGURA 55 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 4 e frequência 3 Hz.

FIGURA 56 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 4 e frequência 4 Hz.

FIGURA 57 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 5 e frequência 1 Hz.

FIGURA 58 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 5 e frequência 2 Hz.

FIGURA 59 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 5 e frequência 3 Hz.

FIGURA 60 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 5 e frequência 4 Hz.

FIGURA 61 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 6 e frequência 1 Hz.

FIGURA 62 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 6 e frequência 2 Hz.

FIGURA 63 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 6 e frequência 3 Hz.

FIGURA 64 - Campo instantâneo de velocidade, para Pos 6 e frequência 4 Hz.

FIGURA 67 - Campo médio de velocidade para Pos 2 e frequência 1 Hz.

FIGURA 68 - Campo médio de velocidade para Pos 2 e frequência 2 Hz.

FIGURA 69 - Campo médio de velocidade para Pos 2 e frequência 3 Hz.

FIGURA 70 - Campo médio de velocidade para Pos 2 e frequência 4 Hz.

FIGURA 71 - Campo médio de velocidade para Pos 3 e frequência 1 Hz.

FIGURA 72 - Campo médio de velocidade para Pos 3 e frequência 2 Hz.

FIGURA 73 - Campo médio de velocidade para Pos 3 e frequência 3 Hz.

FIGURA 74 - Campo médio de velocidade para Pos 3 e frequência 4 Hz.

FIGURA 75 - Campo médio de velocidade para Pos 4 e frequência 1 Hz.

FIGURA 76 - Campo médio de velocidade para Pos 4 e frequência 2 Hz.

FIGURA 77 - Campo médio de velocidade para Pos 4 e frequência 3 Hz

FIGURA 78 - Campo médio de velocidade para Pos 4 e frequência 4 Hz.

FIGURA 79 - Campo médio de velocidade para Pos 5 e frequência 1 Hz.

FIGURA 80 - Campo médio de velocidade para Pos 5 e frequência 2 Hz.

FIGURA 81 - Campo médio de velocidade para Pos 5 e frequência 3 Hz.

FIGURA 82 - Campo médio de velocidade para Pos 5 e frequência 4 Hz.

FIGURA 83 - Campo médio de velocidade para Pos 6 e frequência 1 Hz.

FIGURA 84 - Campo médio de velocidade para Pos 6 e frequência 2 Hz.

FIGURA 85 - Campo médio de velocidade para Pos 6 e frequência 3 Hz.

FIGURA 86 - Campo médio de velocidade para Pos 6 e frequência 4 Hz.

Distribuição horizontal de u , w e i

Apresenta-se nas FIGURAS 87-92 a distribuição horizontal de u , w e i , para o Plano 1 (sobre a barra) e frequências de 3 Hz e 4 Hz, e para o Plano 2 (entre barras) e frequências de 1, 2, 3 e 4 Hz.

FIGURA 87 - Distribuição horizontal de u , w e i , para o Plano 1 e frequência 3 Hz.

Sobre a barra - 4 Hz

FIGURA 88 - Distribuição horizontal de u , w e i , para o Plano 1 e frequência 4 Hz.

FIGURA 89 - Distribuição horizontal de u , w e i , para o Plano 2 e frequência 1 Hz.

FIGURA 90 - Distribuição horizontal de u, w e i, para o Plano 2 e frequência 2 Hz.

FIGURA 91 - Distribuição horizontal de u, w e i, para o Plano 2 e frequência 3 Hz.

FIGURA 92 - Distribuição horizontal de u , w e i , para o Plano 2 e frequência 4 Hz.

Propriedade da turbulência isotrópica: $w/u = 1$

As FIGURAS 93 e 94 apresentam a relação w/u para o Plano 1 e frequências de 3 Hz e 4 Hz, e a mesma relação para o Plano 2 e frequências de 1, 2, 3 e 4 Hz de oscilação da grade.

FIGURA 93 - Relação w/u para o Plano 1 e frequências de 3 Hz e 4 Hz.

FIGURA 94 - Relação w/u para o Plano 2 e frequências de 1, 2, 3 e 4 Hz.

Tensões de Reynolds

As FIGURAS 95 e 96 mostram as tensões de Reynolds para o Plano 1 e frequências de 3 Hz e 4 Hz, e as tensões de Reynolds para o Plano 2 e frequências de 1, 2, 3 e 4 Hz.

FIGURA 95 - Tensões de Reynolds para o Plano 1 e frequências 3 Hz e 4 Hz.

FIGURA 96 - Tensões de Reynolds para o Plano 2 e frequências de 1, 2, 3 e 4 Hz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATKINSON, J. F.; WOLCOTT, S. B. (1990). Interfacial Mixing Driven by Mean Shear and Oscillating Grid. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 116, n. 3, p. 397-413, Mar.
- BAINES, W. D.; PETERSON, E. G. (1951). An investigation of flow through screens, *Transactions American Society of Mechanical Engineers*, v.73, p.467.
- BARRY, M. E.; IVEY, G. N., WINTERS, K. B., IMBERGER, J. (2001). Measurements of diapycnal diffusivities in stratified fluids. *Journal of Fluid Mechanics*, v.442, p.267-291, Sept.
- BATCHELOR, G. K.; TOWNSEND, A. A. (1947). Decay of vorticity in isotropic turbulence, *Proceedings Royal Society A*, v.190, p.534.
- BATCHELOR, G. K.; TOWNSEND, A. A. (1948). Decay of isotropic turbulence in the initial period, *Proceedings Royal Society A*, v. 193, p. 539.
- BOUVARD, M.; DUMAS, H. (1967). Application de la methode de fil chaud a la mesure de la turbulence dans l'eau. *La Houille Blanche*, n.3, p.257-270.
- BRUMLEY, B. H.; JIRKA, G. H. (1987). Near-Surface Turbulence in a Grid-Stirred Tank, *Journal of Fluid Mechanics*, v.183, p.236-263.
- BRUNK, B.; WEBER-SHIRK, M., JENSEN, A.; JIRKA, G.; LION, L. W. (1996). Modeling natural hydrodynamics systems with a differential-turbulence column. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.122, n.7, July.
- BRUNK, B. K.; KOCH, D. L.; LION, L. W. (1998). Observations of coagulation in isotropic turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 371, p.81-107, Sep.
- BUDWIG, R.; TAVOULARIS, S.; CORRSIN, S. (1985). Temperature fluctuations and heat flux in grid-generated isotropic turbulence with streamwise and transverse mean-temperature gradients. *Journal of Fluid Mechanics*, v.153, p.441-460.
- CASSON, L. W.; LAWLER, D. F.; BOGARD, D. G. (1994). Spectral analysis of fluid flow in oscillating grid reactor. *Journal of Engineering Mechanics*, v.120, n.2, Feb.
- CHENG, N. S.; LAW, A. W.K. (2001). Measurements of Turbulence Generated by Oscillating Grid. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 127, n. 3, p. 201-208, Mar.
- COMTE-BELLOT, G.; CORRSIN, S. (1966). The use of a contraction to improve the isotropy of grid-generated turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, v.25, n.4, p.657-682.
- CORRSIN, S. (1942). Decay of turbulence behind three similar grids, *Aerospace Engineering*. California. Tese - California Institute of Technology.
- CORRSIN, S. (1963). Turbulence: experimental methods. *Handbuch der Physik*, v.8, Strömungsmechanik II, p. 524-587.

- DAVIES, J. T. (1972). *Turbulence Phenomena*. New York, Academic Press. Cap.1, p. 1-77: Velocities and Stresses in Turbulent Flows.
- DE SILVA, I. P. D.; FERNANDO, H. J. S. (1992). Some aspects of mixing in a stratified turbulent patch. *Journal of Fluid Mechanics*, v.240, p.601-625.
- DE SILVA, I. P. D.; FERNANDO, H. J. S. (1994). Oscillating grids as a source of nearly isotropic turbulence. *Physics of Fluids*, v.6, n.7, p.2455-2464.
- DE SILVA, I. P. D.; FERNANDO, H. J. S. (1998). Experiments on collapsing turbulent regions in stratified fluids. *Journal of Fluid Mechanics*, v.358, p.29-60.
- DOEBELIN, E. O. (1990). *Measurements systems- application and design*. 4.ed. New York, McGraw-Hill. (Measuring devices, pt.2).
- DRYDEN, H. L.; KUETHE, A. M. (1930). *Natl. Advisory Comm. Aeronaut. Tech. Repts.*, n.342
- DRYDEN, H. L.; SCHUBAUER, G. B.; MOCK, W. C.; SKRAMSTAD, H. K. (1937). Measurements of the intensity and scale of wind tunnel turbulence and their relation to the critical Reynolds number of spheres. *NACA Rep.*, n.581.
- E, X.; HOPFINGER, E. J. (1986). On mixing across an interface in stably stratified fluid. *Journal of Fluid Mechanics*, v.166, p.227-244.
- FERREIRA, A. B. H. (1999). *Novo Aurélio*. 3.ed. São Paulo, Nova Fronteira, p.2018.
- GRANT, H. L.; NISBET, I. C. T. (1957). The inhomogeneity of grid turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, v.2, p.263.
- HIBBS, D. E.; GULLIVER, J. S. (1999). Dissolution rate coefficients for surface slicks on rivers. *Water Research*, v.133, n.8, p.1811-1816.
- HINZE, J. O. (1959). *Turbulence: An Introduction to Its Mechanism and Theory*. New York, McGraw-Hill.
- HOPFINGER, E. J.; TOLY, J. A. (1976). Spatially decaying turbulence and its relation to mixing across density interfaces. *Journal of Fluid Mechanics*, v.78, part 1, p.155-175.
- HOUAISS, A.; VILLAR, M. S. (2001). *Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa*, Rio de Janeiro, Objetiva Ltda., p.2787.
- HUNT, J. C. R.; SANDHAM, N. D.; VASSILICOS, J. C., LAUNDER, B. E.; MONKEWITZ, P. A.; HEWITT, G. F. (2001). Developments in turbulence research: a review based on the 1999 Programme of the Isaac Newton Institute, Cambridge. *Journal of Fluid Mechanics*, v.436, p.353-391.
- ITSWEIRE, E. C.; HELLAND, K. N.; VAN ATTA, C. W. (1986). The evolution of grid-generated turbulence in a stably stratified fluid, *Journal of Fluid Mechanics*, v.162, p.299-338.

- KIT, E. L. G.; STRANG, E. J.; FERNANDO, H. J. S. (1997). Measurements of turbulence near shear-free density interfaces. *Journal of Fluid Mechanics*, v.334, p.293-314.
- LIEM, L. E.; SMITH, D. W.; STANLEY, S. J. (1999). Turbulent velocity in flocculation by means of grids. *Journal of environmental Engineering*, v.125, n.3, p.224-233.
- LYN, D. A. (1997). A PIV study of an oscillating-grid flow. *Experimental and numerical flow visualization and laser anemometry*, v.13, Fluids Engineering Division (Publication), ASME, New York.
- McDOUGAL, T. J. (1979). Measurements of turbulence in a zero-mean-shear mixed layer. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, U.K., v.94, p.409-431.
- MATSUNAGA, N.; SUGIHARA, Y.; KOMATSU, T. (1991). A numerical simulation of oscillating-grid turbulence by using the $k-\varepsilon$ model, In: LEE, J. H. W.; CHEUNG, Y. K., eds. *Environmental Hydraulics*, The Netherlands, A.A.Balkema. v.1, p.427-432.
- MOHAMED, M. S., LA RUE, J. C. (1990). The decay power law in grid-generated turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, v.219, p.195-214.
- NOKES, R. I. (1988). On the entrainment rate across a density interface. *Journal of Fluid Mechanics*, v.188, p.185-204.
- O PERIGO vem do Ártico (2001). *Época*, Rio de Janeiro, ed. Globo, ano III, n.143, fevereiro.
- ROMA, W. N. L. (1988). *Medida dos parâmetros de turbulência superficial e sua interrelação com o coeficiente de reaeração*. São Paulo. 74p. Tese (Livre-doscência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ROUSE, H. (1939). Experiments on the mechanics of sediment suspension. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF APPLIED MECHANICS, 5., Cambridge. *Proceedings*, p.550-554.
- SCHULZ, H. E. (2001). *Alternativas em Turbulência*. São Carlos, EESC-USP
- SHY, S. S.; TANG, C. Y.; FANN, S. Y. (1997). A nearly isotropic turbulence generated by a pair of vibrating grids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v.14, p.251-262.
- SIMONS, L. F. G.; SALTER, C. (1934). Experimental investigation and analysis of the velocity variations in turbulent flow, *Proceedings of the Royal Society A*, v.145, 212.
- SRDIC, A.; FERNANDO, H. J. S.; MONTENEGRO, L. (1996). Generation of nearly isotropic turbulence using two oscillating grids. *Experiments in Fluids*, v.20, p.395-397.
- TAYLOR, G. I. (1935b). Statistical Theory of Turbulence. *Proceedings of the Royal Society of London A*, v.151.
- TAYLOR, G. I.; KARMAN, T. V. (1937). *Journal Aeronautical Society*, v.41, p.1109.

- THOMPSON, S. M.; TURNER, J. S. (1975). Mixing across an interface due to turbulence generated by an oscillating grid. *Journal of Fluid Mechanics*, v.67, n.2, p.349-368.
- TOWNSEND, A. A. (1976). Homogeneous Turbulent Flows. In: THE STRUCTURE of turbulent shear flow. Cambridge, Cambridge University Press. Cap.3, p. 45-103.
- TSUJI, H.; HAMA, F. R. (1953). Experiment on the decay of turbulence behind two grids. *Journal of Aerosol Science*, v. 20, p.848.
- TURNER, J. S. (1968). The influence of molecular diffusivity on turbulent entrainment across a density interface. *Journal of Fluid Mechanics*, n. 23, p. 639.
- VOROPAYEV, S. I.; FERNANDO, H. J. S. (1996). Propagation of grid turbulence in homogeneous fluids. *Physics of Fluids*, v.8 n.9, Sept.
- WYATT, L. A. (1955). Energy and spectra in decaying homogeneous turbulence. Manchester. Tese (Doutorado) - University of Manchester.

APÊNDICE

Planilha gerada pelo software **Visiflow**, referente a um campo instantâneo de velocidade para a POS 1 e frequência de 1 Hz. As primeiras duas colunas se referem às coordenadas do vetor velocidade nos eixos x e z, respectivamente. A terceira coluna refere-se à magnitude do vetor e a quarta ao ângulo de inclinação do vetor, em radianos, em relação ao eixo x. Através desta tabela pode se ter uma idéia da dificuldade em se trabalhar apenas com o **Visiflow** para a obtenção dos campos de velocidade turbulenta a partir dos 4800 campos instantâneos nele gerados.

Campo instantâneo de velocidade gerado pelo programa Visiflow para a POS 1

e frequência de 1 Hz.

VISIFLOW ASCII Velocity data file:

Start of header data;

Number of vectors=	841
Randomly positioned data=	0
Number of columns=	29
Number of rows=	29
Vector grid separation=	3347
Area left corner=	0.000000
Area right corner=	100.418.500.800
Area bottom corner=	0.000000
Area top corner=	100.418.500.800
Number of peaks=	1
Number of microns/ypixel=	209.205.210
Number of microns/ypixel=	209.205.210
Macro factor=	1.000.000
Time separation=	33.898.000.000
Flow variable=	none

3347	3347	0.007336	2.792.517
6694	3347	0.010298	2.632.451
10041	3347	0.010677	2.522.907
13388	3347	0.008723	2.241.674
16735	3347	0.003619	-3.092.898
20082	3347	0.002567	-2.252.182
23429	3347	0.002876	-1.166.982
26776	3347	0.003938	-1.084.768
30123	3347	0.013390	-0.984905
33470	3347	0.012540	-1.380.968
36817	3347	0.008993	-1.968.251
40164	3347	0.008910	-1.692.015
43511	3347	0.004715	-1.824.241

46858	3347	0.007182	2.272.496
50205	3347	0.014795	2.132.399
53552	3347	0.004836	2.104.339
56899	3347	0.003133	2.138.079
60246	3347	0.002368	2.231.584
63593	3347	0.003439	2.342.851
66940	3347	0.004371	2.246.616
70287	3347	0.007032	1.999.128
73634	3347	0.011774	1.541.145
76981	3347	0.015403	1.375.892
80328	3347	0.013664	1.269.405
83675	3347	0.006507	1.345.723
87022	3347	0.003700	1.353.729
90369	3347	0.001481	1.537.108
93716	3347	0.000457	1.753.695
97063	3347	0.000284	1.412.881
3347	6694	0.014885	2.789.827
6694	6694	0.020505	2.709.568
10041	6694	0.016118	2.595.171
13388	6694	0.009471	2.100.606
16735	6694	0.001799	-2.450.105
20082	6694	0.004481	-1.078.696
23429	6694	0.007482	-0.586254
26776	6694	0.012514	-0.180667
30123	6694	0.011101	-0.357625
33470	6694	0.007194	-1.202.183
36817	6694	0.006081	-1.751.328
40164	6694	0.004166	-1.680.637
43511	6694	0.001076	2.946.129
46858	6694	0.004508	2.132.603
50205	6694	0.010691	2.058.557
53552	6694	0.002572	1.890.944
56899	6694	0.002969	2.016.153
60246	6694	0.004752	2.145.917
63593	6694	0.006460	2.207.282
66940	6694	0.006623	1.963.814
70287	6694	0.008245	1.859.972
73634	6694	0.011007	1.480.088
76981	6694	0.016900	1.189.687
80328	6694	0.015187	1.195.331
83675	6694	0.009427	1.359.338
87022	6694	0.006516	1.625.716
90369	6694	0.004872	1.836.603
93716	6694	0.003131	1.952.205
97063	6694	0.001702	2.049.778
3347	10041	0.023266	2.698.983
6694	10041	0.013186	2.764.901
10041	10041	0.010783	2.548.518
13388	10041	0.003763	2.558.347
16735	10041	0.002065	0.397151
20082	10041	0.003493	-0.277126
23429	10041	0.007231	-0.363598
26776	10041	0.010543	-0.279329

30123	10041	0.009297	-0.466984
33470	10041	0.007135	-1.193.864
36817	10041	0.005804	-1.244.368
40164	10041	0.003279	-0.958145
43511	10041	0.001906	0.239728
46858	10041	0.001937	0.650904
50205	10041	0.003277	1.098.942
53552	10041	0.002633	1.457.244
56899	10041	0.003831	1.910.925
60246	10041	0.006220	2.013.528
63593	10041	0.007706	2.043.665
66940	10041	0.007445	1.815.957
70287	10041	0.007158	1.727.510
73634	10041	0.011073	1.262.579
76981	10041	0.009376	1.131.595
80328	10041	0.009130	1.069.177
83675	10041	0.011759	1.550.089
87022	10041	0.012929	1.803.867
90369	10041	0.010233	1.928.295
93716	10041	0.007437	1.982.655
97063	10041	0.004943	2.008.493
3347	13388	0.022029	2.855.799
6694	13388	0.012923	2.546.950
10041	13388	0.009469	2.550.949
13388	13388	0.003279	2.183.260
16735	13388	0.003330	0.954763
20082	13388	0.002494	-0.143363
23429	13388	0.006148	-0.778177
26776	13388	0.006562	-0.827627
30123	13388	0.006144	-0.850630
33470	13388	0.004583	-0.782713
36817	13388	0.004532	-0.691952
40164	13388	0.005097	-0.407996
43511	13388	0.004852	-0.087129
46858	13388	0.004421	0.335277
50205	13388	0.006847	0.471171
53552	13388	0.004740	1.531.751
56899	13388	0.005804	1.782.787
60246	13388	0.009034	1.865.991
63593	13388	0.009367	1.766.735
66940	13388	0.008179	1.747.341
70287	13388	0.004515	1.621.681
73634	13388	0.004571	1.443.437
76981	13388	0.006211	1.359.404
80328	13388	0.008210	1.334.210
83675	13388	0.014379	1.739.535
87022	13388	0.022564	1.913.617
90369	13388	0.020143	1.921.121
93716	13388	0.009983	1.990.700
97063	13388	0.008248	2.019.907
3347	16735	0.014438	2.146.969
6694	16735	0.011515	1.895.261
10041	16735	0.009205	1.918.279

13388	16735	0.005548	1.945.452
16735	16735	0.001565	1.247.016
20082	16735	0.003511	-1.316.253
23429	16735	0.005381	-1.156.353
26776	16735	0.006208	-1.062.110
30123	16735	0.005864	-1.047.838
33470	16735	0.005077	-0.979774
36817	16735	0.005092	-0.719109
40164	16735	0.006168	-0.307342
43511	16735	0.005896	0.190955
46858	16735	0.007145	0.984147
50205	16735	0.009951	1.305.489
53552	16735	0.009426	1.410.695
56899	16735	0.006979	1.481.052
60246	16735	0.008397	1.663.136
63593	16735	0.008025	1.529.450
66940	16735	0.006626	1.472.833
70287	16735	0.002867	1.444.564
73634	16735	0.002795	1.811.746
76981	16735	0.006354	1.941.484
80328	16735	0.008677	1.811.373
83675	16735	0.014187	1.857.348
87022	16735	0.018504	1.898.119
90369	16735	0.018198	1.915.081
93716	16735	0.015776	1.909.737
97063	16735	0.014506	2.126.908
3347	20082	0.016579	1.663.537
6694	20082	0.015693	1.644.358
10041	20082	0.009416	1.968.089
13388	20082	0.006021	2.383.257
16735	20082	0.004110	-2.337.121
20082	20082	0.004983	-1.679.948
23429	20082	0.005735	-1.426.822
26776	20082	0.005781	-1.262.921
30123	20082	0.005107	-1.059.392
33470	20082	0.004187	-0.844713
36817	20082	0.003849	-0.342287
40164	20082	0.005333	0.236839
43511	20082	0.007931	0.862006
46858	20082	0.013621	1.296.231
50205	20082	0.015787	1.290.226
53552	20082	0.014294	1.336.095
56899	20082	0.010049	1.350.397
60246	20082	0.009200	1.331.481
63593	20082	0.008582	1.158.232
66940	20082	0.007691	0.912276
70287	20082	0.001868	0.218931
73634	20082	0.000244	-0.300302
76981	20082	0.003148	1.452.473
80328	20082	0.010699	1.835.382
83675	20082	0.016090	1.936.298
87022	20082	0.019370	1.892.131
90369	20082	0.019936	1.865.376

93716	20082	0.019530	1.869.350
97063	20082	0.019732	1.890.637
3347	23429	0.016660	1.456.378
6694	23429	0.012751	1.493.211
10041	23429	0.006909	1.960.471
13388	23429	0.003815	-2.803.142
16735	23429	0.005687	-2.230.403
20082	23429	0.006728	-1.758.924
23429	23429	0.006733	-1.473.836
26776	23429	0.006306	-1.274.790
30123	23429	0.005390	-0.957704
33470	23429	0.004374	-0.773111
36817	23429	0.002609	-0.074274
40164	23429	0.005527	1.035.117
43511	23429	0.012527	1.350.742
46858	23429	0.018681	1.487.462
50205	23429	0.022871	1.382.847
53552	23429	0.020781	1.424.311
56899	23429	0.013191	1.550.470
60246	23429	0.011681	1.485.015
63593	23429	0.012325	1.095.993
66940	23429	0.010292	0.683756
70287	23429	0.011383	0.103046
73634	23429	0.007426	0.189416
76981	23429	0.004784	1.284.270
80328	23429	0.012598	1.948.972
83675	23429	0.016350	1.884.127
87022	23429	0.018500	1.712.983
90369	23429	0.019040	1.685.729
93716	23429	0.018596	1.731.277
97063	23429	0.017045	1.731.581
3347	26776	0.014882	1.068.724
6694	26776	0.010478	0.727533
10041	26776	0.003401	1.895.441
13388	26776	0.002873	-2.475.765
16735	26776	0.005686	-2.001.242
20082	26776	0.007986	-1.600.381
23429	26776	0.007939	-1.497.015
26776	26776	0.006510	-1.396.125
30123	26776	0.004630	-1.166.310
33470	26776	0.002976	-1.099.051
36817	26776	0.000762	0.959937
40164	26776	0.005933	1.656.356
43511	26776	0.015187	1.742.001
46858	26776	0.018281	1.664.405
50205	26776	0.022063	1.539.944
53552	26776	0.021466	1.612.789
56899	26776	0.018443	1.835.633
60246	26776	0.015154	1.780.507
63593	26776	0.009871	1.229.807
66940	26776	0.006440	0.578101
70287	26776	0.010235	-0.197975
73634	26776	0.007177	-0.067446

76981	26776	0.004443	0.773248
80328	26776	0.008747	1.413.271
83675	26776	0.014172	1.481.532
87022	26776	0.018269	1.444.643
90369	26776	0.018087	1.391.799
93716	26776	0.013668	1.246.440
97063	26776	0.010627	1.173.906
3347	30123	0.016304	0.840097
6694	30123	0.011548	0.867171
10041	30123	0.003174	1.205.407
13388	30123	0.001578	-1.669.050
16735	30123	0.004447	-1.650.472
20082	30123	0.007853	-1.567.164
23429	30123	0.008215	-1.571.794
26776	30123	0.006603	-1.618.613
30123	30123	0.003500	-1.835.678
33470	30123	0.002435	-2.268.364
36817	30123	0.003397	2.916.772
40164	30123	0.006612	2.260.333
43511	30123	0.014570	2.099.816
46858	30123	0.017009	1.940.069
50205	30123	0.017066	1.778.349
53552	30123	0.018006	1.881.250
56899	30123	0.015717	1.695.007
60246	30123	0.012281	1.685.189
63593	30123	0.004163	1.714.253
66940	30123	0.001637	0.101006
70287	30123	0.005413	-0.273585
73634	30123	0.006056	-0.182224
76981	30123	0.004031	0.461912
80328	30123	0.008214	1.082.848
83675	30123	0.012451	1.149.011
87022	30123	0.016549	1.065.715
90369	30123	0.014867	1.016.108
93716	30123	0.009487	0.751675
97063	30123	0.009544	-0.414349
3347	33470	0.012491	1.042.834
6694	33470	0.008726	1.082.331
10041	33470	0.002709	1.436.248
13388	33470	0.000870	-0.904238
16735	33470	0.004355	-1.428.886
20082	33470	0.006345	-1.505.783
23429	33470	0.007438	-1.632.111
26776	33470	0.005894	-1.841.190
30123	33470	0.003588	-2.541.517
33470	33470	0.004126	3.126.153
36817	33470	0.005847	2.918.434
40164	33470	0.003322	3.016.427
43511	33470	0.012811	2.103.193
46858	33470	0.015293	1.953.539
50205	33470	0.010678	1.551.370
53552	33470	0.011511	1.311.757
56899	33470	0.013893	1.166.692

60246	33470	0.012467	0.930777
63593	33470	0.005457	0.697524
66940	33470	0.004206	-0.225284
70287	33470	0.005407	-0.613804
73634	33470	0.004581	-0.763127
76981	33470	0.004232	-0.050321
80328	33470	0.006481	0.585352
83675	33470	0.012377	0.918521
87022	33470	0.014122	1.010.499
90369	33470	0.012722	1.089.410
93716	33470	0.009065	0.863561
97063	33470	0.004962	1.623.982
3347	36817	0.012293	2.105.151
6694	36817	0.006097	1.902.849
10041	36817	0.002220	1.415.329
13388	36817	0.001539	-0.555110
16735	36817	0.004468	-1.135.594
20082	36817	0.006097	-1.321.830
23429	36817	0.006946	-1.563.484
26776	36817	0.005033	-2.031.136
30123	36817	0.004315	-2.810.917
33470	36817	0.006315	2.811.370
36817	36817	0.008322	2.569.346
40164	36817	0.010300	2.360.030
43511	36817	0.013745	2.132.351
46858	36817	0.015571	1.914.887
50205	36817	0.010633	1.534.848
53552	36817	0.011332	1.221.392
56899	36817	0.014892	0.899509
60246	36817	0.015475	0.581096
63593	36817	0.014377	0.256930
66940	36817	0.007306	-0.392041
70287	36817	0.006650	-0.684040
73634	36817	0.005195	-0.819531
76981	36817	0.004164	-0.335517
80328	36817	0.004705	0.302254
83675	36817	0.007994	0.804477
87022	36817	0.010168	1.129.407
90369	36817	0.011643	1.813.246
93716	36817	0.010222	1.348.542
97063	36817	0.010891	1.339.443
3347	40164	0.009907	2.081.145
6694	40164	0.004487	1.717.163
10041	40164	0.001863	0.404702
13388	40164	0.003836	-0.539246
16735	40164	0.006390	-0.711858
20082	40164	0.006575	-1.042.559
23429	40164	0.006556	-1.490.348
26776	40164	0.005298	-1.944.233
30123	40164	0.004543	-2.802.764
33470	40164	0.006274	2.793.647
36817	40164	0.008331	2.504.397
40164	40164	0.010533	2.306.032

43511	40164	0.013357	2.200.187
46858	40164	0.010841	1.816.175
50205	40164	0.009197	1.579.703
53552	40164	0.008938	1.341.744
56899	40164	0.010326	0.901210
60246	40164	0.011130	0.532393
63593	40164	0.010712	0.156065
66940	40164	0.006290	-0.531241
70287	40164	0.007241	-0.699464
73634	40164	0.006351	-0.737915
76981	40164	0.003576	-0.621412
80328	40164	0.002683	0.129251
83675	40164	0.005452	0.785791
87022	40164	0.010930	0.957630
90369	40164	0.017337	0.985845
93716	40164	0.019817	1.097.116
97063	40164	0.023469	1.173.639
3347	43511	0.003783	0.802628
6694	43511	0.003684	0.256389
10041	43511	0.005707	-0.353534
13388	43511	0.006789	-0.488682
16735	43511	0.005674	-0.654271
20082	43511	0.005695	-0.927993
23429	43511	0.006101	-1.392.840
26776	43511	0.004854	-1.803.502
30123	43511	0.003953	-2.614.455
33470	43511	0.004230	3.100.755
36817	43511	0.005861	2.403.236
40164	43511	0.007166	2.117.085
43511	43511	0.008420	1.874.272
46858	43511	0.009544	1.784.947
50205	43511	0.008867	1.720.386
53552	43511	0.008102	1.798.580
56899	43511	0.003349	2.061.131
60246	43511	0.000779	1.455.888
63593	43511	0.003320	-0.531275
66940	43511	0.006158	-0.815803
70287	43511	0.007189	-0.816157
73634	43511	0.006564	-0.730362
76981	43511	0.004689	-0.512091
80328	43511	0.002353	0.210980
83675	43511	0.003926	0.898136
87022	43511	0.009058	1.029.839
90369	43511	0.016071	1.056.770
93716	43511	0.019780	1.206.293
97063	43511	0.025720	1.446.884
3347	46858	0.003884	-0.157510
6694	46858	0.004271	-0.289415
10041	46858	0.005975	-0.582198
13388	46858	0.006560	-0.649668
16735	46858	0.006076	-0.783981
20082	46858	0.005895	-0.955711
23429	46858	0.005501	-1.333.484

26776	46858	0.004875	-1.540.788
30123	46858	0.003577	-1.943.587
33470	46858	0.002739	-1.798.260
36817	46858	0.000847	-2.202.804
40164	46858	0.002408	1.714.566
43511	46858	0.005914	1.533.910
46858	46858	0.006688	1.518.299
50205	46858	0.006155	1.465.799
53552	46858	0.003636	1.582.752
56899	46858	0.001512	1.879.623
60246	46858	0.001384	-1.856.124
63593	46858	0.005200	-1.319.462
66940	46858	0.006264	-1.179.568
70287	46858	0.006543	-1.040.086
73634	46858	0.005602	-0.762393
76981	46858	0.004034	-0.468550
80328	46858	0.002344	0.658351
83675	46858	0.002518	1.299.048
87022	46858	0.006150	1.421.114
90369	46858	0.011732	1.374.010
93716	46858	0.019244	1.283.193
97063	46858	0.023783	1.297.282
3347	50205	0.006039	-0.653155
6694	50205	0.005899	-0.908134
10041	50205	0.005454	-0.941056
13388	50205	0.005339	-0.951433
16735	50205	0.004920	-0.910143
20082	50205	0.005394	-1.086.916
23429	50205	0.006475	-1.310.366
26776	50205	0.006120	-1.359.703
30123	50205	0.005585	-1.360.147
33470	50205	0.004718	-1.320.689
36817	50205	0.003108	-1.100.730
40164	50205	0.001831	0.027869
43511	50205	0.004638	0.698577
46858	50205	0.005710	0.653130
50205	50205	0.006284	0.433047
53552	50205	0.006030	0.449543
56899	50205	0.003648	0.660210
60246	50205	0.002890	-1.186.793
63593	50205	0.006737	-1.387.019
66940	50205	0.007115	-1.377.913
70287	50205	0.006396	-1.356.028
73634	50205	0.003922	-1.133.815
76981	50205	0.002179	-0.602970
80328	50205	0.000912	0.761872
83675	50205	0.003453	2.179.175
87022	50205	0.006938	1.873.752
90369	50205	0.012636	1.609.909
93716	50205	0.019960	1.396.229
97063	50205	0.022484	1.359.214
3347	53552	0.006366	-0.763147
6694	53552	0.006886	-1.012.310

10041	53552	0.006048	-1.061.355
13388	53552	0.005267	-1.163.529
16735	53552	0.006053	-1.194.412
20082	53552	0.007116	-1.315.690
23429	53552	0.007414	-1.352.522
26776	53552	0.007510	-1.349.990
30123	53552	0.007825	-1.264.406
33470	53552	0.006867	-1.195.017
36817	53552	0.005719	-1.013.893
40164	53552	0.004074	-0.583428
43511	53552	0.004410	0.015393
46858	53552	0.005241	0.134010
50205	53552	0.006503	0.127352
53552	53552	0.007396	0.146292
56899	53552	0.006577	-0.012230
60246	53552	0.005965	-0.511447
63593	53552	0.007152	-1.197.131
66940	53552	0.006289	-1.335.286
70287	53552	0.005550	-1.518.423
73634	53552	0.003404	-1.625.131
76981	53552	0.001199	-1.936.062
80328	53552	0.002292	2.822.674
83675	53552	0.006987	2.723.982
87022	53552	0.009099	2.389.372
90369	53552	0.013421	1.966.800
93716	53552	0.015191	1.703.632
97063	53552	0.017670	1.577.477
3347	56899	0.006984	-0.895670
6694	56899	0.006846	-1.024.204
10041	56899	0.006505	-1.107.725
13388	56899	0.006450	-1.212.085
16735	56899	0.006609	-1.274.146
20082	56899	0.007122	-1.342.807
23429	56899	0.007438	-1.369.161
26776	56899	0.007772	-1.363.559
30123	56899	0.008012	-1.269.147
33470	56899	0.007607	-1.180.299
36817	56899	0.006607	-0.984147
40164	56899	0.005666	-0.797188
43511	56899	0.004506	-0.507556
46858	56899	0.004823	-0.367184
50205	56899	0.005895	-0.225085
53552	56899	0.007482	-0.050795
56899	56899	0.009179	0.021771
60246	56899	0.008525	-0.170454
63593	56899	0.006658	-0.923058
66940	56899	0.005362	-1.381.378
70287	56899	0.004363	-1.870.544
73634	56899	0.003734	-2.269.380
76981	56899	0.003690	-2.878.542
80328	56899	0.005524	2.818.800
83675	56899	0.007925	2.726.054
87022	56899	0.009369	2.517.185

90369	56899	0.011276	2.213.597
93716	56899	0.013408	1.868.564
97063	56899	0.013421	1.797.586
3347	60246	0.006671	-1.015.202
6694	60246	0.006495	-1.074.583
10041	60246	0.006247	-1.149.163
13388	60246	0.006428	-1.215.019
16735	60246	0.006604	-1.279.434
20082	60246	0.006655	-1.355.343
23429	60246	0.006868	-1.382.354
26776	60246	0.007250	-1.389.978
30123	60246	0.007132	-1.357.541
33470	60246	0.006794	-1.268.245
36817	60246	0.006589	-1.074.742
40164	60246	0.005877	-0.968007
43511	60246	0.004834	-0.858245
46858	60246	0.004997	-0.815914
50205	60246	0.005023	-0.711992
53552	60246	0.005497	-0.420791
56899	60246	0.006988	-0.182064
60246	60246	0.006651	-0.274018
63593	60246	0.004609	-0.928437
66940	60246	0.003597	-1.514.807
70287	60246	0.003686	-2.279.978
73634	60246	0.004208	-2.796.254
76981	60246	0.005070	3.027.272
80328	60246	0.006072	2.707.195
83675	60246	0.007550	2.653.302
87022	60246	0.008470	2.542.112
90369	60246	0.008929	2.425.902
93716	60246	0.007842	2.394.527
97063	60246	0.005379	2.499.041
3347	63593	0.005548	-1.077.810
6694	63593	0.005482	-1.162.633
10041	63593	0.005829	-1.195.521
13388	63593	0.006308	-1.220.399
16735	63593	0.006598	-1.271.528
20082	63593	0.006689	-1.340.591
23429	63593	0.006778	-1.356.340
26776	63593	0.006777	-1.373.602
30123	63593	0.006749	-1.374.240
33470	63593	0.006564	-1.351.925
36817	63593	0.005917	-1.289.562
40164	63593	0.005427	-1.216.486
43511	63593	0.005107	-1.162.835
46858	63593	0.004861	-1.139.656
50205	63593	0.004478	-1.077.657
53552	63593	0.003983	-0.883548
56899	63593	0.003375	-0.513235
60246	63593	0.003130	-0.554516
63593	63593	0.002134	-0.964583
66940	63593	0.002171	-2.308.799
70287	63593	0.003490	-2.803.518

73634	63593	0.005026	-3.114.067
76981	63593	0.006118	2.831.396
80328	63593	0.007086	2.583.318
83675	63593	0.007628	2.402.510
87022	63593	0.007094	2.318.156
90369	63593	0.005222	2.500.579
93716	63593	0.004345	2.653.560
97063	63593	0.004178	2.898.167
3347	66940	0.004367	-1.134.888
6694	66940	0.004721	-1.233.089
10041	66940	0.005186	-1.243.259
13388	66940	0.005841	-1.238.486
16735	66940	0.006236	-1.260.344
20082	66940	0.006401	-1.303.612
23429	66940	0.006514	-1.317.444
26776	66940	0.006531	-1.334.204
30123	66940	0.006332	-1.391.575
33470	66940	0.006090	-1.358.321
36817	66940	0.005766	-1.330.162
40164	66940	0.005413	-1.285.042
43511	66940	0.005127	-1.257.212
46858	66940	0.004865	-1.260.259
50205	66940	0.004327	-1.245.559
53552	66940	0.003642	-1.133.542
56899	66940	0.002811	-0.884181
60246	66940	0.002530	-0.818042
63593	66940	0.001691	-1.163.718
66940	66940	0.001685	-2.452.819
70287	66940	0.003852	-3.113.653
73634	66940	0.006311	2.953.870
76981	66940	0.007535	2.750.646
80328	66940	0.008027	2.541.446
83675	66940	0.007313	2.342.951
87022	66940	0.003774	2.169.140
90369	66940	0.002936	2.316.846
93716	66940	0.003590	2.784.538
97063	66940	0.003506	3.049.970
3347	70287	0.002856	-1.236.016
6694	70287	0.003367	-1.260.375
10041	70287	0.004322	-1.289.505
13388	70287	0.004764	-1.256.970
16735	70287	0.005167	-1.236.854
20082	70287	0.005627	-1.235.107
23429	70287	0.005917	-1.294.894
26776	70287	0.005880	-1.308.232
30123	70287	0.005704	-1.364.977
33470	70287	0.005645	-1.313.604
36817	70287	0.005491	-1.303.431
40164	70287	0.005068	-1.300.947
43511	70287	0.004911	-1.301.014
46858	70287	0.004728	-1.312.532
50205	70287	0.004231	-1.344.948
53552	70287	0.003661	-1.294.312

56899	70287	0.002937	-1.186.337
60246	70287	0.002418	-0.996819
63593	70287	0.000963	-0.870939
66940	70287	0.001121	2.569.826
70287	70287	0.004411	2.625.355
73634	70287	0.006918	2.654.014
76981	70287	0.008410	2.593.303
80328	70287	0.008720	2.507.440
83675	70287	0.006760	2.344.009
87022	70287	0.004303	2.254.747
90369	70287	0.002608	2.464.494
93716	70287	0.002887	2.776.732
97063	70287	0.004937	2.704.576
3347	73634	0.002606	-1.355.582
6694	73634	0.002845	-1.334.462
10041	73634	0.003351	-1.294.194
13388	73634	0.003800	-1.272.164
16735	73634	0.004355	-1.257.482
20082	73634	0.004695	-1.243.277
23429	73634	0.004924	-1.219.116
26776	73634	0.004558	-1.292.740
30123	73634	0.004524	-1.276.997
33470	73634	0.005200	-1.276.847
36817	73634	0.005148	-1.283.129
40164	73634	0.004908	-1.300.232
43511	73634	0.004713	-1.326.227
46858	73634	0.004539	-1.359.744
50205	73634	0.004170	-1.414.476
53552	73634	0.003611	-1.416.055
56899	73634	0.002811	-1.328.961
60246	73634	0.002173	-1.047.338
63593	73634	0.000999	0.463876
66940	73634	0.003013	1.677.167
70287	73634	0.006334	2.099.425
73634	73634	0.007620	2.322.064
76981	73634	0.008270	2.437.176
80328	73634	0.008123	2.442.908
83675	73634	0.005982	2.298.979
87022	73634	0.003755	2.239.744
90369	73634	0.001456	2.654.080
93716	73634	0.001707	2.851.216
97063	73634	0.004289	2.621.746
3347	76981	0.002150	-1.415.170
6694	76981	0.002296	-1.397.852
10041	76981	0.002500	-1.314.522
13388	76981	0.002854	-1.275.751
16735	76981	0.003463	-1.270.560
20082	76981	0.003973	-1.230.833
23429	76981	0.003602	-1.160.944
26776	76981	0.004230	-1.224.082
30123	76981	0.004409	-1.179.057
33470	76981	0.004471	-1.218.280
36817	76981	0.004425	-1.250.852

40164	76981	0.004419	-1.280.411
43511	76981	0.004453	-1.316.069
46858	76981	0.004173	-1.366.376
50205	76981	0.003603	-1.427.210
53552	76981	0.003062	-1.493.253
56899	76981	0.002586	-1.430.268
60246	76981	0.002019	-1.219.105
63593	76981	0.001211	0.982790
66940	76981	0.004643	1.534.886
70287	76981	0.010887	1.693.691
73634	76981	0.006157	2.231.555
76981	76981	0.006754	2.358.132
80328	76981	0.006499	2.283.602
83675	76981	0.005214	2.228.646
87022	76981	0.003271	2.192.464
90369	76981	0.001380	2.345.043
93716	76981	0.001365	2.315.356
97063	76981	0.002820	2.237.659
3347	80328	0.002433	-1.584.070
6694	80328	0.002222	-1.492.785
10041	80328	0.002191	-1.332.482
13388	80328	0.002480	-1.257.181
16735	80328	0.003114	-1.233.045
20082	80328	0.003816	-1.204.613
23429	80328	0.003992	-1.154.999
26776	80328	0.003690	-1.173.368
30123	80328	0.003539	-1.165.433
33470	80328	0.003832	-1.242.638
36817	80328	0.004072	-1.194.830
40164	80328	0.004070	-1.235.082
43511	80328	0.004070	-1.287.078
46858	80328	0.003739	-1.343.398
50205	80328	0.003259	-1.437.895
53552	80328	0.002954	-1.457.830
56899	80328	0.002665	-1.520.425
60246	80328	0.001881	-1.578.048
63593	80328	0.000062	1.601.425
66940	80328	0.003347	1.592.222
70287	80328	0.004870	1.714.876
73634	80328	0.005293	1.968.658
76981	80328	0.005541	2.146.674
80328	80328	0.005569	2.199.299
83675	80328	0.004696	2.192.753
87022	80328	0.003735	2.105.584
90369	80328	0.002758	1.862.289
93716	80328	0.002345	1.840.902
97063	80328	0.002280	1.795.777
3347	83675	0.002201	-1.634.264
6694	83675	0.002015	-1.555.820
10041	83675	0.001842	-1.345.953
13388	83675	0.002167	-1.228.517
16735	83675	0.002875	-1.125.564
20082	83675	0.003090	-1.220.689

23429	83675	0.003735	-1.138.512
26776	83675	0.003913	-1.135.788
30123	83675	0.003958	-1.132.748
33470	83675	0.003763	-1.178.504
36817	83675	0.003783	-1.191.211
40164	83675	0.003707	-1.212.416
43511	83675	0.003716	-1.250.613
46858	83675	0.003593	-1.276.935
50205	83675	0.003413	-1.361.872
53552	83675	0.003129	-1.469.353
56899	83675	0.002945	-1.571.067
60246	83675	0.002155	-1.714.748
63593	83675	0.000635	-2.947.029
66940	83675	0.002630	1.776.944
70287	83675	0.003718	1.780.504
73634	83675	0.004629	1.944.159
76981	83675	0.004710	1.983.886
80328	83675	0.004327	2.004.117
83675	83675	0.003755	1.975.344
87022	83675	0.002579	1.790.849
90369	83675	0.002263	1.426.125
93716	83675	0.002607	1.415.828
97063	83675	0.002319	1.123.560
3347	87022	0.001570	-1.696.323
6694	87022	0.001551	-1.609.640
10041	87022	0.001599	-1.425.122
13388	87022	0.001893	-1.332.297
16735	87022	0.002134	-1.248.688
20082	87022	0.002379	-1.160.553
23429	87022	0.002926	-1.133.746
26776	87022	0.003359	-1.133.975
30123	87022	0.003532	-1.144.923
33470	87022	0.003393	-1.184.774
36817	87022	0.003728	-1.221.005
40164	87022	0.003405	-1.256.581
43511	87022	0.003079	-1.336.718
46858	87022	0.003447	-1.304.708
50205	87022	0.003498	-1.388.036
53552	87022	0.003510	-1.508.613
56899	87022	0.003348	-1.604.367
60246	87022	0.002501	-1.784.326
63593	87022	0.001283	-2.700.570
66940	87022	0.002442	2.177.931
70287	87022	0.003633	1.905.421
73634	87022	0.004395	1.700.439
76981	87022	0.004374	1.678.153
80328	87022	0.003730	1.650.995
83675	87022	0.002761	1.587.817
87022	87022	0.002335	1.388.336
90369	87022	0.002157	1.117.561
93716	87022	0.002361	0.868891
97063	87022	0.002701	0.604399
3347	90369	0.001392	-1.762.080

6694	90369	0.001312	-1.686.786
10041	90369	0.001378	-1.547.607
13388	90369	0.001697	-1.374.373
16735	90369	0.001818	-1.240.927
20082	90369	0.002016	-1.155.697
23429	90369	0.002453	-1.152.949
26776	90369	0.003145	-1.116.811
30123	90369	0.003415	-1.130.369
33470	90369	0.003445	-1.173.903
36817	90369	0.003255	-1.270.396
40164	90369	0.003227	-1.321.913
43511	90369	0.003171	-1.343.058
46858	90369	0.003374	-1.365.839
50205	90369	0.003361	-1.446.546
53552	90369	0.003383	-1.547.414
56899	90369	0.003146	-1.636.457
60246	90369	0.002410	-1.797.862
63593	90369	0.001321	-2.528.750
66940	90369	0.001767	2.363.904
70287	90369	0.002598	1.987.645
73634	90369	0.003232	1.711.783
76981	90369	0.003820	1.475.784
80328	90369	0.003413	1.343.536
83675	90369	0.002217	0.973250
87022	90369	0.001750	0.731365
90369	90369	0.002159	0.367112
93716	90369	0.003325	0.170002
97063	90369	0.003655	0.163970
3347	93716	0.001252	-1.875.576
6694	93716	0.001163	-1.716.027
10041	93716	0.001212	-1.573.971
13388	93716	0.001342	-1.388.788
16735	93716	0.001501	-1.189.407
20082	93716	0.001752	-1.165.228
23429	93716	0.002048	-1.129.990
26776	93716	0.002410	-1.128.055
30123	93716	0.003023	-1.133.444
33470	93716	0.003018	-1.225.877
36817	93716	0.003235	-1.241.157
40164	93716	0.003374	-1.282.339
43511	93716	0.003365	-1.315.980
46858	93716	0.003270	-1.394.456
50205	93716	0.003005	-1.545.929
53552	93716	0.002826	-1.641.928
56899	93716	0.002421	-1.710.039
60246	93716	0.002075	-1.787.198
63593	93716	0.001446	-2.015.219
66940	93716	0.000679	-2.937.917
70287	93716	0.001253	1.963.481
73634	93716	0.002270	1.574.023
76981	93716	0.003178	1.303.425
80328	93716	0.002917	1.091.193
83675	93716	0.002251	0.479034

87022	93716	0.002399	0.138249
90369	93716	0.002978	0.004328
93716	93716	0.003502	-0.002738
97063	93716	0.003756	0.010246
3347	97063	0.001230	-1.825.130
6694	97063	0.001095	-1.692.554
10041	97063	0.001217	-1.527.369
13388	97063	0.001266	-1.344.574
16735	97063	0.001493	-1.232.143
20082	97063	0.001665	-1.175.590
23429	97063	0.001916	-1.136.005
26776	97063	0.002165	-1.142.314
30123	97063	0.002491	-1.183.423
33470	97063	0.002745	-1.248.126
36817	97063	0.002883	-1.318.909
40164	97063	0.003085	-1.351.244
43511	97063	0.003494	-1.331.721
46858	97063	0.003207	-1.399.767
50205	97063	0.002695	-1.581.049
53552	97063	0.002709	-1.636.592
56899	97063	0.002947	-1.624.018
60246	97063	0.002622	-1.637.460
63593	97063	0.001908	-1.629.361
66940	97063	0.000459	-2.452.728
70287	97063	0.000610	1.814.796
73634	97063	0.001475	1.273.120
76981	97063	0.002353	0.973411
80328	97063	0.002444	0.751489
83675	97063	0.002351	0.347046
87022	97063	0.002526	0.004718
90369	97063	0.002888	-0.245352
93716	97063	0.003168	-0.237786
97063	97063	0.003597	-0.092456