

DETERMINAÇÃO DOS PADRÕES DE ESCOAMENTOS PREFERENCIAIS EM TANQUES DE TURBULÊNCIA GERADA POR GRADES OSCILANTES

*Carlos Eugenio Pereira¹; José Eduardo Alamy Filho²;
Nivaldo Aparecido Corrêa³ & Harry Edmar Schulz⁴*

RESUMO --- A turbulência gerada em equipamentos de grade oscilante presta-se a uma série grande de comprovações experimentais de proposições teóricas. Isto ocorre tanto para a turbulência propriamente dita, como para os fenômenos de transporte a ela associados. Usualmente não se considera a presença de correntes preferenciais nas constatações experimentais conduzidas nesses equipamentos. Entretanto, para que as previsões teóricas possam ser definitivamente corroboradas, é preciso quantificar as correntes preferenciais e a sua forma, de modo que se possa inferir a sua influência nos fenômenos medidos. No presente estudo apresentam-se resultados da quantificação das correntes preferenciais em escoamentos gerados por grades oscilantes.

ABSTRACT --- Turbulence generated by oscillating grids is used in a series of experimental procedures to support or to test theoretical proposals. This way to conduct the studies is usual for turbulence itself and also for associated transport phenomena. Usually the preferential currents are not taken into account during the experiments conducted in oscillating grids equipments. However, to definitively corroborate theoretical predictions, it is necessary to quantify the preferential currents and to determine the shape of the flow, in a way that permits to infer the effects on the measured phenomena. In the present study, results related to preferential currents generated in a stirred grid equipment are presented.

Palavras-chave: Tanque de grades oscilantes, correntes preferenciais, turbulência.

Key words: Oscillating grids tank, preferential currents, turbulence.

¹ Doutorando do Departamento de Hidráulica e Saneamento – EESC/USP – Av. Trabalhador São-carlense 400, 13566-590 São Carlos.
E-mail:cep@sc.usp.br

² Doutorando do Departamento de Hidráulica e Saneamento – EESC/USP – Av. Trabalhador São-Carlense 400, 13566-590 São Carlos.
E-mail: zealamy@yahoo.com.br

³ Professor Doutor do Departamento de Hidráulica e Saneamento - EESC/USP - Av. Trabalhador São-Carlense 400, 13566-590 São Carlos. E-mail: nacorreia@sc.usp.br

⁴ Professor Titular do Departamento de Hidráulica e Saneamento - EESC/USP - Av. Trabalhador São-Carlense 400, 13566-590 São Carlos. E-mail: heschulz@sc.usp.br

1 - INTRODUÇÃO

Os equipamentos de geração de turbulência em meio líquido com o uso de grades oscilantes vem ganhando espaço nos mais diversos estudos realizados em laboratórios. Isto ocorre principalmente devido às características gerais observadas nos campos turbulentos gerados, tais como: homogeneidade da turbulência produzida ao longo de um plano, geração com intensidade controlável, tensões de Reynolds nulas distante das grades, comprovação de modelos teóricos para turbulência isotrópica. Esses equipamentos já foram utilizados em experimentos com os mais diversos objetivos, entre os quais: detalhar a transferência de gás em interfaces, verificar o comportamento de sedimentos, observar a dispersão de poluentes e quantificar a mistura interfacial de fluidos estratificados, entre outros.

1.1 – Utilização do equipamento de grades oscilantes

1.1.1 - Transferência de gases através da interface ar-água

Entre os diferentes autores que atuaram nessa área, o trabalho de Brumley & Jirka (1987) é talvez o mais citado. Os autores utilizaram um tanque de grade oscilante com superfície livre quadrada e realizaram as medidas com anemômetro de filme quente, obtendo perfis verticais das componentes vertical e horizontal da velocidade turbulenta (valor RMS), das escalas de comprimento integrais transversal e longitudinal e da taxa de dissipaçāo de energia. O objetivo do trabalho era esclarecer a estrutura turbulenta e elucidar os detalhes da transferência mecânica de massa na interface gás/líquido. Os resultados experimentais foram comparados com os de outras pesquisas.

Nessa mesma linha, Chu & Jirka (1991) procuraram avançar no detalhamento do mecanismo de transferência de massa na interface. Utilizaram um tanque de grades oscilantes com as mesmas características do trabalho de Brumley & Jirka (1987), medindo as flutuações de concentração de oxigênio dissolvido na água. Concluíram que a espessura da camada limite de concentração abaixo da superfície da água pode ser relacionada com o número de Reynolds turbulento no seio do volume de água e que a macro- escala do movimento dos turbilhões é dominante na transferência de massa interfacial.

1.1.2 - Suspensão de sedimentos

Medina et al (2001) realizaram um conjunto de experimentos para estudar o comportamento de sedimentos na presença de um campo turbulento com escoamento médio nulo. O interesse particular é apresentar o inicio do movimento dos sedimentos e no fim do fenômeno de varredura dos mesmos. Alguns de seus resultados são mencionados aqui. Por exemplo, nos experimentos de

início de movimento, a oscilação da grade foi estabelecida inicialmente com um valor baixo de freqüência, sendo este aumentado gradativamente até se observar o início do movimento. O valor da velocidade turbulenta u' (valor RMS) observado foi menor para cada diâmetro de sedimento usado do que a velocidade crítica (u_{*CR}) estimada pelo diagrama de Shields. Também foram medidos o aumento e o decaimento das velocidades para diferentes concentrações de sedimentos.

Brunk et al (1996) utilizaram um aparato experimental constituído de uma coluna vertical com cinco grades oscilantes instaladas verticalmente em uma das laterais e que apresentavam movimento oscilatório simultâneo e idêntico. Esse equipamento foi montado para simular a turbulência em sistemas hidrodinâmicos onde ocorrem processos químicos associados à poluição nos meios naturais. Segundo os autores, a turbulência gerada era isotrópica e homogênea, confirmando que o sistema obedece aos padrões relativos a turbulência com grade oscilante. Por meio de uma seleção apropriada de amplitudes e freqüências das grades, geraram-se dados, que foram utilizados para simular a lei de decaimento exponencial associada à intensidade turbulenta em escoamentos em canal aberto. Perfis de sedimentos foram obtidos nessa coluna acuradamente, mostrando que esses perfis seguem teorias convencionais. Os experimentos permitem sugerir que a "coluna de turbulência" pode ser utilizada para simular quantitativamente a intensidade turbulenta e o carreamento dos sedimentos associados com sistemas aquáticos.

1.1.3 - Mistura interfacial de fluidos estratificados

Rouse & Dodu, citados em Thompson & Turner (1975) foram talvez os primeiros a utilizar um tanque com grades oscilantes para examinar o movimento entre dois meios de diferentes densidades. As grades geravam turbulência, sendo o seu efeito observado em uma interface líquido/líquido.

Thompson & Turner (1975) utilizaram o mesmo equipamento de grades oscilantes de Turner (1968) e afirmam que para entender a mistura através de uma interface localizada à determinada distância da grade oscilante é necessário (naturalmente) conhecer as propriedades da turbulência na região próxima dessa interface. Para isso correlacionaram a velocidade turbulenta com os parâmetros externos (parâmetros de controle do equipamento), como freqüência e a amplitude de oscilação da grade para três grades de malhas diferentes. Em cada combinação foram medidas as escalas de comprimento turbulentas e verificados os decaimentos espaciais da turbulência.

Hopfinger & Toly (1976) realizaram medidas em equipamento similar aos anteriormente mencionados, com uma camada homogênea de fluido e com duas camadas homogêneas de fluido. Os autores propuseram uma lei empírica de decaimento da turbulência e a forma pela qual a estrutura da turbulência depende do tamanho da malha, da freqüência e da amplitude de oscilação

da grade. Essa lei empírica é citada em muitos trabalhos que utilizam grades oscilantes. Entretanto, propostas teóricas têm surgido e permitido aprofundar o conhecimento nessa área. (Janzen, 2003).

1.2 – Técnicas de medida em equipamentos de grades oscilantes

Atualmente busca-se efetuar medidas em escoamentos através de técnicas não-intrusivas, o que faz com que as técnicas óticas e acústicas estejam em voga. No caso do estudo de fluidos transparentes, as técnicas óticas são mais adequadas, sendo que o presente trabalho utilizou velocimetria a laser (denominada de velocimetria por processamento de imagens - PIV). Para medidas que envolvem a concentração de compostos dissolvidos nos fluidos, utiliza-se a assim denominada fluorescência induzida por laser - LIF.

1.2.1 - Técnica PIV (*Medida de campo de velocidades*)

Estudos que consideram especificamente o movimento dos fluidos são melhor descritos com a técnica PIV. De forma simples, trata-se de obter registros fotográficos de posições de partículas traçadoras em momentos sucessivos, com um intervalo de tempo muito pequeno entre esses momentos. Com o uso de programas que identificam as partículas através de correlações estatísticas, a divisão entre o espaço percorrido e o intervalo de tempo fornece campos de velocidades bastante precisos. Entretanto, estudos anteriores ao advento dessa metodologia produziram resultados relevantes, como o trabalho de Hopfinger & Toly (1976), no qual uma grade oscilante horizontal gerava turbulência horizontal homogênea, tendo sido a intensidade turbulenta descrita matematicamente por parâmetros medidos externamente. Sendo o movimento da grade especificado pela amplitude S , freqüência f , com um lado da malha da grade M , tem-se:

$$u' = 0,25 \cdot f \cdot S^{1,5} \cdot M^{0,5} \cdot y^{-1} \quad (1)$$

onde y é a distância a partir de aproximadamente o centro do movimento da grade. Essa definição da intensidade turbulenta foi utilizada em muitos estudos posteriores, nos quais métodos óticos foram utilizados. Orlins & Gulliver (2000) utilizaram a técnica PIV em um tanque com grade oscilante para investigar a relação entre turbulência na superfície livre e o transporte de massa. Os autores obtiveram dados de oito sub regiões da superfície da água, apresentando velocidades, vorticidades e divergente bi-dimensionais, calculados como função do espaço e do tempo em cada região. Cheng & Law (2001) investigaram a turbulência gerada por uma grade vertical usando a técnica PIV. Em uma análise comparativa, seus resultados concordam com os demais resultados presentes na literatura.

Souza (2002) projetou e construiu um tanque de grade oscilante e realizou medidas de velocidade turbulenta utilizando PIV. A amplitude de oscilação utilizada foi mantida constante em 3,0 cm, para quatro diferentes freqüências de oscilação. Souza adquiriu 9.600 imagens do movimento do fluido, em seis regiões do tanque. Por meio de um programa computacional calculou os campos de velocidade turbulenta (valor RMS), gerando gráficos a partir desses campos e possibilitando a observação do decaimento espacial da turbulência e da região de sua produção.

Janzen (2003) ampliou os resultados de Souza (2002), realizando medidas precisas para diferentes condições de freqüência e amplitude. Adicionalmente, estudou com detalhes a região compreendida entre duas grades oscilantes. Modelos construídos para essa região foram corroborados por suas medidas.

1.2.2 - Técnica LIF (Medidas de campos de concentração)

A técnica LIF, descrita de forma simples, consiste no lançamento de uma substância fluorescente no meio fluido, sendo a sua concentração registrada através de fotografias sucessivas, obtidas em intervalos de tempo vinculados aos objetivos do estudo. A fluorescência é induzida pela iluminação do fluido com luz laser. Herlina & Jirka (2004) investigaram a absorção de oxigênio na interface ar/água com turbulência induzida por grades oscilantes utilizando-se da técnica de fluorescência induzida por laser (LIF). Essa técnica permitiu a visualização e a quantificação do campo de concentração de oxigênio dissolvido nas proximidades da interface ar/água. Janzen, Jirka e Schulz (2005) apresentam resultados de perfis de concentração e de flutuações de concentração obtidos com técnica semelhante, mostrando que previsões teóricas são corroboradas pelas suas medidas.

1.2.3 - Possibilidades de estudos de correntes internas no equipamento

Nos experimentos descritos nos itens anteriores, não se estudou a existência de correntes preferenciais no seio do fluido, decorrente da ação de bombeamento de energia para esse mesmo fluido, através do movimento da grade oscilante. Em outras palavras, o equipamento é concebido basicamente para gerar movimentos turbulentos e dissipar, em uma cascata de energia, toda a energia fornecida ao fluido. Entretanto, isto implica em uma combinação adequada de fatores geométricos, cinemáticos e dinâmicos. Não necessariamente a condição de trabalho permite a combinação adequada dos fatores mencionados, para induzir à dissipação através do caminho único da cascata de energia entre escalas de movimento turbulento.

Uma quantidade da energia suprida ao fluido pode ser direcionada para gerar movimentos preferenciais, ou correntes preferenciais, com padrões bem definidos, no seio fluido. Assim, a grade funciona como uma “bomba”, que induz movimento médio ao fluido. A possibilidade de indução de

movimento médio é aumentada pela existência de singularidades, como as extremidades da grade (não é uma grade infinita), os cantos e as paredes do tanque (trata-se de um meio confinado lateralmente e com geometria quadrada), o que implica em uma distribuição não homogênea da energia no próprio fluido, ainda que o movimento seja único para toda a grade. Os “efeitos de borda” podem ser decisivos na geração de movimentos preferenciais.

Com as técnicas não intrusivas de medida é possível explorar a existência de correntes preferenciais em equipamentos de grades oscilantes. O presente trabalho apresenta essas correntes para algumas situações geométricas bem definidas, fornecendo valores característicos das velocidades nessas situações. Espera-se, com isto, contribuir para a correta quantificação das grandezas medidas com o auxílio deste tipo de equipamento.

2. - METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS

2.1 – Sistema de geração de turbulência

O equipamento utilizado foi montado considerando as informações da literatura. A concepção é, contudo, original, apresentando soluções inovadoras para o movimento das grades e a inibição de movimentos secundários. Como já foi mencionado, a utilização de grade oscilante se justifica pelo fato de gerar turbulência "quase-isotrópica". Considerando planos paralelos horizontais a turbulência é idealmente homogênea, existindo decaimento apenas na direção vertical.



Figura 1 - Tanque com grades oscilantes em funcionamento no Laboratório de Hidráulica Ambiental CRHEA/SHS-EESC-USP.

O tanque foi construído com placas de acrílico de espessura de 2,5 cm, apresenta base quadrada 50 cm x 50 cm e profundidade interna de 115 cm. Um sistema biela-manivela de raio variável instalado na parte superior do tanque promove a oscilação vertical das grades. A Figura 1 apresenta uma fotografia do tanque em pleno funcionamento. O equipamento foi desenvolvido originalmente por Souza (2002), sendo modificado por Janzen (2003) e para os estudos conduzidos no presente trabalho.

A grade oscilante foi montada de modo que a posição central se situa a 50 cm do fundo do tanque, sua forma é quadrada, constituída por barras de aço inox de seção transversal de 10 mm de lado, apresentando malha quadrada e espaçamento entre os eixos das barras de 5,1 cm (32% de solidez).

O sistema para movimentação das grades é acionado por um motor de corrente contínua, que transfere sua potência através de um sistema de transmissão com correias e polias. O motor, de potência nominal igual a 7,5 HP, está ligado a um inversor de freqüência, sendo possível regular eletronicamente a velocidade por meio de um painel de controle, permitindo o controle da movimentação da grade. Na regulagem da freqüência de oscilação da grade foi utilizado um tacômetro, com precisão de 0,1:1000 para rotações inferiores a 1000 rpm.

2.2 - Equipamento Laser para Medidas dos Campos de Velocidade

O equipamento Laser existente no Laboratório de Hidráulica Ambiental do CRHEA/SHS-EESC-USP é utilizado para a técnica PVI. A Figura 2 apresenta uma fotografia do equipamento.



Figura 2 - Equipamento Laser a gás de cobre

O equipamento é da marca Oxford Lasers Ltd., modelo LS 20-10. Apresenta alta taxa de repetição de pulsos de iluminação (até 10,0 KHz) com duração de pulso entre 15 e 30 ns, com alta potência no pulso de iluminação. Esse feixe de luz é transportado através de uma fibra ótica e, utilizando um conjunto de lentes, gera-se uma folha de luz laser, que ilumina o escoamento na parte desejada.

Um câmera digital CCD (1024 x 1024 pixels por foto) compõe o equipamento de registro dos eventos observados. Deve-se buscar alta resolução de imagens. As imagens são capturadas e armazenadas em um micro computador, para depois serem processadas através de um software de visualização de escoamento aplicadas a cada par de fotos.

2.3 – Metodologia empregada

Seguindo os procedimentos gerais anteriormente relatados, torna-se necessário efetuar o registro com qualidade adequada. Para tanto, uma vez estabelecido o foco do plano de luz, procede-se à calibração da câmera com o auxílio de uma régua graduada colocada coincidente com o plano de luz. Por fim, com a imagem ao vivo na tela do computador, observando a graduação da régua, faz-se a calibração da câmera.

A água potável proveniente do poço de abastecimento do CRHEA/SHS-EESC-USP foi utilizada para abastecer o tanque de grades oscilantes. O nível de água no tanque acima da grade ficou definido em 15 cm.

A freqüência de oscilação da grade foi estabelecida através de regulagem eletrônica da rotação do motor de corrente contínua, com o auxílio de contador de rotação. Através de um ajuste manual de um potenciômetro obteve-se a rotação desejada.

Após o acionamento do motor elétrico e sendo estabelecida a rotação do ensaio, esperou-se sempre um intervalo de 30 minutos para permitir o estabelecimento de condições estacionárias (com relação à turbulência e aos eventuais escoamentos preferenciais) dentro do tanque de água.

Como mencionado, foi estabelecida uma altura de lâmina de água de 15 cm que, em conjunto com as demais dimensões do tanque, implicaram em varreduras de 50cm de comprimento por 15 cm de altura (imagens totais, compostas de quatro imagens inicialmente independentes). A sobreposição lateral entre fotos foi em torno de 3,0 cm, resultando em quatro ensaios de fotos por seção do tanque, com resolução adequada. Após a realização de alguns ensaios observou-se que um número de fotos a se adquirir para obter informações de boa qualidade é em torno de 800 imagens. Como segurança, foi estabelecido o total de 1.000 imagens por ensaio. Esse total foi obtido em pacotes de 100 imagens, capturadas ao longo de três minutos. Cada pacote de 100 imagens foi capturado em quatro segundos. Assim, o intervalo entre a captura de cada pacote foi de aproximadamente 16 segundos.

O número de seções ensaiadas em cada direção foi de quatro seções. Considerando duas direções, tem-se oito seções ensaiadas. Considerando que cada seção é composta de quatro ensaios e em cada ensaio foram obtidas 1.000 imagens, foram obtidas, no total, 32.000 imagens que foram rigorosamente analisadas.

A oscilação imposta à grade foi de 100,0 rpm, com uma amplitude de 2,0 cm.

As quatro seções em cada direção foram localizadas com a folha de luz sobre as barras em duas seções e com a folha de luz localizada entre barras para as duas seções restantes. As medições entre barras e sobre barras foram efetuadas em seções intercaladas. Muito próximo à grade os vetores de velocidade são perturbados pela presença intermitente da grade. Assim, estipulou-se que o nível inferior de cada foto ficasse localizado a 2,5 cm acima da posição central da grade, portanto a 1,5 cm acima da amplitude máxima atingida.

Cada foto tinha 15 x 15 cm, e em torno de 43 x 43 vetores de velocidade que foram obtidos com o uso de programa que utiliza correlação cruzada entre posições de partículas em fotografias sucessivas.

3 – ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS CAMPOS DE VELOCIDADE

As figuras 3, 4 e 5 contém os campos de velocidade nas três direções ortogonais, X , Y e Z , correspondentes às componentes U , V e W . Cada figura é composta de dois gráficos, o primeiro apresentando os planos de velocidade, cujas componentes U e W foram efetivamente medidas (figuras 3 e 5). A componente V (figura 4, componente vertical da velocidade) foi obtida na captura tanto dos dados de U e W . Assim, um procedimento de média e interpolação foi utilizado para gerar os dois planos de velocidade que compõem o primeiro gráfico da figura 4.

Por fim, com o uso de interpolação linear, foi obtido o segundo gráfico de cada figura, que apresenta superfícies de velocidades constantes, permitindo observar uma estrutura de movimentos preferenciais. Por exemplo, A figura 3 mostra regiões de escoamento preferencialmente no sentido positivo de X ocorrendo em sítios (locais) diferentes daqueles nos quais há movimento preferencial no sentido negativo de X (idealmente não deveria haver regiões com "concentrações de movimentos preferenciais", ou seja, os gráficos deveriam ser monocromáticos em verde, que corresponde a velocidades nulas).

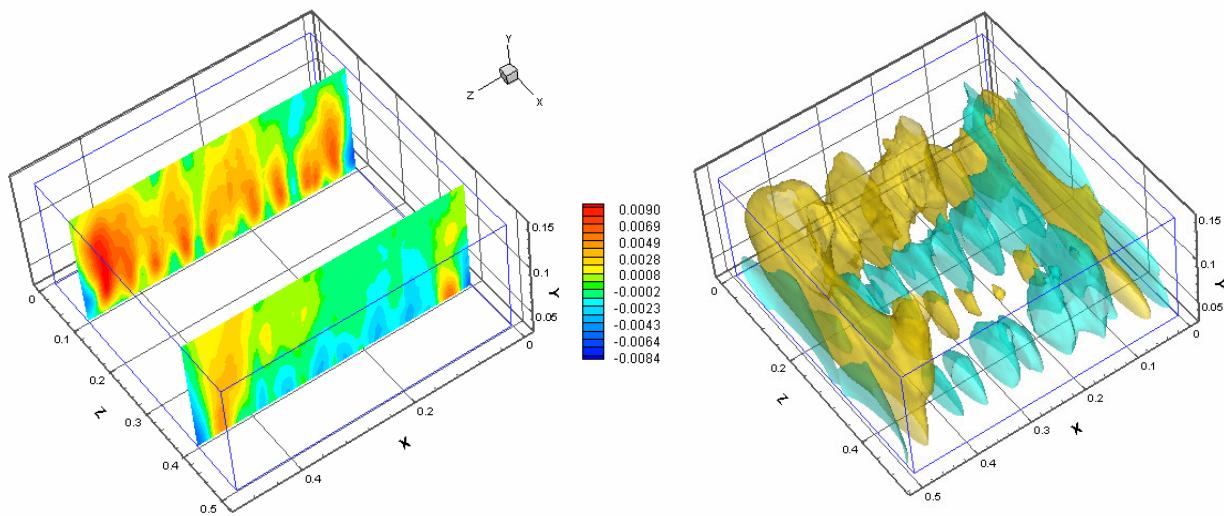


Figura 3 – velocidade U (m/s) na direção X : (a) cortes no plano XY; (b) isosuperfícies de $U=-0.0015$ e $U=0.0015$ m/s

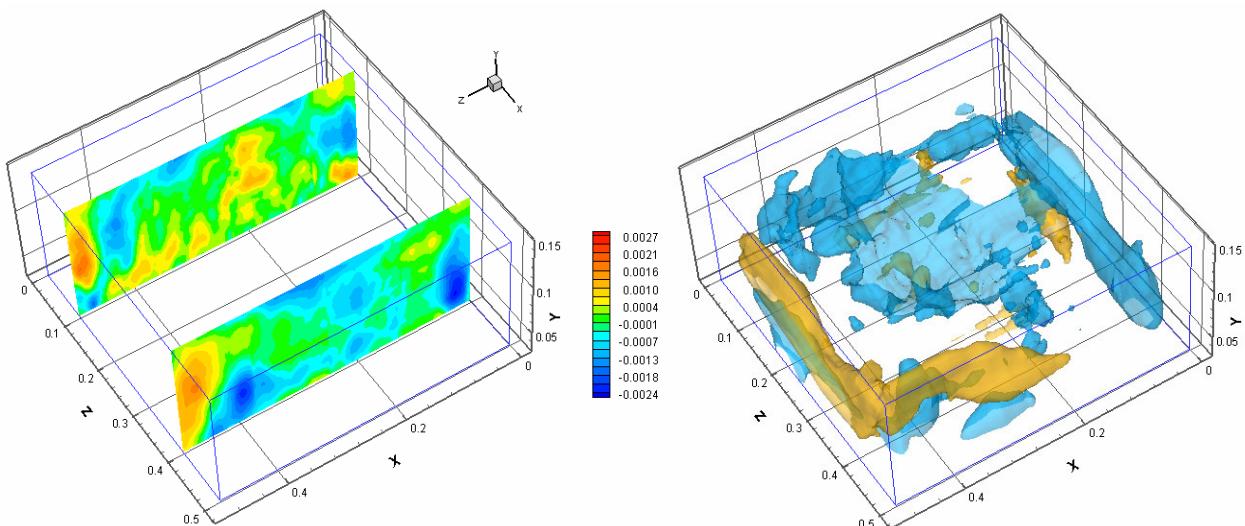


Figura 4 – velocidade V (m/s) na direção Y : (a) cortes no plano XY; (b) isosuperfícies de $V=-0.0010$ e $V=0.0010$ m/s

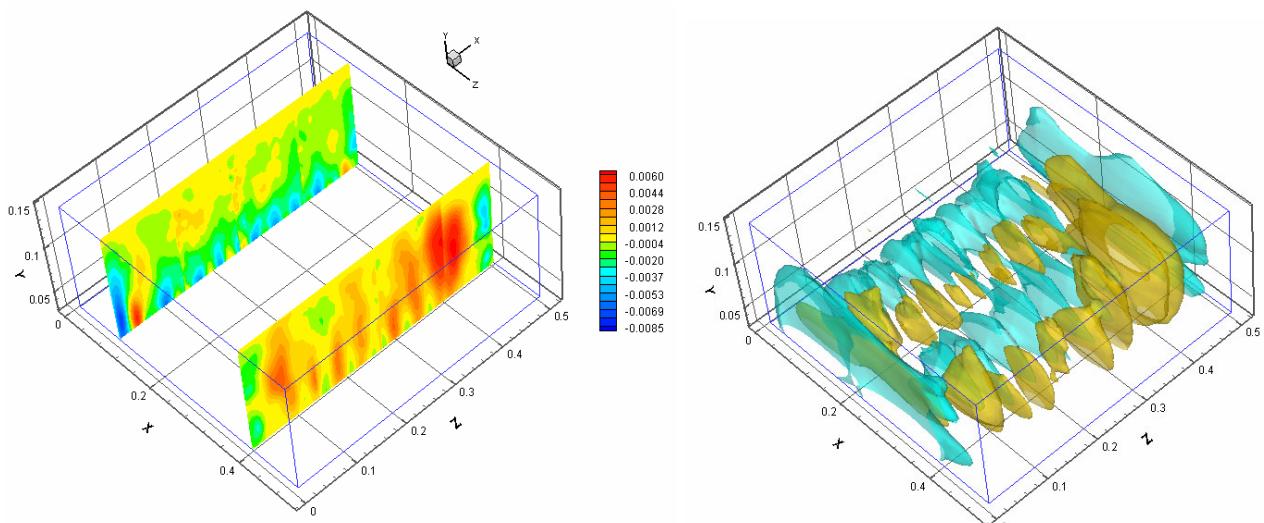


Figura 5 – velocidade W (m/s) na direção Z : (a) cortes no plano ZY; (b) isosuperfícies de $W=-0.0015$ e $W=0.0015$ m/s

A mesma análise pode ser feita para os segundos gráficos das figuras 4 e 5. De forma geral, essas constatações experimentais mostram estruturas de escoamento em forma de vórtices estáveis (os seja, movimentos opostos em regiões distintas do volume em estudo). Fica, assim, evidenciada a existência de correntes preferenciais em experimentos com grades oscilantes.

Em termos numéricos, tem-se, nas figuras 3 e 5, as isosuperfícies para as velocidades U e W, respectivamente, em módulo igual a 0,0015 m/s. Na figura 4 têm-se as isosuperfícies para V em módulo igual a 0,0010 m/s.

O movimento da água devido a oscilação da grade, sem a presença das paredes, prosseguiria se difundindo horizontalmente até que toda a energia cinética fosse dissipada. A presença das paredes, entretanto, inibe essa difusão e gera um "efeito de bomba hidráulica", ou seja, a energia introduzida no meio líquido é convertida em energia cinética com movimento preferencial, do mesmo modo que ocorre com uma bomba hidráulica instalada em uma tubulação. O presente estudo mostra que, para a profundidade de água de 15 cm sobre a grade oscilante há efetivamente correntes preferenciais. A influência da geometria (profundidade da água) ainda deve ser explorada em detalhes, para que se possam estabelecer os tipos de comportamento que ocorrem para cada condição geométrica.

4 - CONCLUSÕES

Equipamentos de grades oscilantes, originalmente concebidos para gerar unicamente movimentos turbulentos, também geram movimentos preferenciais. No presente trabalho isto foi observado para a condição de 15,0 cm de lâmina de água sobre a grade oscilante, à qual foi aplicada uma freqüência de 100 rpm e uma oscilação máxima de 2,0 cm (amplitude 1,0 cm). A grade utilizada tem dimensões especificadas ao longo do texto.

Com as condições ensaiadas pode-se dizer que a energia fornecida ao meio líquido, que idealmente deveria ser convertida exclusivamente em movimento turbulento, seguindo a cascata de energia dos maiores para os menores turbilhões (vórtices), é parcialmente utilizada para gerar movimentos médios bem estabelecidos.

Configura-se, nesse tipo de equipamento e para a configuração geométrica aqui apresentada, um "efeito de bomba hidráulica", ou seja, energia fornecida converte-se em movimento médio.

A presente constatação sugere a continuidade dos estudos nessa área.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP, pela manutenção da pesquisa na área de turbulência (terceiro e quarto autores) e a bolsa de estudos do segundo autor, à CAPES e ao CNPq pelas bolsas de estudo e de produtividade ao primeiro e quarto autores.

BIBLIOGRAFIA

- BRUMLEY B.H.; JIRKA G.H. (1987). “*Near-surface turbulence in a grid-stirred tank*”. Journal Fluid Mechanic v.183, n.1, pp.235-263.
- BRUNK, B.; SHIRK, M.W.; JENSEN, A.; JIRKA, G.H.; LION, L.W. (1996) “*Modeling natural hydrodynamic systems with a differential-turbulence column*”. Journal of Hidraulic Engineering, v.122, pp. 373-380.
- CHENG, N.S.; LAW, W.K. (2001) “*Measurement of Turbulence Generated by Oscillating Grid*”, Journal of Hidraulic Engineering, v.127, n.3, pp. 201-208.
- CHU, C.R.; JIRKA, G.H. (1991) “*Turbulent Velocity and Gas Concentration Measurements in the Near-Surface Layer*”. In: WILHELMS, E. C. ; GULLIVER, J.S. ed. Air water mass transfer, New York, ASCE. p.160-172.
- CHU, C.R.; JIRKA, G.H. (1992) “*Turbulent gas flux measurements below the air-water interface of a grid-stirred*”. Int: Journal Heat Mass Transfer, v.35, n.8, pp.1957-1968.
- JANZEN, J.G. (2003). “*Detalhamento das Propriedades Turbulentas em Águas Agitada por Grades Oscilante*s”. São Carlos 107p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- JANZEN, J.G.; JIRKA, G.H., SCHULZ, H.E. (2005) “*Detalhes da transferência de gases na interface ar-água: Experimentos de precisão*. /Comunicação pessoal/
- HERLINA & JIRKA, G.H. (2004) “*Application of LIF to investigate gas transfer near the air-water interface in a grid-stirred tank*”. Experiments in Fluids, v.37, pp. 341-349.
- HOPFINGER, E. L. ;TOLY, J.A. (1976) “*Spacially decaying turbulence and its relation to mixing across density interfaces*”. Journal of fluid mechanic, v.78, n.1, p.155-175.
- MEDINA, P.; SÁNCHEZ, M.A.; REDONDO, J.M. (2001) “*Grid stirred turbulence: applications to the initiation of sediment motion and lift-off studies*” Phys. Chem. Earth, v.26, n.4, pp.299-304.
- ORLINS, J.J. ;GULLIVER, J.S. (2000) “*Measurement of Free Surface Turbulence*”. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GAS TRANSFER AT WATER SURFACES, 4., Flórida, /Comunicação pessoal/
- SOUZA, L.B.S. de (2002). “*Estudo da estrutura turbulenta em escoamentos gerados por grades oscilantes*”. São Carlos 65 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- THOMPSON S.M. ;TURNER J.S. (1975) “*Mixing across in interface due to turbulence generated by in oscillating grid*”. Journal of Fluid Mechanic, v.67, n.2, p.349-368.