

INVESTIGAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TURBULENTAS EM TANQUE DE GRADE OSCILANTE ATRAVÉS DA TÉCNICA DPIV

Johannes Gérson Janzen¹ & Harry Edmar Schulz²

Resumo – A técnica DPIV (Digital Particle Image Velocimetry) foi utilizada para medir campos bidimensionais de velocidade em um tanque de grade oscilante. Perfis verticais de intensidade turbulenta foram obtidos e comparados com solução empírica encontrada na literatura. Os dados experimentais mostram uma boa concordância com as previsões teóricas. Adicionalmente, foi observado que há uma oscilação significativa da intensidade turbulenta para distâncias próximas da grade. Com o aumento da distância da grade, a turbulência se torna mais homogênea no plano horizontal, e estas oscilações tendem a desaparecer. Os resultados mostram também que o escoamento somente pode ser considerado livre de cisalhamento para grandes distâncias da grade, onde as tensões de Reynolds se aproximam de zero.

Abstract – Digital Particle Image Velocimetry (DPIV) is used to measure two-dimensional velocity fields in a grid-stirred tank. Vertical profiles of the turbulent intensity have been obtained and compared with available empirical solution. The experimental data agree well with the theoretical prediction. In addition, it could be observed that there are significant variations of the turbulent intensities at a small distance from the grid. With increasing distance from the grid, the turbulence becomes more homogeneous in the horizontal plane, and the variations in the turbulent intensities are reduced. The results also show that the turbulence can be considered to be shear-free only at a distance sufficiently far away from the grid, where the Reynolds shear stress approaches zero.

Palavras-chave – grade oscilante, DPIV, turbulência.

¹ Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP, Av. do Trabalhador São-carlense, 400, CEP 13566-590, São Carlos, tel.: (16) 33068745, email: jgersonj@gmx.net

² Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP, Av. do Trabalhador São-carlense, 400, CEP 13566-590, São Carlos, tel. (16) 2739570, email: heschulz@sc.usp.br

INTRODUÇÃO

O interesse de se investigar características físicas de escoamentos, tais como campos de velocidade, vorticidade, energia cinética turbulenta, taxa de dissipação de energia e correlações espaciais em duas ou três dimensões, de uma maneira não intrusiva e instantânea, têm requerido técnicas de medição de alta tecnologia. Uma alternativa para preencher tal necessidade tem sido a técnica DPIV (Digital Particle Image Velocimetry), que tem sido extremamente valiosa para engenheiros e pesquisadores na mecânica dos fluidos experimental.

DPIV é uma técnica de medição óptica, na qual um feixe do laser é expandido para o interior de um escoamento, tornando visíveis partículas de impurezas naturalmente existentes no mesmo, cujos movimentos são registrados através de câmaras CCD (Charged Coupled Device) de alta resolução. Algumas características da técnica DPIV são:

- A técnica é não intrusiva;
- Utiliza a medição de velocidade de partículas naturalmente existentes no escoamento;
- A velocidade pode variar de zero a supersônica;
- São obtidos vetores de velocidade instantâneos na seção em estudo;
- Com uma seqüência de mapas de vetores de velocidade pode-se obter velocidade média, intensidade turbulenta, correlação espacial, vorticidade, etc.

Na técnica DPIV os vetores velocidade são calculados utilizando sub-sessões (ou sub-regiões) da área em estudo através da medição do deslocamento ($\Delta\bar{X}$) de partículas presentes no fluido, entre duas imagens sucessivas (Δt):

$$\bar{V} = \frac{\Delta\bar{X}}{\Delta t} \quad (1)$$

Possuindo uma seqüência de duas imagens de posições sucessivas de partículas, divide-se, como já mencionado, essas imagens em pequenas sub-sessões denominadas de áreas de interrogação. As áreas de interrogação de cada imagem (*imagem 1* e *imagem 2*), são correlacionadas uma com a outra, pixel por pixel. Esta operação produz um pico de correlação, identificando o deslocamento $\Delta\bar{X}$ da partícula presente em ambas as imagens. Repetindo o processo da correlação cruzada para cada área de interrogação das duas imagens capturadas pela câmara CCD pode-se obter um mapa de vetores de velocidade (FIGURA 1).

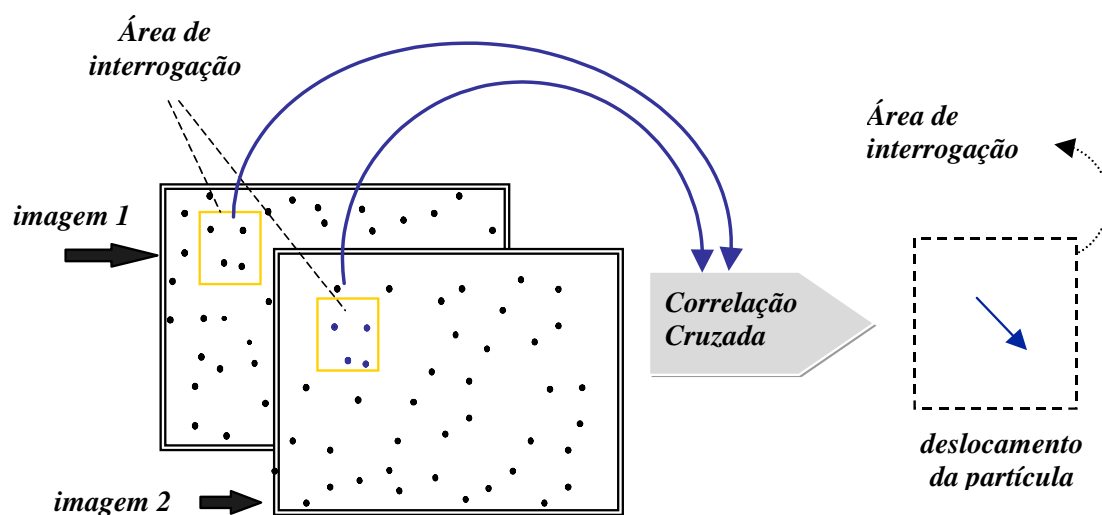


FIGURA 1 – Nesse caso, duas imagens são capturadas. A correlação cruzada das duas imagens em cada área de interrogação fornece o deslocamento médio das partículas naquela área. A direção do deslocamento é da imagem 1 para imagem 2. Esse processo é repetido para todas as áreas de interrogação. Como o intervalo de tempo entre as imagens é conhecido, obtém-se o vetor velocidade.

O objetivo do presente estudo é mostrar a aplicação da técnica DPIV na investigação das propriedades turbulentas em um tanque de grade oscilante, com a finalidade de avaliar a ocorrência de propriedades turbulentas características dos escoamentos gerados por grade oscilante. Vale aqui frisar que os experimentos em tanques de grade oscilante têm sido utilizados como uma forma simples e controlável de gerar turbulência, constituindo-se numa forma importante de se avançar no estudo da influência da turbulência em fenômenos físicos. A aplicação dos resultados abraça um amplo espectro de áreas, atualmente assumindo relevância na área ambiental, na qual se podem citar exemplos como a mistura de fluidos de diferentes densidades (THOMPSON e TURNER, 1975; HOPFINGER e TOLY, 1976), transferência de gases entre ar-água (BRUMLEY e JIRKA, 1987; CHU e JIRKA, 1992), dispersão de poluentes (BRUNK et al, 1996), suspensão de sedimentos (MEDINA et al., 2001) e coagulação (BRUNK et al., 1998).

EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Tanque de grade oscilante

Para simular condições de escoamento turbulento, regime no qual acontece a maioria das situações encontradas no ambiente, foi construído um tanque de grade oscilante com área superfície de 50,0 cm x 50,0 cm e altura de 115,0 cm (FIGURA 2). As paredes do tanque foram feitas de placas de acrílico transparente, permitindo tanto a projeção do feixe do laser para o interior do tanque como a captura de imagens. A grade de aço inoxidável com barras quadradas de 1,0 x 1,0 cm possuindo uma malha M de 5,1 cm (distância entre os eixos das barras) foi colocada paralela à superfície, a uma distância de 55,0 cm do fundo do tanque (FIGURA 3). Esta grade possui uma

solidez (definido como sendo a relação entre a área superficial da grade e a área superficial total do tanque) de 32%. Segundo HOPFINGER e TOLY (1976) uma solidez abaixo de 40% é capaz de evitar heterogeneidades no plano horizontal e circulação secundária. A frequência de oscilação f foi variada entre 1,0 e 3,0 Hz e a amplitude S de oscilação de 3,0 a 4,0 cm.

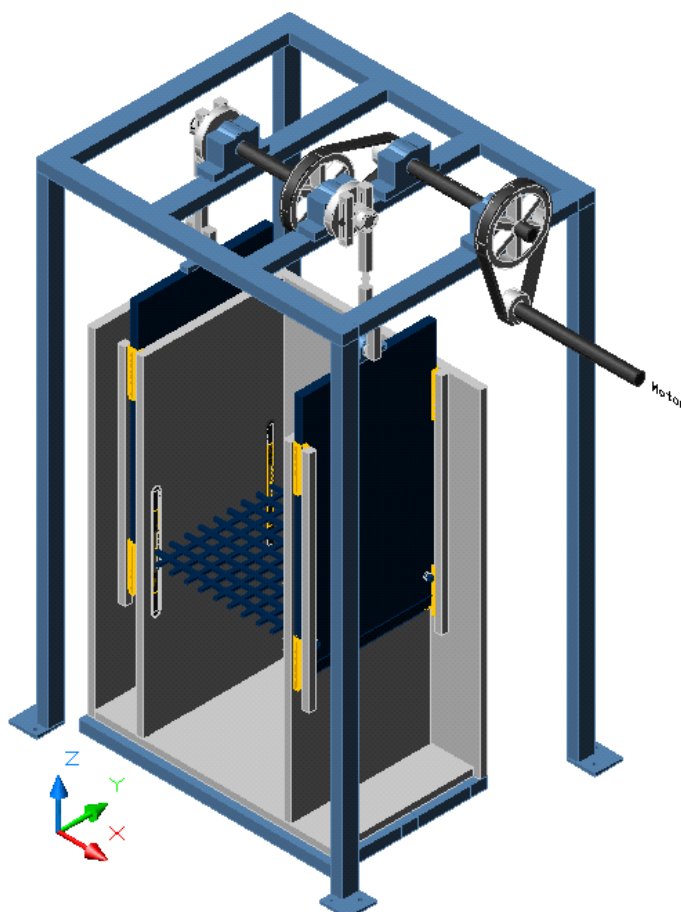


FIGURA 2 - Vista geral do tanque. No esquema, duas placas de acrílico externas foram removidas, para permitir a visualização esquemática da grade no interior do tanque.

Devido à turbulência gerada por grade oscilante ser sensível às condições iniciais dos experimentos, no sentido de haver uma fase transiente ao longo de um intervalo de tempo da ordem de minutos ou dezena de minutos, as medidas iniciaram-se somente 30 minutos após o início da oscilação da grade (baseou-se este procedimento nas observações de HERLINA et al., 2001).

DPIV

O equipamento Laser de gás de cobre da marca Oxford, com potência média de 20 W (LS20), foi utilizado para gerar a folha de luz e permitir o uso da metodologia DPIV para a obtenção dos

campos instantâneos de velocidade. A FIGURA 4 mostra o equipamento utilizado, durante as medidas de velocidade. Uma câmera CCD Kodak Megaplug, modelo ES 1.0 foi utilizada para registrar as imagens. Esta câmera fornece uma resolução de até 1024 pixel \times 1024 pixel tendo uma velocidade máxima de 30 frames/segundo. 500 imagens de aproximadamente 14,0 cm \times 14,0 cm foram obtidas em posições pré-estabelecidas do escoamento (ilustrados na FIGURA 5). Após a captura e gravação das imagens no computador, utilizou-se o software VISIFLOW[®] para obtenção dos vetores velocidade através do método da correlação cruzada. A área de interrogação, nesse caso, possui cerca de 0,93 cm \times 0,93 cm (que corresponde a 32 pixel \times 32 pixel) sendo utilizada uma sobreposição de 50% nas áreas de interrogação. O tamanho da área de interrogação afeta a resolução dos dados, enquanto que a sobreposição das áreas de interrogação melhora a correlação inerente aos vetores adjacentes.

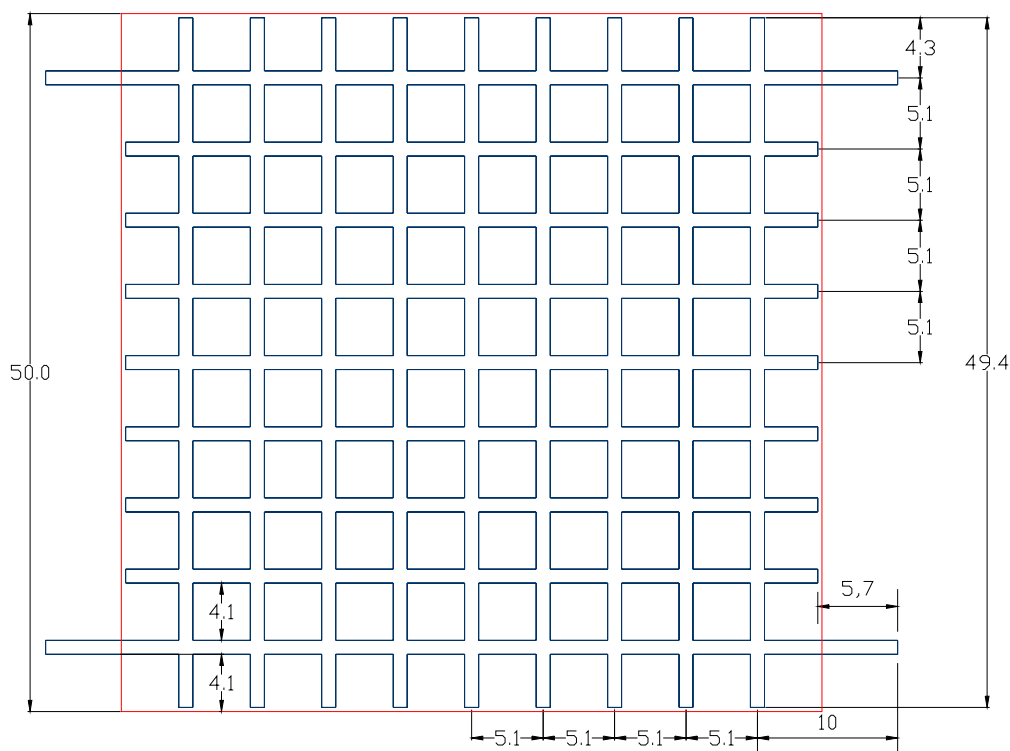


FIGURA 3 – Grade com malha M de 5,1 cm dando uma solidez de 32 %.

Admitindo-se velocidade média nula no tanque, pode-se calcular a intensidade turbulenta a partir dos campos de vetores instantâneos através da equação:

$$q = \left(\overline{u'^2} + \overline{w'^2} \right)^{1/2} \quad (2)$$

onde u' e w' são as flutuações de velocidade horizontal e vertical, respectivamente.

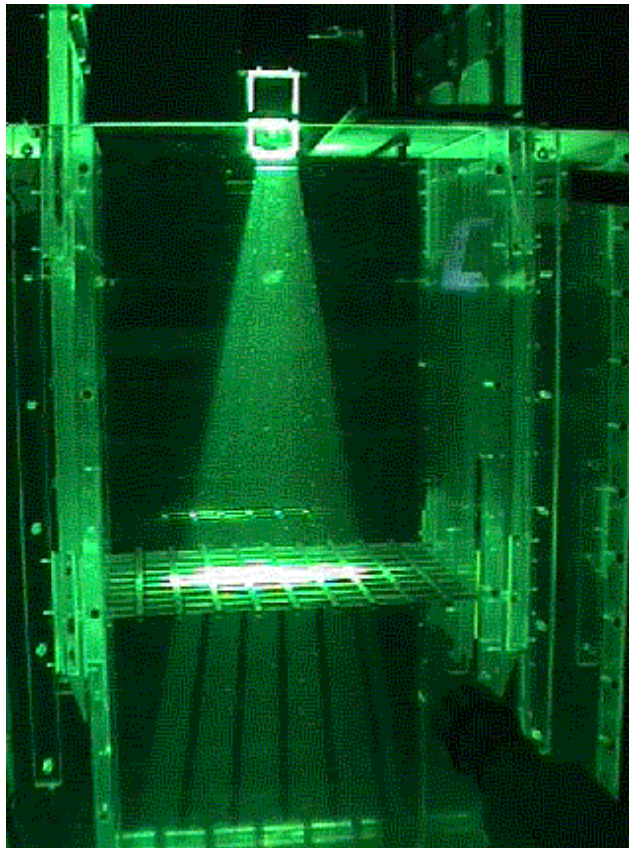


FIGURA 4 – O fluido iluminado pelo feixe do laser (no interior do tanque) tornando visíveis partículas naturais existentes no escoamento.

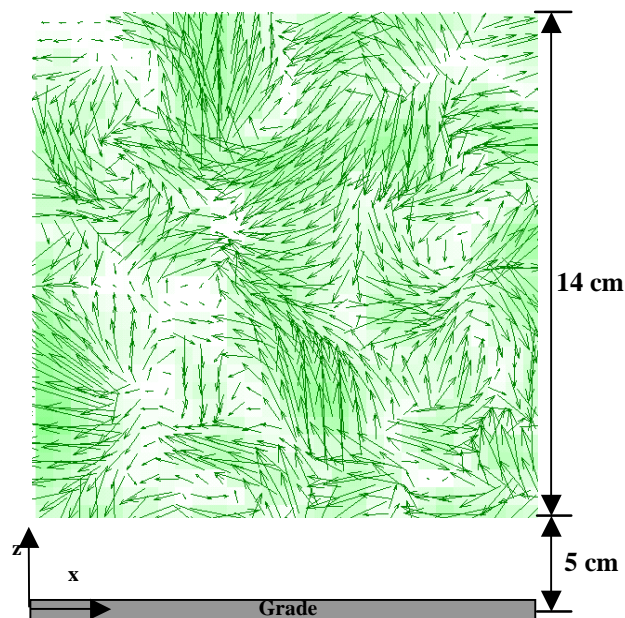


FIGURA 5 – Vista lateral da captura de imagens. Imagens de aproximadamente 14,0 cm \times 14,0 cm foram obtidas na posição sobre a grade localizada no intervalo de $5,0 \text{ cm} \leq z \leq 19,0 \text{ cm}$, onde z é o eixo vertical com origem no centro de oscilação da grade.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Velocidade média

O tanque de grade oscilante é usualmente mencionado como um equipamento que gera turbulência sem que haja escoamento médio do fluido. Assim, a magnitude dos vetores dos campos médios, que teoricamente deve ser nula, experimentalmente deve se aproximar o máximo de zero. Um campo de vetores instantâneos é mostrado na FIGURA 6. Na FIGURA 7, por sua vez, um campo médio de velocidade, calculado a partir de 500 campos instantâneos é apresentado. Observa-se que o campo médio mostra vetores com magnitude consideravelmente inferior à dos vetores dos campos instantâneos. Contudo, em certas regiões do escoamento a velocidade média se distanciou de zero.

JANZEN (2003) comenta que este distanciamento de zero pode ser decorrente de um movimento de grande escala, que “rouba” energia originalmente destinada à turbulência, interferindo assim na turbulência gerada pela grade (em outras palavras, parte da energia fornecida à grade é utilizada em um “efeito bomba” que simplesmente introduz movimento médio no meio fluido). Neste sentido, BRUMLEY e JIRKA (1987) já comentaram que este significativo escoamento médio é uma característica mais ou menos comum aos experimentos em tanques de grades oscilantes.

Nota-se que mais estudos com este tipo de equipamento devem ser conduzidos, visando esclarecer os aspectos dúbios da existência de correntes secundárias. O tema é relevante, uma vez que os sistemas de grades oscilantes visam, em princípio, estudar a turbulência sem interferências de escoamentos médios e dos gradientes de velocidade que estes produzem. Lembra-se que qualquer região com altos gradientes de velocidade média é potencialmente uma região de produção de turbulência. Havendo sítios no tanque de grade oscilante que produzem turbulência sem ser junto à própria grade, a análise de processos puramente difusivo-dissipativos fica comprometida.

Distribuição das tensões de Reynolds

A FIGURA 8 mostra a distribuição horizontal das tensões de Reynolds para diferentes elevações (distâncias) a partir da grade. Observa-se que os valores médios das tensões de Reynolds ao longo de uma linha horizontal são praticamente nulos e que as suas flutuações ao longo do eixo x se tornam cada vez mais próximas de zero conforme a distância à grade aumenta. As tensões de Reynolds obtidas são menores que as obtidas por ORLINS (1999) e CHENG e LAW (2001), mostrando que o tanque pode ser considerado livre de cisalhamento. Adicionalmente, pode se dizer que o tanque possui características de turbulência isotrópica, visto que tensões de Reynolds nulas são uma característica dos escoamentos isotrópicos.

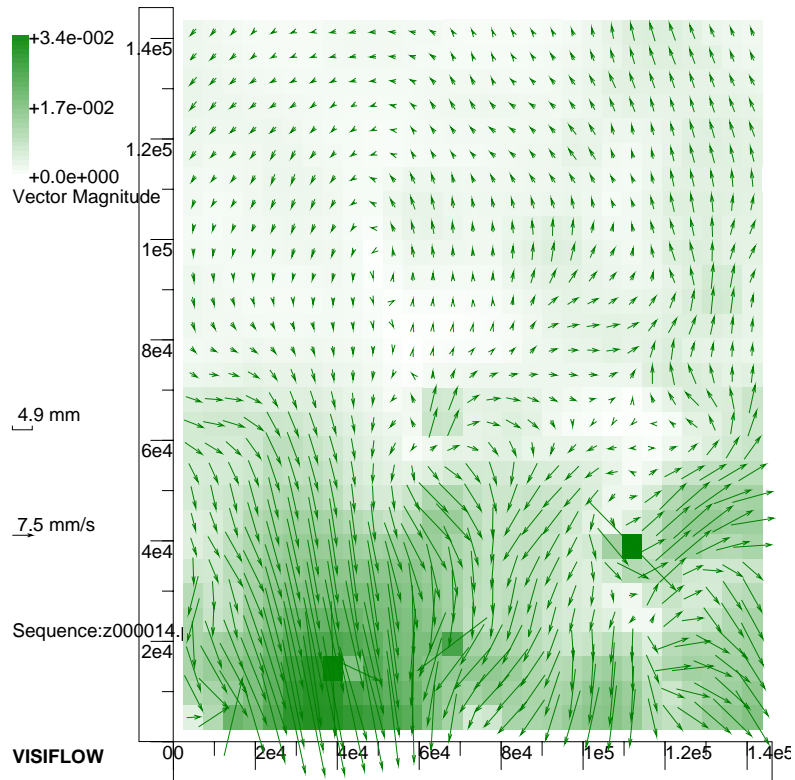


FIGURA 6 - Campo instantâneo de velocidades, obtido com o uso da metodologia DPIV no tanque de agitação com grades oscilantes.

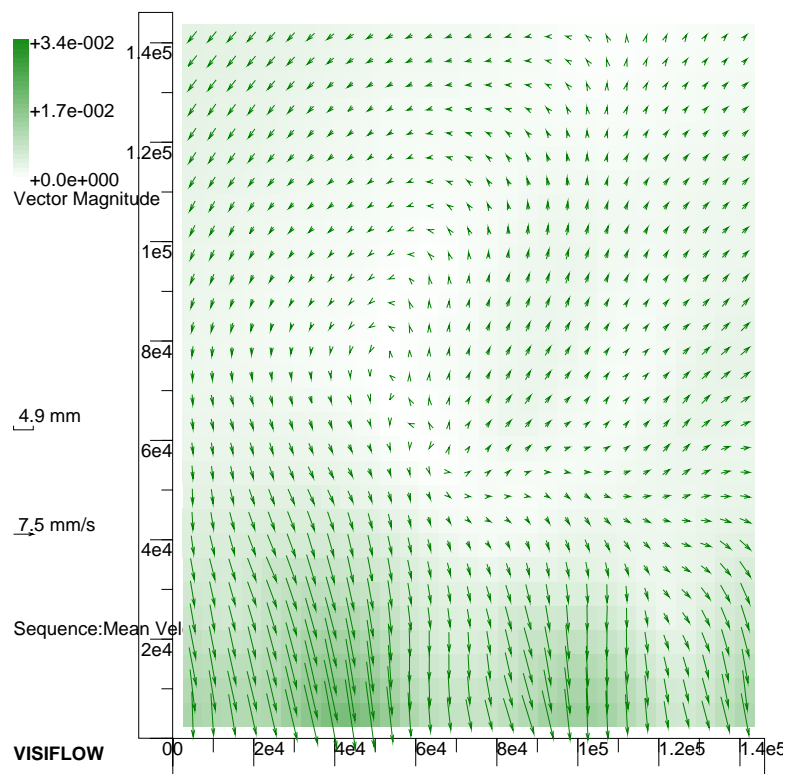


FIGURA 7 - Campo médio de velocidades, obtido a partir de 500 imagens instantâneas. A magnitude dos vetores é menor do que na FIGURA 6 (idealmente o campo médio é nulo).

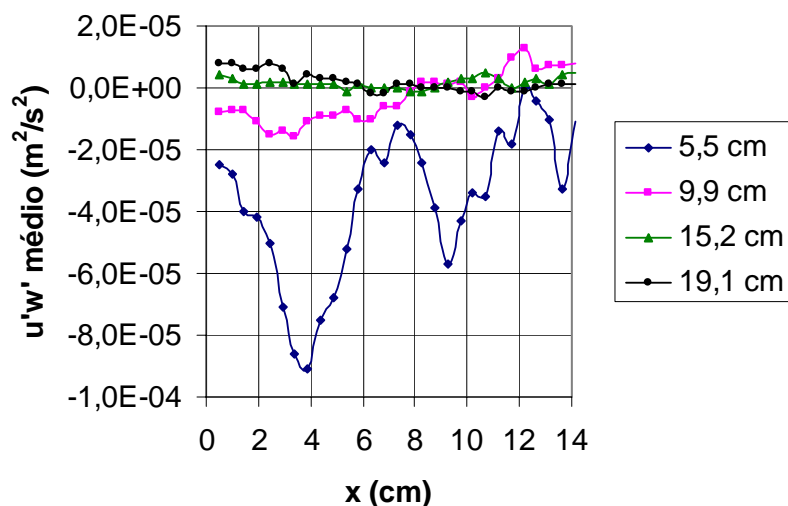


FIGURA 8 – Distribuição horizontal das tensões de Reynolds para altura da água acima do centro de oscilação da grade = 40 cm, frequência de 1,0 Hz e amplitude de 4,0 cm.

As cores de fundo da FIGURA 9 também mostram a variação das tensões de Reynolds no plano em estudo para uma altura da água de 40 cm acima do centro de oscilação da grade, frequência de 1,0 Hz, amplitude de 4,0 cm. Pode-se observar que próximo à grade as tensões de Reynolds são maiores e sofrem variações de intensidade. Já longe da grade as tensões são praticamente nulas e não sofrem mais oscilação.

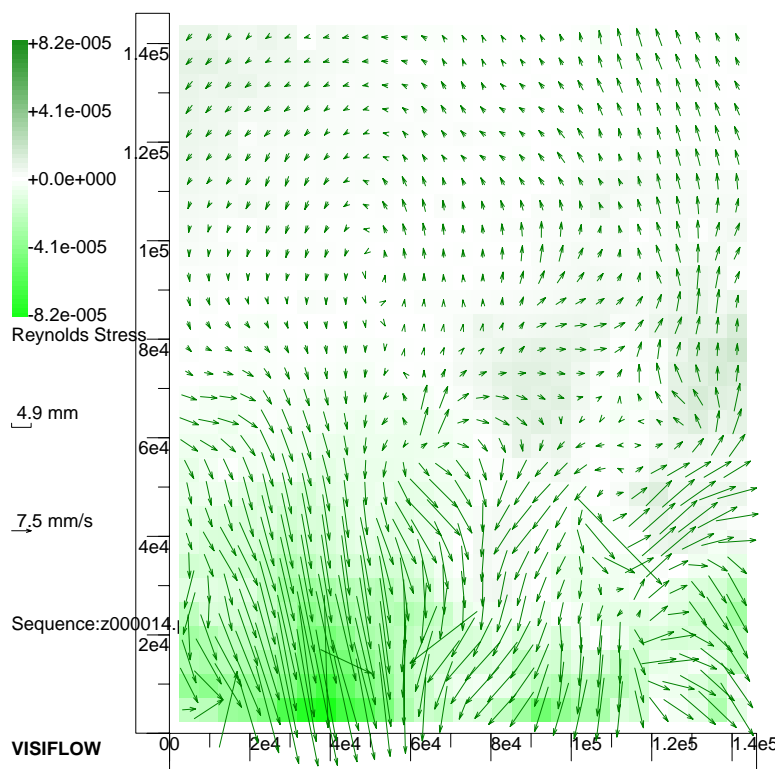


FIGURA 9 – Distribuição das tensões de Reynolds para altura da água acima do centro de oscilação da grade = 40 cm, frequência de 1,0 Hz e amplitude de 4,0 cm.

Distribuição horizontal da intensidade turbulenta

Para verificar a homogeneidade da turbulência gerada, apresenta-se na FIGURA 10 a distribuição horizontal da intensidade turbulenta para diferentes elevações. Há uma significativa variação da intensidade turbulenta no plano horizontal para distâncias próximas à grade devido à agitação mecânica da mesma. Com o aumento da distância à grade, a intensidade turbulenta tende a se homogeneizar. Esta homogeneização da turbulência a partir de 2 a 3 M da grade (entre 10 e 15 cm) concorda com os resultados obtidos por CHENG e LAW (2001) e DE SILVA e FERNANDO (1994).

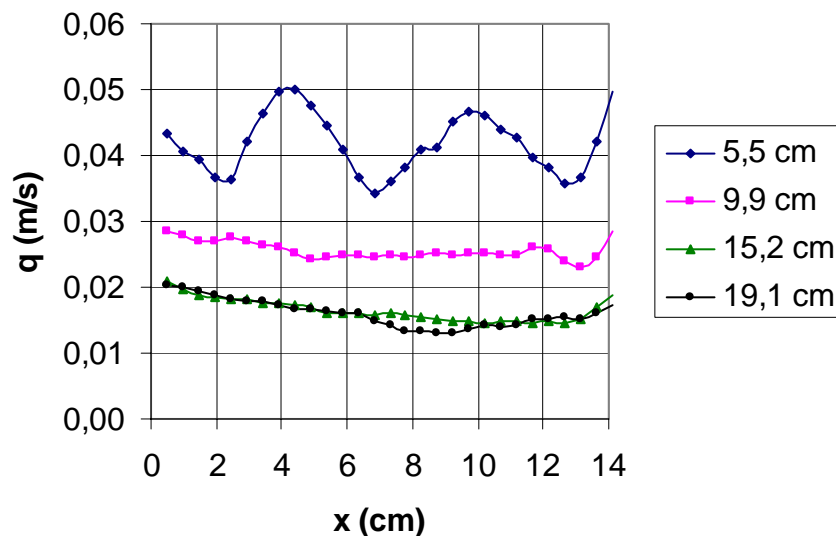


FIGURA 10 – Distribuição horizontal da intensidade turbulenta para altura da água acima do centro de oscilação da grade = 40 cm, frequência de 3,0 Hz e amplitude de 4,0 cm.

Da mesma maneira, as cores de fundo da FIGURA 11 mostram a variação da intensidade turbulenta no plano em estudo para uma altura da água acima do centro de oscilação da grade de 40 cm, frequência de 3,0 Hz, amplitude de 4,0 cm. Pode-se observar que próximo à grade a intensidade turbulenta sofre uma significativa oscilação, mas que propende a desaparecer conforme a distância à grade aumenta.

Este comportamento diferenciado próximo e longe da grade foi discutido qualitativamente por HOPFINGER e TOLY (1976) e NOKES (1988). Genericamente pode-se identificar duas espécies de escoamentos gerados pela grade: jatos e esteiras. Os jatos são formados nas aberturas da grade, e as esteiras são criadas abaixo e acima das grades. As características da grade impõem o tipo de escoamento dominante. Para uma grade com alta solidez, jatos são importantes. Já para uma grade com solidez inferior a 40%, a turbulência é formada principalmente pela interação das esteiras.

Distribuição vertical da intensidade turbulenta

HOPFINGER e TOLY (1976) apresentaram uma solução empírica para a distribuição vertical da intensidade turbulenta para escoamentos turbulentos gerados por uma grade oscilante:

$$q = CS^{1,5} M^{0,5} fz^{-1} \quad (3)$$

onde C é uma constante. Trata-se de uma solução empírica largamente utilizada para verificar as tendências obtidas dos resultados experimentais. Posteriormente, foram apresentadas por SCHULZ e CHAUDHRY (1998) e MATSUNAGA et al. (1999) soluções analíticas baseadas no modelo $k-\varepsilon$. Estas soluções são mais gerais, podendo ser utilizadas para diferentes situações de escoamento. Visando a simplicidade e com a finalidade de verificar a validade da equação empírica, somente são aqui apresentados resultados comparativos com a equação de HOPFINGER e TOLY (1976).

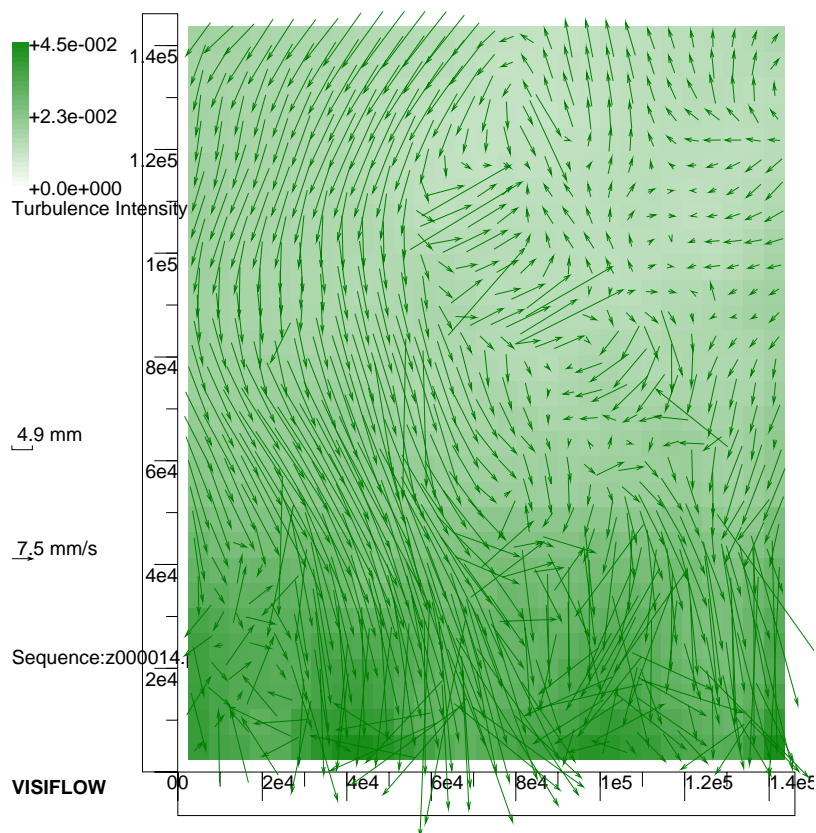


FIGURA 11 – Distribuição da intensidade turbulenta para altura da água acima do centro de oscilação da grade = 40 cm, frequência de 3,0 Hz e amplitude de 4,0 cm.

Para comparar os resultados obtidos para a intensidade turbulenta com a lei empírica de decaimento, como mostrado na equação, foi efetuada a média espacial em x das medidas das intensidades para uma mesma altura. Usando como exemplo o gráfico da FIGURA 10, da distribuição de q ao longo de x , a operação efetuada implica que cada conjunto de pontos pertencentes a uma mesma altura z gera apenas um ponto para a representação da média desejada (a média desses pontos).

O gráfico apresentado na FIGURA 12 mostra a evolução da intensidade turbulenta, ao longo de z para os primeiros 19 cm sobre a grade, que correspondem à região de maior decaimento. Os mecanismos preponderantes nesta região de decaimento são a difusão e a dissipação de energia cinética turbulenta. Pode-se observar que a solução de HOPFINGER e TOLY (1976) se ajusta bem aos dados experimentais. O valor do coeficiente C foi obtido através do método de mínimos quadrados (neste caso $C = 0,38$).

O decaimento da intensidade turbulenta também pode ser verificado através das cores de fundo da FIGURA 11. Observa-se que a intensidade turbulenta diminui conforme aumenta a distância à grade.

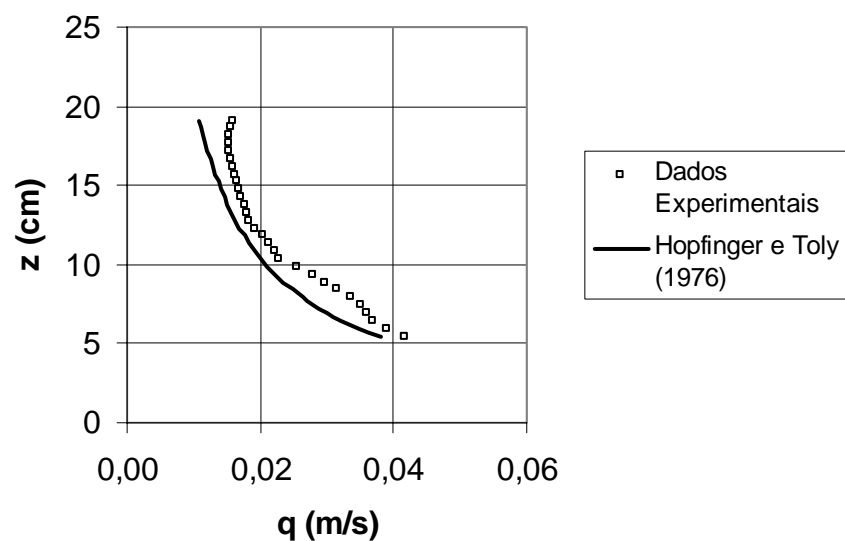


FIGURA 12 – Distribuição vertical da intensidade turbulenta para altura da água acima do centro de oscilação da grade= 40 cm, frequência de 3,0 Hz e amplitude de 4,0 cm.

CONCLUSÃO

A técnica DPIV foi utilizada para estudar a turbulência gerada em tanque de grade oscilante. Os resultados mostram que a distribuição das tensões de Reynolds, para grandes distâncias da grade, é próxima de zero, indicando que a turbulência tende a possuir propriedades da turbulência isotrópica. Adicionalmente observou-se que os campos médios de velocidade são inferiores aos campos instantâneos, apesar de algumas vezes as velocidades em sub-regiões se distanciarem de zero. Esta característica de gerar escoamentos secundários parece ser (segundo algumas informações de literatura, corroboradas pelo presente trabalho) uma característica natural dos experimentos em tanques de grades oscilantes (embora, rigorosamente falando, não desejada). A condição de homogeneidade é atingida à medida que se afasta da grade. O decaimento da turbulência foi analisado através de solução empírica, encontrando-se um bom grau de aproximação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, pelo auxílio 00/13953-6 que permitiu conduzir esse trabalho. Agradecem ainda à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa do primeiro autor, que permitiu a sua manutenção ao longo deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BRUMLEY, B.H.; JIRKA, G.H. (1987). Near-surface turbulence in a grid-stirred tank. *Journal of Fluid Mechanics*, v.183, p.235-63.
- BRUNK, B.; SHIRK, M.W.; JENSEN, A.; JIRKA, G.; LION, L.W. (1996). Modeling natural hydrodynamic systems with a differential-turbulence column. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.122, p.373-80.
- 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, Sept.
- CHENG, N. S.; LAW, A. W.K. (2001). Measurements of Turbulence Generated by Oscillating Grid. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.127, n.3, p.201-08.
- CHU, C.R; JIRKA, G.H. (1992). Turbulent gas flux measurements below the air-water interface of a grid-stirred tank. *Int. J. Heat Mass Transfer*, v.35, p.1957-68.
- DE SILVA, I.P.D.; FERNANDO, H.J.S. (1994). Oscillating grids as a source of nearly isotropic turbulence. *Phys. Fluids*, v.6, p.2455-64.
- HERLINA, M.E.; KÜHN, G.; LANG, C. (2001). Turbulenzverteilung in einem Rüttelgittertank - Einsatz der PIV-Messtechnik. In: Bericht Nr. 788. Institut für Hydromechanik, Karlsruhe.
- HOPFINGER, E.J.; TOLY, J.-A. (1976). Spatially decaying turbulence and its relation to mixing across density interfaces. *J. Fluid Mechanics*, v.78, p.155-75.
- JANZEN, J.G. (2003). *Detalhamento das propriedades turbulentas em água agitada por grades oscilantes*. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MATSUNAGA, N.; SUGIHARA, Y.; KOMATSU, T.; MASUDA, A. (1999). Quantitative properties of oscillating-grid turbulence in a homogeneous fluid. *Fluid Dynamics Research*, v.25, p.147-65.
- 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, p.299-304.
- NOKES, R.I. (1988). On the entrainment rate across a density interface. *Journal of Fluid Mechanics*, v.188, p.185-204.

- ORLINS, J.J. (1999). *Turbulence and mass transfer with an oscillating grid*. Tese (Doutorado) – Faculty of the Graduate School of the University of Minnesota.
- SCHULZ; H.E.; CHAUDHRY, F.H. (1998). Uma aproximação para turbulência gerada por grades oscilantes. In: PRIMEIRA ESCOLA DE TRANSIÇÃO E TURBULÊNCIA, COPPE, Rio de Janeiro.
- THOMPSON, S.M.; TURNER, J.S. (1975). Mixing across an interface due to turbulence generated by an oscillating grid. *J. Fluid Mechanics*. v.67, p.349-68.