

INVESTIGAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TURBULENTAS EM TANQUE COM DUAS GRADES OSCILANTES ATRAVÉS DA TÉCNICA DPIV

Johannes Gérson Janzen¹ & Harry Edmar Schulz²

Resumo – As propriedades da turbulência induzida em um fluido viscoso através da oscilação de duas grades foram investigadas através de medidas de turbulência utilizando a técnica DPIV (Digital Particle Image Velocimetry). Os campos médios de velocidade mostraram-se bem inferiores aos campos instantâneos, indicando a existência de baixo escoamento médio do fluido. Os gráficos criados a partir dos campos de velocidade possibilitaram a observação tanto do decaimento espacial da turbulência como a região de sua produção. Adicionalmente, foi observado que o escoamento somente pode ser considerado livre de cisalhamento para grandes distâncias da grade, onde as tensões de Reynolds se aproximam de zero. Os resultados mostram também que há uma oscilação significativa da intensidade turbulenta para distâncias próximas da grade. Com o aumento da distância, a turbulência se torna mais homogênea no plano horizontal, e estas oscilações tendem a desaparecer.

Abstract - The properties of turbulence induced in a viscous fluid by oscillating two grids are investigated by means of turbulence measurements using the digital particle image velocimetry. 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. The spatial decay of the turbulence and the region near the grids where it is produced could also be observed. In addition, it could be observed 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. The results also show 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.

Palavras-chave - grades oscilantes, turbulência, DPIV.

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 estudo da turbulência isotrópica teve início com TAYLOR (1935b) que a definiu como a condição na qual todos os valores médios das funções de variáveis do escoamento são independentes da direção. Desde então, por ser o que se denomina teoricamente de “a classe mais simples de turbulência”, a turbulência isotrópica tem sido amplamente estudada para um melhor entendimento de suas características e sua relação com fenômenos de transporte. A turbulência isotrópica tem sido utilizada também em tratamentos teóricos, servindo como um bloco construtivo fundamental para o entendimento de escoamentos mais complexos (não isotrópicos). Por muitas décadas, tem-se almejado gerar turbulência isotrópica em laboratório. Entretanto, apesar dos esforços, esse tipo de turbulência somente pode ser aproximado, visto que a perfeita isotropia é uma abstração teórica não atingível experimentalmente, sendo por isso chamada de turbulência quase-isotrópica (SRDIC et al., 1996). Assim, a “simplicidade” teórica corresponde a uma impossibilidade física, o que, caso não houvesse aproximações experimentais viáveis, tornaria inócua a exploração da turbulência por este caminho.

No passado, diversas pesquisas foram realizadas em túneis de vento ou ar onde é gerada uma turbulência aproximadamente isotrópica a jusante de uma grade colocada transversalmente ao escoamento. Todavia, este arranjo possui alguns inconvenientes: dimensão exagerada (chegam a possuir 12 metros de comprimento), gera escoamentos com rápido decaimento turbulento e impossibilita o estudo da influência da turbulência isotrópica em alguns outros fenômenos relevantes (transferência de gás na interface ar-água, dispersão de poluentes, sedimentação, por exemplo).

Desta forma, os pesquisadores têm recorrido a equipamentos alternativos na busca da turbulência isotrópica em laboratório. A alternativa talvez mais viável é o tanque de grade oscilante, um equipamento mais compacto, com escoamento médio aproximadamente nulo e oferecendo a possibilidade do estudo concomitante da turbulência isotrópica e fenômenos associados a ela. Os primeiros estudos de isotropia e homogeneidade foram realizados em tanques com uma grade, sendo recentemente proposto por VILLERMAUX et al. (1995), SRDIC et al. (1996) e SHY et al. (1996), em estudos independentes, a utilização de duas grades oscilantes para geração de turbulência estacionária quase isotrópica.

VILLERMAUX et al. (1995) utilizaram esta configuração para estudar as características da estrutura dos vórtices em turbulência estacionária quase isotrópica utilizando técnica de migração de bolhas. Duas grades idênticas foram posicionadas a distância de $2L = 5xM \approx 28cm$ (onde L é a

meia distância entre as grades e M é malha, ou seja, a distância entre o eixo de duas barras consecutivas), no topo e fundo do tanque. Não foram realizadas medições de velocidade. SRDIC et al. (1996) instalaram as grades verticalmente em ambas extremidades do tanque, com uma distância média de 44 cm entre elas, as quais foram osciladas fora de fase. Os autores mencionados encontraram diversas características de turbulência isotrópica, indicando que a turbulência produzida pelo arranjo de duas grades pode ser considerada, do ponto de vista prático, aproximadamente isotrópica. SHY et al. (1996) utilizaram um par de grades para gerar turbulência isotrópica estacionária para simular experimentalmente combustão turbulenta, usando reações aquosas autocatalíticas. Duas grades idênticas foram posicionadas a uma distância de $3.53M \approx 10.6\text{cm}$, sendo osciladas fora de fase. Os resultados mostram velocidades médias essencialmente zero e intensidades turbulentas cerca de 11% da velocidade de oscilação da grade. SHY et al. (1997) realizaram medidas detalhadas de velocidade baseados nos experimentos de SHY et al. (1996), concentrando-se no efeito da distância entre as grades $2L$ e da frequência f na intensidade turbulenta e em outros parâmetros como autocorrelação, escala integral de comprimento e espectro. Finalmente, OTT e MANN (2000) utilizaram a configuração de duas grades para estudar a difusão turbulenta.

O objetivo do presente estudo é mostrar a aplicação da técnica DPIV na investigação das propriedades turbulentas em tanque de duas grades oscilantes, com a finalidade de avaliar a ocorrência de características turbulentas comuns a esses escoamentos.

EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Tanque de duas grades oscilantes

A FIGURA 1 mostra o tanque de duas grades oscilantes. O tanque possui dimensões de $50,0 \times 50,0 \times 115,0$ cm. 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. Duas grades idênticas posicionadas horizontalmente, a uma distância de 31,6 cm uma da outra, foram osciladas em fase. A frequência de oscilação f foi variada entre 1,0 e 4,0 Hz e a amplitude S de oscilação de 2,0 a 5,0 cm.

Grade

Para geração do movimento turbulento foram construídas duas grades de aço inoxidável, idênticas, compostas de 9×9 barras de seção quadrada de $1,0 \text{ cm} \times 1,0 \text{ cm}$, com um espaçamento M de $5,1 \text{ cm}$ (distância entre o eixo de duas barras vizinhas), produzindo uma solidez de 32% (ver FIGURA 2). As grades atendem a requisitos propostos por HOPFINGER e TOLY (1976) de que uma solidez inferior a 40% é capaz de evitar movimentos secundários e falta de homogeneidade no plano horizontal. Entende-se por solidez a relação entre a área superficial da grade e a área superficial do tanque. O centro de oscilação da grade inferior ficou posicionado a 55 cm do fundo do tanque, e o centro de oscilação da grade superior ficou a uma distância de $31,6 \text{ cm}$ da grade inferior.



FIGURA 1 – Tanque com duas grades oscilantes.

DPIV

A medição das velocidades horizontais e verticais foi realizada através da técnica DPIV (Digital Particle Image Velocimetry), uma técnica não intrusiva que fornece campos de vetores de velocidade instantâneos no plano em estudo.

Na técnica DPIV, um feixe do laser é expandido para dentro do escoamento. Câmaras CCD (Charge Coupled Device) são utilizadas para capturar imagens de partículas movendo-se dentro do fluido na região do feixe, sendo que através da análise de múltiplas imagens pode-se obter os vetores velocidade. O tempo entre as capturas de imagens é escolhido de tal forma que o deslocamento seja grande o suficiente para produzir precisas medidas de velocidade e pequeno o suficiente para caracterizar o movimento do fluido local.

Como fonte de luz foi utilizado o Oxford Laser (LS20), que possui uma potência média próxima de 20 W. Uma câmera CCD Kodak Megaplus, 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 de 30 frames/segundo (foi utilizada uma resolução de 480 pixel \times 480 pixel).

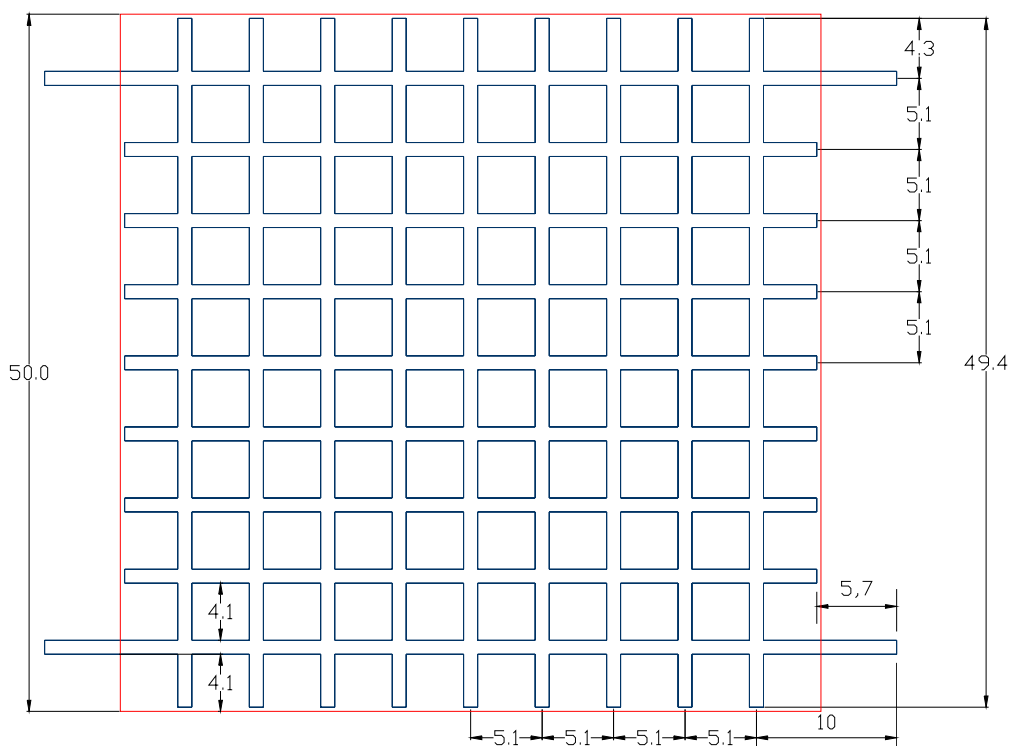


FIGURA 2 – Grade com malha M de 5,1 cm conferindo uma solidez de 32 %.

PROCEDIMENTOS

Devido à turbulência gerada 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 após 30 minutos do começo de oscilação das grades, seguindo recomendação de HERLINA et al. (2001), que trabalhou com apenas uma grade oscilante. Imagens de aproximadamente 15,0 cm \times 15,0 cm foram obtidas na posição "sobre a barra" (ver FIGURA 3), no centro do tanque, em uma região do escoamento entre as grades posicionada no

intervalo de $-15,0 \text{ cm} \leq z \leq 15,0 \text{ cm}$, onde z é o eixo vertical com origem no centro do espaçamento entre as grades (FIGURA 4). Após a captura e gravação das imagens no computador (foram capturadas cerca de 500 imagens por experimento), 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 $1,0 \text{ cm} \times 1,0 \text{ cm}$ ($32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$) sendo utilizada uma sobreposição de 50% (para detalhes teóricos da técnica DPIV, ver JANZEN, 2003).

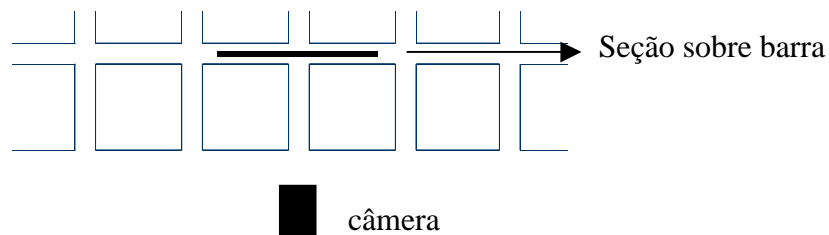


FIGURA 3 – Localização da captura das imagens, vista superior (a linha horizontal é a projeção do plano fotografado localizado na posição "sobre a barra").

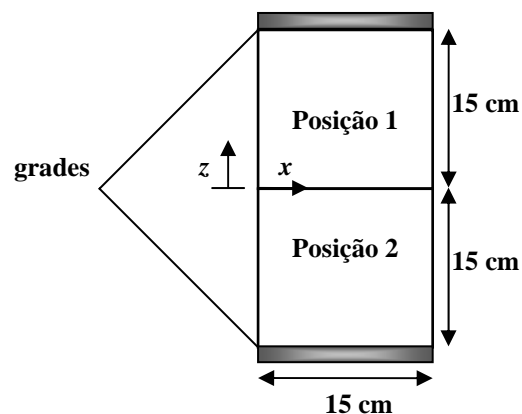


FIGURA 4 – Vista lateral da captura de imagens. As imagens de aproximadamente $15,0 \text{ cm} \times 15,0 \text{ cm}$ foram obtidas no intervalo de $-15,0 \text{ cm} \leq z \leq 15,0 \text{ cm}$, onde z é o eixo vertical com origem no centro do espaçamento entre as duas grades.

Admitindo velocidade média nula, foi possível calcular a intensidade turbulenta a partir dos campos de vetores instantâneos através da equação:

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

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

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Velocidade média

É muito importante que neste tipo de análise não haja uma alta velocidade média, pois esta pode comprometer a análise dos processos puramente difusivo-dissipativos. As FIGURAS 5 e 6 mostram, respectivamente, um campo de vetores instantâneo e um campo médio de velocidade (calculado a partir de 500 campos instantâneos). Ressalta-se que a análise detalhada da velocidade média nesses experimentos, em conjunto com parâmetros como taxa de dissipação de energia, energia cinética turbulenta, macro-escala e viscosidade turbulenta, encontra-se em JANZEN (2003), enquanto que alguns detalhes construtivos podem ser obtidos em SOUZA (2002). Os vetores do campo médio possuem em geral magnitude inferior à do campo instantâneo, apesar de em determinadas regiões os vetores de ambos os campos terem praticamente a mesma magnitude. Essa velocidade média relativamente alta em determinadas regiões do escoamento parece ser (segundo a literatura consultada) uma característica mais ou menos inerente aos experimentos em tanques de grades oscilantes.

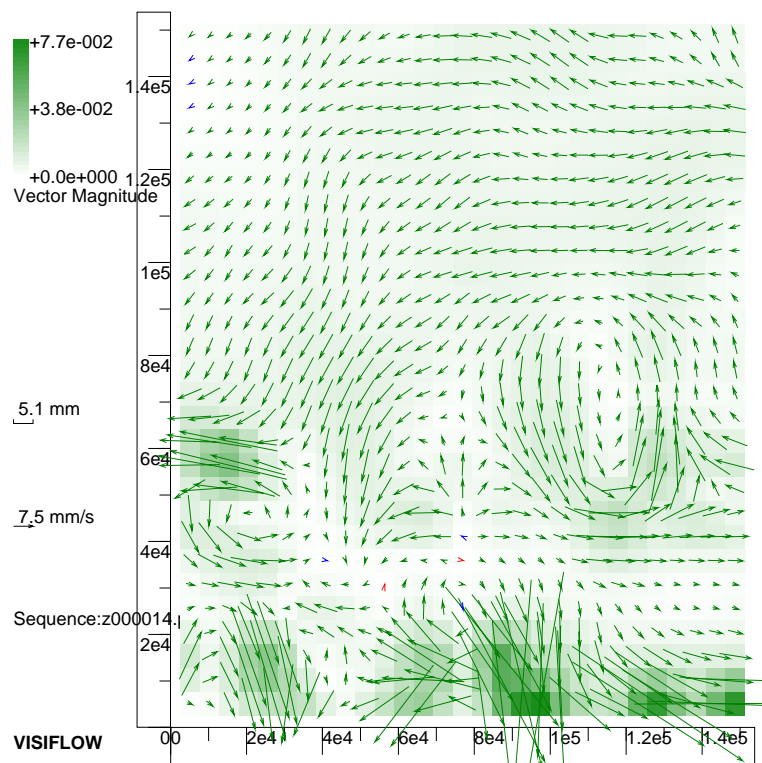


FIGURA 5 – Campo instantâneo de velocidades, obtido com o uso da metodologia DPIV no tanque de agitação com duas grades oscilantes para frequência de 1,0 Hz, amplitude de 4,0 cm e posição 2 (ver FIGURA 4).

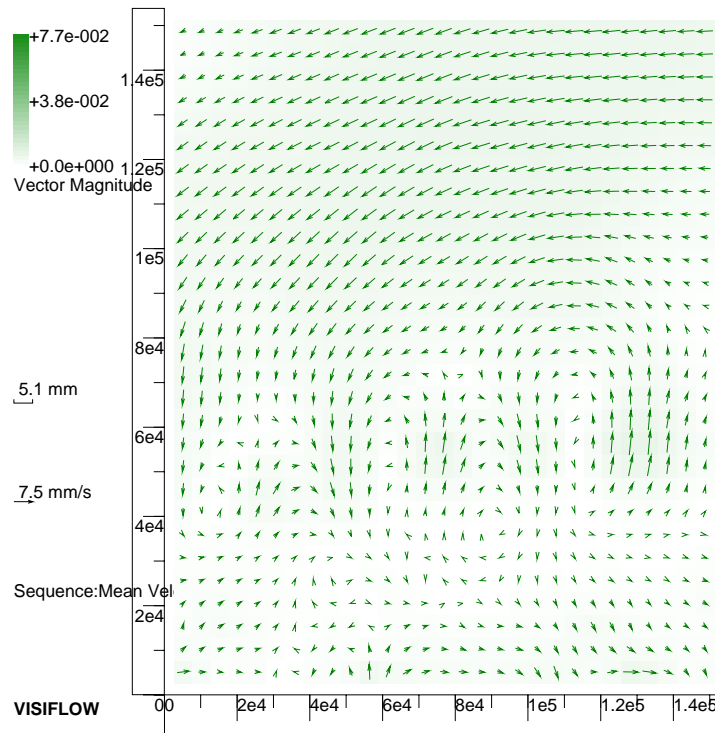


FIGURA 6 – Campo médio de velocidades, obtido a partir de 500 imagens instantâneas para frequência de 1,0 Hz, amplitude de 4,0 cm e posição 2 (ver FIGURA 4).

Distribuição das tensões de Reynolds

A FIGURA 7 mostra a distribuição horizontal das tensões de Reynolds para diferentes elevações (distâncias) da origem no centro do espaço entre as grades. Observa-se que há uma significativa variação nos valores das tensões de Reynolds nas regiões ocupadas pelas grades oscilantes. Entretanto, nas demais regiões, as tensões de Reynolds podem ser consideradas desprezíveis. A ausência de cisalhamento, isto é, tensões de Reynolds nulas é uma característica dos escoamentos isotrópicos.

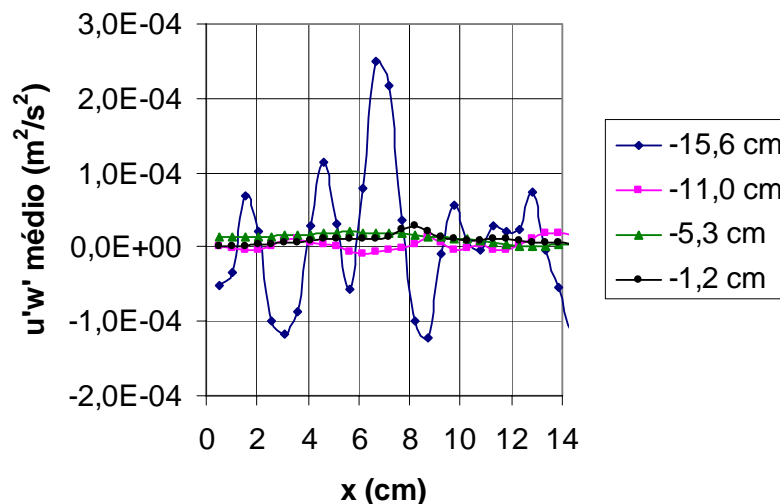


FIGURA 7 – Distribuição horizontal das tensões de Reynolds para frequência de 1,0 Hz, amplitude de 4,0 cm e posição 2 (ver FIGURA 4).

As cores de fundo da FIGURA 8 também mostram a variação das tensões de Reynolds para uma frequência de 1,0 Hz, amplitude de 4,0 cm e posição 2 (conforme a FIGURA 4). Pode-se observar que na região onde as grades oscilam as tensões de Reynolds não são zero. Já longe da grade as tensões são praticamente nulas.

Distribuição horizontal da intensidade turbulenta

Apresenta-se na FIGURA 9 a distribuição horizontal da intensidade turbulenta objetivando-se verificar a homogeneidade da turbulência gerada. Para a região próxima das grades há uma significativa oscilação da intensidade turbulenta. Já no centro do espaçamento entre as grades, ou seja, longe das grades, esta variação é bem menor, podendo-se considerar homogênea a turbulência gerada.

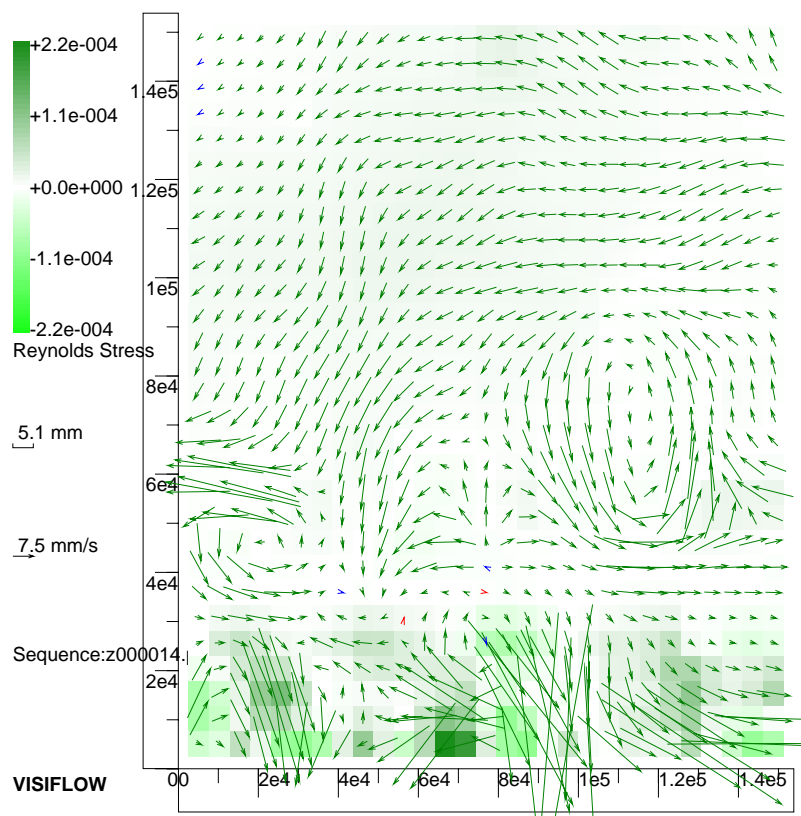


FIGURA 8 – Distribuição das tensões de Reynolds para uma frequência de 1,0 Hz, amplitude de 4,0 cm e posição 2 (ver FIGURA 4).

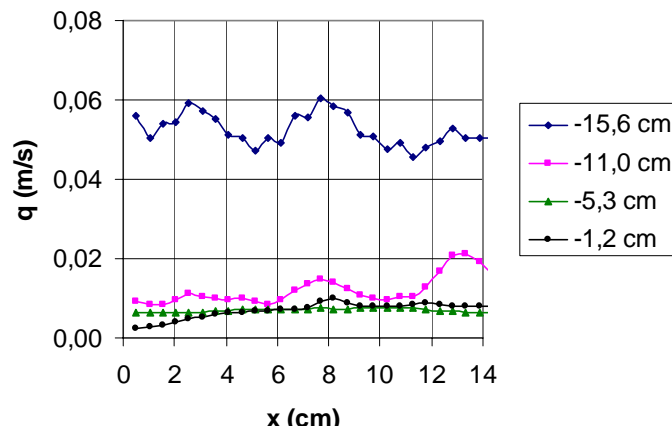


FIGURA 9 – Distribuição horizontal da intensidade turbulenta para frequência de 1,0 Hz, amplitude de 4,0 cm e posição 2.

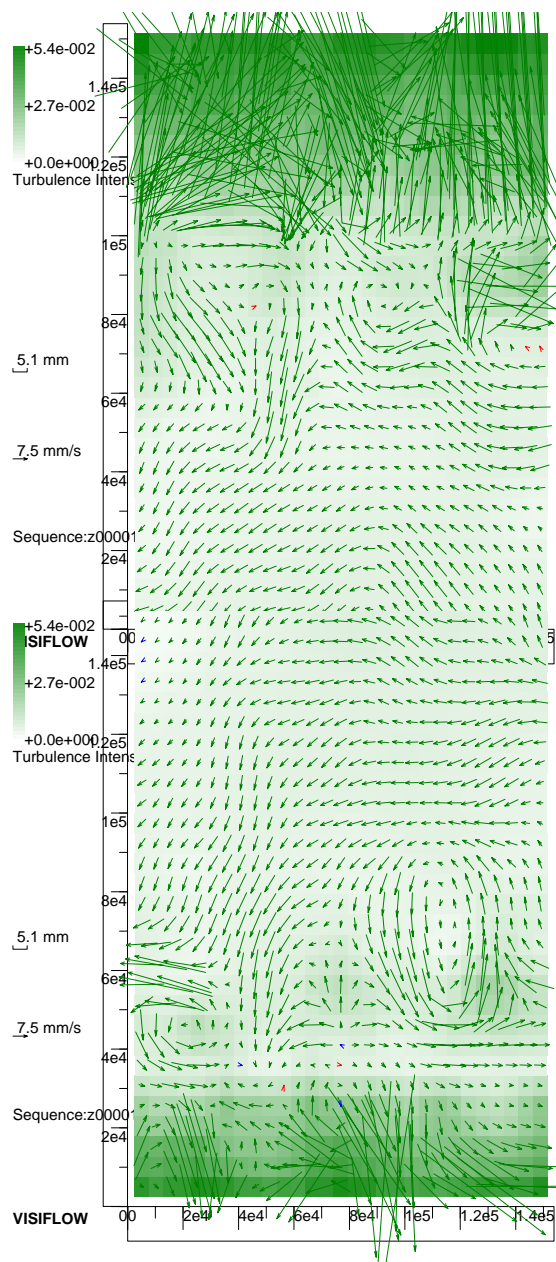


FIGURA 10 – Distribuição da intensidade turbulenta para frequência de 1,0 Hz, amplitude de 4,0 cm.

Distribuição vertical da intensidade turbulenta

A FIGURA 11 mostra a variação da intensidade turbulenta no espaço entre as duas grades. Pode-se observar duas regiões, ambas próximas da grade, delimitadas por pequenos "picos" nas curvas de decaimento, que, devido à proximidade das grades, entende-se como regiões onde há geração de turbulência. Os picos são visíveis nas distâncias de aproximadamente 9,0 cm da grade superior e 10,0 cm da grade inferior. Na região $9,0 \text{ cm} < z < -10,0 \text{ cm}$ há decaimento da intensidade turbulenta e os mecanismos preponderantes são a difusão e a dissipação de energia cinética turbulenta.

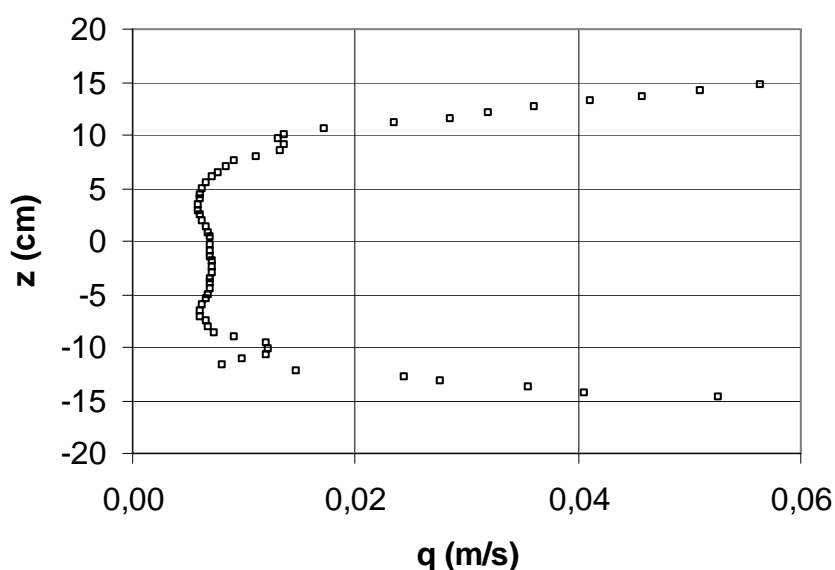


FIGURA 11 – Variação da intensidade turbulenta no espaço entre as grades para frequência de 1,0 Hz e amplitude de 4,0 cm.

SCHULZ e CHAUDHRY (1998) e SCHULZ (2001) apresentam uma solução teórica para escoamentos turbulentos gerados por duas grades oscilantes, considerando os casos de viscosidade turbulenta constante e variável. Os autores mostram que a energia cinética turbulenta (de forma simples, a intensidade turbulenta elevada ao quadrado é uma medida para a energia cinética turbulenta) passa por um mínimo em $z = 0$. Os resultados experimentais mostram que a energia cinética turbulenta passa por uma “região” de mínimo, isto é, a energia cinética turbulenta permanece aproximadamente constante na região central, apresentando um mínimo “global” que, nos experimentos efetuados, mostrou-se deslocado em relação ao ponto central entre as duas grades. O mesmo comportamento foi observado por SRDIC et al. (1996) e OTT e MANN (2000). Infere-se que o estabelecimento de um mínimo exatamente posicionado na origem (ponto central do espaço entre as grades) implica em controle muito fino das condições de trabalho, como distância às

superfícies, oscilação em fase, existência ou não de superfície livre, etc. Este controle implica que qualquer corrente secundária deve ser totalmente suprimida ou deve ser gerada também simetricamente com relação à origem, o que pode ser uma condição de difícil obtenção.

A variação vertical da intensidade turbulenta também pode ser verificada através das cores de fundo da FIGURA 10. Pode-se visualizar que a intensidade turbulenta decai conforme a distância do ponto de medida às grades aumenta.

CONCLUSÃO

A técnica DPIV foi utilizada para estudar a turbulência gerada em tanque de duas grades oscilantes. Medidas de velocidade foram realizadas variando os parâmetros experimentais, e suas características foram investigadas. Observou-se que a distribuição das tensões de Reynolds, na região central, é próxima de zero, indicando que a turbulência tende a possuir propriedades da turbulência isotrópica. Adicionalmente, verificou-se que o escoamento médio (secundário) é baixo, entretanto não está ausente. Aparentemente está é uma característica natural dos escoamentos gerados em tanques de duas grades oscilantes. A turbulência tende a se homogeneizar conforme se aproxima da região central entre as duas grades. Observou-se, através de uma análise qualitativa, a existência de duas regiões: uma região próxima às grades, onde efeitos de produção de turbulência são relevantes (eventualmente também a advecção decorrente dos jatos que se formam nas grades); e uma segunda região (mais distante das grades) em que há o decaimento da energia cinética turbulenta sujeita somente aos processos difusivo-dissipativos. Os resultados mostram a potencialidade do equipamento e a possibilidade de utilizá-lo em estudos nos quais a influência da turbulência (isotrópica) é relevante, como por exemplo, em coagulação e suspensão de sedimentos.

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

- 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.
- OTT, S.; MANN, J. (2000). An experimental investigation of the relative diffusion of particle pairs in three-dimensional turbulent flow. *Journal of Fluid Mechanics*, v.422, p.207-223.
- 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.
- SCHULZ, H.E. (2001). *Alternativas em turbulência*. São Carlos, EESC-EDUSP.
- SHY, S.S.; JANG, R.H.; TANG, C.Y. (1996). Simulation of turbulent burning velocities using aqueous autocatalytic reactions in a near-homogeneous turbulence. *Combustion and Flame*. v.105, p.54-67.
- 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.251-62.
- SOUZA, L.B.S. (2002). *Estudo da estrutura turbulenta em escoamentos gerados por grades oscilantes*. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SRDIC, A.; FERNANDO, H.J.S; MONTENEGRO, L. (1996). Generation of nearly isotropic turbulence using two oscillating grids. *Experimental in Fluids*. v.20, p.395-97.
- TAYLOR, G. I. (1935b). Statistical Theory of Turbulence. *Proceedings Royal Society of London, A*, v.151.
- VILLERMAUX, E.; SIXOU, B.; GAGNE, Y. (1995). Intense vortical structures in grid-generated turbulence. *Phys. Fluids*. v.7, p.2008-13.