

Uso da técnica de velocimetria por imagem de partículas na determinação de campos de velocidade em escoamentos turbulentos desenvolvidos em laboratório

Leonardo Barra Santana de Souza

Escola de Engenharia Civil -
Universidade Federal de Goiás.
Endereço: Praça Universitária,
s/n., Setor Universitário. CEP -
74605-220. Goiânia - GO.
leobarra@eec.ufg.br

Johannes Gérson Janzen

Departamento de Engenharia
Ambiental - Fundação
Universidade Federal de
Rondônia.
johannes.janzen@unir.br.

Harry Edmar Schulz

Departamento de Hidráulica e
Saneamento - Escola de
Engenharia de São Carlos -
Universidade de São Paulo.
heschulz@sc.usp.br

Swami Marcondes Villela

Departamento de Hidráulica e
Saneamento - Escola de
Engenharia de São Carlos -
Universidade de São Paulo.
swami@sc.usp.br

Resumo

Este trabalho expõe o uso de velocimetria a laser no estudo de detalhes do fenômeno da turbulência e na obtenção de padrões do escoamento de fluidos. A descrição dessa técnica não intrusiva é feita a partir de sua aplicação em duas pesquisas desenvolvidas: a turbulência gerada por grades oscilantes e o assoreamento de um modelo físico de reservatório. No tanque de grades oscilantes, a velocimetria possibilitou a observação e a quantificação de características importantes da turbulência. No reservatório, a técnica auxiliou na comparação dos dados de assoreamento com sua simulação feita em um modelo computacional. A concordância dos resultados apontou para as vantagens do uso de procedimentos numéricos para estudo e estimativa de assoreamento em reservatórios. Tanto na pesquisa acadêmica de turbulência, como na pesquisa aplicada de sedimentação, ambas desenvolvidas em laboratório, a velocimetria a laser mostrou-se uma ferramenta essencial.

Palavras-chave: *Velocimetria a laser. Velocimetria por imagem de partícula. Grades oscilantes. Sedimentação.*

Abstract

This work presents the use of laser velocimetry to obtain turbulence details and fluid flow characteristics, through the description of two studies in which this technique has been used: generation of turbulence by oscillating grids and sediment settling in a reduced physical model of a reservoir. In the first study, the laser velocimetry was used for observation and measurement of the generated turbulence. For the reservoir, it aided as a tool for the comparison between the sediment settling data and the predictions obtained with a numerical model, which demonstrated the advantages of using numerical procedures to predict settling. In both studies, developed in laboratory, the results showed the adequacy of such technique.

Keywords: Laser velocimetry. Particle image velocimetry. Oscillating grids. Sediment settling.

1 Introdução

A observação dos padrões dos escoamentos é fundamental para o estudo dos fenômenos que envolvem fluidos e para sua correta aplicação. Na dispersão de poluentes, por exemplo, o escoamento médio é responsável pela convecção ou transporte desse poluente, enquanto sua difusão é determinada pela intensidade turbulenta do meio, relacionada à flutuação da velocidade em torno da média. Os reatores de tratamento de esgoto, por sua vez, têm sua geometria desenvolvida para que todo o efluente permaneça o mesmo período de tempo em seu interior, a fim de ser igualmente tratado. O mesmo ocorre com as lagoas de estabilização, cujo tempo de detenção é função do padrão do escoamento em seu interior e, por isso, deve-se evitar que haja caminhos preferenciais do fluido e suas porções sejam tratadas de forma desigual.

Para observar padrões de escoamento em estudos de laboratório, geralmente com modelos reduzidos ou plantas-piloto, a Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV - *Particle Image Velocimetry*) se destaca por ser uma técnica não intrusiva e que permite a obtenção simultânea de velocidades em diferentes pontos do meio fluido, situados em uma área delimitada pelo plano de luz laser utilizado nessa técnica.

Neste estudo são descritos os procedimentos seguidos para obter campos instantâneos de velocidade em dois equipamentos distintos construídos no Laboratório de Hidráulica Ambiental - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. O primeiro deles, um tanque de grades oscilantes, tem por finalidade estudar a turbulência isotrópica e suas características, como o decaimento espacial a partir do seu ponto de geração e a dependência de diferentes fenômenos relevantes na área ambiental para com a turbulência. Exemplos

desses fenômenos são: a mistura de fluidos de diferentes densidades (THOMPSON; TURNER, 1975; HOPFINGER; TOLY, 1976), transferência de gases entre o ar e a água (BRUMLEY; JIRKA, 1987; CHU; JIRKA, 1992; JANZEN; SCHULZ; JIRKA, 2006), dispersão de poluentes (BRUNK *et al.*, 1996), suspensão de sedimentos (MEDINA; SANCHEZ; REDONDO, 2001) e coagulação (BRUNK; KOCH; LION, 1998). O segundo equipamento é um reservatório de acrílico que permite simular, por exemplo, reservatórios de barragem, possuindo dois canais afluentes e um vertedor variável. Os estudos neste tipo de equipamento envolvem transporte de sedimentos (GESSLER, 1999), estimativa do tempo de assoreamento (SLOFF; JAGERS; KITAMURA, 2004), dispersão de poluentes, correntes de densidade e escoamento estratificado em reservatórios (BARBOSA, 1998; SILVA, 2002).

1.1 Tanque de grades oscilantes

A construção de um tanque de grades oscilantes para geração de turbulência com intensidade controlável, no trabalho de Souza (2005), representou o início de uma série de pesquisas para o estudo da turbulência e sua relação com mistura e trocas gasosas entre ar e água, através de experimentos com grades.

Os trabalhos seguintes, de Janzen (2003), Pereira (2006) e Janzen (2006), conduziram à implantação de equipamentos periféricos que permitiram realizar estudos com uma e duas grades oscilantes, gerando dados experimentais e soluções analíticas para escoamentos turbulentos. Tanques de grades oscilantes geralmente possuem uma grade (usualmente de seção quadrada) de malha M (distância entre o centro de duas barras consecutivas), imersa em um fluido em repouso, oscilada com amplitude S e frequência f , gerando turbulência estacionária “quase” isotrópica distante de 1 a 3 malhas da grade. A razão entre a intensidade turbulenta vertical e a horizontal situa-se entre 1 e 1,3; e escoamentos internos possuem velocidade média aproximadamente nula.

A Fig.1 mostra o projeto e o tanque sendo utilizado neste estudo, feito de acrílico, com seção transversal quadrada de 50,0cm x 50,0cm e altura de 115,0cm. A grade teve M igual a 5,10cm, que corresponde a uma solidez de 32% (razão entre a área horizontal das barras da grade e a área total da superfície do tanque). A grade foi posicionada a 55,0cm do fundo do tanque. O sistema de oscilação da grade permite que se utilizem frequências de oscilação da grade até 10,0Hz e amplitudes de oscilação da grade entre 0,5cm e 10,0cm. Mais detalhes do equipamento são encontrados em Souza (2002), Janzen (2003) e Pereira (2006).



Figura 1: À esquerda: vista geral do tanque em seu desenho de projeto 3D. Duas placas de acrílico externas foram removidas, para visualização da grade no interior do tanque. À direita: equipamento construído e em utilização.

1.2 Modelo físico de reservatório formado por barragem

Os sedimentos transportados por cursos de água causam danos quando depositados nos reservatórios, como a redução do seu volume de água, prejuízos à navegação, danificação de turbinas e bloqueio de tomadas de água e comportas. Para que medidas preventivas possam ser tomadas, através de políticas públicas ou ações de engenharia, a capacidade de prever taxas de sedimentação e sua distribuição em reservatórios é muito importante desde a fase de projeto. Para o estudo de transporte de sedimentos e assoreamento, o presente modelo físico de reservatório foi desenvolvido com base na estrutura construída nos trabalhos de Barbosa (1998) e Silva (2002), focados em dispersão de poluentes e escoamento estratificado em reservatórios.

O conhecimento do escoamento no interior do reservatório é fundamental para o entendimento do processo de assoreamento. As partículas de areia são transportadas pelo fluido segundo fenômenos de advecção e dispersão (ou convecção e difusão), portanto dependentes das propriedades do escoamento, como velocidade

média e intensidade turbulenta.

O modelo físico de reservatório possui paredes e fundo em acrílico, de forma que a deposição dos sedimentos pôde ser registrada através de fotografias obtidas de diferentes ângulos. O abastecimento de água foi feito neste trabalho por um dos dois canais prismáticos de alimentação, também construídos em acrílico, de seção retangular com 0,15m de largura, 0,25m de altura e 2m de comprimento. O sistema de alimentação de areia (material usado no assoreamento) possui um reservatório elevado e um sistema de transporte com ar comprimido até os canais; e permitiu realizar os experimentos com descarga constante. As dimensões do reservatório são 1,5m de largura por 3,00m de comprimento; e uma vista geral é apresentada na Fig.1, juntamente com o detalhe do sistema de alimentação de areia.

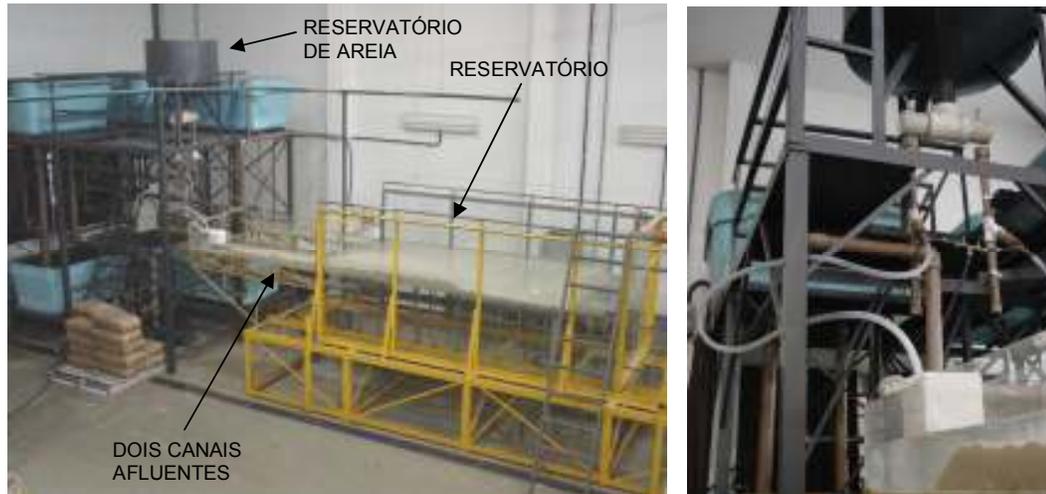


Figura 2: À esquerda: vista geral do reservatório, desenvolvido com base na estrutura construída nos trabalhos de Barbosa (1998) e Silva (2002). À direita: o sistema de abastecimento de sedimento.

Para registrar o padrão de escoamento no reservatório, obtiveram-se campos de velocidade instantânea e média em regiões pré-definidas do reservatório, com uso de velocimetria a laser, para o escoamento apenas de água, ainda sem a adição de areia. Esses campos de velocidade permitiram: 1) que se fizesse um estudo da relação entre o escoamento e o início do assoreamento; 2) que se validassem os campos de velocidade da simulação numérica hidrodinâmica com aqueles medidos experimentalmente, passo importante para efetuar a simulação do assoreamento.

2 Metodologia

As medidas de velocidade foram realizadas com técnica DPIV (*Digital Particle Image Velocimetry*), utilizando luz laser e uma câmara digital para registrar as posições sucessivas de partículas na água. Através de um programa computacional, as informações das posições sucessivas e dos tempos envolvidos foram convertidas nos campos de velocidade utilizados nas análises. O posicionamento da câmara digital e da folha de luz laser foi efetuado utilizando um suporte adequadamente adaptado para os dois equipamentos (grade oscilante e reservatório).

No caso do tanque de grade oscilante, apenas as medidas de velocidade foram suficientes para estudar a turbulência gerada pelas grades. No caso do reservatório, também foi necessário registrar em fotografias a evolução dos depósitos de sedimento, efetuando medidas das alturas depositadas.

2.1 Técnica de velocimetria a laser

O equipamento laser DPIV e a metodologia usada para obtenção dos campos de velocidade nos dois trabalhos são descritos a seguir:

Fonte Laser

Dispõe-se de um laser Oxford, modelo LS20, a vapor de cobre, responsável pela produção do plano de luz inserido no meio fluido para obtenção dos campos de velocidade. Sua potência média, de 20W a 10kHz, é suficiente para dispensar a adição de partículas traçadoras, pois as partículas de impurezas em suspensão na água, iluminadas pela luz do laser, já possibilitam boa visualização do escoamento do fluido. Os comprimentos de onda de emissão de luz são de 510,6 nanômetros (nm) (luz verde) e 578,2nm (luz amarela). A luz produzida pelo equipamento é concentrada em fibra ótica e levada ao ponto de utilização, onde é convertida em plano (ou

folha) de luz de espessura média de 3mm por um conjunto de lentes esféricas, côncavas e convexas (Fig.3).



Figura 3: Luz gerada pelo equipamento laser. Conjunto de lentes posicionado ao lado do reservatório, inserindo o plano de luz no escoamento através de uma parede lateral.

Câmera CCD

Essa câmera fotográfica digital (Kodak Megaplug modelo ES 1.0) captura, em escala de cinza, as imagens do plano de fluido iluminado pelo laser. O controle de obtenção de imagens é feito via comunicação serial com um microcomputador. A frequência de captação de imagens durante os experimentos foi de 30 exposições por segundo, para o tanque e para o reservatório. Na Fig.4, mostra-se o plano de luz do laser iluminando o escoamento de água no reservatório e a câmera instalada perpendicularmente a esse plano, sob o fundo em acrílico do reservatório. Uma base móvel posiciona a câmera sob a região a ser analisada.

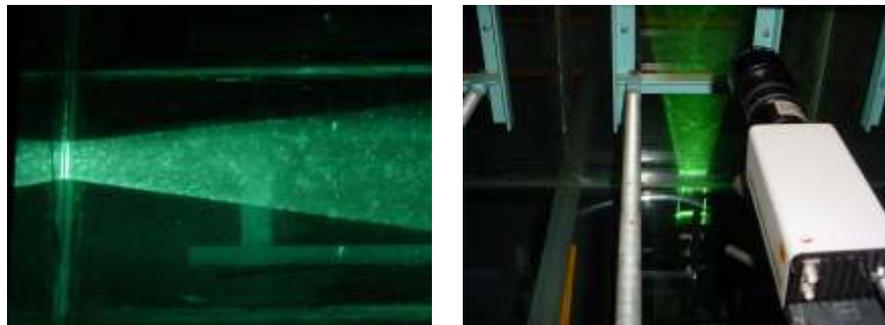


Figura 4: Plano de luz no escoamento do reservatório, iluminando as partículas em suspensão na água; e câmera digital posicionada sob o reservatório, para captura de imagens do escoamento.

Programa para processamento das imagens e obtenção dos campos de velocidade

As fotos capturadas pela câmera são armazenadas em sua memória e enviadas para o disco rígido do microcomputador. Nos presentes estudos, esse procedimento foi gerenciado pela versão 6.14 do programa Visiflow (AEA Technology). Através de técnica DPIV, o programa divide cada imagem em pequenas células e, dentro de cada célula, analisa o deslocamento das partículas iluminadas pelo laser para cada par de fotos consecutivas. A partir desse deslocamento e do intervalo de tempo entre as duas fotos, um tratamento estatístico das imagens (correlação cruzada) é feito e um vetor velocidade instantânea é obtido para cada célula. Com o conjunto de várias células, um campo de velocidade instantânea é então gerado para cada par de fotos. Com a frequência de obtenção de 30 imagens por segundo pela câmera, o intervalo de tempo entre duas fotos consecutivas é de 1/30s. Esse intervalo, para as velocidades dos escoamentos analisados, mostrou-se suficiente para que um número significativo de partículas se mantivesse na mesma célula, nas duas fotos, gerando vetores velocidade corretos.

Um exemplo de seqüência de 3 fotos e 2 campos gerados é apresentado na Fig.5. As fotos registram imagens de uma região quadrada do escoamento no reservatório, de 15cm de lado. A escala de cores refere-se à componente dos vetores velocidade na direção longitudinal do reservatório (direção horizontal nas figuras), em m/s. Uma partícula é acompanhada e localizada pelas setas, como exemplo; e os campos gerados são, consecutivamente, referentes aos pares de fotos 1-2 e 2-3.

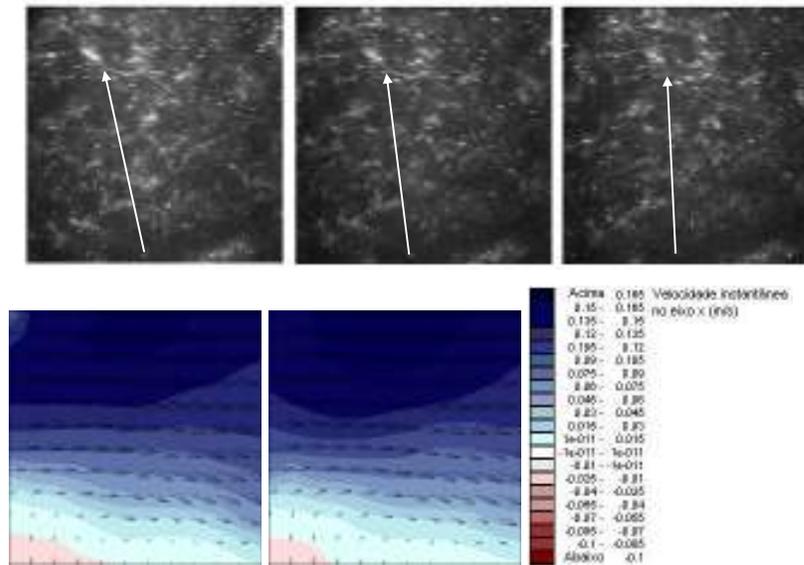


Figura 5: Sequência de fotos de uma região do escoamento, com acompanhamento de uma partícula. Campos de velocidade instantânea, obtidos a partir da análise das imagens do escoamento; e escala de cores dos campos referente à componente da velocidade na direção longitudinal do reservatório.

2.2 Tanque de grades oscilantes

Nesse caso, uma grade de 9x9 barras foi usada na agitação do fluido, com uma amplitude de oscilação de 3cm, para 4 diferentes frequências de oscilação. Adquiriu-se 9600 imagens do fluido, em 6 regiões do tanque, para a obtenção dos campos de velocidade turbulenta. Além do programa Visiflow, um código computacional auxiliar também foi desenvolvido neste trabalho. O procedimento experimental constituiu-se das seguintes etapas:

Localização das regiões de estudo no tanque

Dois planos verticais e paralelos, cada um com 10cm de base e 30cm de altura, compreenderam as duas regiões estudadas. O primeiro plano (Plano 1) foi localizado sobre a barra central da grade. O segundo, denominado Plano 2, foi situado entre as duas barras mais centrais da grade. As fotos correspondiam a imagens de 10cm x 10cm (para se ter boa resolução). Assim, os planos 1 e 2 foram divididos em três subplanos, relativos a três posições da câmara: Pos 1, Pos 2 e Pos 3 para o Plano 1 e Pos 4, Pos 5 e Pos 6 para o Plano 2. Na Fig.6, ilustra-se os Planos 1 e 2; e a obtenção das imagens nesses planos de luz pela câmera.

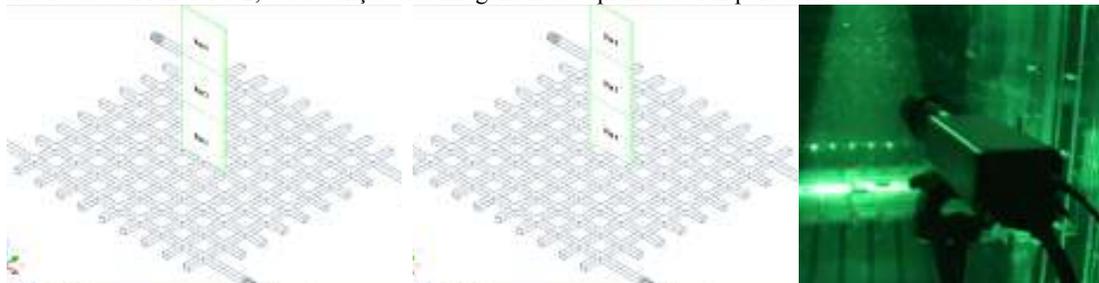


Figura 6: Plano 1 à esquerda, representando a região de análise dos campos de velocidade sobre a barra central da grade; e Plano 2, região entre barras. À direita: câmera digital, em posição perpendicular aos planos, capturando as imagens do escoamento

Frequência e da amplitude de oscilação da grade

Todos os experimentos foram realizados com amplitude de oscilação de 3cm. As frequências de oscilação da grade foram 1, 2, 3 e 4Hz. Para estabelecer um regime estacionário para a turbulência, a grade era oscilada durante 10 minutos antes de se obter as imagens. O mesmo tempo de 10min foi empregado no trabalho de De Silva e Fernando (1994), e as frequências de oscilação foram as mesmas recentemente estudadas por Cheng e Law (2001), porém com amplitude de 4cm.

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. Para cada situação, foram obtidas 400 fotos, em grupos de 16, respeitando a capacidade de armazenamento da câmera digital. O intervalo de tempo entre duas fotos consecutivas de um mesmo grupo era de 0,033s. Após a obtenção de cada grupo de 16 fotos, as mesmas eram transferidas para o disco rígido do computador, esvaziando a memória da câmera, para obtenção de novas fotos. Levou-se, em média, 6 minutos para obtenção das 400 fotos de cada situação, o que perfaz um intervalo médio de 14,4s para a transferência de imagens entre memórias.

Cada campo de velocidade calculado, dos 4800 obtidos, era formado por uma malha de 29 x 29 vetores de velocidade. Esse campo era disponibilizado em duas formas: gráfica e em planilha do programa *Excel*, com posição, magnitude e ângulo de inclinação de cada vetor.

Cada vetor instantâneo foi decomposto nos eixos x e z (eixos do plano de luz). Para este cálculo criou-se um programa computacional auxiliar capaz de decompor os 4.036.800 vetores gerados (4800 campos de 9600 fotos), que também otimizou a obtenção dos campos de velocidade.

Subtraiu-se, de cada vetor instantâneo, o valor da média temporal obtida para sua posição na malha de 29 x 29 vetores. Desta forma, para cada situação, foram obtidos 200 campos de u' e 200 campos de w' . Extraiu-se a raiz quadrada da média dos quadrados de u' e w' , isto é, $\sqrt{u'^2}$ e $\sqrt{w'^2}$. Foram obtidos um campo de u' e um campo de w' para cada situação de posição e frequência ensaiadas.

Cálculo das tensões médias de Reynolds e caracterização da turbulência gerada

O procedimento de cálculo para as tensões de Reynolds foi similar ao procedimento acima até se obter as flutuações instantâneas u' e w' . A partir de então, foi feita a média do produto destas flutuações, obtendo-se as Tensões de Reynolds ($\overline{u' \cdot w'}$). Com base em gráficos gerados para u , w , e $\overline{u' \cdot w'}$, analisou-se a ocorrência, no interior do tanque, de duas propriedades da turbulência isotrópica: $u' = w'$ e $\overline{u' \cdot w'} = 0$. A turbulência é um fenômeno tridimensional, mas em tanques de grade oscilante ela é considerada homogênea nos planos horizontais. Assim, os cálculos foram realizados em duas dimensões, coincidentes com o plano de luz laser.

2.3 Modelo físico de reservatório formado por barragem

Este estudo envolveu uma etapa experimental e uma etapa de simulação numérica, da hidrodinâmica e do transporte de sedimentos, com uso do programa computacional Mike21C (*DHI Software and Environment*). A etapa experimental compreendeu: o projeto e a construção do reservatório; o conhecimento do padrão do escoamento de água no interior do reservatório, através da técnica PIV; e seu assoreamento. A etapa de simulação numérica compreendeu a adequação de modelos de transporte de sedimentos contidos no programa computacional para a obtenção do escoamento e do assoreamento.

Campos de velocidade no reservatório

Durante o assoreamento de um reservatório, o padrão do escoamento em seu interior pode variar consideravelmente. A deposição de areia faz com que a seção do escoamento diminua e a velocidade do fluido aumente. Assim, elevam-se também as tensões de cisalhamento junto ao fundo, o número de Reynolds local e a capacidade de transporte de sedimentos. Com o aumento das tensões, a resistência ao escoamento é elevada e o fluido pode então seguir outro caminho, que apresente menor resistência. Esse processo dinâmico deve ser conhecido para o estudo do assoreamento.

A técnica de velocimetria a laser não se aplica, evidentemente, enquanto há partículas assoreando. As imagens são obtidas, como detalhado posteriormente, com a câmera CCD instalada sob o fundo do reservatório, e a deposição de areia impede que as imagens do escoamento sejam registradas. Assim, obtiveram-se campos de velocidade instantânea e média em várias regiões do reservatório para escoamento apenas de água, sem a adição de areia. Esses campos permitiram o estudo da relação entre o escoamento e o início do assoreamento, enquanto as condições de contorno não se alteraram de forma significativa. Adicionalmente, os campos de velocidade experimental são úteis na validação do campo de velocidade da simulação numérica sem sedimento, fundamental para o início da simulação posterior, do próprio assoreamento no reservatório.

As regiões que foram analisadas experimentalmente foram escolhidas para obter uma visão ampla do padrão do escoamento no reservatório. Cada região, um plano de forma quadrada e lado igual a 15cm, foi posicionada horizontalmente a 6cm do fundo do reservatório. Com a altura da superfície da água no reservatório variando entre 11,5cm e 12,5cm (em toda a área do reservatório), o plano estava localizado a aproximadamente 50% da altura do escoamento. O campo de velocidade obtido em cada região, provavelmente, não corresponde exatamente ao campo médio do perfil vertical de velocidade, mas possui a mesma ordem de grandeza e fornece, em conjunto com as outras regiões, uma boa representação do padrão do escoamento. Na Fig.7, as regiões analisadas estão ilustradas e enumeradas no interior do reservatório. A unidade das cotas é o centímetro.

Foram definidas 15 regiões de medição para cada uma das duas configurações experimentadas. Na primeira (Configuração 1) definiu-se a vazão de 0,002m³/s no canal 1, e o canal 2 foi fechado (não utilizado). Para a Configuração 2, usou-se vazão de 0,002 m³/s em ambos os canais.

Para cada configuração, obtiveram-se 315 imagens em cada região para geração dos campos de velocidade instantânea. Um total de 9450 imagens do escoamento foram capturadas e analisadas. No presente estudo, apenas os resultados da Configuração 1 são apresentados e discutidos. Os campos de velocidade média foram calculados através da média temporal de 314 campos de velocidade instantânea para cada região.

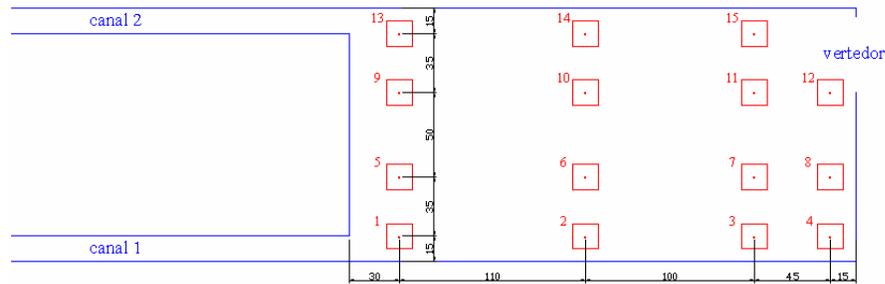


Figura 7: Localização das regiões no reservatório, nas quais os campos de velocidade foram obtidos.

3 Resultados e discussão

3.1 Tanque de grades oscilantes

Na Fig 8 apresenta-se, respectivamente para 1Hz e 2Hz, exemplos de campos instantâneos de velocidade para a sub-seção POS1 do Plano 1. Observa-se o aumento da magnitude dos vetores com o aumento da frequência de oscilação da grade. Aumento similar foi observado elevando a frequência para 3Hz e 4Hz. Nas figuras, os campos estão apresentados no ambiente do Visiflow, onde foram gerados.

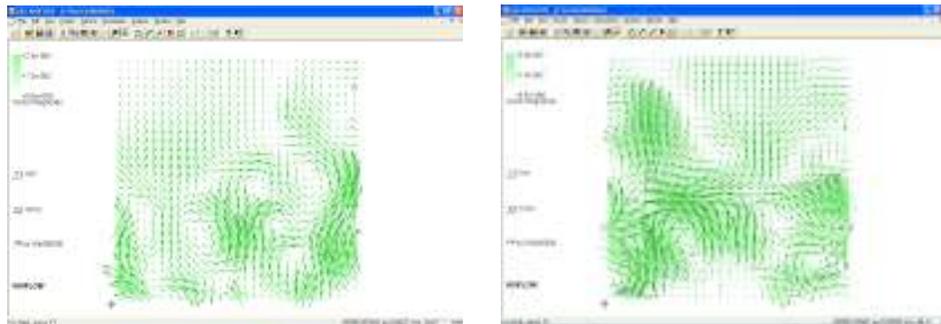


Figura 8: Campos instantâneos de velocidade, para a POS 1 e frequências de 1 Hz e 2 Hz, respectivamente.

Os maiores vetores na parte inferior dos campos implica em maior intensidade turbulenta nesta região, que está mais próxima da grade geradora da turbulência.

As diferentes direções dos vetores nos dois campos mostram as diferentes trajetórias das partículas do fluido, evidenciando o movimento turbulento. Esta alteração de direções foi observada em toda a seqüência dos 200 campos instantâneos (400 fotos), de qualquer das 24 situações (combinações de frequência e posição) estudadas.

Campos médios de velocidade

O tanque de grade oscilante é considerado um equipamento que gera turbulência sem produzir escoamento médio do fluido. Assim, a magnitude teórica dos vetores dos campos médios ($\sqrt{\overline{U}^2 + \overline{W}^2}$) é zero. Experimentalmente, portanto, este valor deveria se aproximar de zero. Neste estudo, apesar dos campos médios mostrarem vetores com magnitude consideravelmente inferior àqueles dos campos instantâneos, observa-se que, em algumas regiões, a velocidade média se distanciou de zero. A Fig.9 mostra os vetores nos campos médios para frequências de 1Hz e 2Hz. Experimentos com maior número de campos de velocidade instantânea e um estudo sobre a ocorrência de escoamentos secundários como característica comum em tanques de grades oscilantes são vistos em Pereira (2006), estudo realizado neste mesmo equipamento. Também se verifica, na Fig.9, maior magnitude dos vetores do campo médio à medida que se aumenta a frequência de oscilação da grade de 1Hz para 2Hz. O mesmo acontece aumentando a frequência para 3Hz e 4Hz. Este fato permite inferir que os escoamentos médios dependem das condições de agitação e que há necessidade de estabelecer

corretamente as condições ideais para uso das grades oscilantes e para os cálculos dos campos médios nesses escoamentos turbulentos, ainda não presentes na literatura.

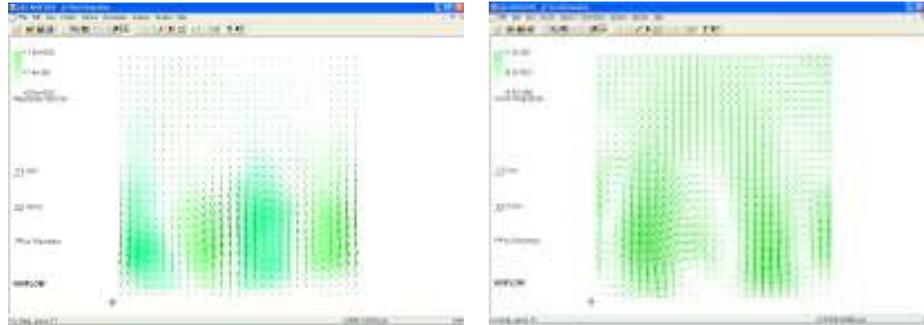


Figura 9: Campos médios de velocidade para frequências de 1 Hz e 2Hz, respectivamente.

Decaimento espacial da turbulência

Os gráficos apresentados na Fig.10 mostram a evolução da intensidade turbulenta $i = \sqrt{u'^2 + v'^2}$, ao longo do eixo z (dimensão vertical no tanque) para as 24 situações de posição da câmera e frequência de oscilação da grade. A intensidade turbulenta do gráfico à esquerda corresponde àquela gerada no Plano 1 (posições POS 1, POS 2 e POS 3 unidas e frequências 1, 2, 3 e 4Hz). O gráfico à direita refere-se ao Plano 2.

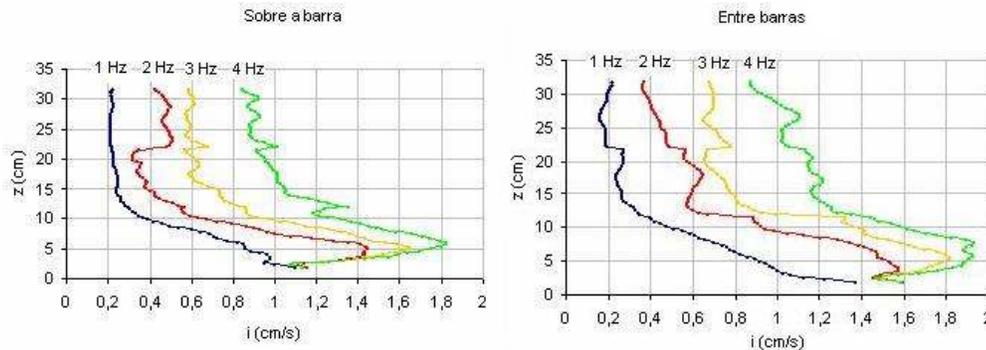


Figura 10: Decaimento espacial da turbulência, nas regiões do Plano 1 (sobre a barra) e do Plano 2 (entre barras), respectivamente.

As seguintes características da turbulência podem ser descritas: 1) a intensidade turbulenta e seu decaimento espacial foram semelhantes para os dois planos estudados (Plano 1 e Plano 2); 2) existe uma região de geração de turbulência junto à grade oscilante (parte inferior dos gráficos); 3) essa geração é visível para 2 Hz, 3 Hz e 4Hz e ocorre até uma distância z de 5cm a 7cm a partir do centro de oscilação da grade, quando é ultrapassado o pico da intensidade turbulenta. 4) a partir do pico há decaimento da turbulência e os mecanismos preponderantes são a difusão e a dissipação da energia cinética turbulenta. Essas características são relevantes para estabelecer o equacionamento a adotar para prever o transporte de propriedades neste tipo de equipamento. A geração de turbulência mostra-se relevante em uma parcela substancial do volume fluido, que deve ser considerada nas previsões.

Experimentos neste equipamento, utilizados para comparar adequadamente a série de dados obtidos com previsões teóricas, são descritos em Janzen (2003).

3.2 Reservatório formado por barragem

Os resultados dos experimentos e simulação do escoamento para um canal afluyente (Configuração 1), com vazão constante de 2L/s, são apresentados e discutidos. Nessa configuração, as 315 imagens do escoamento obtidas para cada uma das 15 regiões estudadas geraram 314 campos de velocidade instantânea. As seqüências animadas das imagens e dos respectivos campos (como exemplifica a Fig.4) constam de vídeos em gravação digital, em Souza (2006). Os 9420 arquivos com dados de velocidade instantânea (314 campos x 15 regiões x 2 configurações) foram reformatados para a animação das imagens através de um programa auxiliar em linguagem FORTRAN, criado para este estudo, e do uso de programas computacionais específicos para edição de vídeos.

Os campos das regiões escolhidas permitem a análise do campo médio em todo o reservatório, viabilizando a calibração da simulação numérica hidrodinâmica, realizada para a Configuração 1 do escoamento e que antecede a simulação do assoreamento. A Fig.11 mostra um esquema dos campos medidos em cada região, ficando evidente o padrão médio do escoamento no reservatório, ou seja, uma grande célula de recirculação, de fato observada.

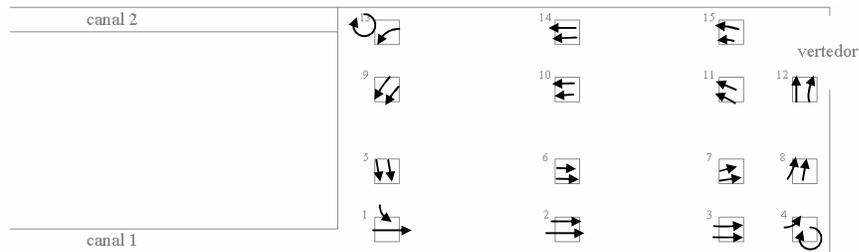


Figura 11: Padrão do escoamento médio no reservatório, para a Configuração 1.

Vê-se que o caminho preferencial do fluido não segue a menor distância entre o canal de alimentação 1 e o vertedor, para a vazão experimental. Seu caminho passa pelas regiões 1, 2, 3, 8 e 12. Próximas às regiões 4 e 13 formam-se duas pequenas áreas de recirculação, consequência do vértice formado pelas paredes. Como já mencionado, observa-se que as outras regiões evidenciam uma zona de recirculação ou vórtice com escala de comprimento cuja ordem de grandeza acompanha a geometria do reservatório.

Validação da simulação numérica

A simulação hidrodinâmica partiu do fluido em repouso até atingir o regime estacionário para a turbulência. Nota-se que neste regime há variação de velocidade, representada pela flutuação da velocidade instantânea. Assim, o regime estacionário representa a constância das propriedades médias, ou, em outras palavras, o escoamento médio no reservatório é permanente. O modelo de turbulência adotado nos procedimentos numéricos foi o de Smagorinsky. A Fig.12 mostra um instante da simulação da Configuração 1. À esquerda, um campo instantâneo e à direita o campo médio para quinze minutos de escoamento (regime estacionário). O escoamento médio foi obtido com a média dos campos numéricos instantâneos, através de trabalho de programação. As regiões analisadas em laboratório são sobrepostas ao escoamento médio para que experimento e simulação possam ser comparados.

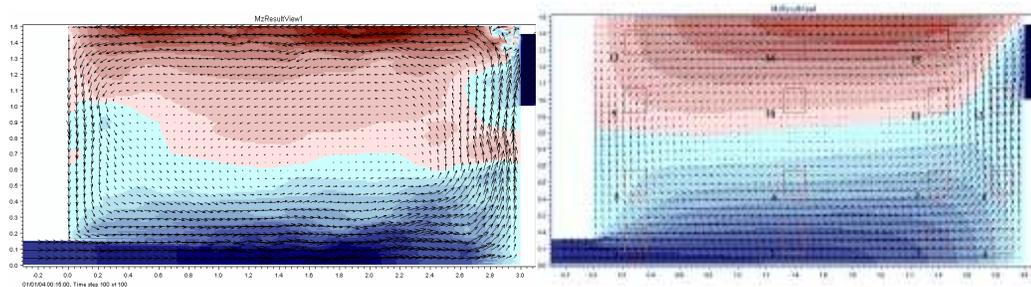


Figura 12: Instante da simulação computacional para a Configuração 1 (à esquerda), referente a 15min de escoamento; e o padrão médio do escoamento, à direita.

Nota-se a grande semelhança entre simulação e resultados experimentais (Fig.11 e Fig.12). A simulação reproduziu a grande zona de recirculação e o fluido segue o caminho preferencial que passa pelas regiões 1, 2, 3, 8 e 12.

Avaliada e validada a simulação hidrodinâmica, realizou-se a simulação do assoreamento do reservatório. A equação usual de advecção e difusão de massa foi utilizada, tendo-se ainda selecionado as fórmulas de Engelund-Fredsoe (dentre as disponíveis no programa Mike21C) para transporte de sedimentos de fundo e em suspensão. A visualização tridimensional do assoreamento foi criada utilizando programa gráfico apropriado, para melhor observação e comparação com o resultado final do assoreamento, após 72 horas de experimento (Fig.13).

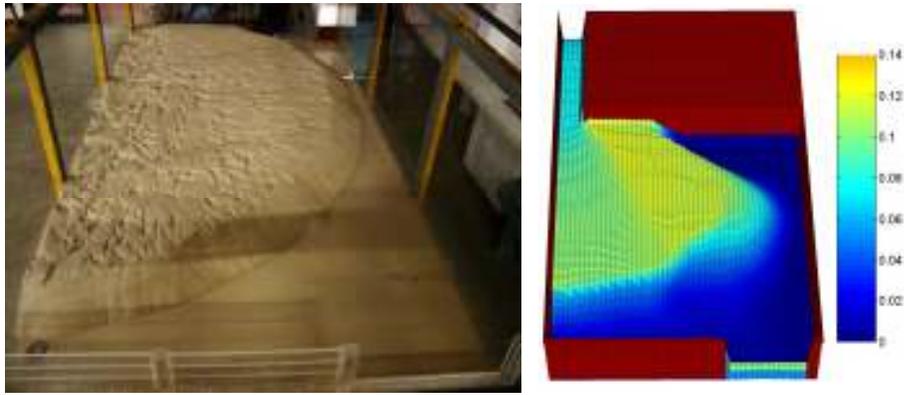


Figura 13: Vista superior do assoreamento, real e simulado, com 72h. A escala de cores refere-se à elevação do fundo, na simulação.

A semelhança obtida entre resultados experimentais e simulados, tanto para o padrão do escoamento no interior do reservatório quanto para a deposição de sedimentos, permitiu avaliar o uso de ferramentas numéricas como adequado na estimativa do assoreamento de reservatórios, o que representa um ponto altamente positivo em uma realidade como a brasileira, que baseia sua matriz energética em reservatórios, mas que não realiza estudos regulares de assoreamento. Detalhes do trabalho experimental e de simulação numérica do assoreamento são encontrados em Souza, Villela e Schulz (2006).

4 Conclusões

Neste trabalho apresentou-se a utilidade da metodologia de velocimetria por imagem de partículas, que viabilizou o estudo dos detalhes da turbulência em um tanque de agitação hidrodinâmica por grade oscilante, e do escoamento de água em um modelo físico de assoreamento de reservatório. Tanto no estudo acadêmico, que procura desvendar as particularidades dos escoamentos turbulentos, como no estudo aplicado de sedimentação, que pode ser utilizado tanto em reservatórios de usos múltiplos, como em bacias de decantação mais vinculadas ao saneamento, a velocimetria a laser mostrou-se uma ferramenta essencial.

Para o tanque com grades oscilantes, a observação e a análise das imagens, vídeos e gráficos criados a partir dos campos evidenciaram os seguintes aspectos do campo turbulento: 1) os campos médios de velocidade mostraram velocidades bem inferiores aos campos instantâneos, mas ainda indicando a existência de escoamento médio do fluido; 2) a intensidade turbulenta mostrou um pico, evidenciando que nas regiões mais próximas à grade há produção de energia cinética turbulenta; 3) a intensidade turbulenta produzida é diretamente relacionada com a frequência de oscilação da grade; 4) a partir do pico há decaimento da turbulência e os mecanismos preponderantes são a difusão e a dissipação da energia cinética turbulenta; 5) essas características devem ser levadas em conta na geração de modelos para descrever a turbulência produzida por grades oscilantes.

Para o modelo físico do reservatório, o trabalho realizado mostrou que o padrão geral do escoamento pode ser bem representado medindo-se campos de velocidade em regiões adequadamente escolhidas. Adicionalmente, efetuou-se um processo de assoreamento por 72 horas, gerando um depósito que foi muito bem representado pela simulação numérica efetuada, esta última utilizando um código computacional comercial e um auxiliar. Os resultados apontam para a conveniência desse tipo de simulação, um ponto altamente positivo em um país que possui reservatórios de geração de energia cuja manutenção é, evidentemente, estratégica.

Os autores frisam que não têm interesses particulares na divulgação de eventuais equipamentos aqui descritos, nem vínculo comercial ou de qualquer natureza com empresas que os produzem e distribuem.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FINEP e FAPESP pelo financiamento das pesquisas realizadas no Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC/USP, ao CNPq e à CAPES pelas bolsas de pós-graduação dos primeiro e segundo autores, e pelo processo CAPES 2201/06-2.

Referências

- BARBOSA, A. A. *Correntes de densidade em reservatórios*. 1998. 278 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento)-Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
- BRUMLEY, B.; JIRKA, G. Near-surface turbulence in a grid-stirred tank. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v.183, p. 235-263, 1987.
- BRUNK, B.; KOCH, D.; LION, L. Observations of coagulation in isotropic turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v. 371, p. 81-107, 1998.
- BRUNK, B. *et al.* Modeling natural hydrodynamic systems with a differential-turbulence column. *Journal of Hydraulic Engineering*, Reston, v. 122, p. 373-380, 1996.
- CHENG, N. S.; LAW, A. W. K. Measurement of turbulence generated by oscillating-grid. *Journal of Hydraulic Engineering*, Reston, v.127, n. 3, p. 201-208, 2001.
- CHU, C.; JIRKA, G. Turbulent gas flux measurements below the air-water interface of a grid-stirred tank. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Chicago, v. 35, p. 1957-1968, 1992.
- DE SILVA, I. P. D.; FERNANDO, H. J. S. Oscillating grids as a source of nearly isotropic turbulence. *Physics of Fluids*, Los Angeles, v. 6, p. 2455-2464, 1994.
- GESSLER, D. *et al.* Application of 3D mobile bed, hydrodynamic model. *Journal of Hydraulic Engineering*, Reston, v.125, n. 7, p. 737-749, July 1999.
- HOPFINGER, E.; TOLY, J.-A. Spatially decaying turbulence and its relation to mixing across density interfaces. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v. 78, p. 155-175, 1976.
- JANZEN, J. G. *Detalhamento das propriedades turbulentas em água agitada por grades oscilantes*. 2003. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento)-Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- JANZEN, J. G. *Fluxo de massa na interface ar-água em tanques de grades oscilantes e detalhes de escoamentos turbulentos isotrópicos*. 2006. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento)-Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- JANZEN, J. G.; SCHULZ, H.; JIRKA, G. Detalhes da transferência de gases na interface ar-água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 11, p.153-161, 2006.
- MEDINA, P.; SANCHEZ, M.; REDONDO, J. Grid stirred turbulence: applications to the initiation of sediment motion and lift-off studies. *Phys. Chem. Earth B.*, Aarhus, v. 26, n. 4, p. 299-304, 2001.
- PEREIRA, C. E. *Determinação das células de convecção induzidas em tanques agitados por grades oscilantes*. 2006. 250 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento)-Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- SILVA, S. V. *Características de escoamentos decorrentes de diferenças de densidades*. 2002. 284 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento)-Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- SLOFF, C. J.; JAGERS, H. R. A.; KITAMURA, Y. K. Study on the channel development in a wide reservoir. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLUVIAL HYDRAULICS, RIVER FLOW, 2., 2004, Napels. *Proceedings...* Napels: Local Organizing Committee, 2004. p. 811-819.
- SOUZA, L. B. S. *Estudo da estrutura turbulenta em escoamentos gerados por grades oscilantes*. 2002. 102p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento)-Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- SOUZA, L. B. S. *Estudo experimental e modelagem numérica do escoamento e do assoreamento em uma armadilha de sedimentos*. 2006. 110 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento)-Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SOUZA, L. B. S.; VILLELA, S. M.; SCHULZ, H. E. Simulação computacional do assoreamento em uma armadilha de sedimentos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 11, n. 4, p. 163-174, out./dez. 2006.

SOUZA, L. B. S. *et al.* Construção de uma armadilha de sedimentos em laboratório e análise do escoamento de água em seu interior com uso de velocimetria a laser. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa: ABRH, 2005. 1 CD-ROM.

THOMPSON, S. M.; TURNER, J. S. Mixing across an interface due to turbulence generated by an oscillating grid. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v. 67, n. 2, p. 349-368, 1975.

SOBRE OS AUTORES

Leonardo Barra Santana de Souza

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Uberlândia em 1998, M.Sc. Engenharia Civil (Hidráulica e Saneamento) pela Universidade de São Paulo em 2002, Dr. Engenharia Civil (Hidráulica e Saneamento) pela Universidade de São Paulo em 2006. Atualmente ocupa o posto de professor adjunto junto à Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, onde atua em nível de graduação e pós-graduação nas áreas de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Básica.

Johannes Gérson Janzen

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Mato Grosso do Sul em 2000, M.Sc. Engenharia Civil (Hidráulica e Saneamento) pela Universidade de São Paulo em 2003, Dr. Engenharia Civil (Hidráulica e Saneamento) pela Universidade de São Paulo em 2006. Atualmente ocupa o posto de professor adjunto junto ao Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Rondônia, onde atua em nível de graduação e pós-graduação (*Lato Sensu*) na área de Hidráulica Ambiental.

Harry Edmar Schulz

Engenheiro Civil pela Universidade Regional de Blumenau em 1983. Especialista em Ensino de Fenômenos de Transporte, pela Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo em 1985. M.Sc. Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo em 1985, Dr. Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo em 1990. Livre Docente em Fenômenos de Transporte pela Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo em 1997. Prof. Titular em Fenômenos de Transporte pela Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo em 2002. Pós-doutorados e Pesquisas no Exterior realizadas em 1992-1993, 1998-1999 (Universität Karlsruhe, Alemanha) e 2007-2008 (University of Minnesota, USA). Atualmente ocupa o posto de professor titular junto ao Departamento de Hidráulica e Saneamento Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo, onde atua em nível de graduação e pós-graduação, tendo orientado 25 teses de mestrado e doutorado. Consultor ad-hoc CNPq, CAPES, FAPESP, e de outras instituições que solicitam seu julgamento.

Swami Marcondes Villela

Engenheiro Civil pela Escola de Engenharia de São Carlos - USP em 1959. Professor Titular (desde 1974). Aposentado pelo Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP. Pesquisador visitante na University of Iowa - EUA em 1970-1971. Diretor da Escola de Engenharia de São Carlos em 1979-1983. Coordenador Técnico dos projetos básicos das estações elevatórias São Francisco - Projeto de Transposição das Águas do Rio São Francisco, em 1994. Atualmente ocupa o posto de diretor da SHS Consultoria e Projetos de Engenharia Ltda.