

## Teste de simulação numérica para assoreamento em reservatórios: caso da Represa Velha – SP

### *Test of numerical simulation for reservoirs sedimentation: the case of the Represa Velha reservoir - SP - Brazil.*

**Stênio de Sousa Venâncio**  
venancio@unifran.br  
Universidade de Franca

**Swami Marcondes Villela**  
swami@shs.com.br  
Universidade de São Paulo

**Leonardo Barra Santana de Souza**  
leobarra@eec.ufg.br  
Universidade Federal de Goiás

**Harry Edmar Schulz**  
heschulz@sc.usp.br  
Universidade de São Paulo

#### Resumo

Neste estudo testou-se um código numérico para reproduzir o assoreamento observado em situação de campo, no reservatório Represa Velha, em Pirassununga, SP, visando avaliar seu desempenho. Usou-se o modelo MIKE 21C, que se baseia nas equações de Navier-Stokes 2D com integração na vertical para águas rasas e em equações empíricas, juntamente com a equação de advecção-difusão, para os sedimentos. O teste foi realizado utilizando parâmetros de ajuste obtidos em escala laboratorial em estudo precedente. Os resultados numéricos foram comparados com dados de campo, como vazão, concentração de sedimento e levantamentos batimétricos realizados em períodos secos e úmidos no reservatório. Os resultados mostram que os parâmetros responsáveis pela mistura no meio fluido necessitam a princípio de melhores avaliações.

**Palavras-chave:** Simulação numérica. Transporte de sedimento. Assoreamento de reservatório.

#### Abstract

In this study, a numerical code was tested to reproduce the sedimentation process measured in the Represa Velha reservoir, in Pirassununga-SP-Brazil. The MIKE 21C model was chosen, which is based on the Navier-Stokes equations simplified for shallow water flows, and on empirical formulations, together with the advection-dispersion equation, for sediment transport. The test was conducted using parameters obtained in laboratory investigations during previous studies. Numerical results were evaluated through comparison with field data, comprising water discharge, sediment concentration and bathymetry, during dry and wet periods. The results show that the parameters responsible for the water-sediment mixture still need better evaluation *a priori*.

**Keywords:** Numerical simulation. Sediment transport. Reservoir sedimentation.

## 1 Introdução

O assoreamento de reservatórios é um fenômeno natural que pode ser intensificado pela ação antrópica, podendo comprometer o bom funcionamento e a vida útil de sistemas de geração de energia, irrigação e navegação a eles vinculados, além de gerar problemas ambientais. O armazenamento de água em grandes reservatórios acompanha a humanidade desde o início de sua organização como sociedade. Um exemplo é a barragem de Sadd-el-Kaffara, construída no Egito por volta de 2600 a.C., com 14m de altura e 113m de comprimento na crista, que é a mais antiga de seu porte. (Smith, 1971; Schnitter, 1994). Reservatórios invariavelmente alargam a seção transversal do escoamento que represam, reduzindo a velocidade desse escoamento e favorecendo a deposição de sedimentos. Quantificar o depósito de sedimentos, quanto ao volume e localização no reservatório, é importante para avaliar a eficiência e a vida útil do mesmo.

No Brasil os reservatórios são comumente destinados a usos múltiplos (navegação, irrigação, abastecimento público, geração de energia elétrica). No tocante à energia elétrica, a parcela mínima de produção hidrelétrica no país é de 75,58%, se todas as fontes alternativas operarem concomitantemente. (ANEEL, 2008). Essa dependência da energia hidrelétrica, associada aos usos múltiplos dos reservatórios, impõe um controle adequado da vazão regularizada, sendo necessário

conhecer, portanto, o volume útil do sistema. Porém, é usual considerar apenas o volume útil de projeto, não levando em conta o volume assoreado ao longo do tempo, o qual pode atingir parcela substancial do volume de projeto (ou, em casos extremos, a sua totalidade. Ver Carvalho, 1994). O Brasil não tem tradição de acompanhamento e controle dos reservatórios nacionais, independente de seu volume ou condição estratégica para o país.

A dinâmica dos fluidos computacional surge como uma esperança nos estudos previsivos dos transportes de sedimentos em rios e reservatórios, permitindo analisar suas implicações econômicas. Também espera-se que permita o estudo do problema inverso, ou seja, indicar os dados de campo necessários para avaliar o assoreamento futuro com precisão adequada e a necessidade de métodos práticos para estabelecimento dos parâmetros relevantes às simulações. Alguns estudos que usaram códigos computacionais (numéricos) calibrados com dados de campo para prever assoreamento podem ser citados, como Ziegler e Nisbet (1995), para o reservatório Watts Bar (Tennessee, EUA); Molino, Greco e Rowan (2001), para o reservatório Abbeystead (Reino Unido); Dargahi (2004), para o rio Klaralven (Suécia); Chao et al. (2008), para o lago Deep Hollow (Mississipi, EUA); Kiat et al. (2008), para o rio Kulim (Malásia). Vale mencionar que os estudos existentes mostram erros de até 40% no cálculo do volume assoreado, o que indica a relevância de estudos continuados e de procedimentos adequados para realizar as simulações com confiabilidade. Menciona-se a seguir outros códigos de destaque e suas aplicações.

O programa FLUVIAL-12 foi aplicado por Chang et al. (1996), dentre outros trabalhos desses autores, para avaliar a viabilidade e eficiência de descargas de fundo em reservatórios ao longo do rio North Feather. Uma análise a respeito da acumulação de sedimentos nesses reservatórios apresentou um comprometimento futuro de geração de energia elétrica. O modelo tridimensional de escoamento e transporte de sedimentos CH3D-SED é descrito em Gessler et al. (1999), bem como sua aplicação no Projeto *Deep Draft Navigation*, no baixo Mississipi. A capacidade do programa em simular transporte de sedimentos (apenas areia) em canais de fundo móvel foi desenvolvida em conjunto pelo Laboratório de Hidráulica do *U.S. Army Corps of Engineers* e a *Waterways Experiment Station-Iowa Institute of Hydraulic Research*. O modelo tridimensional SIIMM (Olsen, 1999) foi usado na simulação do assoreamento em um modelo físico reduzido do reservatório *Kali Gandaki Hydropower Reservoir - Nepal*, na escala 1:50 e construído no *Norwegian Hydrotechnical Laboratory*. O estudo estimou que o volume de 0,4 milhões de metros cúbicos do reservatório seria preenchido completamente em curto período de tempo caso não ocorresse operações de descarga de fundo.

Destacam-se também o FAST3D, desenvolvido na Universidade de Karlsruhe e apresentado em Demuren (1991); HEC-6, do *U.S. Army Corps of Engineers*, aplicado a sistemas de múltiplos reservatórios em Nicklow e Mays (2000); e Delft3D, usado em Sloff et al. (2004), com aplicação ao reservatório Senbiri no rio Toshibetsu, Japão.

Estudos numéricos brasileiros em transporte de sedimentos e assoreamento são ainda incipientes, como ressaltado em Souza et al. (2006). Há exceções que merecem menção, como Terabe et al. (2006), que estudaram o reservatório de Fiú, em Londrina, PR. Uma das principais causas da escassez de estudos nacionais é a indisponibilidade de dados dos reservatórios nacionais para calibração e teste dos modelos numéricos.

Neste estudo foram utilizados os dados reunidos por Bufon (2006), que realizou um levantamento detalhado das vazões, descargas de sedimentos e batimetrias do reservatório Represa Velha, em Pirassunga, SP, de 1998 a 2001, viabilizando o estudo aqui conduzido de teste de simulação numérica.

## 2 Metodologia

### 2.1 Área de Estudo

O reservatório Represa Velha encontra-se em uma área localizada geograficamente entre 21°55'35''S e 47°22'00''W, e 21°57'30''S e 47°24'00''W, cerca de 575m acima do nível do mar, no município de Pirassununga, Estado de São Paulo. A área é estimada em 862 há com extensão aproximada de 4 Km, sendo cerca de 40% de propriedade da União desde 1938 (Silva, 1994), e faz parte da microbacia do córrego da Barrinha, pertencente à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRH) do Estado de São Paulo, do rio Mogi Guaçu (Fig. 1a). É parte integrante da região hidrográfica do Rio Paraná, a mais desenvolvida do país. A bacia hidrográfica é predominantemente rural, com atividades de agricultura, pecuária e extração de areia. O solo característico é areno-argiloso. O reservatório Represa Velha é ilustrado na Fig. 1b.

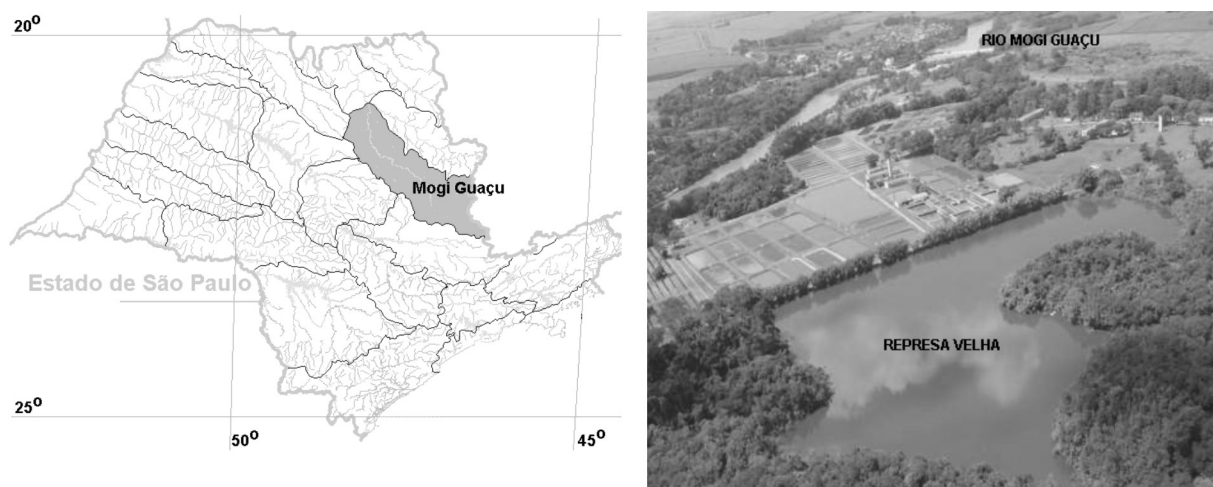


Figura 1:

- (a) Localização da área de estudo no contexto regional (UGRH do Mogi Guaçu, Estado de São Paulo). Fonte: BIOTA (2004).  
 (b) Vista aérea do reservatório Represa Velha, do CEPTA, e do rio Mogi Guaçu. Fonte: CEPTA (2009).

O reservatório pertence ao Centro de Pesquisa e Gestão de Recursos Pesqueiros Continentais, CEPTA/IBAMA. O abastecimento principal do reservatório se dá pelo córrego da Barrinha, com extensão 3.217 m da nascente até o reservatório. Segundo Kleerekoper (1944), o reservatório foi construído em 1939, composto por uma barragem de terra de 300 m de comprimento e 5,5 m de altura, cuja operação iniciou em fevereiro de 1940. Seu volume de água foi calculado em 41.589 m<sup>3</sup> em agosto de 1998 e 57217 m<sup>3</sup> em agosto de 1999. As profundidades variam entre 0,02 m e 4,79 m. A superfície livre tem área aproximada de 5 ha e o reservatório possui comporta de fundo que permite seu esvaziamento total, tendo ele sido esvaziado 7 (sete) vezes para a limpeza dos sedimentos assoreados (Bufon, 2006).

## 2.2 Dados de campo

Reproduzem-se aqui os dados de vazão, concentração de sedimentos orgânicos e inorgânicos em suspensão, descarga de sedimentos e batimetrias do reservatório obtidos por Bufon (2006), utilizados na calibração do código numérico e avaliação das simulações. As batimetrias foram realizadas nos anos de 1998, 1999, 2000 e 2001. A batimetria de 1998 foi usada como condição inicial da presente simulação numérica. Em termos de vazão, frisa-se que Bufon (2006) encontrou preferencialmente vazões na saída do reservatório superiores àquelas na entrada, tanto nos períodos secos como nos úmidos. Uma causa provável para essa diferença preferencial é o afloramento de água de lençol freático no interior da represa, porém com localização não reportada nos dados existentes sobre a mesma. No teste do código numérico considerou-se que o afloramento ocorre junto à seção de entrada do reservatório, fazendo com que a vazão em seu interior seja constante e igual ao valor de saída. Adicionalmente, em períodos chuvosos ou após eventos de chuva, o reservatório não atua em regime permanente. Em termos simples, a variação de volume pode ser expressa por:

$$Q_E - Q_S = A \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

A maior diferença entre as vazões de entrada e saída ocorreu em janeiro de 2001, com valor de 0,293 m<sup>3</sup>/s. Para a área de 5 hectares do reservatório, isso implica em uma variação instantânea de profundidade de apenas 2,1 cm/h (5,8.10<sup>-6</sup> m/s), compatível com as condições da bacia hidrográfica e do reservatório, permitindo admitir regime “quase permanente” neste primeiro teste. Em outros termos, o acúmulo observado com a diferença de vazões implica em pequena variação instantânea de profundidade. Para o teste do código numérico considerou-se regime permanente com o valor da maior vazão (entre entrada e saída) atuando sempre em todo o reservatório.

Os dados de concentração de sedimentos suspensos foram obtidos na entrada do reservatório e em mais 5 (cinco) pontos no seu interior. A Tab. 1 mostra as vazões na entrada e na saída da represa e os valores de concentração de sólidos suspensos na entrada. Vale mencionar que a concentração de sedimentos nos pontos interiores da represa é preferencialmente superior à concentração na entrada, sugerindo contribuição lateral via *washload*.

**Tabela 1:** Valores de vazão e concentração de sedimentos suspensos na entrada (Bufon, 2006).

Datas	Vazão-Q (m <sup>3</sup> /s)		Concentração (g/m <sup>3</sup> )	
	Entrada	Saída	Inorgânico	Orgânico
22-ago-98	0,004	0,129	157,00	54,00
16-dez-98	0,010	0,089	91,90	69,20
30-jan-99	0,021	0,099	33,30	81,20
27-fev-99	0,048	0,198	29,40	18,20
1-mai-99	0,024	0,087	25,10	19,40
26-jun-99	0,016	0,114	20,10	18,70
24-jul-99	0,019	0,082	13,50	21,00
21-ago-99	0,011	0,050	16,80	28,90
23-out-99	0,014	0,072	63,00	40,10
31-dez-99	0,009	0,099	84,00	39,20
28-jan-00	0,024	0,017	81,90	30,80
26-fev-00	0,042	0,203	177,20	48,30
28-jun-00	0,011	0,114	68,60	34,30
24-jul-00	0,009	0,084	30,10	21,70
29-ago-00	0,014	0,072	46,90	40,60
27-out-00	0,002	0,076	107,10	54,60
21-dez-00	0,006	0,135	87,20	43,90
31-jan-01	0,390	0,097	330,40	116,50
21-fev-01	0,110	0,100	162,50	63,70
25-abr-01	0,034	0,014	425,80	192,60

As amostras homogeneizadas, provenientes dos seis pontos de medição e coletadas em 22/08/98, apresentaram uma composição de 38% de argila, 12% de silte e 50% de areia, com diâmetros médios de 0,0013mm, 0,022 mm e 0,10 mm respectivamente (escala de classificação *Unified Soil Classification System*) A massa específica real dos grãos, para toda a amostra, foi de 2,73 g/cm<sup>3</sup>). A Fig. 2 apresenta a curva granulométrica obtida por Bufon (2006).

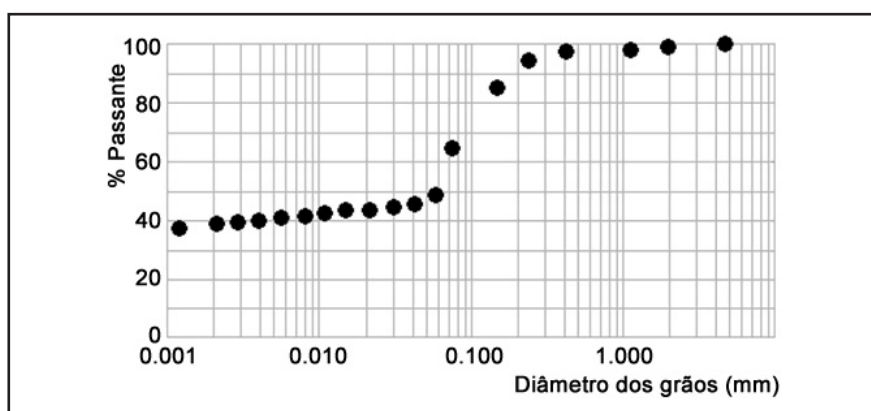
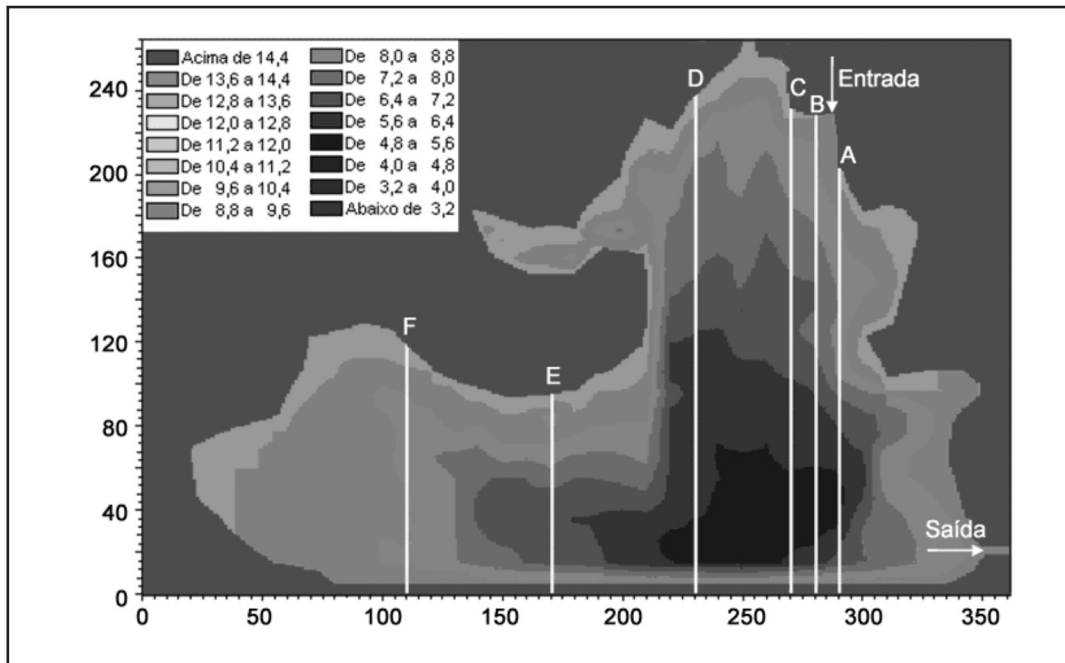


Figura 2: Curva granulométrica adaptada de Bufon (2006).

### 2.3 Simulação Numérica e Dados Utilizados

Utilizou-se o programa MIKE 21C, da empresa DHI (*Danish Hydraulic Institute*), também descrito em Souza et al. (2006) e utilizado para assoreamento de reservatórios. O modelo utiliza as equações de Navier-Stokes no plano horizontal, integradas na altura, com distribuição hidrostática de pressão e condição de escorregamento livre nas paredes. O modelo é aplicável para águas rasas e escoamentos gradualmente variados. A malha do programa pode ser ortogonal curvilínea, ou seguir coordenadas cartesianas. Optou-se utilizar uma malha cartesiana, com espaçamento de 1,0 m entre os nós ao longo dos dois eixos, compatível com os dados de campo disponíveis. O domínio computacional e a batimetria inicial para simulação são apresentados na Fig. 3.



**Figura 3:** Malha computacional (espaçamento de 1,0 m) e batimetria do reservatório Represa Velha referente a agosto de 1998, usadas no início da simulação. As escalas de cores e dos eixos são representadas em metros. As linhas A, B, C, D, E e F indicam as seções utilizadas para comparação entre as batimetrias medida e simulada.

As equações que governam o movimento são evidentemente as de conservação de massa, Eq. (2), e de quantidade de movimento, Eq. (3) e (4). No presente estudo as equações foram integradas ao longo da altura e as Eq. (3) e (4) são para as componentes da vazão específica nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente. As equações foram discretizadas utilizando o método de diferenças finitas para a sua resolução.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{I}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{I}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \quad (4)$$

nas quais  $C$  é o coeficiente de Chezy ( $m^{1/2}/s$ );  $d$  é a altura do leito (m);  $f$  é o fator de cisalhamento do vento;  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );  $h$  é a profundidade do escoamento,  $h = \zeta - d$  (m);  $p$  e  $q$  são as componentes da vazão específica nas direções  $x$  e  $y$  ( $m^3/s/m$ );  $p_a$  é a pressão atmosférica ( $kg/m^2$ );  $t$  é o tempo (s);  $V$ ,  $V_x$ ,  $V_y$  são respectivamente a velocidade do vento e suas componentes em  $x$  e  $y$  (m/s);  $x$ ,  $y$  são coordenadas espaciais (m);  $\zeta$  é a elevação da superfície (m);  $\Omega$  é o parâmetro de Coriolis ( $s^{-1}$ );  $\rho_w$  é a massa específica da água ( $kg/m^3$ );  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yy}$  são componentes da tensão de cisalhamento efetiva.

As condições de contorno hidrodinâmicas foram a vazão à montante (na entrada) e a altura de água à jusante (na saída). As vazões constam na Tab. 1. Adotou-se o passo temporal de 5,0 segundos para o escoamento, coerente com suas velocidades e com o refinamento da malha computacional, enquanto a batimetria foi atualizada a cada 60 passos no tempo (300 s). Para o teste numérico, a viscosidade turbulenta foi considerada constante (0,01 m<sup>2</sup>/s), seguindo o procedimento adotado anteriormente por Souza et al. (2008). O código utilizado permite a simulação de grandes escalas (Large Eddy Simulation) utilizando viscosidade de sub-malha de Smagorinsky. Entretanto, conforme já observado por Souza et al. (2008, 2009), este modelo não reproduz adequadamente o aumento da viscosidade turbulenta decorrente do crescimento das ondulações do fundo, levando a um assoreamento simulado acima do observado na entrada do reservatório. O coeficiente de Chezy é calculado a partir das profundidades e do coeficiente de Manning,  $n = 0,05$ , correspondente a rios e reservatórios com margens espriadas (Porto, 1999). O vento igualmente interfere no valor da viscosidade turbulenta, podendo ser utilizado no código computacional utilizado. Porém o vento não foi considerado nesta simulação devido à ausência de medições de campo. Evidentemente isto induz a taxas de mistura menores e colabora para a sedimentação excessiva na entrada do reservatório. As simulações foram executadas para cada período da medição de campo, com condições de contorno constantes no período. As simulações foram iniciadas com nível de água horizontal e velocidade nula no reservatório, até atingir o regime permanente para a hidrodinâmica em cada situação de estudo. A este campo de velocidades permanente foi posteriormente sobreposta a simulação da sedimentação e do transporte de sedimentos.

A equação utilizada para avaliar a evolução dos sedimentos suspensos é a equação de advecção-difusão, que, na sua forma tradicional, é escrita como:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = w_s \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( E \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( E \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (5)$$

na qual  $z$  é a coordenada vertical;  $c$  é a concentração dos sedimentos em suspensão;  $E$  é o coeficiente de difusão turbulenta;  $w_s$  é a velocidade de queda da partícula em suspensão;  $u$ ,  $v$ ,  $w$  são as componentes das velocidades nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente. Detalhes da dedução da equação de advecção-difusão podem ser encontrados, por exemplo, em Schulz (2003).

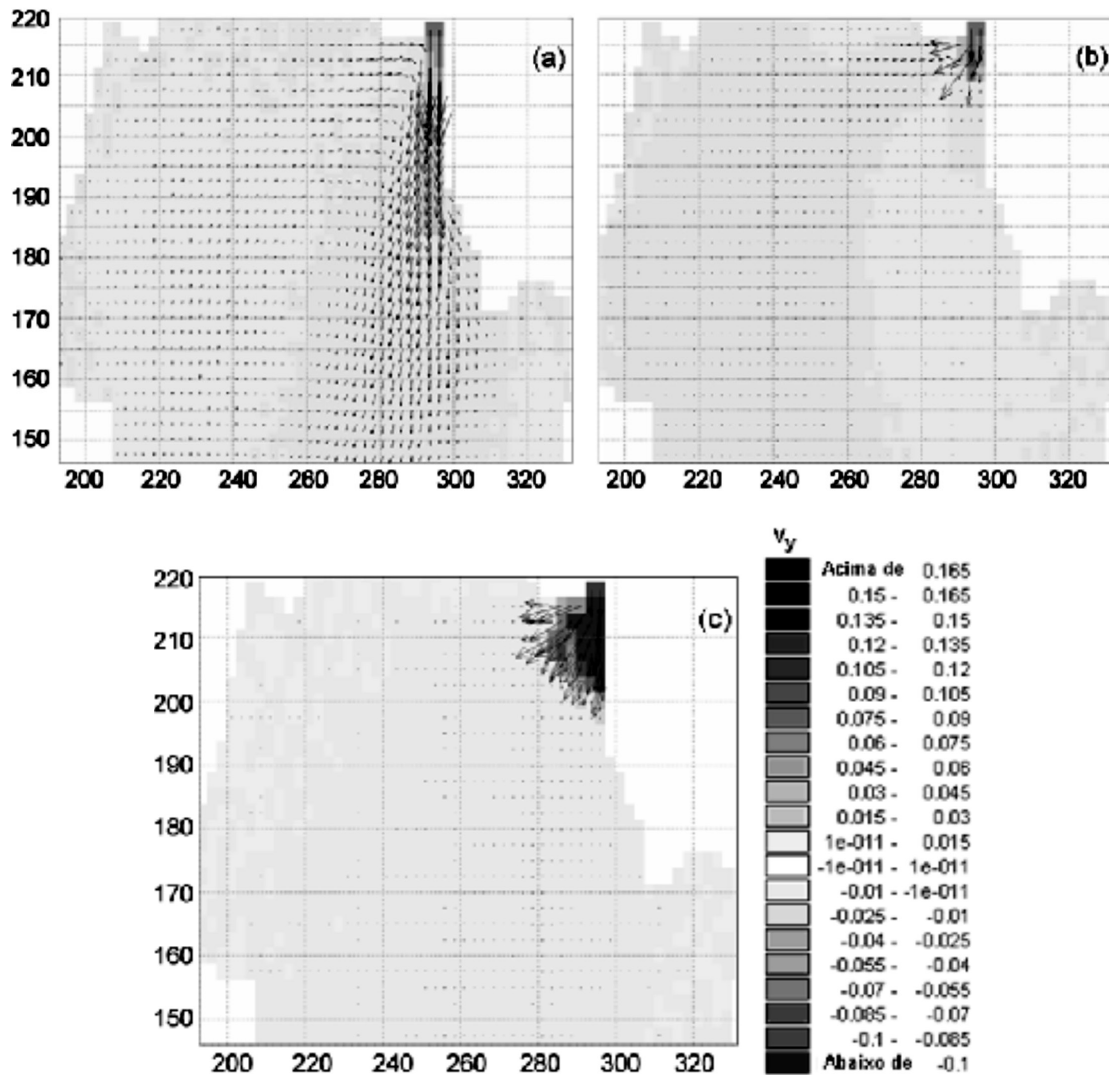
As condições de contorno para o transporte de sedimentos utilizando a Eq. (5) foram fluxo nulo na superfície e concentração especificada a uma altura acima do leito correspondente a 2% da profundidade total. Esta altura de 2% da profundidade total é adotada como a fronteira entre as regiões de transportes de fundo e em suspensão. Para calcular as tensões de cisalhamento no fundo, tensões estas utilizadas no transporte de fundo, são incorporados perfis de velocidade que produzem a mesma velocidade média simulada.

Admite-se, conforme usual, que o transporte de fundo responde imediatamente às mudanças hidrodinâmicas locais. Assim, leva-se em consideração a mudança de direção da tensão de cisalhamento junto ao leito, e a alteração no transporte em consequência da declividade do leito. Estudos relacionando parâmetros como declividade do leito e transporte de fundo podem ser encontrados em Lane (1953), Koch (1980), Ikeda (1980) e Olesen (1987), por exemplo. Com base nas conclusões de Souza et al. (2006) para uso deste código computacional em experimentos de laboratório, a formulação de Engelund e Fredsøe (1976) apresentou os melhores resultados para o assoreamento então simulado. No presente estudo a mesma formulação foi adotada.

As concentrações de sedimentos suspensos na entrada da represa (Tabela 1) são constantes para cada período da simulação. Neste teste foram utilizadas as concentrações de sedimentos inorgânicos, medidas em seis pontos no reservatório. A concentração inicial no reservatório foi admitida constante e igual à média dos seis pontos amostrados no dia 22/08/98. O parâmetro crítico de Shields foi obtido para cada período de simulação considerando as características hidrodinâmicas e morfológicas na entrada da represa. Os diâmetros característicos dos grãos utilizados foram aqueles obtidos da curva granulométrica. As densidades relativas adotadas foram: 2,65 (areia), 1,5 (silte) e 1,5 (argila). As porosidades foram: 0,4 (areia), 0,48 (silte) e 0,46 (argila). Estes valores foram obtidos dos estudos de Morris e Johnson (1967) e de Graf (1971).

### 3 Resultados e discussão

A Fig. 4 mostra o padrão hidrodinâmico em três momentos ao longo dos dois primeiros anos de simulação. A Fig. 4(a) mostra o escoamento simulado, na região de entrada, no dia 23/08/98 às 00h. Trata-se do início da simulação com sedimentos e o escoamento é naturalmente direcionado da entrada para a saída do reservatório. Este padrão se manteve ao longo do primeiro ano de simulação, até se atingir a condição da Fig. 4(b), que corresponde à simulação para o dia 02/10/98 às 16h.



**Figura 4:** Evolução do padrão de escoamento na represa em função do assoreamento. (a) dia 23/08/98 às 00:00 h. (b) dia 02/10/98 às 16:00 h. (c) 01/05/99 às 00:00 h.

Observou-se que ao longo de grande parte do primeiro ano, a deposição de sedimentos na região de entrada não altera a característica do escoamento. Entretanto, nem a viscosidade de submalha de Smagorinsky, nem a viscosidade turbulenta constante com valor obtido em laboratório permitiram gerar uma difusividade turbulenta que representasse corretamente a mistura dos sedimentos no escoamento. Isto acarretou uma sedimentação mais intensa na região de entrada, que, a partir de 02/10/98 passa a alterar o padrão de escoamento simulado, não mais representando o padrão observado. O fenômeno de formação do banco de areia foi simulado por Souza (2006) e descrito por Souza et al. (2006), para descrever seu crescimento na entrada de reservatórios. O escoamento, ao invés de se mostrar unidirecional ao longo de  $y$ , passa a apresentar uma característica radial a partir da seção de entrada, decorrente da pouca profundidade do

mesmo no banco de areia formado. Frisa-se que Souza (2006) realizou extensos experimentos de laboratório e calibrou o código computacional de forma que este reproduzisse de forma otimizada o fenômeno observado.

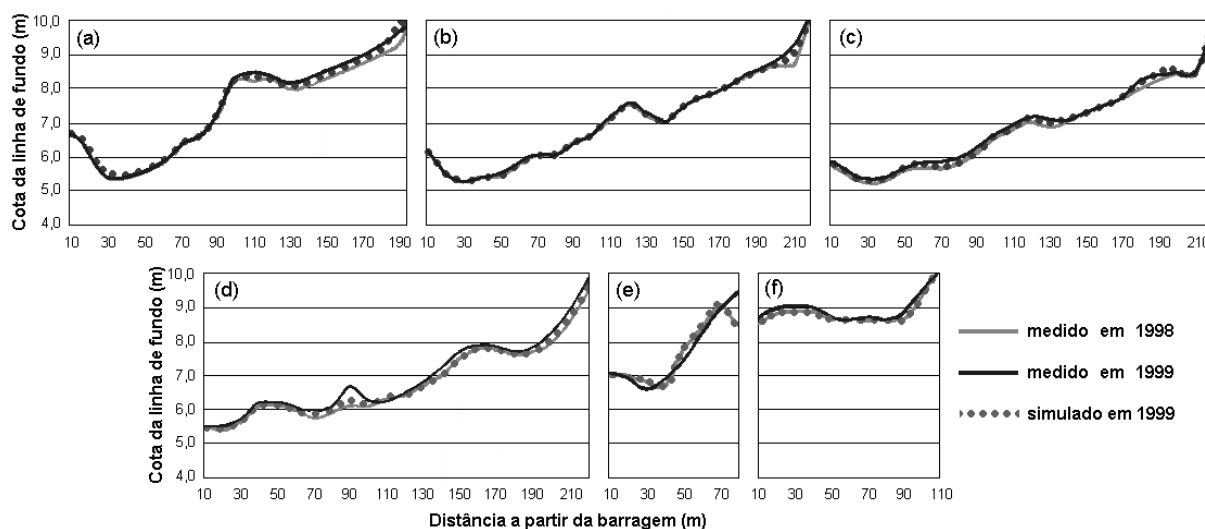
No presente estudo, o interesse se concentrou em utilizar a experiência adquirida com as conclusões de Souza (2006) e verificar a sua aplicabilidade imediata em situações de campo. Como o banco de areia não se forma tão rapidamente em campo (na Represa Velha) como havia se formado em laboratório, verifica-se que adequações para a aplicação em campo são necessárias. A expansão calculada do banco de areia manteve-se estável ao longo de um intervalo de tempo bastante extenso, como ilustra o resultado obtido para o dia 01/05/99 às 00h, correspondente à Fig. 5(c). Esta estabilidade permaneceu até o dia 21/08/99, quando foram geradas células sem circulação (uma situação extrema, não prevista) e ocorreu a instabilização da resolução numérica.

Como a experiência anterior com este código havia permitido simular um amplo intervalo de tempo do assoreamento de um reservatório experimental, sem qualquer instabilização, verificou-se que de fato são necessárias adequações para o uso de códigos semelhantes em campo. Mais uma vez considera-se aqui que a condição de mistura de campo não foi bem representada ao utilizar os parâmetros descritos em Souza et al. (2006) no presente estudo.

Vale mencionar que a escala de cores da Fig. 4 mostra que a cor rosa claro corresponde às velocidades “descendentes” nas figuras e a cor azul claro às velocidades “ascendentes”.

Como se observou estabilidade da simulação no primeiro ano de simulação, efetuou-se ainda a comparação entre a batimetria simulada e a batimetria medida em campo para este período anual, ou seja, o intervalo entre 23/08/98 e 21/08/99. Isto permitiu mostrar que o excesso de sedimentação de fato foi um problema localizado neste teste, concentrando-se essencialmente na entrada no reservatório. As seções batimétricas utilizadas estão apresentadas na Fig. 4, indicadas por A, B, C, D, E e F.

As seções A, B e C, apresentadas nas Fig. 5(a), (b) e (c), respectivamente, mostram a evolução do perfil do fundo no sentido preferencial do escoamento. Na região de entrada (lado direito da seção A) observa-se que o assoreamento simulado é superior ao observado, mas invertendo esta característica após uma distância de aproximadamente 10 m para jusante. Isto demonstra que o problema da alta deposição é localizado e que a condição de mistura na entrada do reservatório não está bem representada usando os procedimentos estabelecidos para escoamentos em laboratório. Na seção A, para as distâncias entre 10 m e 100 m, há pouca alteração do perfil do fundo ao longo do primeiro ano, o que é bem reproduzido pela simulação. A seção B mostra que a sedimentação simulada é compatível com a sedimentação observada no primeiro ano, próximo à entrada. Isto mais uma vez demonstra que a sedimentação localizada na entrada é uma característica pontual que deve ser tratada de forma diferenciada quando se busca simular situações de campo. Esta afirmação se fundamenta na pequena distância existente entre as seções A e B, de apenas 10 m. De forma geral, a seção B foi bem reproduzida pela simulação para o primeiro ano, o mesmo podendo ser dito acerca da seção C.



**Figura 5:** Seções A, B, C, D, E e F da Fig. 3. Observa-se que apenas o perfil A (Fig. 5a) apresenta a previsão de sedimentos junto à entrada mais alta que o perfil medido (190 m). Entretanto, é justamente neste ponto que se forma o banco de areia, que não é observado no escoamento real.



As Seções D, E e F estão apresentadas nas Fig. 5(d), (e) e (f), respectivamente. Nessas seções o perfil medido ao final de um ano mostra diferenças em relação ao perfil inicial, que, entretanto, não são reproduzidas pela simulação. A simulação após um ano mostrou resultados muito próximos ao perfil de fundo inicial, o que pode ser decorrente da deposição excessiva ocorrida na entrada do reservatório (não há mais sedimento com velocidade suficiente para sedimentar e assorear o fundo nessas seções). Na marca de 90 metros da seção D há uma elevação acentuada no perfil medido. Esta região do reservatório caracteriza-se por apresentar a mata ciliar rompida, contribuindo para a entrada de sedimentos via *washload*., o que pode ter originado esta elevação. Esta possível fonte de sedimentos não foi colocada como condição de contorno deste teste numérico, o que pode ter acarretado também a pouca alteração do perfil de fundo. Embora as seções E e F sejam as que sofrem menos influência dos sedimentos transportados pelo córrego da Barrinha, conforme relata Bufon (2006), o assoreamento é intenso. Isto se deve à contribuição lateral de sedimentos da bacia hidrográfica e, eventualmente, ao pisoteamento da região por animais, fatos igualmente não considerado no teste numérico.

#### 4 Conclusões

Em primeiro lugar, observou-se que a Represa Velha é um excelente reservatório para simulação de situações de sedimentação. Trata-se de um reservatório com histórico conhecido e cujos dados foram reunidos na forma de um banco de dados útil por Bufon (2006). Embora nem todos os dados necessários para estudos numéricos detalhados estejam disponíveis, sua localização de acesso fácil permite monitoramento adequado. Esta ressalva é importante, porque não há tradição nacional em acompanhar e controlar os reservatórios naturais ou artificiais, esses últimos independentemente de seu volume ou de sua relevância estratégica.

Objetivou-se testar o código numérico MIKE 21C em situações de campo, tendo sido anteriormente ajustado para responder a observações conduzidas em laboratório. Observou-se que, considerando os mesmos parâmetros e ajustes adotados para os dados de laboratório, o código reproduziu aquelas primeiras condições de trabalho. Em linhas gerais, a primeira parte da simulação reproduziu o escoamento principal observado na Represa Velha. Entretanto, o uso da viscosidade turbulenta (e consequente difusividade turbulenta) obtida para a situação de laboratório, sem considerar ventos, declividade de fundo e efeitos localizados na entrada, levou a uma sedimentação exagerada nesta posição, permitindo efetuar a simulação para o primeiro ano do levantamento dos dados, mas impedindo o seu progresso para anos subsequentes.

A deposição concentrada na entrada reproduz os dados obtidos em estudo anterior para laboratório, que visava quantificar o assoreamento decorrente do banco de areia que se forma nesta posição. A Represa Velha, contudo, não apresenta formação de banco de areia acelerada, mostrando que de fato uma reavaliação da viscosidade turbulenta (e consequente difusividade turbulenta) é necessária, notadamente, em torno da região de entrada.

O código foi rodado para a situação de regime permanente e vazão constante, mais uma vez reproduzindo as condições de trabalho de estudos laboratoriais anteriores. Os dados de vazão obtidos na Represa Velha, que mostram vazões maiores preferencialmente na saída, sugeriram, entretanto, que eventualmente podem haver fontes de água (afioramento de lençol) no interior do próprio reservatório, mostrando a necessidade de uma modificação nos contornos usados no código para seu uso efetivo. Por outro lado, devido às pequenas taxas de variação da profundidade da água com as diferenças entre as vazões de entrada e saída observadas, o reservatório pode estar operando em regime quase-permanente. O uso de vazões constantes simplificou este primeiro teste e manteve valores de fato medidos para as análises feitas.

Os cálculos perderam estabilidade a partir do segundo ano de simulação, demonstrando que as características de viscosidade/difusividade são restritivas para o uso do código como ferramenta de previsão. Metodologias mais elaboradas de obtenção dos valores desses parâmetros físicos são ainda necessárias. As bases obtidas com estudos laboratoriais são fundamentais para esses testes, bem como o uso de reservatórios com histórico e geometrias bem conhecidos nos testes de aplicação em escala real.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa concedida ao primeiro autor.

## Referências

- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Banco de Informações de Geração (BIG)*. Disponível em: <[www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp)>. Acesso em: 19 dez. 2008.
- BIOTA. *Sub-bacias hidrográficas do Estado de São Paulo*. Disponível em: <[www.biota.org.br/info/saopaulo/bacias](http://www.biota.org.br/info/saopaulo/bacias)>. Acesso em: 28 abr. 2006.
- BUFON, A. G. M. *Estudo do assoreamento e sua relação com a vida útil do reservatório Represa Velha*. 2006. 313p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.
- CARVALHO, N. O. *Hidrossedimentologia prática*. Rio de Janeiro: CPRM, 1994.
- CHANG, H. H. et al. Numerical modeling for sediment-pass-through reservoirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, v. 122, n.7, p. 381-388, jul. 1996.
- CEPTA. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Peixes Continentais. *Imagem do CEPTA*. Disponível em: <<http://www4.icmbio.gov.br/cepta>>. Acesso em: 18 fev. 2009.
- CHAO, X. et al. Three-dimensional numerical modeling of cohesive sediment transport and wind wave impact in a shallow oxbow lake. *Advances in Water Resources*, Southampton, v. 31, p.1004-1014, 2008.
- DARGAHI, B. Three-dimensional flow modelling and sediment transport in the river Klarälven, Stockholm, Sweden. *Earth Surface Processes and Landforms*, Karlstad, v. 29, p. 821-852, 2004.
- DEMUREN, A. O. *Development of a mathematical model for sediment transport in meandering rivers*. Karlsruhe: Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe, 1991. (Report. n. 693)
- ENGELUND, F.; FREDSSØE, J. A sediment transport model for straight alluvial channels. *Nordic Hydrology*, v. 7, n. 5, 1976. Disponível em: <<http://www.iwaponline.com/nh/007/0293/0070293.pdf>>. Acesso em: 8 out. 2009.
- GALAPPATTI, R. *A depth-integrated model for suspended transport*. Delft, Netherlands: Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, 1983. (Report n. 83-7)
- GESSLER, D.; HALL, B.; SPASOJEVIC, M.; HOLLY, F.; POURTAHERI, H.; RAPHELT, N. Application of 3D mobile bed, hydrodynamic model. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, v. 125, n.7, p. 737-749, jul. 1999.
- GRAF, W. H. *Hydraulics of sediment transport*. McGraw-Hill Book Company, EUA, 1971.
- IKEDA, S. Incipient motion of sand particles on slopes. *Report of Foundation Engineering & Construction Engineering*, Saitama, Saitama University, 1980.
- KIAT, C. C. et al. Sediment transport modeling for Kulim River: a case study. *Journal of Hydro-environment Research*, Netherlands, v. 2, p. 47-59, 2008.
- KLEEREKOPER, H. *Introdução ao estudo da limnologia*. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura/Serviço de Informação Agrícola, 1944. (Série Didática, n. 4)
- KOCH, F. G. *Bed level computation for axis-symmetric curved channels - part 1*. Delft, Netherlands: Delft Hydraulic Laboratory, 1980. (Report R567-1X/W308)
- LANE, E.W. Progress report on studies on the design of stable channels by the Bureau of Reclamation. In: AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 1953, Denver. *Proceedings...* Denver: Irrigation and Drainage Division, Book: National government publication (HYD352), 1953. v. 79, p. 1-45.
- LEITE, M. A. *Variação espacial e temporal da taxa de sedimentação no reservatório de Salto Grande – SP e sua influência sobre as características limnológicas do sistema*. 1998. 170 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
- MARICATO, F. E. *Caracterização físico-química e sedimentação nas regiões de desembocadura dos rios Paranapanema e Taquari, e no reservatório Jurumirim – Alto Paranapanema*. 1994. 205 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

- MOLINO, B.; GRECO, M.; ROWAN, J. S. A 2-D reservoir routing model: sedimentation history of Abbeystead Reservoir. *Water Resources Management*, London, v. 15, p. 109-122, 2001.
- MORRIS, D. A.; JOHNSON, A. I. Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials as analyzed by the hydrologic laboratory of the U.S. Geological Survey. Denver, Co : U.S. Dept. of the Interior, Geological Survey, 1967. 60 p. Water-Supply Paper 1839-D,
- NICKLOW, J. W.; MAYS, L. W. Optimization of multiple reservoir networks for sedimentation control. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, v. 126, n.4, p. 232-242, abr. 2000.
- OLESEN, K. W. *Bed topography in shallow river bends*. Netherland: Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, 1987. Report 87-1.
- OLSEN, N. R. B. Two-dimensional numerical modelling of flushing processes in water reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, v. 37, n. 1, p. 3-16, 1999.
- PORTO, R. M. *Hidráulica básica*. São Carlos: EESC/USP/Projeto Reenge, 1999.
- SCHNITTER, N. J. *A history of dams: the useful pyramids*. Rotterdam: A.A.Balkema, 1994.
- SCHULZ, H. E. *O essencial em fenômenos de transporte*. São Carlos: EESC/USP/Projeto Reenge, 2003. 398 p.
- SILVA, V. *Relatório da microbacia do córrego da Barrinha*. Pirassununga: CEPTA/IBAMA, 1994.
- 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, 2., 2004, River Flow, 2004. *Proceedings...* United Kingdom: Routledge 2004. p. 811-819.
- SMITH, N. A. F. *A history of dams*. London: Peter Davies, 1971.
- 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 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.163-173, out./dez. 2006.
- SOUZA, L. B. S. et al. Uso da técnica de velocimetria por imagem de partículas na determinação de campos de velocidade em escoamentos turbulentos desenvolvidos em laboratório. *Revista Tecnologia*, Fortaleza, v. 29, n. 2, p. 186-197, 2008.
- SOUZA, L. B. S. et al. Experimental study and numerical simulation of sediment transport in a shallow reservoir. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, v. 3, n. 2, 2010. Disponível em: <<http://www.jafmonline.net/modules/content/article.php?name=beforeProofPapers>>. Acesso em: 20 nov. 2009.
- TERABE, F. R. et al. Modelagem computacional da hidrodinâmica e do processo de transporte e deposição de sedimentos no reservatório de Fiú – modelo RMA10/11. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 7., 2006, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2006. 1 CD-ROM.
- ZIEGLER, C.K.; NISBET, B.S. Long-term simulation of fine-grained sediment transport in large reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, v. 121, p. 773-781, 1995.

**Stênio de Sousa Venâncio**

Engenheiro Civil pela Fundação de Ensino Superior de Passos em 1996, com Mestrado em Engenharia Civil (Hidráulica e Saneamento) em 2003 e Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental, ambos pela Universidade de São Paulo. Atualmente é docente da Universidade de Franca – UNIFRAN, nas Faculdades de Engenharia Civil e Engenharia de Produção

**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.

**Leonardo Barra Santana de Souza**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Uberlândia em 1998, com Mestrado (2002) e Doutorado (2006) em Engenharia Civil (Hidráulica e Saneamento) pela Universidade de São Paulo. Tem formação complementar em modelagem numérica do assoreamento de reservatórios, na empresa de pesquisa e consultoria DHI – Dinamarca, em 2005. Atualmente é Professor Adjunto II 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.

**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/USP em 1985. M.Sc. e Dr em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos/USP em 1985 e 1990, respectivamente. Livre Docente e Prof. Titular em Fenômenos de Transporte pela Escola de Engenharia de São Carlos/USP em 1997 e 2002, respectivamente. Pós-doutorados e Pesquisas no Exterior realizadas em 1992-93, 1998-99 (Universität Karlsruhe, Alemanha) e 2007-08 (University of Minnesota, USA). Atualmente é professor titular junto ao Departamento de Hidráulica e Saneamento Escola de Engenharia de São Carlos/USP, 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.