

Simulação Computacional do Assoreamento em uma Armadilha de Sedimentos

Leonardo Barra Santana de Souza

Universidade Federal de Mato Grosso

leo_barra@yahoo.com

Swami Marcondes Villela

Harry Edmar Schulz

Escola de Engenharia de São Carlos/USP

Recebido: 13/01/06 – revisado: 17/04/06 – aceito: 28/09/06

RESUMO

A capacidade de prever taxas de sedimentação e sua distribuição não-uniforme em reservatórios é muito importante, ainda em sua fase de projeto. Essa previsão pode ser auxiliada por uma análise detalhada do movimento da água e do transporte do material granulométrico no interior dos reservatórios, realizada através de modelagem numérica. Este trabalho apresenta a utilização do programa computacional MIKE 21C para simulação do assoreamento em uma armadilha de sedimentos, construída em laboratório. A modelagem envolve as equações de Saint-Venant em duas dimensões, no plano horizontal e integradas na profundidade, uma formulação empírica para o transporte de sedimentos e um modelo de escoamento helicoidal para representação de movimentos secundários do fluido. A semelhança obtida entre resultados experimentais e simulados, tanto para o padrão do escoamento no interior da armadilha quanto para a deposição de sedimentos, permitiu avaliar o programa MIKE 21C como ferramenta útil no estudo e na estimativa do assoreamento de reservatórios.

Palavras-chave: assoreamento de reservatórios; armadilha de sedimentos; simulação numérica.

INTRODUÇÃO

A estimativa do processo de assoreamento é muito importante ainda na fase de projeto de reservatórios. A partir da análise de prováveis taxas de sedimentação, existem medidas preventivas e corretivas que podem ser tomadas no combate ao assoreamento e são importantes para o prolongamento da vida útil da obra. Das medidas preventivas, cita-se controle de erosão na bacia, proteção das margens do reservatório e construção de desarenadores em canais de adução para abastecimento e geração de energia. Como medidas corretivas, tem-se as dragagens (operações de retirada de sedimentos dos reservatórios) e as lavagens (do inglês *flushing*), que compreendem a liberação de sedimentos através de comportas de fundo na barragem.

O estudo do volume de material a ser sedimentado ao passar dos anos e de sua distribuição não-uniforme no reservatório pode ser auxiliado por uma análise detalhada do movimento do fluido (água) e do transporte de sedimentos no interior do reservatório, realizada através de modelagem física,

numérica, ou de ambas. De interesse particular deste trabalho, a modelagem numérica tem crescido substancialmente e se tornado ferramenta importante no estudo de transporte de sedimentos em escoamentos fluviais, apoiada pelo avanço da capacidade dos computadores e das técnicas numéricas para solução das equações representativas do fenômeno físico. Em contrapartida, o escoamento de um fluido carregado de sedimentos envolve um número alto de variáveis que os modelos atuais não conseguem representar. Como resultado, modelos matemáticos hidrodinâmicos e de transporte de sedimentos possuem hipóteses simplificadoras e precisam ser calibrados, através de dados obtidos a partir do próprio fenômeno real estudado ou de um modelo físico que o represente.

Modelagem numérica do assoreamento de reservatórios

Diversos programas computacionais para aplicação no estudo da morfologia de rios e reserva-

tórios têm sido desenvolvidos em pesquisas no meio acadêmico ou por agências governamentais, enquanto outros são resultados de pacotes comerciais, desenvolvidos por empresas particulares. Existem, ainda, programas desenvolvidos em trabalho conjunto dessas instituições (academia, governo e empresa).

Ziegler e Nisbet (1995) simularam 30 anos (de 1961 a 1991) de transporte de sedimentos finos e coesivos com o modelo SEDZL, no reservatório de Watts Bar, localizado no Tennessee e que faz parte do sistema de reservatórios *Tennessee Valley Authority*. A calibração foi feita com dados de batimetrias realizadas em 1946, 1951, 1956, 1961 e 1991, em 64 seções do reservatório. Uma comparação quantitativa da variação do nível do fundo acusou um erro relativo médio de 46% e foi considerada satisfatória pelos autores. O SEDZL também foi usado em simulações de transporte de sedimentos finos em outros sistemas aquáticos, como *Fox River*, em Wisconsin (Gailani et al. 1991); *Pawtuxet River*, em Rhode Island (Ziegler e Nisbet, 1994) e Lake Irie (Lick et al., 1994).

Um estudo com o programa FLUVIAL-12 foi realizado por Chang et al. (1996) 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 apresenta um comprometimento de geração de energia elétrica em um futuro próximo. O FLUVIAL-12, segundo Chang (1988), tem sido formulado e desenvolvido desde 1972 para modelagem de escoamento e transporte de sedimentos fluviais.

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*, no *Iowa Institute of Hydraulic Research*.

Olsen (1999) aplicou o modelo tridimensional SIIMM com modelo κ - ϵ de turbulência ao assoreamento em um modelo físico reduzido de reservatório, construído em concreto, no *Norwegian Hydrotechnical Laboratory*. Com 12 metros (m) de comprimento e 6m de largura, representa o *Kali Gandaki Hydropower Reservoir*, no Nepal, na escala 1:50. 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. Outros programas computacionais aplicados à morfologia fluvial e de reservatórios são encontrados na literatura, dentre eles 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.

Trabalhos nacionais

São poucas as aplicações de simulações numéricas à hidráulica fluvial no Brasil, considerando-se a quantidade de trabalhos em outros países. Restringindo-se ao estudo de morfologia de reservatórios, no qual se leva em conta a dinâmica do processo de transporte de sedimentos, o número de trabalhos nacionais é ainda menor. No caso particular em que as simulações são realizadas com base na solução das equações hidrodinâmicas e de transporte de sedimentos em duas ou três dimensões, não se encontrou na bibliografia pesquisada um trabalho nacional de modelagem computacional aplicada ao assoreamento de reservatórios. Para modelagens unidimensionais (equações hidrodinâmicas em uma direção) de assoreamento de reservatórios, cita-se os trabalhos de Alvim (1987) e Cogollo e Villela (1988), este com uso do modelo matemático de Lopes (1978) na estimativa do assoreamento do Reservatório de Urra II no Rio Sinu, Colômbia.

Talvez a pequena quantidade de simulações envolvendo assoreamento esteja relacionada à escassez de medições conjuntas e periódicas de vazão, descarga de sedimentos e batimetria em reservatórios nacionais, necessárias ao estudo da distribuição espacial dos sedimentos depositados e sua evolução no tempo. Essa falta de dados de campo dificulta, e por muitas vezes impossibilita, a calibração de modelos numéricos de assoreamento e a validação de seus resultados. Por esta razão, realizou-se o assoreamento em uma armadilha de sedimentos em laboratório, sob condições controladas de vazão de água e descarga de sedimento, para sua reprodução numérica com uso do programa computacional MIKE 21C. A avaliação satisfatória dos resultados numéricos, a partir de sua comparação com os resultados experimentais, viabilizaria a utilização do programa em trabalhos seguintes, contribuindo para que um objetivo maior fosse atingido: o uso confiável de simulação numérica para auxiliar na estimativa do assoreamento de reservatórios de água formados por barragens.

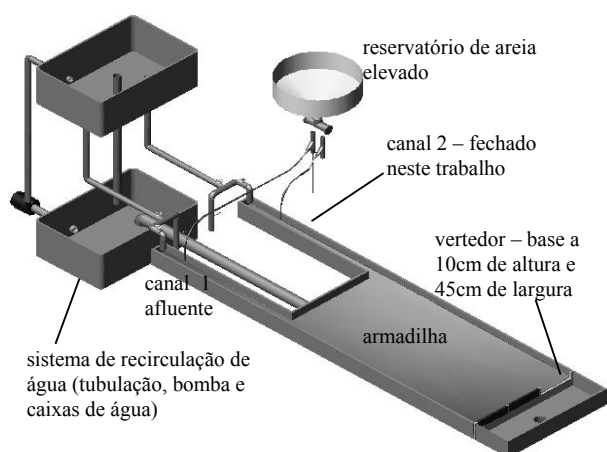
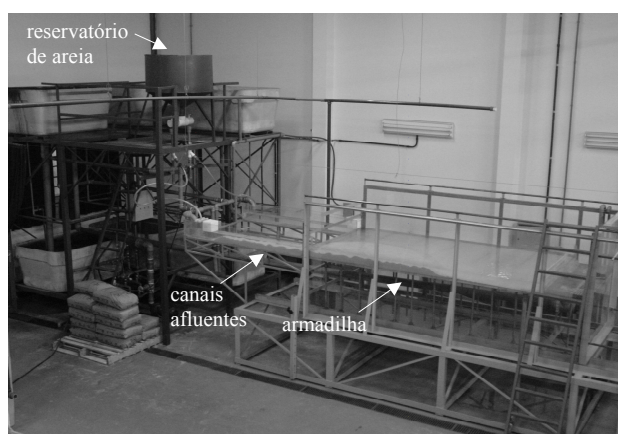


Figura 1 – Acima: vista geral da armadilha de sedimentos, construída com base na estrutura desenvolvida nos trabalhos de Barbosa (1998) e Silva (2002). Abaixo: apresentação simplificada do projeto da armadilha.

TRABALHO EXPERIMENTAL

Esta etapa compreendeu a realização do assoreamento na armadilha de sedimentos construída em laboratório. Os detalhes construtivos do equipamento são apresentados em Souza et al. (2005), juntamente com a análise do escoamento com uso de velocimetria a laser PIV (*Particle Image Velocimetry*), para determinação do padrão do escoamento na armadilha. Essa análise foi feita com escoamento apenas de fluido, sem sedimento, para validação da simulação hidrodinâmica do escoamento em regime permanente na armadilha, fundamental para o início da simulação do assoreamento.

Equipamento construído

A armadilha foi construída no Laboratório de Hidráulica Ambiental do Departamento de Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, com base na estrutura desenvolvida nos trabalhos de Barbosa (1998) e Silva (2002). Com paredes e fundo em acrílico, a deposição de sedimento pôde ser registrada através de fotografias tiradas de diferentes ângulos, ao longo do processo de assoreamento. Permitiu-se também o uso do equipamento de velocimetria a laser, para o qual paredes e fundo transparentes são necessárias, na obtenção de campos de velocidade instantânea em várias regiões da armadilha e o então conhecimento do padrão do escoamento de água em seu interior, para a vazão afluente experimentada. Uma vista geral da armadilha em operação, com 1,5m de largura por 3,00m de comprimento, é apresentada na Figura 1, juntamente com seu projeto simplificado. Ilustra-se na Figura 2 o equipamento laser em uso, com o plano de luz inserido no escoamento e a câmera fotográfica posicionada sob o fundo da armadilha.



Figura 2 - Plano de luz laser e câmera digital posicionada sob a armadilha, para captura de imagens do escoamento.

O abastecimento de água foi feito neste trabalho por apenas um dos dois canais prismáticos 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), com reservatório elevado e um sistema de transporte com ar comprimido até os canais, forneceu descarga consideravelmente constante (Figura 3).

Nota-se que o equipamento construído representa um reservatório de água abastecido por dois rios e tem por função permitir um trabalho

experimental que auxilie na pesquisa do assoreamento de reservatórios. Não se estuda neste caso nenhum reservatório real em particular, cuja geometria se assemelhe àquela da armadilha e justifique a denominação desta de modelo reduzido.



Figura 3 - Sistema de alimentação de areia.

Assoreamento experimental

Iniciou-se o assoreamento após 30min de escoamento apenas de água, para estabelecimento do regime permanente, com vazão igual a $0,002\text{m}^3/\text{s}$ no canal 1. A descarga de areia com d_{50} igual a $0,12\text{mm}$ foi definida em 2g/s (encontrada em rios naturais), o que representou uma concentração média de 1g/L na extremidade de montante do canal, local de lançamento. O assoreamento foi realizado durante 72 horas.

MODELAGEM COMPUTACIONAL

O trabalho de simulação foi desenvolvido com o programa MIKE 21C, da empresa dinamarquesa *DHI Water and Environment*, adquirido para este trabalho de pesquisa. A decisão por esse programa deveu-se à existência tanto de trabalhos de validação do modelo, desenvolvidos na *Delft University of Technology*, como Olesen (1987) e Talmon (1992), quanto de aplicações em casos reais de transporte de sedimentos. Descrições e resultados dos trabalhos podem ser encontrados resumidamente em *DHI Water and Environment* (2005).

Modelagem quase-tridimensional

A hidrodinâmica de escoamentos com fundo móvel é caracterizada por padrões tridimensionais complexos. Isso tem que ser levado em consideração quando se estuda morfologia de rios e assoreamento de reservatórios. Por outro lado, a aplicação de um modelo hidrodinâmico tridimensional a simulações de grande escala de tempo (décadas, no caso de assoreamento de reservatórios) requer um grande trabalho computacional, muitas vezes inviável. Por isso, nesse programa, as equações de conservação de massa e quantidade de movimento são reduzidas às equações de Saint-Venant em duas dimensões, no plano horizontal e integradas na vertical. Efeitos tridimensionais, chamados de escoamentos secundários, são mantidos de forma simplificada através de um modelo de escoamento helicoidal, detalhado em Vriend (1981). O equacionamento também adota hipóteses de distribuição hidrostática de pressão na vertical e ausência da condição de não-escorregamento (velocidade zero) junto às paredes, fazendo com que o modelo seja aplicável a escoamentos de águas rasas e gradualmente variados. A formulação de Engelund and Fredsøe (1976) para transporte de sedimentos, dentre as oferecidas no programa, apresentou os melhores resultados na reprodução do trabalho experimental.

Simulação hidrodinâmica do escoamento

Iniciou-se o trabalho de simulação com uma malha formada por células de 1cm de lado. Contudo, o tempo de trabalho computacional mostrou-se muito longo, visto que para cada atualização da geometria da armadilha, a hidrodinâmica do escoamento é recalculada na simulação do assoreamento. A simulação hidrodinâmica foi então refeita para uma malha de 3cm de lado, formando uma malha de 52 células ao longo da largura da armadilha e 150 ao longo do comprimento. O padrão do escoamento resultante não foi alterado, no nível de detalhe buscado, quando comparado com aquele realizado com a malha de 1cm , significando que, mesmo com uma malha mais grosseira, o padrão do escoamento real foi bem representado. O domínio estudado e a malha com 3cm de lado são ilustrados na Figura 4.

Adotou-se um passo no tempo de $0,01\text{s}$, coerente com a malha computacional para manter a estabilidade numérica durante o processo de cálculo. A simulação foi completada após 100.000 passos no tempo (16 minutos e 40 segundos de escoamento

real), após o escoamento atingir regime permanente. As condições de contorno do problema foram definidas, como geralmente faz-se para escoamentos livres em regime fluvial, com a profundidade do escoamento a jusante, de 0,113m (0,10m da base do vertedor mais 0,013m de lâmina de água), e vazão a montante igual a $0,002\text{m}^3/\text{s}$.

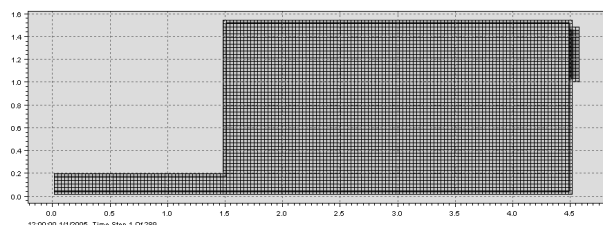


Figura 4 - Malha usada na simulação do assoreamento, com células de 3cm de lado. O escoamento se dá da esquerda (canal afluente) para a direita (vertedor na parte superior).

A viscosidade turbulenta foi modelada a partir da formulação de Smagorinsky (1963). O parâmetro de calibração, compreendido entre 0,25 e 1,0, não modificou consideravelmente o padrão do escoamento, mesmo quando se testou modelagens com os valores extremos do parâmetro. Adotou-se, por isso, o valor 0,5.

Como parâmetro de resistência, o coeficiente M de Strickler (ou $1/n$ de Manning) foi definido constante e igual a $50\text{m}^{1/3}/\text{s}$. Contudo, a resistência imposta ao escoamento é atualizada através do parâmetro de Chezy $C = M \cdot h^{1/6}$, onde h é a profundidade do escoamento.

Simulação do assoreamento

Com base no passo de tempo para a solução das equações hidrodinâmicas do escoamento (0,01s), o passo para o equacionamento do transporte de sedimentos foi definido em 10s. Isso significa que a geometria (batimetria) da armadilha era atualizada a cada 1000 passos de cálculo da hidrodinâmica.

A ferramenta *flood and dry* foi acionada para que regiões da armadilha pudessem ser consideradas secas, caso a altura do escoamento se tornasse inferior a 0,002m, e ser consideradas molhadas, caso a altura do escoamento sobre regiões secas superasse 0,003m. Esses parâmetros definem quando uma célula será excluída ou incluída no cálculo computacional, e são diferentes para se evitar instabilidades no modelo.

A viscosidade cinemática turbulenta do escoamento foi um dos parâmetros de maior influência nos resultados da simulação. Para a etapa de simulação apenas hidrodinâmica, anterior e que dá início à simulação do assoreamento, a viscosidade foi calculada pelo modelo de turbulência de Smagorinsky. Apesar das tentativas de realizar a simulação do assoreamento com a viscosidade calculada também dessa forma, o melhor resultado foi obtido com viscosidade turbulenta constante igual a $0,01\text{m}^2/\text{s}$. A decisão por essa viscosidade é discutida com a apresentação dos resultados.

As condições de contorno para entrada de sedimentos na estrutura foram concentração constante no canal de entrada, de $1000\text{g}/\text{m}^3$, e concentração nula no vertedor, caso haja fluido entrando na armadilha pelo vertedor. Nada impede, contudo, que qualquer concentração saia no escoamento sobre essa estrutura.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Padrão do escoamento na armadilha

Na Figura 5 mostra-se um instante da simulação, referente a 16min e 40s de escoamento real, quando já se havia estabelecido o regime permanente. As flutuações de velocidade em torno da média podem ser observadas na simulação devido ao modelo de turbulência de Smagorinsky. A escala de cores da Figura 6 refere-se a componente longitudinal da velocidade simulada, em m/s.

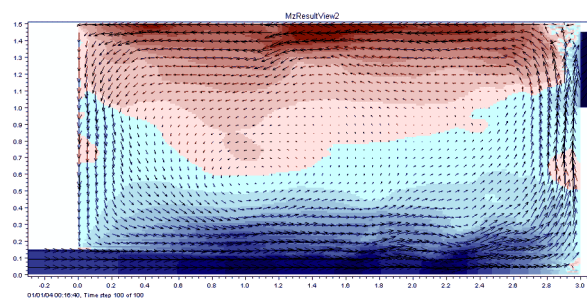


Figura 5 - Instante da simulação, referente a 16min 40s de escoamento.

O padrão médio do escoamento (Figura 7) foi obtido a partir da sequência de campos de velocidade instantânea. As 15 regiões analisadas em laboratório, com uso de velocimetria a laser, são

sobrepostas na Figura 7 para que experimento e simulação possam ser comparados.

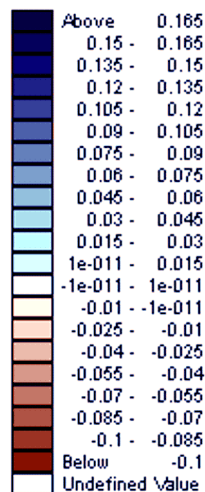


Figura 6 - Escala de cores dos campos da Figura 6, referente à componente da velocidade na direção longitudinal da armadilha, Valores em m/s.

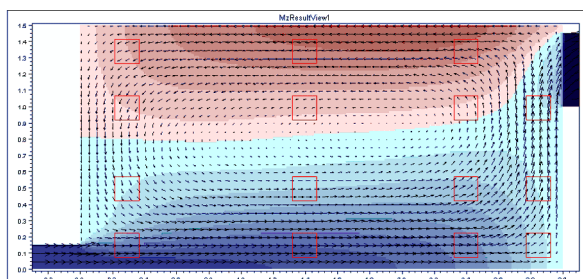


Figura 7 - Padrão médio do escoamento.

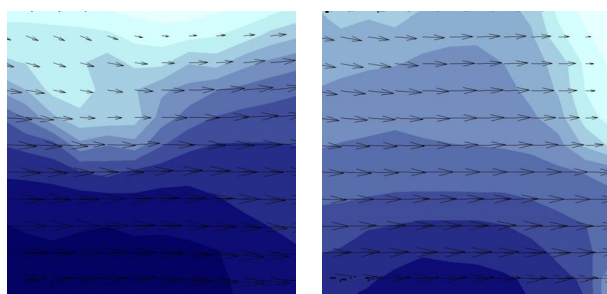


Figura 8 - Campos de velocidade média das regiões 1 e 2 da armadilha. Fonte: Souza et al. (2005).

Validação

A partir de campos de velocidade instantânea obtidos experimentalmente nas 15 regiões, os campos de velocidade média foram calculados. Co-

mo exemplo, mostra-se na Figura 8 aqueles calculados para as regiões 1 e 2 na armadilha. O padrão do escoamento médio experimental para toda a armadilha é esboçado resumidamente na Figura 9, com base nos campos de velocidade média.

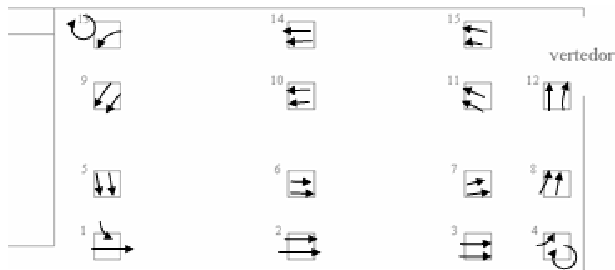


Figura 9 - Padrão do escoamento médio na armadilha.

Comparando-se as Figuras 7 e 9, nota-se semelhança da simulação com os resultados experimentais, mostrando uma grande zona de recirculação e o fluido que adentra a armadilha seguindo o caminho que passa pelas regiões 1, 2, 3, 8 e 12. Tanto para a direção dos vetores quanto para a magnitude da componente longitudinal da velocidade (de acordo com a escala de cores), obteve-se boa representação do escoamento na simulação.

Assoreamento: experimento x simulação

A simulação numérica com viscosidade turbulenta calculada com modelo de Smagorinsky reproduziu bem o assoreamento nas primeiras quatro horas e meia de experimento. A partir daí, observou-se que a variação da viscosidade turbulenta simulada não acompanhou o aumento da intensidade turbulenta no experimento. Na realidade, o aumento da intensidade turbulenta é causado pelo aumento da velocidade do escoamento (menor seção transversal devido ao assoreamento) e pelas dunas de areia formadas. Na modelagem, um assoreamento médio é gerado, e o aumento da intensidade turbulenta levou em consideração apenas o aumento da velocidade e não a agitação do fluido causada pelo escoamento sobre as dunas.

Optou-se então por desenvolver a simulação com viscosidade turbulenta constante mais alta, igual a $0,01\text{m}^2/\text{s}$, dando menor importância à semelhança durante as primeiras 4h ou 5h. Buscou-se com isso boa representação das demais horas de simulação (entre 5h e 72h), período mais longo e representativo do assoreamento. O uso de viscosidade constante tem sido feito para escoamentos

turbulentos e gerado bons resultados não apenas neste trabalho, mas também nos trabalhos de transporte de sedimentos desenvolvidos pela DHI Water and Environment, apresentados em DHI (2005).

O padrão do escoamento com viscosidade constante de $0,01\text{m}^2/\text{s}$ (Figura 10) pode ser comparado àquele com uso do modelo de Smagorinsky (Figura 5). Consta-se que a maior viscosidade ocasiona maior divergência das linhas de corrente na entrada da armadilha e auxilia na formação de um assoreamento mais arredondado e regular, como o ocorrido em laboratório.

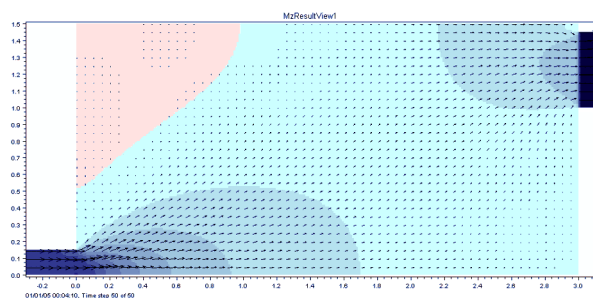


Figura 10 - Padrão do escoamento simulado com viscosidade turbulenta constante $0,01\text{m}^2/\text{s}$.

O desenvolvimento do assoreamento simulado é mostrado nas Figuras 11-19, juntamente com imagens do assoreamento real para comparação imediata. A escala de cores refere-se à altura do fundo na armadilha. Na Figura 11 mostra-se a situação da armadilha anterior ao assoreamento.

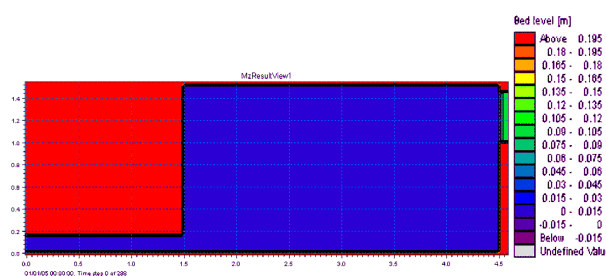


Figura 11 - Situação da armadilha, antes do assoreamento.

O assoreamento simulado com 10h representa bem a realidade nesse instante (Figura 12). É alongado, entrando na armadilha com altura entre 7,5cm e 9,0cm, no primeiro 0,5m do comprimento da armadilha (sentido longitudinal – horizontal na figura). De 0,5m a 1,0m, eleva-se para uma altura entre 9,0cm e 10,5cm. Essa elevação é notada na

vista lateral do primeiro metro de comprimento da armadilha real. De 1,0m a 1,5m ocorre a diminuição do assoreamento tanto para simulação como para experimento, embora mais acentuada para este último. As linhas que ligam a ilustração em planta da simulação à vista lateral da armadilha auxiliam na localização das seções, para comparação.

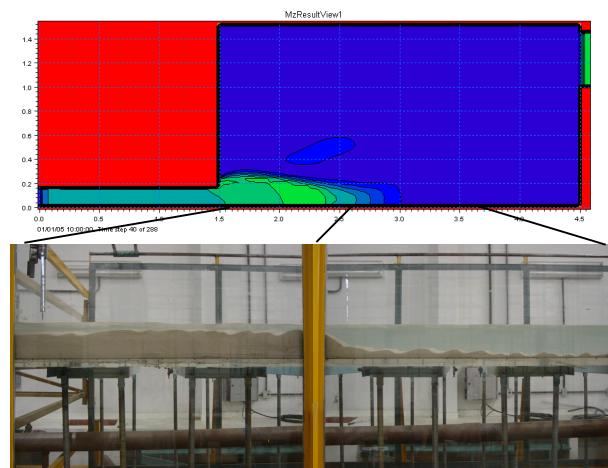


Figura 12 - Assoreamento com 10h de experimento.

A vista superior da armadilha na Figura 13 complementa a apresentação do experimento nesse instante. Observa-se que uma fina camada de areia, de altura desprezível para medição da elevação do fundo, cobre a armadilha junto às suas paredes. Essa formação foi desenvolvida nas primeiras 4 ou 5 horas de assoreamento. De interesse neste trabalho, tem-se a deposição significativa no primeiro 1,5m a partir da entrada da armadilha, bem representada na simulação.



Figura 13 - Vista superior da armadilha, com 10h.

Com 20h, o assoreamento simulado apresenta-se arredondado, com talude (no contorno do assoreamento) íngreme no sentido transversal e mais suave no sentido longitudinal da armadilha. Sua semelhança com a situação experimental é observada nas Figuras 14 e 15.

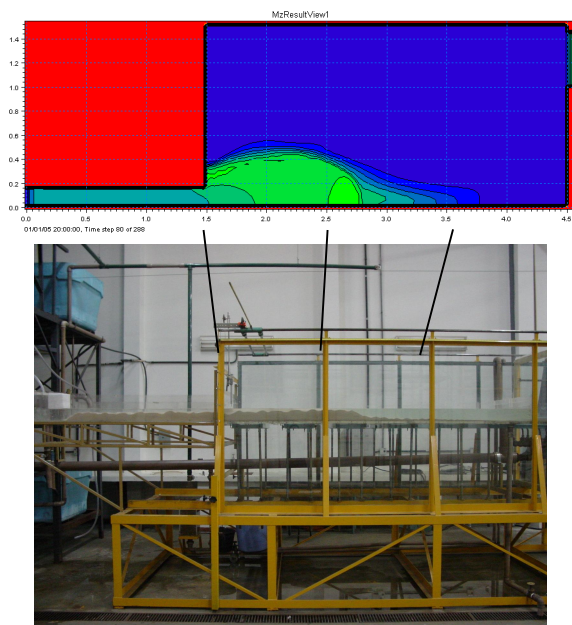


Figura 14 - Assoreamento com 20h.

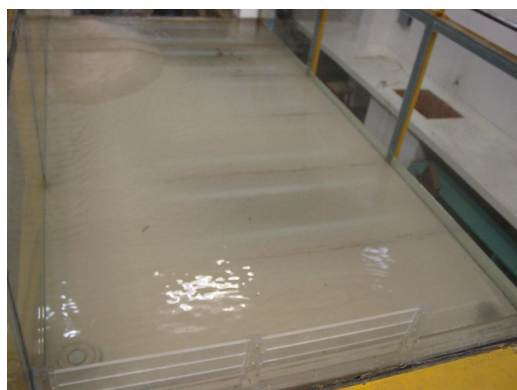


Figura 15 - Vista superior da armadilha, com 20h.

Nas horas seguintes, a forma arredondada do assoreamento e sua altura máxima praticamente se mantêm, porém com expansão para dentro da armadilha.

A declividade do talude em todo o contorno do volume depositado se torna um pouco mais suave na simulação, o que não acontece no experimento. O assoreamento no canal aumenta sensivelmente

em altura, pois a maior resistência ao escoamento imposta pelo maior volume de areia na armadilha causa uma sensível elevação da superfície da água no canal com diminuição da sua capacidade de transporte, até que o equilíbrio se estabeleça novamente.

Em torno de 50h, a simulação expande o assoreamento preponderantemente no sentido transversal da armadilha, perdendo um pouco em extensão para a situação real. A declividade do talude no contorno permanece mais suave na simulação. A situação é ilustrada nas Figuras 16 e 17.

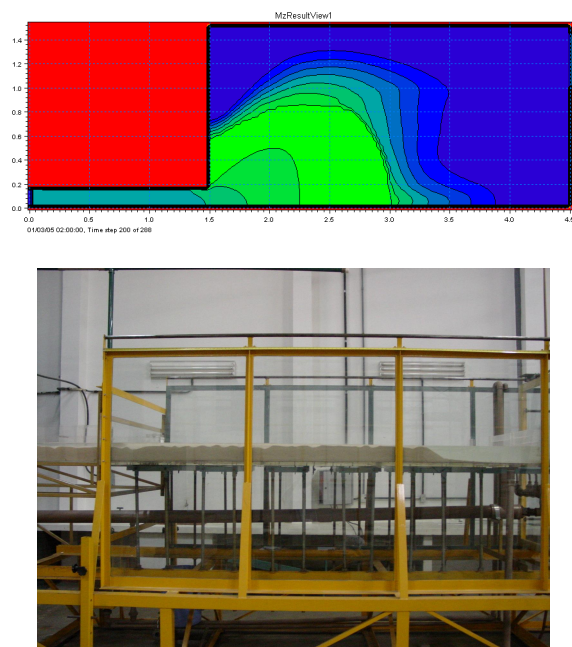


Figura 16 - Assoreamento com 50h.



Figura 17 - Vista superior da armadilha, com 50h

Deste momento em diante o assoreamento simulado passa novamente a ter uma expansão mai-

or na direção longitudinal da armadilha, se aproximando mais do experimento. Seu resultado final, com 72h e ilustrado na Figura 18, mostrou-se mais irregular, com taludes mais suaves no contorno e uma formação de areia de menores dimensões que o resultado experimental (Figura 19), tanto no sentido longitudinal quanto no sentido transversal da armadilha. Por outro lado, o assoreamento simulado tem forma arredondada e com uma grande região consideravelmente plana e horizontal, de altura entre 9cm e 12cm, bem representativa do resultado experimental.

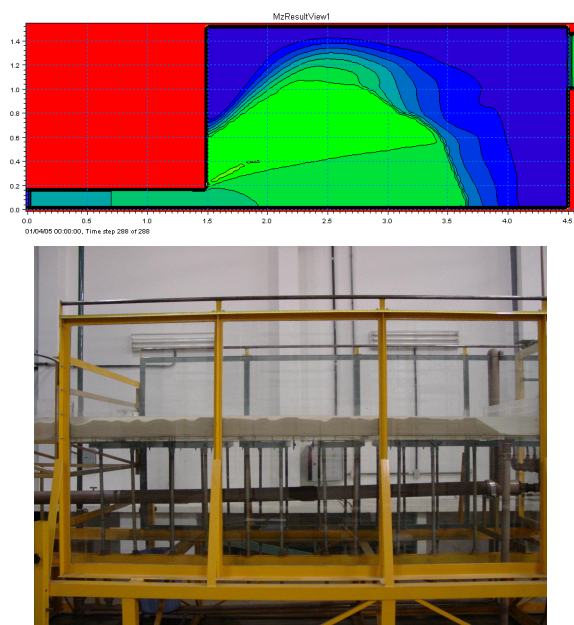


Figura 18 - Assoreamento com 72h.



Figura 19 - Vista superior do assoreamento com 72h.

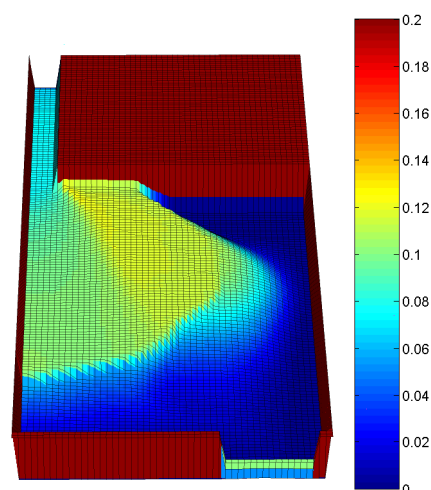


Figura 20 - Assoreamento simulado com 72h.

Uma visualização tridimensional do assoreamento simulado com 72h foi criada com uso do programa MATLAB (Figura 20), para melhor observação e comparação com o resultado final do experimento. A escala de cores refere-se à elevação do fundo.

Comparação de seções transversais

Quatro seções transversais do assoreamento para 72h foram comparadas. Os gráficos experimentais não apresentam pontos discretos, pois foram feitos com base em observação visual durante o experimento, através de aproximadamente 2000 fotos tiradas de diferentes ângulos e apenas alguns pontos medidos para referência de altura. Para obtenção eficiente das seções transversais, notou-se a falta de um sistema automatizado para medição rápida e detalhada do assoreamento, com captura da elevação das dunas e ravinas em toda a armadilha. Para a simulação, os pontos do gráfico representam a medida do assoreamento em cada célula da malha computacional. As seções transversais são localizadas na armadilha de acordo com a Figura 21 e mostradas na Figura 22.

A divergência entre os resultados a ser considerada se resume à forma da Seção 4, mais regular para o experimento. A superfície do assoreamento experimental é mais regular, plana e horizontal, se expandindo mais para a esquerda. O talude no experimento apresenta-se com praticamente a mesma declividade em todas as seções.

O volume total do assoreamento também foi comparado, com aproximadamente 13% a menos de volume para a simulação, com relação ao volume experimental. É provável que a simulação tenha apresentado maior transporte de sedimentos em suspensão, causando maior saída de areia pelo vertedor.

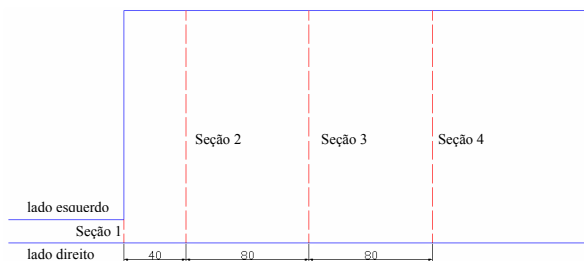


Figura 21 - Localização das seções transversais analisadas, do assoreamento na armadilha. Cotas em centímetros.

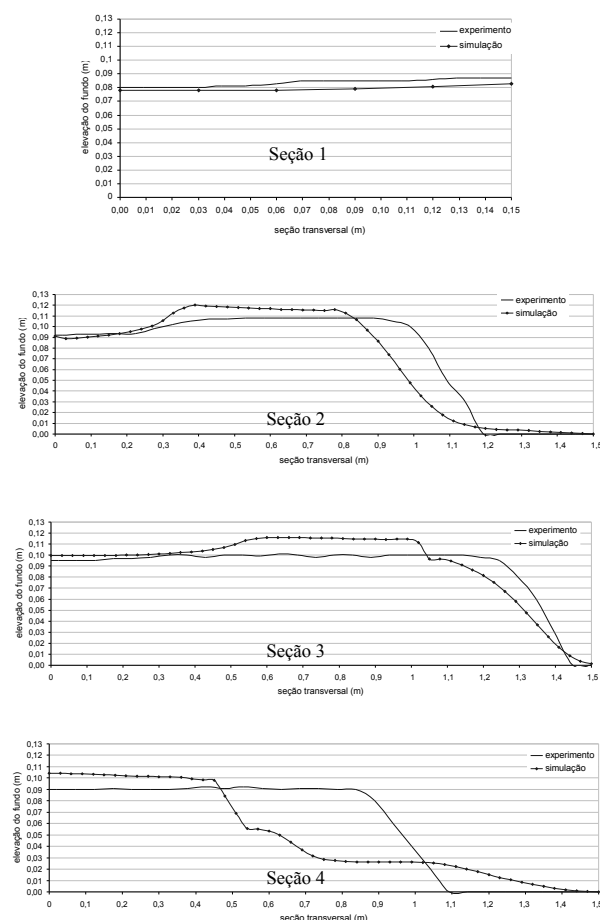


Figura 22 - Seções transversais do assoreamento com 72h.

CONCLUSÕES

Realizou-se um trabalho experimental de assoreamento em uma armadilha de sedimentos construída em laboratório. Seus resultados foram usados para comparação e validação da simulação numérica do assoreamento na armadilha, realizada com o programa computacional MIKE 21C.

A armadilha construída auxilia em pesquisas de transporte de sedimentos e assoreamento de reservatórios, proporcionando diferentes configurações de vazão nos canais afluentes, descarga de sedimento e abertura de vertedor.

O sistema de alimentação de areia desenvolvido mostrou-se eficiente, apresentando uma descarga relativamente constante do material nos canais.

Durante o assoreamento experimental, o comportamento hidrodinâmico variou consideravelmente em torno de 5 horas de trabalho. Por esse motivo, certo cuidado é necessário ao se estender as características iniciais do assoreamento para estimativa das demais horas desse processo.

A mudança do padrão do assoreamento deveu-se ao aumento considerável da viscosidade turbulenta e da resistência ao escoamento. A alta difusão de quantidade de movimento, diretamente relacionada à viscosidade turbulenta, fez com que o escoamento médio se comportasse como o de um fluido muito viscoso. Houve então divergência das linhas de corrente na entrada do reservatório e a areia, transportada preponderantemente por advecção, formou o assoreamento distribuído, de forma regular e arredondada.

A simulação hidrodinâmica com uso do modelo de turbulência de Smagorinsky representou bem o comportamento do escoamento na armadilha, quando comparados com os dados obtidos através da velocimetria a laser. Contudo, durante o assoreamento, o aumento da difusividade turbulenta ocasionado pela formação das dunas não foi captado pela modelagem numérica, pois o programa MIKE 21C apresenta resultados médios de assoreamento, sem o detalhamento das formas de fundo. Por esse motivo, a simulação do assoreamento foi inteiramente realizada com uma viscosidade turbulenta constante, igual a $0,01 \text{ m}^2/\text{s}$, em lugar do modelo de Smagorinsky, mais representativo de escoamentos turbulentos.

A comparação satisfatória dos resultados simulados de assoreamento com os experimentais justifica o uso do programa MIKE 21C como ferramenta numérica de auxílio em trabalhos de assore-

amento, realizados em laboratório ou aplicados a reservatórios reais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, pela bolsa de Doutorado concedida ao primeiro autor; à FINEP, pelo auxílio financeiro através do convênio nº 23.01.0606.00; e a DHI Water and Environment, pelo suporte técnico.

REFERÊNCIAS

- ALVIM, A. M. *Modelo matemático bidimensional de assoreamento em reservatórios*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1987.
- BARBOSA, A. A. *Correntes de densidade em reservatórios*. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1999.
- CHANG, H. H. *Fluvial processes in river engineering*. Nova Iorque: John Wiley & Sons. 1988.
- CHANG, H. H.; Harrison, L. L.; Lee, W.; TU, S. Numerical modeling for sediment-pass-through reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, v.122, n.7, jul. 1996.
- COGOLLO, P. R. J.; VILLELA, S. M. Mathematical model for reservoir silting. In: *Porto Alegre Symposium Of Sediment Budgets*, proceedings..., dez 1988, Porto Alegre: IAHS Publication, n. 174. 1988.
- DEMUREN, A. O. *Development of a mathematical model for sediment transport in meandering rivers*. Report. n.693, Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Alemanha. 1991.
- DHI - MIKE 21C river hydrodynamics and morphology. Horsholm, Dinamarca. 2005.
- DHI WATER AND ENVIRONMENT. Horsholm, Dinamarca. Disponível em: <www.dhisoftware.com>. Acesso em 02 de outubro. 2005.
- ENGELUND, F.; FREDSE, J. A sediment transport model for straight alluvial channels. *Nordic Hydrology*, v.7, n.5. 1976.
- GAILANI, J.; ZIEGLER, C. K.; LICK, W. Transport of suspended solids in the Lower Fox River. *Journal of Great Lakes Reservoirs*, v.17, n.4, p.479-494. 1991.
- GESSLER, D.; HALL, B.; SPASOJEVIC, M.; HOLLY, F.; POURTAHERI, H.; RAPHELT, N. Application of 3D mobile bed, hydrodynamic model. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.125, n.7, jul. 1999.
- LICK, W.; LICK, J.; ZIEGLER, C. K. The resuspension and transport of fine-grained sediments in Lake Erie. *Journal of Great Lakes Reservoirs*, v.20, n.4, p.599-612. 1994.
- LOPES, S. J. L. *Mathematical modeling of sediment deposition in reservoirs*. Hydrology Papers, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, jul. 1978.
- NICKLOW, J. W.; MAYS, L. W. Optimization of multiple reservoir networks for sedimentation control. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.126, n.4, abril. 2000.
- OLESEN, K.W. *Bed topography in shallow river bends*. Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, Report 87-1. 1987.
- OLSEN, N. R. B. Two-dimensional numerical modelling of flushing processes in water reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, v.37, n.1. 1999.
- SCHNITTER, N.J. *A history of dams: the useful pyramids*. Rotterdam: A.A.Balkema, 1994.
- SILVA, S. V. *Características de escoamentos decorrentes de diferenças de densidades*. 284 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2002.
- SLOFF, C. J.; JAGERS, H. R. A.; KITAMURA, Y. K. *Study on the channel development in a wide reservoir*. Proc. 2nd Intern. Conf. on Fluvial Hydraulics, River Flow 2004, June 23-25, Napels, Italy, p.811-819. 2004.
- SMAGORINSKY, J. *General circulation experiment with the primitive equations*. Monthly Weather Review, v.91, n.3, p.99-164. 1963.
- SOUZA, L. B. S.; VENÂNCIO, S. S.; ALAMY FILHO, J. E.; VILLELA, S. M.; SCHULZ, H. E. 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, PB. Anais... João Pessoa, 2005.
- TALMON, A. M. *Bed topography of river bends with suspended sediment transport*. Tese (Doutorado) - Delft University of Technology, Holanda, 1992.
- VRIEND, H. J. *Steady flow in shallow channel bends*. comm. on Hydraulics 81-3, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, Holanda. 1981.
- ZIEGLER, C. K.; NISBET, B. S. Fine-grained sediment transport in Pawtuxet River, Rhode Island. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.120, n.5, p.561-576. 1994.
- ZIEGLER, C. K.; NISBET, B. S. Long-term simulation of fine-grained sediment transport in large reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.121, n.11, nov. 1995.

Numerical Modeling of The Sedimentation In a Sand Trap

ABSTRACT

The capacity of predicting sedimentation and its non-uniform distribution in reservoirs is very important, already in the planning and design phase. This prediction can be supported by a detailed analysis of flow pattern and sediment transport in reservoirs, developed through numerical simulation. This study shows the use of MIKE 21C software to simulate the sedimentation process in a sand trap, built in a laboratory. The modeling involves the depth-average Saint-Venant equations in two dimensions, an empirical formulation for sediment transport and a helical flow tool to reproduce secondary movements of the fluid. The similarity achieved between experimental and numerical results, for the flow pattern and sediment deposition, validated the MIKE 21C program as a useful tool to study and predict reservoir sedimentation.

Key-words: reservoir sedimentation, sand trap, numerical simulation.