

Implementação de Modelo Numérico para Avaliação do Transporte de Sedimentos no Reservatório de Itaipu – PR

Guadalupe Eugenia Garcia

Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná
lupegarcia_83@hotmail.com

José Eduardo Gonçalves

Instituto Tecnológico SIMEPAR

Recebido: 03/09/09 - revisado: 15/12/10 - aceito: 28/07/11

RESUMO

Para conhecer a dinâmica do reservatório de Itaipu, este estudo propõe a implementação do modelo numérico Delft3D que visa avaliar a circulação de suas águas e o transporte de sedimentos, identificando as áreas que apresentam os maiores percentuais de erosão/deposição. Além da implementação do módulo hidrodinâmico foram realizados testes de análise de sensibilidade. Uma vez que a hidrodinâmica mostrou-se satisfatória, foram criados cenários com aporte de sedimentos de diferentes tipos (silte e argila) e fontes (fundo e em suspensão) e analisadas as deposições e o transporte ao longo do reservatório. Para todas as simulações realizadas, não foi observada erosão/deposição além de 45 km iniciais do reservatório.

Palavras Chave: modelo numérico, transporte de sedimentos, reservatório de Itaipu.

INTRODUÇÃO

Sedimentos transportados pelo rio, quando acumulam nos reservatórios, podem causar-lhes danos tais como: redução do volume de água, prejuízos à navegação, danificação de turbinas, bloqueio de tomadas de água e comportas, entre outras. Qualquer que seja a finalidade (armazenamento de água, geração de energia, irrigação, entre outros), o tamanho e as características de operação dos reservatórios, estes estão sujeitos a ter sua capacidade de armazenamento parcial ou totalmente tomada pelos sedimentos, causando o processo de assoreamento. Em geral, os reservatórios de hidrelétricas brasileiros possuem grandes extensões, o que dificulta seu monitoramento e identificação de problemas tais como áreas assoreadas e/ou com baixa qualidade da água, desmatamento das margens, entre outros. Além disso, no Brasil, a maior parte da energia elétrica é gerada por aproveitamento hidrelétrico, fazendo com que os estudos sedimentológicos sejam particularmente importantes para que seja garantida a mitigação dos efeitos de assoreamento dos reservatórios.

ÁREA DE ESTUDO

A Usina Hidrelétrica de Itaipu, maior em produção de energia no mundo, é um empreendimento binacional desenvolvido pelo Brasil e pelo Paraguai no Rio Paraná (Figura 1). A potência instalada final da usina é de 14.000 MW (megawatts), com 20 unidades geradoras de 700 MW cada (Itaipu Binacional, 2007).

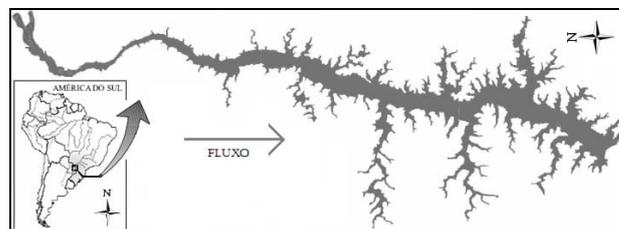


Figura 1 – Reservatório de Itaipu.

A Usina Hidrelétrica de Itaipu está localizada no Rio Paraná, no trecho de fronteira entre o Brasil e o Paraguai, 14 km ao norte da Ponte da Amizade. A área de estudo se estende desde Foz do

Iguaçu – *Ciudad del Este* até a cidade de Guaíra, ao norte. O limite a jusante é dado pela barragem de Itaipu, tendo o reservatório 150 km de comprimento e 7 km de largura média. A área alagada é de 1.350 km², sendo 770 km² em território brasileiro e 580 km² em território paraguaio. A profundidade média é de 22 m, chegando a 170 m nas proximidades da barragem. A área de drenagem é de 820.000 km² e os níveis de água mínimo e máximo são de 197 e 220 m, respectivamente. A vazão média afluente em 2005, no Rio Paraná, foi de 11.094 (m³/s), com valores diários que variaram entre 7.532 m³/s e 22.656 m³/s (Itaipu Binacional, 2007).

MODELO NUMÉRICO DELFT3D

O módulo hidrodinâmico do Sistema de Modelagem Delft3D, desenvolvido pela *Delft3D Hydraulics* (Holanda) tem como base o sistema de equações de águas rasas em duas e três dimensões.

O sistema de equações básicas do modelo é composto pela equação da continuidade (1), equação do movimento na direção horizontal (2), e equações do transporte para constituintes conservativos (3). O módulo hidrodinâmico do modelo resolve a equação de Navier-Stokes para um fluido incompressível, levando em conta a aproximação de águas rasas de Boussinesq. Na componente vertical da equação, a aceleração é desprezível quando comparada à aceleração gravitacional, sendo a equação do momento reduzida à relação hidrostática para o campo de pressão. O conjunto de equações diferenciais parciais, com condições iniciais e de contorno apropriadas, são discretizadas utilizando o esquema de diferenças finitas.

Na horizontal estas equações podem ser formuladas em coordenadas cartesianas retangulares, ortogonais curvilíneas ou em coordenadas esféricas, sendo o domínio do modelo limitado pelos contornos abertos e fechados.

As equações básicas são apresentadas a seguir, em coordenadas ortogonais curvilíneas (ξ, ζ).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\zeta\zeta}}}} \frac{\partial [(d+\eta)U\sqrt{G_{\zeta\zeta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\zeta\zeta}}}} \frac{\partial [(d+\eta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \zeta} = Q \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\zeta\zeta}}} \frac{\partial u}{\partial \zeta} + \frac{\omega}{d+\eta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\zeta\zeta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \zeta} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\zeta\zeta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\zeta\zeta}}}{\partial \xi} - fv \quad (2)$$

$$= -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\eta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi$$

$$\frac{\partial (d+\eta)c}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\zeta\zeta}}}} \left\{ \frac{\partial [\sqrt{G_{\zeta\zeta}}(d+\eta)uc]}{\partial \xi} + \frac{\partial [\sqrt{G_{\xi\xi}}(d+\eta)vc]}{\partial \zeta} \right\} + \frac{\partial \omega c}{\partial \sigma}$$

$$= + \frac{d+\eta}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\zeta\zeta}}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[D_H \frac{\sqrt{G_{\zeta\zeta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right] + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[D_H \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\zeta\zeta}}} \frac{\partial c}{\partial \zeta} \right] \right\} +$$

$$\frac{1}{d+\eta} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[D_V \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right] - \lambda_d (d+\eta)c + S \quad (3)$$

onde:

$$\sqrt{G_{\xi\xi}} = R \cos \varphi$$

$$\sqrt{G_{\zeta\zeta}} = R$$

$$\sigma = \frac{z-\eta}{d+\eta}, \quad \sigma : \text{sistema de coordenada vertical } (\sigma = 0$$

na superfície e $\sigma = -1$ no fundo);

R : raio da Terra;

z : coordenada cartesiana vertical no espaço físico;

η : elevação da superfície livre em relação ao plano de referência (em $z = 0$);

d : profundidade abaixo do plano de referência z ;

φ : latitude;

U : velocidade à profundidade média na direção ξ ;

V : velocidade à profundidade média na direção ζ ;

u : velocidade do fluido na direção ξ ;

v : velocidade do fluido na direção ζ ;

ω : componente da velocidade na vertical;

Q : contribuições, por unidade de área, das vazões de entrada e de saída, da precipitação e da evaporação;

f : parâmetro de Coriolis;

t : tempo;

ρ_0 : densidade da água;

P_ξ : gradiente de pressão na direção ξ ;

F_ξ : tensão de Reynolds na direção ξ ;

ν_v : viscosidade vertical turbulenta;

M_ξ : contribuições de fontes externas que podem fornecer ou destruir momento (descargas de rios, ondas, etc) na direção ξ ;

D_H : coeficiente cinemático horizontal de difusão turbulenta;

D_v : coeficiente cinemático vertical de difusão turbulenta;

λ_d : decaimento de primeira ordem;

c : concentração de sedimento;

S : termos de contribuição ou retirada devido às descargas de entrada e saída de água;

O transporte de sedimentos em suspensão na coluna de água é calculado utilizando a equação da advecção-difusão na sua forma tridimensional, da mesma forma que constituintes conservativos, como sal e calor, com algumas diferenças como fluxo de sedimento entre o fundo e a coluna de água, e velocidade de queda do sedimento sobre a ação da gravidade.

Também podem ser citados outros efeitos como a influência do sedimento na massa específica da água e a conseqüente redução da turbulência. Mudanças na batimetria de fundo, provocadas pela constante erosão/deposição de sedimentos, podem modificar o campo de velocidades, este efeito, embora acrescente custo computacional, pode ser levado em consideração nos cálculos. Estes processos dependem do tipo de sedimento envolvido, especialmente areia e argila, pois diferentes fórmulas serão utilizadas para os cálculos das velocidades de queda, erosão e deposição. Podem ser selecionadas diferentes frações de argila e areia, a interação de frações de sedimentos é importante para simular diversos processos.

A velocidade de queda (w_q) do sedimento não coesivo (areia) é calculada de acordo com o método de Rijn (1993), na qual a formulação utilizada depende do diâmetro do sedimento em suspensão. Já para sedimentos coesivos o modelo não possui formulação interna, neste trabalho, esta velocidade foi estimada utilizando a lei de Stokes:

$$w_q = \frac{gd^2}{18\nu} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \quad (4)$$

onde g é a aceleração da gravidade, d é o diâmetro da partícula, ρ é a massa específica do fluido, ρ_s é a massa específica do sólido e ν é a viscosidade cinemática.

Para observar a dinâmica dos processos de transporte, deposição e re-suspensão dos sedimentos, é necessária a simulação de cenários com duração de anos ou décadas. Entretanto, por limitações computacionais, a duração dessas simulações seriam inviáveis devido ao tempo necessário.

Neste estudo foi utilizada uma ferramenta disponível no Delft3D chamado MORFAC (fator de escala morfológico). Esta ferramenta é um acelerador (multiplicador) que atua nos fluxos de erosão e deposição dos sedimentos. Com isto, os volumes dos sedimentos depositados e re-suspensos são amplificados.

Os resultados de deposição de sedimentos podem ser visualizados mesmo com a simulação de períodos de curta duração (menores que um ano). Na prática, é como se a simulação do processo de transporte de sedimentos tivesse sido realizada por um período maior que o simulado.

GRADE NUMÉRICA E BATIMETRIA

Os dados topográficos do reservatório de I-taipu foram obtidos através da digitalização das curvas de nível, provenientes das cartas topográficas anteriores ao enchimento do reservatório. Além destes dados, foram utilizadas informações provenientes de 16 seções batimétricas transversais, ao longo de todo o reservatório. A distância entre cada seção varia de 5 a 15 km, sendo que a média de espaçamento entre os pontos amostrais ao longo destas seções é de aproximadamente 25 metros.

O contorno do reservatório foi produzido com o processamento de imagens *Landsat 7 ETM+*, capturadas em 19 de dezembro de 2002 e resolução espacial de 15 metros. Essas imagens foram analisadas com programas computacionais capazes de identificar diferentes padrões (texturas) contidos nos arquivos. Dessa maneira foi possível identificar as coordenadas geográficas dos pontos que representam o limite entre terra e água, que, em última análise, representa o contorno do nível no momento da captura dessa imagem.

Os dados batimétricos gerados foram interpolados para os pontos da grade numérica por meio do módulo QUICKIN do Delft-3D. Nas áreas com baixa densidade de pontos de batimetria amostrados, foi utilizada a interpolação triangular. Já nas áreas com elevada densidade de pontos de batimetria amostrados é realizada uma média destes pontos em cada célula da grade. Estas áreas foram selecionadas manualmente utilizando ferramentas específicas deste módulo. A batimetria resultante pode ser observada na Figura 2. As profundidades zero representam os pontos de terra (secos).

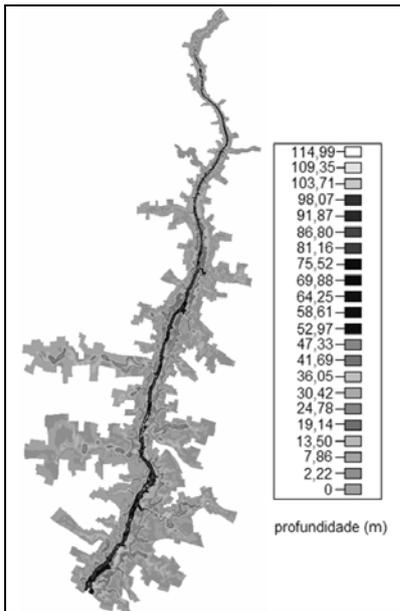


Figura 2 – Batimetria e contornos do reservatório.

A grade obtida é curvilínea, de forma que as linhas de grade na direção longitudinal acompanham a direção dos fluxos mais intensos, que causa minimização de erros numéricos. A grade possui 18.848 células com 649 pontos na direção latitudinal e 150 na direção longitudinal. Nas regiões onde o reservatório é mais estreito, a grade possui maior resolução, representando bem o fluxo em todo o domínio.

Após a confecção manual da grade, foi observada a qualidade desta. Fazendo uso das ferramentas gráficas disponíveis no sistema de modelagem Delft3D, foi possível construir uma grade numérica obedecendo fielmente às normas de qualidade, quanto à ortogonalidade, suavidade e resolução dos elementos da grade.

HIDRODINÂMICA

Para implementar o módulo hidrodinâmico são necessárias forçantes externas de entrada e saída, que neste caso podem ser as séries de níveis ou vazões. Estes dados (séries diárias) foram obtidos nas estações de monitoramento localizadas em Guaíra (na entrada) e na UHE de Itaipu (na saída).

Os contornos abertos de entrada e saída do modelo são Guaíra e Itaipu, respectivamente. A bacia de contribuição do afluente rio Paraná na

estação Guaíra corresponde a 98,7% do total de bacias afluentes, o que justifica ser a principal forçante da hidrodinâmica no interior do reservatório.

Na Figura 3 podem ser observados os pontos de monitoramento para obtenção de dados de nível, os contornos abertos de entrada (Guaíra) e saída (Itaipu), e também a localização da seção transversal (2 km a jusante de Guaíra) medida com ADCP para obtenção de dados de velocidade.

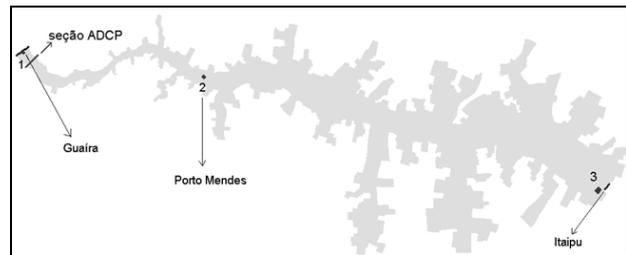


Figura 3 – Pontos de monitoramento, contornos e seção.

Três diferentes esquemas foram testados como condição de contorno, sendo estes: (1º) vazões na entrada e saída, (2º) série de nível na entrada e de vazões na saída e (3º) níveis na entrada e na saída.

As condições iniciais, como altura média do nível do reservatório e outros parâmetros físicos e numéricos utilizados nas simulações são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Condições iniciais, parâmetros físicos e numéricos utilizados nas simulações.

Parâmetro	Valor
Condição Inicial: Nível (m)	219,83
Passo de tempo (s)	30
Aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$)	9,81
Massa específica da água ($kg.m^{-3}$)	1.000
Temperatura da água ($^{\circ}C$)	22
Coefficiente de Rugosidade ($Chézy m^{0,5}.s^{-1}$)	65
Viscosidade turbulenta ($m^2.s^{-1}$)	1,0

Os resultados da série de nível para os três esquemas simulados de condições de contorno foram comparados com os dados medidos na estação Porto Mendes. O erro médio absoluto, que é a diferença média entre os dados medidos e os simulados, foi para o (1º) esquema de 111 cm, para o (2º) de 110 cm, e para o (3º) de 3,5 cm. A simulação que

apresentou erros menores foi a que utiliza séries de níveis como condições de contorno de entrada e de saída do modelo.

Além da calibração quanto ao nível, foi analisado também o campo de velocidades para a terceira simulação. Há uma diferença na magnitude da velocidade na entrada do reservatório (da ordem de 0,5 a 0,3 m/s) e próximo à barragem (da ordem de 0,1 m/s). A velocidade média obtida no reservatório foi de 0,25 m/s. Além disso, as velocidades obtidas da terceira simulação estão de acordo com as medidas pelo ADCP (0,375 m/s) na seção 2 km a jusante de Guaira.

SENSIBILIDADE E CALIBRAÇÃO

Análises de sensibilidade foram realizadas como forma de se conhecer o comportamento global do modelo e a resposta deste às variações, principalmente dos parâmetros físicos e numéricos (Tobón, 2002).

As análises de sensibilidade foram realizadas em relação à rugosidade de fundo, coeficiente de viscosidade turbulenta e resolução dos elementos da grade. Estas análises consistiram na avaliação da diferença dos resultados quanto à magnitude da velocidade das correntes e níveis produzidos nos pontos de monitoramento no reservatório, através de um certo número de simulações para cada um dos parâmetros avaliados. Comparações de níveis modelados com os níveis observados, nos pontos de monitoramento, foram realizadas como forma de facilitar a escolha do melhor cenário a ser utilizado.

As simulações para análise de sensibilidade foram realizadas para vinte e um dias do mês de março de 2000 (dia dez ao dia trinta) e tiveram as mesmas condições iniciais e parâmetros físicos utilizadas na análise da condição de contorno (Tabela 1).

Os coeficientes de rugosidade de Chézy do fundo de 45, 55 e 65 $m^{0.5}.s^{-1}$ foram testados. O modelo mostrou baixa sensibilidade à variação do coeficiente de Chézy, resultando em uma diferença de níveis e magnitude das correntes praticamente iguais para cada simulação. O coeficiente de Chézy de 65 $m^{0.5}.s^{-1}$ resultou nas menores diferenças quanto a níveis medidos e modelados (Figura 4) para a estação Porto Mendes e foi utilizado nos demais testes.

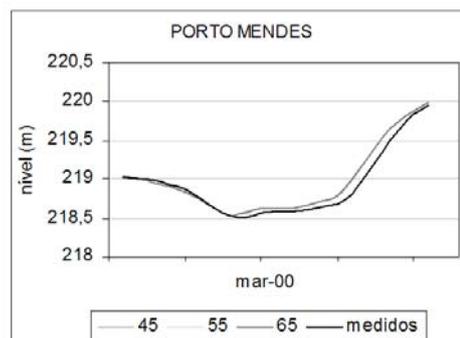


Figura 4 – Níveis gerados na análise de sensibilidade dos coeficientes de Chézy ($m^{0.5}.s^{-1}$).

Foram testados coeficientes de viscosidade turbulenta de 0,1; 0,5; 1 e 10,0 $m^2.s^{-1}$. O modelo mostrou baixa sensibilidade à variação do coeficiente de viscosidade turbulenta, resultando em uma diferença de níveis (Figura 5) e magnitude das correntes praticamente iguais para cada simulação. O coeficiente de 1,0 $m^2.s^{-1}$ foi escolhido para dar continuidade às simulações por apresentar as menores diferenças quanto a níveis medidos e modelados.

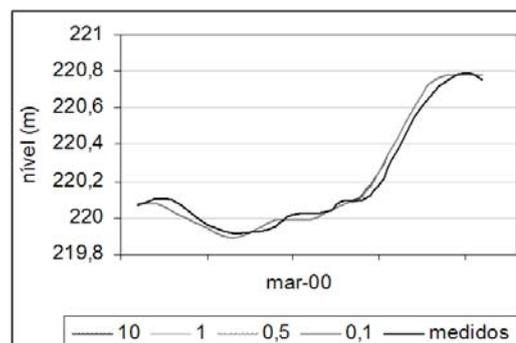


Figura 5 – Níveis gerados na análise de sensibilidade dos coeficientes de viscosidade turbulenta ($m^2.s^{-1}$).

Para economizar tempo e esforço computacional foi realizada uma simulação com uma grade menos refinada. A grade possui 4.264 células com 325 pontos na direção latitudinal e 75 na direção longitudinal. A ortogonalidade, suavidade e resolução dos elementos estão dentro dos padrões sugeridos pelo manual do modelo. Na Figura 6, é apresentada a comparação de níveis medidos e modelados para esta grade na estação Porto Mendes.

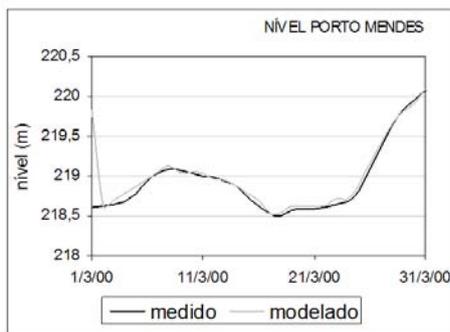


Figura 6 – Níveis gerados na análise de sensibilidade para resolução dos elementos da grade.

Esta simulação apresentou resultados muito semelhantes aos dados de níveis medidos. O erro médio absoluto entre os dados medidos e modelados é de 5 cm para Porto Mendes. O erro maior pode ser percebido nos momentos iniciais da simulação, pois é necessário um tempo de estabilização até que a simulação entre em equilíbrio com as forçantes de entrada e saída do modelo. Este fato também foi observado utilizando a grade mais refinada. Portanto, a grade menos refinada foi utilizada nas demais simulações.

SIMULAÇÃO TRIDIMENSIONAL

Campos de velocidade calculados para um mês completo utilizando a simulação em três e duas dimensões foram semelhantes, sugerindo que os fluxos tridimensionais não foram tão importantes na composição das velocidades.

ANÁLISE DOS SEDIMENTOS

Os parâmetros adotados nas simulações utilizando sedimentos no reservatório de Itaipu são apresentados na Tabela 2.

A taxa de erosão dos sedimentos é uma constante que depende da composição mineral, matéria orgânica, salinidade, entre outros. Para lamas naturais pouco consolidadas os valores relatados desta taxa de erosão estão na faixa de $0,00001 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ a $0,0005 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (Rijn, 1993).

Rijn (1993) apresentou resultados de tensões tangenciais críticas de erosão obtidas para sedimentos naturais em dois lagos localizados na Ho-

landa como sendo de $0,2 \text{ N.m}^{-2}$ e do rio Maas localizado na Holanda de $0,2 \text{ N.m}^{-2}$. As partículas de sedimentos, flocos ou até mesmo trechos da superfície do leito, serão erodidos quando a tensão tangencial aplicada no leito exceder o valor da tensão tangencial crítica de erosão, o qual depende das características do material e da estrutura do leito (Rijn, 1993).

Tabela 2 – Parâmetros adotados nas simulações de sedimentos.

Parâmetro	Valor
Taxa de erosão do sedimento ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	0,0001
Tensão tangencial crítica de erosão (N.m^{-2})	0,2
Tensão tangencial crítica de deposição (N.m^{-2})	0,08

Já para a tensão tangencial crítica de deposição, Rijn (1993) apresentou resultados obtidos para sedimentos naturais em dois lagos localizados na Holanda como sendo de $0,08$ e $0,1 \text{ N.m}^{-2}$ e do rio Maas (Holanda) de $0,06 \text{ N.m}^{-2}$. A deposição do sedimento ocorre quando a tensão tangencial no leito não é suficiente para re-suspender as partículas de sedimentos que entram em contato com o leito. A tensão tangencial na qual há uma taxa incipiente de deposição é denominada tensão tangencial crítica de deposição.

A massa específica do quartzo e de minerais argilosos é aproximadamente igual a 2650 kg.m^{-3} . Será considerado sedimento coesivo aquele que possui tamanho inferior a $0,065 \text{ mm}$ (Rijn, 1993).

Para sedimentos em suspensão, segundo o relatório preliminar de março de 1992 produzido pelos pesquisadores Newton de Oliveira Carvalho e Márcio Gomes Catharino na ELETROBRAS e intitulado avaliação do assoreamento de Itaipu – PR, a análise dos resultados de 170 medições realizadas em Guaíra levou à equação de correlação entre a descarga líquida e a descarga sólida em suspensão para este local (Neidert e Terabe, 1999):

$$Q_{SF} = 8,88 \times 10^{-7} \cdot Q^{2,6836} \quad (5)$$

onde: Q_{SF} é a descarga sólida final (t/dia) e Q é a vazão líquida (m^3/s).

A média de sedimentos suspensos entrando no reservatório por Guaíra para o período analisado (março de 2000 a março de 2001) é de 52.325 t/dia .

Pelo solo da região ser do tipo latossolo (Faccetti, Kump e Diaz, 2003), assumiu-se que os sedimentos em suspensão possuem uma fração de 80% de sedimentos do tipo argila grossa e outra de 20% de sedimentos do tipo areia média. Foram consideradas durante as simulações, alterações ocorridas no leito do reservatório que foram causadas por erosão e deposição de sedimentos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para analisar a dinâmica dos sedimentos no leito do reservatório de Itaipu e supondo que exista uma camada de sedimentos depositada no fundo do reservatório, foram realizadas duas simulações com sedimentos coesivos e não coesivos. Este procedimento é realizado para verificar a capacidade do fluxo de água em re-suspender e transportar esses sedimentos de fundo.

Uma camada com 1m de espessura, de sedimentos não coesivos de diâmetro 0,4 mm (areia) foi disponibilizada no leito do reservatório, como condição inicial. A simulação teve duração de 1 ano. Para todo o período simulado não foi constatada nenhuma alteração (erosão e deposição) no leito do reservatório. O fluxo de água não teve energia suficiente para alterar a camada de sedimentos arenosos do leito do reservatório.

Foi realizada a mesma simulação utilizando sedimentos coesivos com diâmetro de 0,06 mm para o período de tempo de um mês e foi disponibilizada uma camada de fundo com espessura de 1m de sedimentos em todo o reservatório. A vazão necessária para alterar o fundo do reservatório foi de 12.361 m³/s, que causou uma erosão de 3,5 mm em apenas uma célula da grade, para o dia em que esta vazão ocorreu. Esta célula apresenta uma velocidade integrada verticalmente de 0,48 m/s, que foi considerada elevada se comparada com as outras áreas do reservatório, por se encontrar na região onde o canal principal é mais estreito (entrada do reservatório).

Para a vazão de 13.640 m³/s a erosão máxima observada foi de 90 mm nas células vizinhas à citada anteriormente e a vazão de 13.202 m³/s causou uma erosão máxima de 160 mm. Já para a vazão de 13.099 m³/s foi observada uma erosão de 250 mm que permaneceu inalterada até o fim do período simulado, pois as vazões mantiveram-se inferiores. As alterações nas características de fundo (erosão/deposição) foram notadas apenas nos 8 km iniciais do reservatório.

Para sedimentos suspensos, foi realizada uma simulação para o período de 1 ano com sedimento sendo descarregado diariamente no principal afluente do reservatório (rio Paraná em Guaíra).

Não foi evidenciada erosão/deposição significativa para 1 ano de simulação utilizando o MORFAC igual a um. Para analisar o transporte de sedimentos foram traçadas 4 seções ao longo do reservatório, que podem ser observadas na Figura 7.

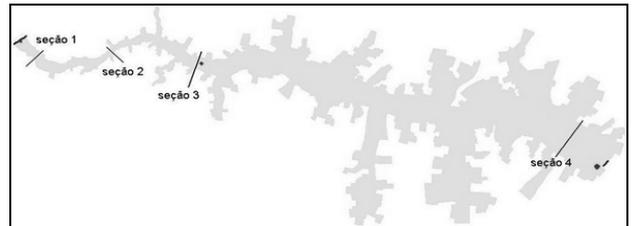


Figura 7 – Seções transversais no reservatório.

Para melhor visualização dos resultados, a Figura 8 apresenta o perfil do leito do reservatório de Itaipu.

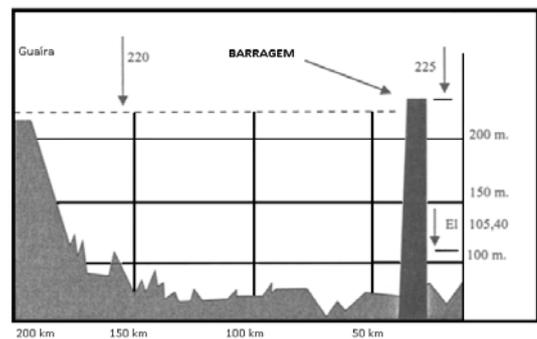


Figura 8 – Reservatório de Itaipu: perfil do leito (Itaipu Binacional, 2007).

O transporte total de sedimentos passando pelas seções ao longo de todo o período simulado pode ser observado na Figura 9.

A média de sedimentos suspensos transportados para todo o período analisado na seção 4 é de 0,093 m³/s (0,53 g/s transportados por m² da seção 4 para sedimentos argilosos), já pelo leito não é observado nenhum transporte. As partículas de sedimentos levaram 23 dias para chegar até a seção 4, desde o início da simulação.

Considerando que o total de sedimentos que passa pela seção 1 é de 100%, o decaimento para a seção 4 foi de aproximadamente 70%. Estes resultados e os das demais seções podem ser visualizados na Tabela 3.

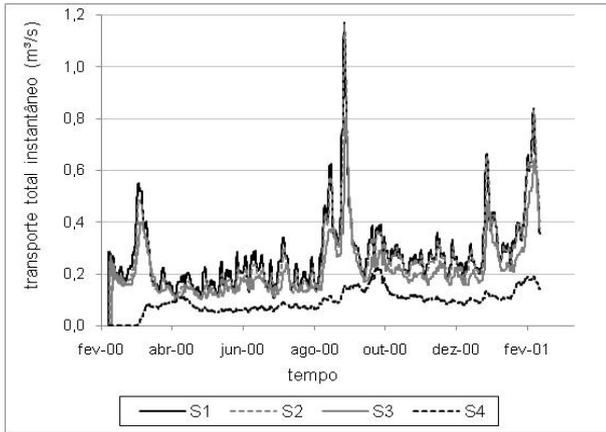


Figura 9 – Transporte total de sedimentos nas seções.

Tabela 3 – Dados e resultados da simulação de transporte total de sedimentos.

Local	Área da Seção (m ²)	Transporte de Sedimentos (%)
S 1	27.564	100,0
S 2	37.966	92,7
S 3	101.859	77,0
S 4	465.449	33,5

A simulação foi repetida utilizando o parâmetro MORFAC igual a 100. Neste caso foi observada deposição dos sedimentos ao longo do tempo (Figura 10).

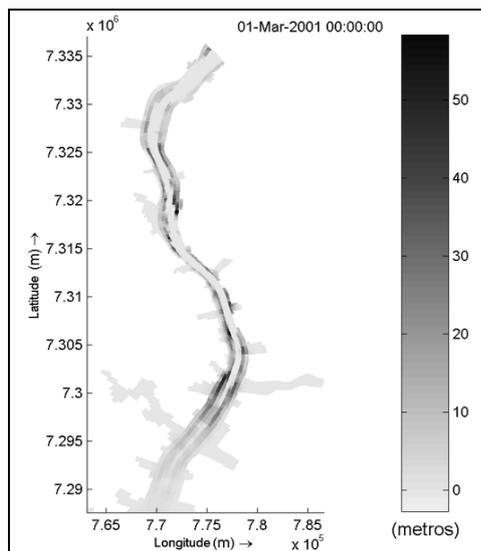


Figura 10 – Deposição de sedimentos em suspensão após 100 anos de simulação (MORFAC = 100, 1 ano).

As áreas de deposição estão localizadas nas margens do canal principal de entrada do reservatório. Para esta simulação, a previsão de deposição em alguns pontos das margens (representada pelas áreas mais escuras na Figura 10) do reservatório de Itaipu para 100 anos de simulação é de 50 m, com redução da profundidade. A deposição ocorreu nos 45 km iniciais do reservatório e nas outras áreas não foi observada nenhuma alteração na batimetria de fundo.

Os aspectos morfológicos são relevantes na dinâmica dos sedimentos. Nota-se pela Figura 8 que a área onde ocorreu a deposição (45 km iniciais) apresenta uma inclinação muito grande, favorecendo este acúmulo de sedimentos.

CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser inferidas deste trabalho:

- O programa Delft3D, aplicado em simulações hidrodinâmicas e de transporte de sedimentos, mostrou-se uma ferramenta capaz de atender aos objetivos deste trabalho.
- A simulação hidrodinâmica mostrou-se satisfatória e capaz de reproduzir a realidade do reservatório com fidelidade. Os níveis medidos e os modelados apresentaram um erro médio absoluto de 3,5 cm na estação de Porto Mendes para o período de um mês utilizando a condição de contorno de nível na entrada e na saída do modelo. Além disso, a velocidade obtida das simulações para a seção (na faixa de 0,2 m/s até 0,4 m/s) está próxima da velocidade medida com o ADCP (0,375 m/s).
- A análise de sensibilidade, realizada para verificar a influência do coeficiente de rugosidade e da viscosidade turbulenta nos níveis de água e na velocidade do reservatório mostraram baixa influência destes parâmetros na hidrodinâmica do reservatório e por consequência do transporte de sedimentos. Isto se deve ao fato de que as velocidades observadas no reservatório são muito baixas e a variação destes parâmetros não irá provocar grandes alterações.
- Simulações para sedimentos coesivos de fundo (0,06 mm de diâmetro) mostraram que a velocidade necessária para que seja

observada erosão no leito do reservatório é de 0,48 m/s, fato que só ocorreu na entrada do reservatório, próximo à Guaíra e para uma vazão observada de 12.300 m³/s.

- A análise do transporte de sedimentos (80% de argila grossa e 20% de areia média) em seções ao longo do reservatório mostra que parte do sedimento é depositada. Pelo leito não é observado nenhum transporte (arraste). O decaimento observado no transporte de sedimentos suspensos da seção mais próxima de Guaíra para a mais próxima da barragem foi de aproximadamente 70%.
- Os processos de erosão e deposição, segundo os resultados das simulações do modelo, ocorrem nos 45 km iniciais do reservatório, devido à maior intensidade do fluxo. A hidrodinâmica do reservatório tem importância primordial nos processos de transporte, deposição e re-suspensão dos sedimentos. Isto ocorre porque as velocidades observadas no interior do reservatório são muito baixas, principalmente próximas à barragem. Por este motivo, nos 100 km finais não ocorrem alterações na batimetria de fundo, os sedimentos que chegam até a barragem representam as partículas mais finas do material suspenso que não depositaram anteriormente e que ainda podem ser carregadas pelo fluxo.
- As análises deste estudo foram realizadas a partir de simulações utilizando o fator MORFAC igual a 100. Para estas simulações, a previsão de deposição em alguns pontos (Figura 9) das margens do reservatório de Itaipu nos 45 km iniciais para 100 anos de simulação é de 50 m, com redução da profundidade. Portanto, a taxa de deposição nestes locais é de 0,5 m/ano ou 1,37 mm/dia.
- As áreas que devem merecer uma atenção mais detalhada, com a implementação de programas de monitoramento de alterações batimétricas (deposição de sedimentos) correspondem às faixas de terra das margens nos 45 km iniciais do reservatório.

Depósitos de sedimentos na entrada de reservatórios podem gerar problemas de enchentes a montante. Já depósitos de material fino nas margens podem causar problemas ambientais, pois facilitam o crescimento de plantas aquáticas. Essa vegetação flutuante provocará problemas diversos, como seu

apodrecimento, deposição no fundo do lago e transformação em minerais, indo se adicionar ao assoreamento (ANEEL, 2000).

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer à UFPR pela oferta do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, e ao Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza – CEHPAR, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, pela disponibilidade do programa Delft 3D.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios. Brasília, 2000.
- Delft3D-FLOW. 1996. Manual. Version 3.06. WL-delft hydraulics.
- FACETTI-MASULLI, J. F.; KUMP, P.; DIAZ, Z. V. *Selected trace and minor elements in sediments of Itaipu dam reservoir*. Czechoslovak Journal of Physics, v. 53 (A), 2003.
- ITAIPU BINACIONAL. Dados técnicos, hidrologia e meteorologia, gestão ambiental. Consulta na Internet em: out/2007. Disponível em: <http://www.itaipu.gov.br/>
- NEIDERT S. H.; TERABE F. R. *Avaliação do processo de sedimentação do reservatório de Itaipu*. Jan/1999. CEHPAR, Curitiba, Paraná.
- RIJN V. L. C. *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Amsterdam. Aqua Publications, 1993.
- TOBÓN, C. A. P. 2002. *Metodología para la validación de modelos hidrodinámicos utilizando amplia información de campo: aplicación a la Bahía Meldrof en la Costa Del Mar Del Norte Alemán*. Tese de doutorado. Universidad Nacional de Colombia – Posgrado en Reaprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Medellín, 2002.

Implementation of a Numerical Model for Sediment Transport Assessment in the Itaipu Reservoir – State of Paraná, Brazil

ABSTRACT

In order to learn about the dynamics of Itaipu reservoir, this study proposes the implementation of a Delft-3D numerical model that aims to assess the movement of its waters and sediment transport, identifying the areas that present the highest percentage of erosion/deposition. Besides the implementation of the hydrodynamic module, sensitivity analysis tests were carried out. Since the hydrodynamics proved satisfactory, scenarios were created with input from sediments of different types (silt and clay) and sources (in bed and suspension) and the depositions and transport along the reservoir were reviewed. No additional erosion/deposition was seen beyond the first 45 km of the reservoir in any of the simulations performed.

Keywords: numerical model, sediment transport, Itaipu reservoir.