

MODELAGEM DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS COESIVOS PARTE 2: TESTES DE DEPOSIÇÃO

D. A. Botelho^{1}; M. V. Estigoni^{2*}; I. A. L. Teakle³; R. B. Miranda⁴; O. Veronez⁵ & F. F. Mauad⁶*

Resumo – Na primeira parte desta série de três artigos foi apresentado os principais conceitos e fundamentação teórica empregados no desenvolvimento de um modelo de transporte de sedimentos coesivos acoplado a um modelo hidrodinâmico tridimensional. Este segundo trabalho da série apresenta os testes preliminares do modelo em desenvolvimento no que tange a velocidade de deposição das partículas e de sua deposição efetiva no leito. Os equacionamentos das velocidades de deposição se mostraram capazes de definir uma gama de comportamentos que levem em consideração diversas classes de sedimento, bem como efeitos de inibição da deposição quando estes se encontram em altas concentrações. A utilização de diferentes métodos para o cálculo da velocidade de deposição do sedimento possibilitou obtenção de um modelo versátil, o qual potencialmente poderá ser aplicado com relativa facilidade nos processo de calibração e validação em casos encontrados em ambientes naturais.

Palavras-Chave – Modelagem de Transporte de Sedimentos, Sedimentos Coesivos, Deposição de Sedimentos.

COHESIVE SEDIMENT TRANSPORT MODELLING PART 2: SETTLING AND DEPOSITION TESTS

Abstract – In Part 1 of these three-part series, the concepts and theoretical foundations adopted in a coupled three-dimensional hydrodynamic and cohesive-sediment transport model were presented. In this Part 2 of the series, preliminary model tests of sediment settling and bed deposition were undertaken. The equations adopted for the settling velocities were shown to be able to reproduce a wide range of sediment behavior as well as the effects of hindered settling under high sediment concentrations. The use of different methods for the computations of the settling velocity allowed the production of a versatile model that can be applied with relative ease for calibration and validation in prototype environmental conditions.

Keywords – Sediment Transport Modelling, Cohesive Sediments, Sediment Settling and Deposition.

1* – BMT WBM Pty Ltd.. - Cidade de Brisbane, QLD, Austrália < Daniel.Botelho@bmtwbm.com.au >

2* – Doutorando em Ciências da Engenharia Ambiental, Núcleo de Hidrometria - Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (NH/CHREA/EESC/USP). Tel: (16) 33738255 < marcus.estigoni@usp.br >

3 – BMT WBM Pty Ltd.. - Cidade de Brisbane, QLD, Austrália

4 – Doutorando em Ciências da Engenharia Ambiental, Núcleo de Hidrometria - Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (NH/CHREA/EESC/USP). Tel: (16) 33738255 < eng.renato.miranda@gmail.com >

5 – AES Tietê S.A. - Cidade de Mogi-Guaçu - SP < odemberg.veronez@aes.com>

6 – Professor da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, EESC – USP. Tel: (16) 33738255 < mauadffm@sc.usp.br >

INTRODUÇÃO

Modelos computacionais, se corretamente validados, constituem ferramentas poderosas para estudar os mecanismos dominantes no transporte de sedimentos em reservatórios. Em particular, modelos de transporte de sedimentos acoplados a modelos hidrodinâmicos multidimensionais proporcionam uma descrição da variação espaço-temporal dos processos envolvidos na dinâmica dos sedimentos. Esses modelos podem ser adotados para avaliar a eficácia de intervenções de engenharia nos processos de transporte e deposição de sedimentos, e podem produzir uma redução de custo significativa no gerenciamento do assoreamento, da quantidade e qualidade de água de reservatórios e, conseqüentemente levar ao prolongamento da vida útil dos mesmos. Adicionalmente, a aplicação desses modelos pode vir a subsidiar mudanças na política de operação de um determinado reservatório, levando em consideração as características e dinâmica dos sedimentos que para ele são carregados.

Neste contexto, a publicação dos primeiros testes de um modelo hidrodinâmico de transporte de sedimentos coesivos em desenvolvimento está organizada nos artigos “Modelagem de transporte de sedimentos coesivos” dividida em três partes: “Fundamentos Teóricos”, “Testes de deposição” e “Testes de consolidação e erosão”. O primeiro trabalho desta série (Estigoni *et al.*, 2013) apresenta as principais referências bibliográficas sobre transporte de sedimentos coesivos, bem como todo o embasamento teórico utilizado nas simulações do presente trabalho. Este artigo é a segunda parte desta publicação em série e tem por objetivo apresentar os testes preliminares do modelo em desenvolvimento no que tange a configuração hidrodinâmica do modelo, testes da velocidade de deposição de sedimento na coluna d’água e da deposição efetiva do mesmo no leito do reservatório.

MATERIAIS E MÉTODOS

Domínio Computacional

Para a execução dos testes preliminares do modelo foi criado virtualmente um trecho de entrada de um afluente em um reservatório. Este trecho corresponde à: um canal de seção retangular de 3 m de profundidade, 10 m de largura e comprimento de 100 m ligados por meio de uma zona transicional tipo delta de 50 m de comprimento à uma zona lacustre de seção trapezoidal de 100 m de comprimento, largura superficial de 60 m, largura de base e profundidade de 10 m (Figura 1).

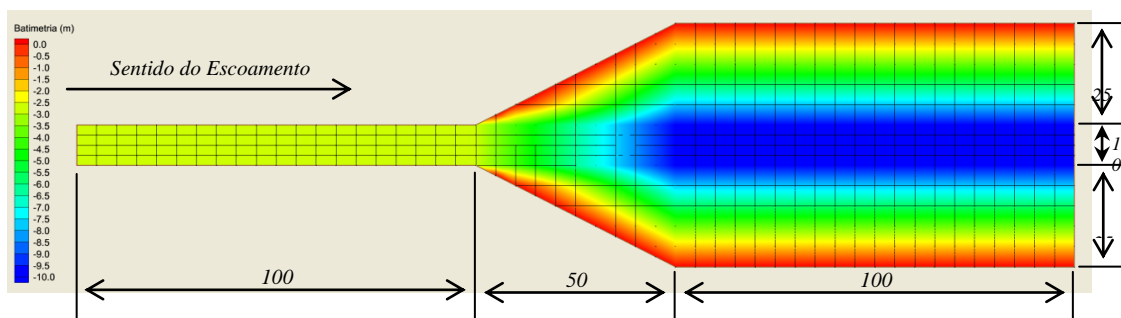


Figura 1 - Malha Computacional e Batimetria Adotada nos Testes. Distâncias em metros. (Fonte: Autor)

A malha computacional horizontal foi configurada com células retangulares de 2,5 m x 5 m na seção central (do canal de aproximação, através do delta até o escoamento de saída do reservatório). Células retangulares de 5 m x 5 m foram adotadas no restante da seção lacustre e para maioria da área de transição, enquanto células triangulares de dimensões diversas foram adotadas para manter o formato trapezoidal da zona de transição (Figura 1). Foi adotada a altura de 0,5 m para as células, formando um total de 20 camadas. O escoamento de entrada foi distribuído

regularmente na seção de montante do reservatório e o escoamento de saída foi configurado entre 8,0 m e 10,0 m de profundidade na seção de jusante justaposta ao canal central.

Configuração Hidrodinâmica

Nos testes foram adotadas descargas iguais para o escoamento de entrada e de saída, sendo a intensidade da descarga definida em função de cada um dos testes. Foram desconsiderados os efeitos de temperatura e salinidade na densidade da água, as forçantes meteorológicas e da tensão de cisalhamento dos ventos. Para os demais parâmetros de configuração do modelo foram adotados valores usuais em modelagem hidrodinâmica que são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros do Modelo Hidrodinâmico.

Parâmetro	Valor Adotado
Modelo de Viscosidade e Dispersão Turbulenta na Horizontal	Smagorinsky*
Coefficiente de Smagorinsky para Viscosidade*	0,5
Coefficiente de Smagorinsky para Dispersão*	0,2
Modelo de Viscosidade e Mistura Turbulenta na Vertical	Constante
Coefficiente de Viscosidade Turbulenta Vertical	$1,0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Coefficiente de Dispersão Vertical	$1,0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Modelo de Arrasto de Fundo	Manning
Coefficiente de Manning	0,025

*NOTA: para maiores detalhes sobre o significado dos parâmetros e os valores adotados vide Smagorinsky (1963) ou Estigoni *et al.* (2013).

TESTES DE VELOCIDADE DE DEPOSIÇÃO

Para os testes de velocidade de deposição, foi utilizada uma descarga líquida de $5,0 \text{ m}^3/\text{s}$. A condição inicial assumiu uma concentração nula de sedimentos no reservatório. A erosão foi desabilitada na configuração do modelo. Três classes de sedimentos foram inseridas como condições de contorno à montante do reservatório, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Características dos Sedimentos nos Testes de Velocidade de Deposição.

Classe de Sedimento	Diâmetro Mediano (mm)	Velocidade de Deposição de Stokes (mm/s)	Tensão de Cisalhamento de Deposição (Pa)	Densidade Seca (kg/m^3)
SED 1 - Argila	0,2	$1,0 \times 10^{-5}$	$8,0 \times 10^{-4}$	2650
SED 2 - Silte Fino	4,1	$1,5 \times 10^{-2}$	$5,0 \times 10^{-3}$	2650
SED 3 - Silte Médio	15,0	$2,0 \times 10^{-1}$	$8,0 \times 10^{-3}$	2650

Regime $C_{floc} \leq C \leq C_{hind}$

Em baixas concentrações, a formulação de Stokes se aplica a todos os sedimentos. A partir da concentração em que os flocos começam a interferir na velocidade de sedimentação, C_{floc} , a formulação RZ (Richardson e Zaki, 1954) adaptada se aplica tanto ao aumento quanto à inibição da velocidade de deposição automaticamente. A formulação WVK (Winterwerp e Van Kasteren, 2004), no entanto, assume que a inibição só se inicia a partir da concentração de inibição, C_{hind} . Os únicos parâmetros em comum entre as duas formulações são C_{floc} e C_{gel} (concentração para velocidade de sedimentação nula ou ponto de formação de gel, do inglês *gelling point*). Estes

parâmetros foram adotados para comparar os efeitos das duas formulações (Tabela 3). As concentrações adotadas no contorno de montante foram de 500 mg/L para cada classe.

Tabela 3 - Parâmetros adotados nos testes de velocidade de deposição.

Modelo	C_{floc} (mg/l)	C_{hind} (mg/l)	C_{gel} (mg/l)	(mm/s)
Richardson & Zaki adaptado	300	-	$1,2 \times 10^5$	-
Winterwerp & Van Kesteren		3000		2,0

As velocidades de deposição após 5 horas de simulação para as formulações de RZ e WVK são apresentadas nas Figura 2a e 2b, respectivamente. As formulações apresentam comportamentos distintos nessa faixa de valores. Para RZ, as três classes de sedimento se comportam relativamente independentes uma das outras, a classe de sedimentos mais grosseiro (SED 3) apresentou velocidades de deposição significativamente maiores que a classe de sedimentos mais finos. Isso se justifica porque a velocidade de deposição é proporcional à velocidade de deposição de Stokes de cada classe. Como resultado, a concentração de sedimentos suspensos na coluna d'água é altamente diferenciada entre as classes (Figura 3a), sendo que os sedimentos grosseiros se mantêm predominantemente à jusante da zona lacustre e os sedimentos mais finos capazes de se manterem suspensos à medida que adentram o reservatório. Nota-se que se fossem utilizados velocidades de deposição associadas aos flocos (e não as partículas isoladas), as diferenças seriam menos gritantes. Por exemplo, utilizando os valores de Nicholson e O'Connor (1986) para uma concentração total de 1500 mg/L, a velocidade de deposição dos flocos seria de 0,9 mm/s, alinhando-se com as velocidades de deposição dos sedimentos mais grosseiros (Figura 2a).

Em contrapartida, neste teste a formulação WVK manteve comportamento mais similar entre as classes de sedimento, com maior uniformização tanto nas velocidades de deposição (Figura 2b) como na concentração de sedimentos (Figura 3b). Este fato se justifica porque a velocidade de deposição é proporcional à diferença entre a velocidade máxima de deposição e a velocidade de Stokes. Sendo a concentração total comparável à C_{hind} , a escala dos valores da velocidade de deposição apresentou pouca diferença entre as classes. Para as concentrações menores, as velocidades de deposição para cada classe tenderiam às velocidades de Stokes e, em consequência, produziriam um comportamento mais distinto. Esse efeito nas velocidades de deposição é, de certa maneira, presente na superfície e seções de jusante do reservatório (Figura 2b), onde as concentrações são inferiores às seções de montante (Figura 3b).

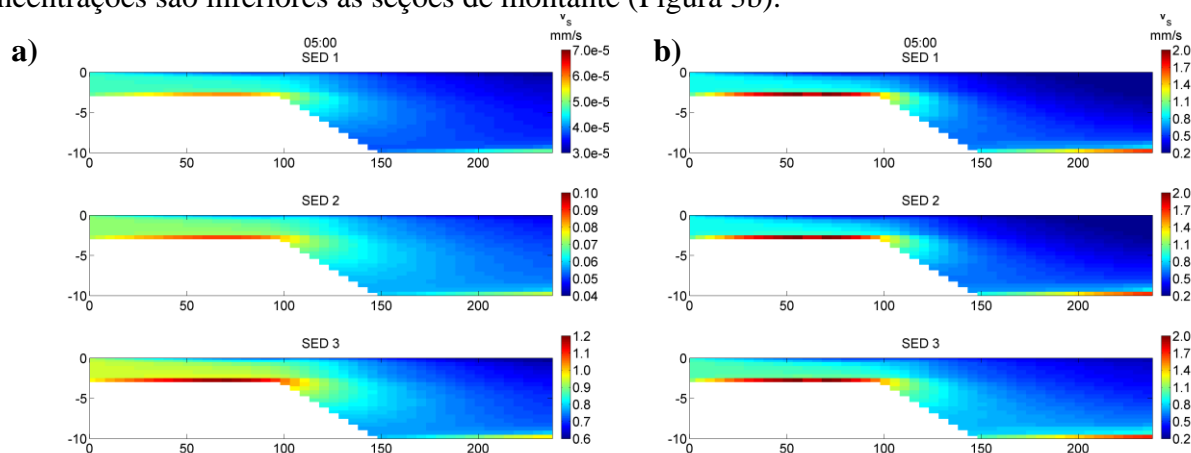


Figura 2 – Velocidade de sedimentação após 5 horas do início da simulação com regime predominante $C_{floc} \leq C \leq C_{hind}$. a) Formulação RZ adaptada; b) Formulação WVK. NOTA: as escalas de cores variam em cada uma das representações.

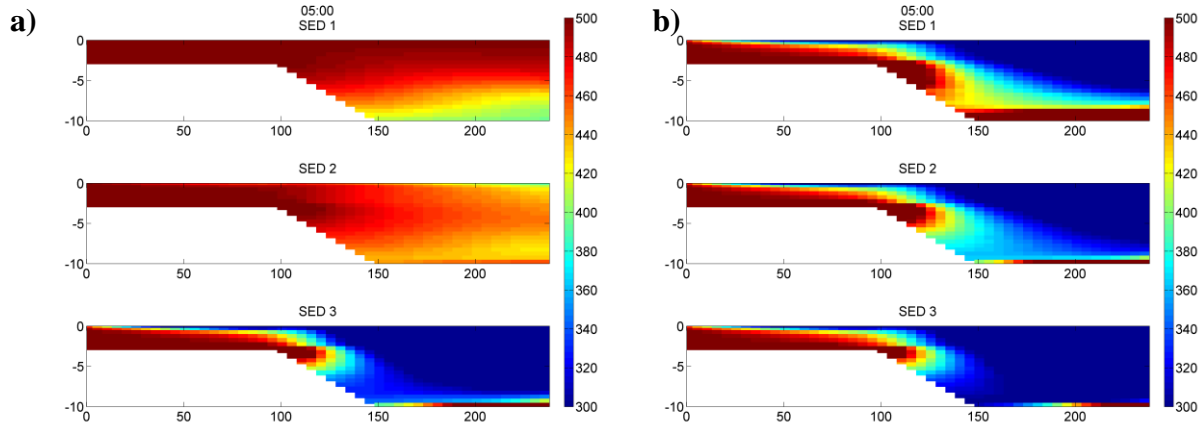


Figura 3 – Concentração de sedimentos suspensos após 5 horas do início da simulação com regime predominante $C_{floc} \leq C \leq C_{hind}$. a) Formulação RZ adaptada; b) Formulação WVK.

Regime $C > C_{hind}$

As concentrações adotadas no contorno de montante correspondem a 5000 mg/L para cada classe de sedimentos, e os outros parâmetros foram mantidos iguais ao teste anterior. Ressalta-se que C_{hind} é igual a 3000 mg/L. Resultados da formulação RZ e WVK são apresentados na a e 4b, respectivamente.

Foi observado o mesmo comportamento para as formulações, ou seja, uma separação marcada nas velocidades de deposição para cada classe de sedimento para RZ e uma maior similaridade para WVK. Nota-se que a velocidade de deposição com a formulação RZ aumentou em relação ao regime anterior (Figura 2a e

a), no entanto, não aumentou na mesma proporção em que a carga de sedimentos no contorno de montante (i.e. 10 vezes maior). No caso da formulação WVK, as velocidades de deposição se mostraram um pouco elevadas em relação ao regime anterior, apesar de registrarem uma mesma ordem de magnitude (provavelmente porque $C \ll C_{gel}$). No entanto, pode-se notar que houve marcada inibição das velocidades de deposição na entrada do reservatório, e um aumento progressivo das velocidades de deposição na zona lacustre. Isso se deve ao fato de que as concentrações são menores que C_{hind} nessa área (Figura 5).

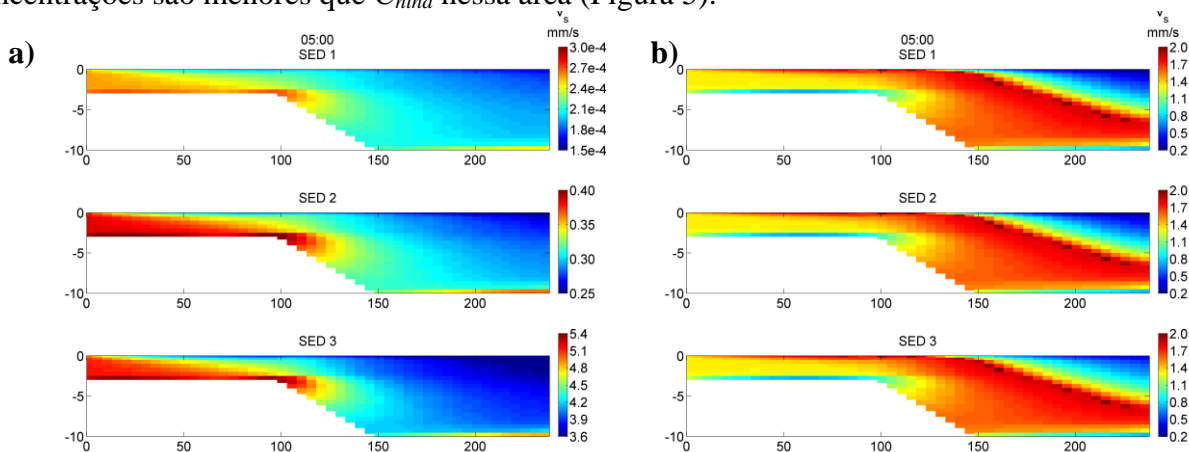


Figura 4 – Velocidade de deposição após 5 horas do início da simulação com regime predominante $C > C_{hind}$. a) Formulação RZ adaptada; b) Formulação WVK. NOTA: as escalas de cores variam em cada uma das representações.

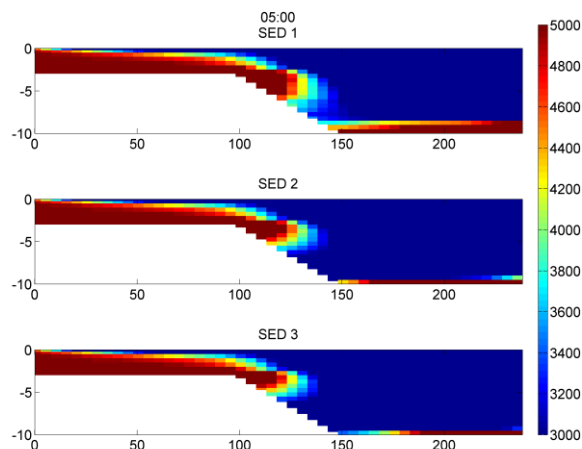


Figura 5 - Concentração de sedimentos suspensos após 5 horas do início da simulação com regime predominante $C > C_{hind}$. Formulação WVK.

TESTES DE DEPOSIÇÃO NO LEITO

Nesta etapa as condições hidrodinâmicas, parâmetros erosivos e condições iniciais do modelo foram mantidos tais quais os testes da velocidade de deposição. Foram utilizadas três classes de sedimento com características semelhantes ao teste anterior. As tensões de cisalhamento críticas de deposição estão apresentadas na Tabela 4. A concentração de sedimentos de montante para cada classe de sedimento foi mantida igual a 500 mg/L e a formulação RZ foi utilizada para cálculo da velocidade de deposição na coluna d'água. O efeito da erosão foi desabilitado neste teste, de modo que o material depositado no leito não é ressuspensionado para a coluna d'água.

Os resultados dos testes ao final da simulação (2 dias) são apresentados na Figura 6a (τ_d baixo) e na Figura 6b **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (τ_d alto). As figuras mostram a tendência de todos os sedimentos de se depositarem na área de delta, particularmente se deslocando para as laterais do reservatório, onde as velocidades e as respectivas tensões de cisalhamento de fundo são menores. A área do canal central na zona lacustre apresentou um grau reduzido de deposição, já que o escoamento de saída induz velocidades relativamente altas ao longo do mesmo. O modelo também mostrou a tendência de acumulação de sedimentos, particularmente, mais grosseiro, no local do escoamento de saída.

No caso τ_d baixo, a classe SED 3 (Silte Médio), por ter velocidades de deposição mais elevadas, também apresentou um grau elevado de deposição no canal de entrada. No caso τ_d alto, com o aumento da tensão crítica de deposição (ou seja, menos restritiva ao processo), uma maior quantidade de sedimentos se depositou no fundo do reservatório, tanto no canal de entrada, quanto na zona lacustre.

Tabela 4 - Tensão de cisalhamento crítica de deposição utilizada.

Classe de Sedimento	Tensão de Cisalhamento Crítica de Deposição (Pa)	
	τ_d baixo	τ_d alto
Argila	$8,0 \times 10^{-4}*$	$8,0 \times 10^{-2}$
Silte Fino	$5,0 \times 10^{-3}*$	$1,0 \times 10^{-1}$
Silte Médio	$8,0 \times 10^{-3}*$	$1,5 \times 10^{-1}$

*NOTA: Similar ao teste da velocidade de deposição para regime $C_{floc} \leq C \leq C_{hind}$.

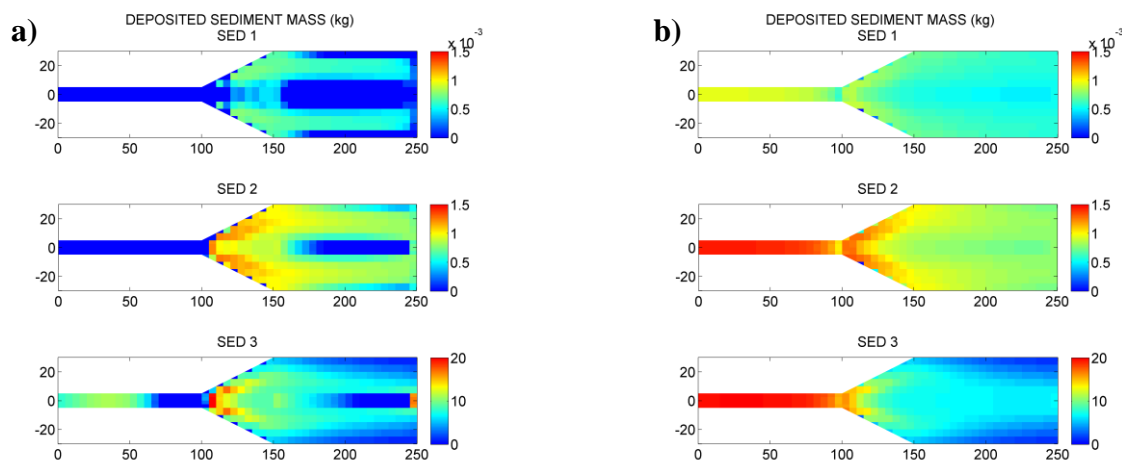


Figura 6 – a) Massa de sedimentos depositados ao final da simulação (2 dias) para o caso τ_d baixo. b) Massa de sedimentos depositados ao final da simulação (2 dias) para o caso τ_d alto.

CONCLUSÕES

Como apresentado por Simões e Yang (2006) para a modelagem de sistemas ambientais deve-se primeiro interpretar o protótipo (local a ser modelado), solucionar matematicamente e numericamente e então comparar os resultados com o protótipo, sendo a solução encontrada fiel, o modelo matemático e numérico é validado. Deste modo, pode-se afirmar que um modelo é versátil quando possuir a potencialidade de se utilizar diferentes soluções matemáticas e numéricas, bem como a potencialidade de alteração da configuração dos parâmetros de entrada.

Objetivando a versatilidade, o modelo em desenvolvimento foi concebido com a capacidade de utilizar duas formulações distintas para representação da velocidade de deposição de sedimentos, propostas nos trabalhos de Richardson e Zaki (1954) e por Winterwerp e Van Kesteren (2004), bem como a potencialidade de se alterar parâmetros de configuração.

Estes testes iniciais mostraram bom desempenho do modelo como um todo, indicando que a inserção das soluções matemáticas do transporte de sedimentos coesivos ao modelo hidrodinâmico TUFLOW foi bem sucedida. Numericamente os resultados das modelagens, empregando as formulações RZ e WVK apresentaram grande diferença, indicando sucesso na obtenção de um modelo versátil, o qual possibilita com a alteração destas configurações uma relativa facilidade no processo de calibração e validação do modelo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à AES Tietê S.A que por meio do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento do Setor de Energia Elétrica (P&D ANEEL) financia esta pesquisa, à FIPAI, à Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP, à BMT WBM Pty Ltd., e ao CNPq.

REFERÊNCIAS

ESTIGONI, M. V.; BOTELHO, D. A.; TEAKLE, I. A. L. *et al.* (2013). *Modelagem de transporte de sedimentos coesivos parte 1: Fundamentos Teóricos*, enviado para avaliação e possível publicação no XX SBRH – Simpósio Brasileiro de Recursos hídricos. Bento Gonçalves – RS.

NICHOLSON, J. & O’CONNOR, B.A. (1986). Cohesive Sediment Transport Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(7): 621-640.

RICHARDSON, J.F. & ZAKI, W. N. (1954), *Sedimentation and fluidisation. Part 1*. Transactions of the Institution of Chemical Engineering 32:35-53.

SIMÕES, F. J. M & YANG, C. T. (2006). Sedimentation Modeling for Rivers and Reservoirs In: *Erosion and Sedimentation Manual*, U.S. Bureau of Reclamation.

SMAGORINSKY, J (1963). General circulation experiments with the primitive equations, i. the basic experiment. *Monthly Weather Review*", 91: 99-164.

WINTERWERP, J.C. & Van KESTEREN, W.G.M. (2004). *Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment*. Elsevier.