

## MODELAGEM DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS COESIVOS PARTE 3: TESTES DE EROSIÃO E CONSOLIDAÇÃO

*D. A. Botelho<sup>1\*</sup>; M. V. Estigoni<sup>2\*</sup>; I. A. L. Teakle<sup>3</sup>; R. B. Miranda<sup>4</sup>; O. Veronez<sup>5</sup> & F. F. Mauad<sup>6</sup>*

**Resumo** – Na primeira parte desta série de três artigos foram apresentados os principais conceitos e a fundamentação teórica empregados no desenvolvimento de um modelo de transporte de sedimentos coesivos acoplado a um modelo hidrodinâmico tridimensional. O segundo trabalho da série apresenta os testes preliminares de deposição. Este terceiro, e último, trabalho da série apresenta os testes de erosão e consolidação do leito, além de uma conclusão geral sobre os três artigos da série. Nas simulações realizadas o modelo mostrou-se versátil, tanto para o equacionamento que representa a erosão quanto para a rotina desenvolvida para a análise da consolidação do leito utilizando o conceito de camadas. Em particular, o modelo mostrou-se capaz em apresentar variações espaciais e temporais para diversas classes de sedimento empregadas nas simulações. Considerando o desempenho satisfatório do modelo em todos os testes realizados (velocidade de deposição, deposição efetiva, erosão e consolidação do leito) acredita-se no alto potencial de aplicabilidade do modelo em situações mais complexas encontrados em protótipos ambientais reais.

**Palavras-Chave** – Modelagem de Transporte de Sedimentos, Sedimentos Coesivos, Erosão e Consolidação de Sedimentos.

## COHESIVE SEDIMENT TRANSPORT MODELLING PART 3: EROSION AND CONSOLIDATION 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 Part 2, preliminary cohesive sediment deposition tests were presented. In this Part 3, the last of the series, erosion and bed consolidation tests were presented followed by a general conclusion of the series of articles. In the simulations performed, the model was shown to be versatile for the approaches adopted for erosion parameterization as well as for the bed consolidation analysis, assuming a layered distribution. In particular, the model was shown to produce spatial and temporal variations for the several sediment classes employed in the simulations. Considering the satisfactory performance of the model in all tests performed (settling velocity, bed deposition, bed erosion and bed consolidation) it is believed the model can be successfully applied in more complex cases such as real environmental prototypes.

**Keywords** – Sediment Transport Modelling, Cohesive Sediments, Sediment Erosion and Consolidation.

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

Apesar da significância da dinâmica de sedimentos em reservatórios, desvendar os processos nela envolvidos não é uma tarefa trivial, já que os processos variam de acordo com: as propriedades do sedimento, as características físicas de tributários e dos lagos principais, a operação do reservatório, e o comportamento induzido pelas tensões cisalhantes dos ventos. Em consequência, o caráter da dinâmica de sedimentos não é linear, com acentuada variação temporal e espacial, mesmo considerando um único reservatório. Desta forma, o desenvolvimento de um modelo matemático que traduza fielmente este comportamento deve estar baseado nos processos de transporte de material, deposição deste material no leito, consolidação do sedimento depositado no leito, erosão e ressuspensão do material depositado à coluna d'água.

Com este intuito, 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”. No primeiro trabalho desta série (ESTIGONI *et al.*, 2013) foram apresentadas as principais referências bibliográficas sobre transporte de sedimentos coesivos, bem como todo o embasamento teórico utilizado nas simulações do presente trabalho. O segundo trabalho (BOTELHO *et al.*, 2013) apresenta 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 deposição efetiva do mesmo no leito do reservatório. Este artigo é o terceiro desta série de publicações e tem por objetivo apresentar os testes preliminares do modelo em desenvolvimento no que tange a consolidação do sedimento efetivamente depositado no leito do reservatório e os processos erosivos envolvidos na ressuspensão deste material.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução dos testes foi criado um reservatório fictício, sendo o domínio computacional da simulação correspondente a um trecho de entrada de um tributário em um reservatório. A configuração hidrodinâmica foi definida em função de cada teste realizado, os efeitos de tensão de cisalhamento dos ventos e variação de densidade da água foram desconsiderados, e outros parâmetros foram adotados baseados em valores usuais.

Maiores detalhes da definição dos parâmetros da configuração hidrodinâmica são apresentados no segundo trabalho desta série de publicações (BOTELHO *et al.*, 2013). O domínio computacional foi dividido em três porções (denominadas “Materiais” na Figura 1). As características de cada uma delas foram estabelecidas em função de cada um dos testes.

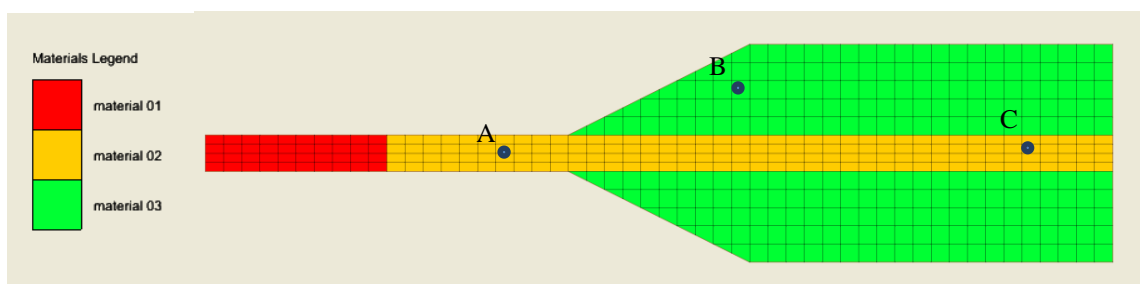


Figura 1 - Disposição horizontal das regiões com diferentes características de camadas sedimentares no domínio computacional. Os pontos A, B e C foram utilizados nos testes de consolidação.

## EROSÃO

Para os testes de erosão, tanto as condições hidrodinâmicas e demais condições iniciais do modelo, quanto as três classes de sedimento simuladas foram as mesmas apresentadas no segundo trabalho desta série de publicações (BOTELHO *et al.*, 2013). Para os testes aqui discutidos, as tensões de cisalhamento críticas de deposição foram mantidas com valores relativamente baixos (Tabela 1). Isso foi feito de maneira a assegurar condições propícias à erosão na simulação.

Tabela 1 - Tensão de cisalhamento crítica de deposição utilizada nos testes de erosão.

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

Nestes testes a primeira porção corresponde à metade do canal de aproximação e foi estabelecida com parâmetros para anular a taxa de erosão ( $M_{se} = 0,0 \text{ g/m}^2/\text{s}$ ). A segunda porção corresponde ao restante da disposição horizontal do domínio computacional. Nesta segunda porção uma das camadas de sedimento foi iniciada com as características descritas na Tabela 2. O delineamento dessas duas porções foi feito para ilustrar como o modelo pode ser configurado de maneira a refletir regiões mais suscetíveis à erosão do que outras.

Tabela 2. Características da camada sedimentar associada aos materiais 02 e 03.

$\tau_{se}$ (Pa)	$\rho_d$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$M_{se}$ ( $\text{kg/m}^2/\text{s}$ )	Massa de Argila ( $\text{kg/m}^2$ )	Massa de Silte Fino ( $\text{kg/m}^2$ )	Massa de Silte Médio ( $\text{kg/m}^2$ )
0,015	200	0,005	100,0	75,0	25,0

A concentração do contorno de montante para cada classe de sedimento foi mantida igual a 0 mg/L (zero) e a formulação RZ (RICHARDSON & ZAKI, 1954) foi utilizada para o cálculo da velocidade de deposição na coluna d'água. Utilizando-se de uma concentração nula no contorno de montante faz-se com que a concentração de sedimentos na coluna d'água seja decorrente somente dos efeitos de erosão.

A distribuição de massa (fracional) após 1 hora e 12 horas de simulação é apresentada na Figura 2a e 2b, respectivamente. As figuras mostram a tendência de erosão (perda de massa do fundo) na área do canal principal imediatamente à jusante do delta, nas áreas rasas (marginais) do delta, e (mais perceptivelmente na Figura 2b) à jusante do escoamento de saída. Isso se deu devido às maiores tensões de cisalhamento do fundo dessas áreas. As figuras também mostram que não houve perda de massa do sedimento na porção inicial do canal de aproximação (onde a erosão foi propositadamente anulada).

Comparando a Figura 2a com a Figura 2b, nota-se que há acentuada perda de massa do sedimento à jusante do delta, ao ponto que a massa no sedimento é exaurida. Apesar das tensões de cisalhamento no fundo se manterem constantes no decorrer da simulação, o efeito dessa redução de massa ocasionou uma diminuição da concentração de sedimentos na coluna d'água (Figura 3a e 3b). Em particular, nota-se a diferença das escalas de cor nas figuras, e o fato das concentrações mais elevadas ocorrerem um pouco mais à jusante na Figura 3b, nesta mesma figura outro fato notável é o aumento das concentrações à jusante do escoamento de saída.

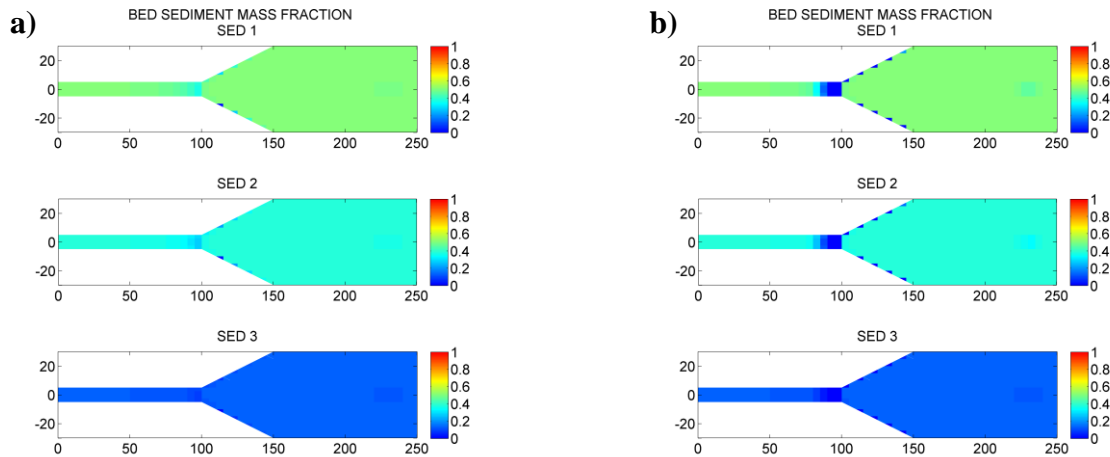


Figura 2 – a) Distribuição de Massa no Sedimento após 1 h. b) Distribuição de massa no sedimento após 12 h. Para ambos os casos a massa é normalizada pela massa total inicial de 200 kg/m<sup>2</sup>.

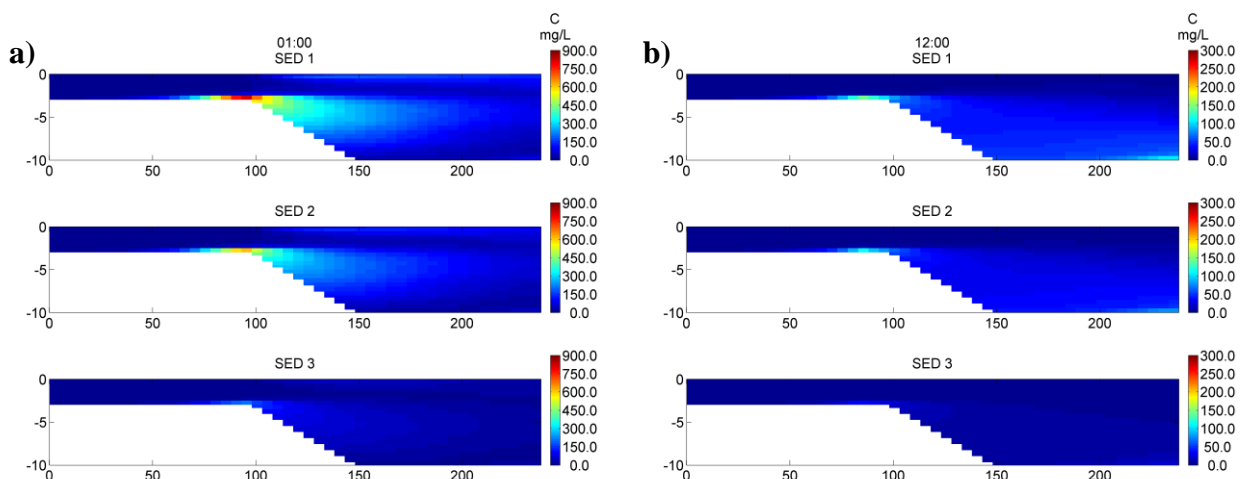


Figura 3 – a) Concentração de sedimentos na coluna d'água após 1 h. b) Concentração de sedimentos na coluna d'água após 12 h. NOTA: as escalas de cores variam de a) para b).

## CONSOLIDAÇÃO

Para os testes de consolidação, os efeitos do modelo hidrodinâmico foram desabilitados, estabelecendo vazões nulas tanto na entrada quanto na saída. Em decorrência da ausência de cisalhamento no fundo, a taxa de deposição foi maximizada e a taxa de erosão anulada. Estas simulações utilizaram uma única classe de sedimento com velocidade de deposição constante de  $5 \times 10^{-2}$  mm/s. Dois casos foram simulados nos quais as concentrações iniciais uniformes na coluna d'água foram especificadas, como:

- Caso i: 0 mg/L;
- Caso ii: 100 mg/L.

Três camadas, cujos parâmetros são definidos na Tabela 3, foram utilizadas para definir a disposição do leito. Nota-se que os parâmetros de erosão não foram definidos, já que essa foi desabilitada.

Tabela 3 - Características Iniciais da Camada Sedimentar (Uniforme no Domínio Computacional).

Camada	$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	$T$ (kg/m <sup>2</sup> /s)	Massa de Sedimento (kg/m <sup>2</sup> )	Espessura Correspondente (m)
1	200	$1,0 \times 10^{-6}$	100	0,50
2	400	$1,0 \times 10^{-7}$	400	1,00
3	1200	0	1200	1,00

Para os dois casos simulados, a Figura 4 mostra a evolução do acúmulo (ou redução) de massa de sedimento em cada uma das camadas do leito durante a simulação para os três locais (A, B e C) assinalados na Figura 1.

No “Caso i” não houve deposição na camada ativa, já que a concentração de sedimentos na coluna d’água era nula. Como resultado, houve somente troca de massa entre as camadas, de maneira que a camada ativa apresentou perda, e as camadas inferiores apresentaram ganho (Figura 4). O ganho de massa na segunda camada se deve ao fato do fluxo originário da camada ativa (para aquela camada) ser superior ao fluxo em direção à terceira camada. Na terceira camada só foram estipulados fluxos de entrada. Como não houve deposição o comportamento foi o mesmo em todas as áreas do reservatório (i.e. pontos A, B e C).

No “Caso ii”, como houve deposição, o comportamento na camada ativa foi diferente para cada um dos pontos de análise (Figura 4). Para o caso analisado, sem movimentação da massa de água, quanto mais profundo o local, maior a capacidade de suprir com sedimentos a camada ativa do leito e vice-versa (Figura 5). Pode notar-se que no ponto A houve um momento em que a deposição se tornou inferior à taxa de transferência da camada ativa, de maneira que uma perda de massa foi observada a partir de aproximadamente 24 horas de simulação (Figura 4). Em contrapartida, a evolução das camadas inferiores foi igual para os dois casos simulados.

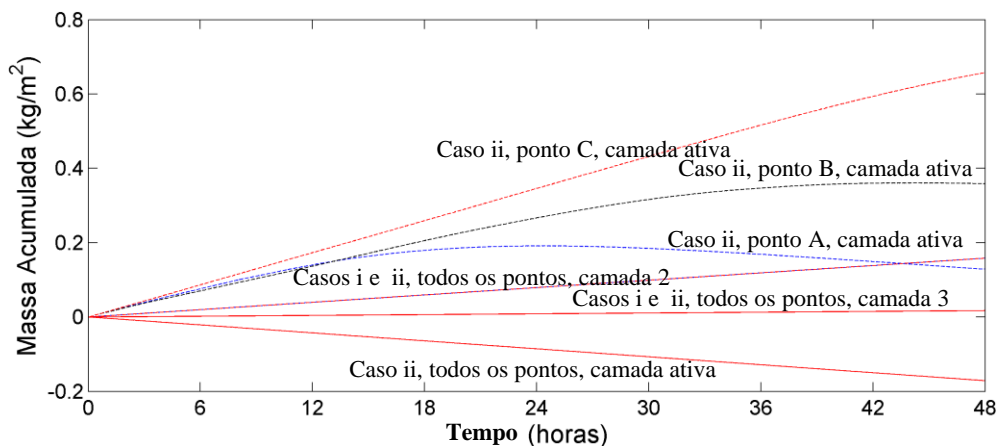


Figura 4 - Massa acumulada nas camadas do leito após simulações dos Casos i e ii.

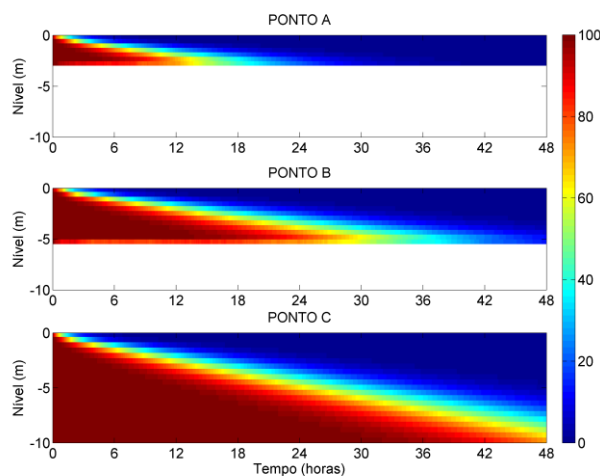


Figura 5 - Concentração de sedimentos na coluna d'água após 48 horas de simulação (Caso ii).

## CONCLUSÕES

Analisando esta série de publicações como um todo, partes 1, 2 e 3, tem-se o ciclo completo das diferentes fases do desenvolvimento de um modelo computacional de transporte de sedimentos coesivos, partindo-se da pesquisa bibliográfica na parte 1 (ESTIGONI *et al.*, 2013) e evoluindo para os testes de desempenho do modelo apresentados na parte 2 (BOTELHO *et al.*, 2013) e no presente trabalho.

Os testes realizados e os resultados obtidos mostraram sucesso na inserção do equacionamento que representa a erosão do leito à partir de tensões cisalhantes calculadas pelo modelo hidrodinâmico TUFLOW, bem como da rotina desenvolvida para a análise da consolidação do leito utilizando o conceito de camadas. O modelo mostrou-se versátil, no sentido de sua capacidade em trabalhar com diversas classes granulométricas, bem como capturar variações espaço-temporais no comportamento de sedimentos em um reservatório.

Neste estágio da pesquisa o modelo encontra-se em fase de aperfeiçoamento e está sendo testado em casos reais mais complexos. Acredita-se que esta será uma ferramenta com grande potencial de aplicabilidade para o transporte de sedimentos de diversas faixas granulométricas em ambientes lóticos e lênticos, podendo ser empregada nos mais variados casos de estudos de assoreamento hidrossedimentológicos.

## 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

BOTELHO, D. A.; ESTIGONI, M. V.; TEAKLE, I. A. L. *et al.* (2013). *Modelagem de transporte de sedimentos coesivos parte 2: Testes de deposição*, aceito para publicação no XX SBRH – Simpósio Brasileiro de Recursos hídricos, 17 a 22 de Novembro de 2013, Bento Gonçalves – RS.

ESTIGONI, M. V.; BOTELHO, D. A.; TEAKLE, I. A. L. *et al.* (2013). *Modelagem de transporte de sedimentos coesivos parte 1: Fundamentos Teóricos*, aceito para publicação no XX SBRH – Simpósio Brasileiro de Recursos hídricos, 17 a 22 de Novembro de 2013, Bento Gonçalves – RS.



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