

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/236670046>

# FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE MODELAGEM DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS COESIVOS

Conference Paper · December 2012

CITATIONS  
0

READS  
554

9 authors, including:



Marcus Vinícius Estigoni  
NHC Brasil Consultores - Especialistas em Recursos Hídricos  
27 PUBLICATIONS 28 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Renato Billia de Miranda  
University of São Paulo  
25 PUBLICATIONS 26 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Daniel Autran Botelho  
BMT Group Ltd  
17 PUBLICATIONS 73 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Frederico Fabio Mauad  
University of São Paulo  
86 PUBLICATIONS 86 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

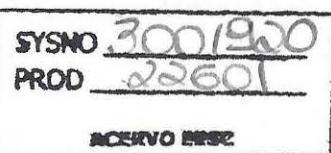
Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Estudos Quantitativos e Qualitativos dos corpos hidrícos aplicados ao Reservatório do Lobo e seus Afluentes [View project](#)



PhD in Environmental Fluid Dynamics 2001-2005 [View project](#)



All content following this page was uploaded by [Marcus Vinícius Estigoni](#) on 16 May 2014.

The user has requested enhancement of the downloaded file.



## FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE MODELAGEM DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS COESIVOS

*Marcus Vinícius Estigoni<sup>1</sup>; Renato Billia de Miranda<sup>2</sup>; Odemberg Veronez<sup>3</sup>; Cláuber B. Leite<sup>4</sup>;  
Daniel Autran Botelho<sup>5</sup>; Fabio R. L. Dotto<sup>6</sup>; Julieta Bramorski<sup>7</sup>; Swami Marcondes Villela<sup>8</sup> &  
Frederico Fábio Mauad<sup>9</sup>*

**RESUMO** – Inevitavelmente os reservatórios irão se assorear, sendo a rapidez e a magnitude que este processo ocorrerá função da característica do corpo hídrico e de sua bacia de contribuição, além da adoção ou não de medidas de gestão do assoreamento. O entendimento sobre o transporte e deposição de sedimentos não-coesivos (e.g. silte e areia) é bem consolidado, enquanto que ainda restam lacunas no conhecimento do comportamento do sedimento coesivo (e.g. argilas). No campo da modelagem hidrodinâmica, o constante avanço da capacidade de processamento abre portas para modelos cada vez mais complexos. Visando dar suporte a pesquisas na área este artigo apresenta uma revisão dos conceitos sobre sedimentos coesivos. São abordados os principais conceitos envolvidos em sua modelagem, discorrendo sobre modelos hidrodinâmicos tridimensionais e propriedades mecânicas dos sedimentos coesivos: agregação, deposição, consolidação e erosão.

**ABSTRACT** – Reservoirs necessarily will suffer from sedimentation, the process speed and magnitude depends on watercourse and catchment characteristics, also if sediment management alternatives are adopted or not. The transport and settling phenomena for non-cohesive sediments (e.g. silt and sand) are well understood, but for cohesive sediments (e.g. clay) there are gaps to be filled. Hydrodynamics models are closely linked to processing capacity, informatics advance provides to increase the models complexity. Aiming to support further researches this paper presents a review of the sediment cohesive concepts.

1 – Núcleo de Hidrometria - Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada – Universidade de São Paulo (NH/CHREA/EESC/USP). Rodovia Domingos Innocentini, km 13 - Itirapina/SP. (16) 33738255 marcus.estigoni@usp.br

2 – Núcleo de Hidrometria - Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada – Universidade de São Paulo (NH/CHREA/EESC/USP). Rodovia Domingos Innocentini, km 13 - Itirapina/SP. (16) 33738255 eng.renato.miranda@gmail.com

3 – AES Tietê S.A.. Est. Municipal Mogi-Guaçu Cachoeira de Cima, Mogi-Guaçu – SP. odemberg.veronez@aes.com

4 – AES Tietê S.A.. Est. Municipal Mogi-Guaçu Cachoeira de Cima, Mogi-Guaçu – SP.

5 – BMT WBM Pty Ltd.. Level 8, 200 Creek Street, Brisbane QLD 4000 Australia. Daniel.Botelho@bmtwbm.com.au

6 – Farol Consultoria & Pesquisa. R. Capitão Alcides 20-77, E-22, Jardim Carvalho, Bauru – SP.

7 – SHS Engenharia Sustentável.R. Padre Teixeira, 1772 Centro. CEP 13560-210. (16) 33741755. julieta@shs.com.br

8 – SHS Engenharia Sustentável.R. Padre Teixeira, 1772 Centro. CEP 13560-210. (16) 33741755.

9 – Professor da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, EESC – USP. Av. Trabalhador São Carlense, 400, CEP 13566-590. São Carlos – SP. (16) 33738255 mauadffm@sc.usp.br

The main concepts of its modeling are presented, including tridimensional hydrodynamic and the cohesive sediment mechanical characterization: aggregation, deposition, consolidation and erosion.

**Palavras – chave:** Sedimentos coesivos, transporte de sedimentos, modelos hidrodinâmicos.

## 1. INTRODUÇÃO

De maneira a proporcionar o aumento da disponibilidade de recursos hídricos reservatórios são construídos, os quais armazenam o excedente de água da época de cheia de modo que este possa ser utilizado na época de seca, sendo o volume disponível diretamente relacionado com a capacidade de armazenamento do reservatório que por sua vez é relacionado com a topografia do terreno o qual é construído.

O dado base para a gestão de um reservatório é a sua capacidade de armazenamento, também chamado de capacidade ou volume de reservação. Todo o gerenciamento de um reservatório é feito através dos dados de volume, normalmente expressos pela relação entre a cota (profundidade relacionada a um marco de altitude conhecida em relação ao nível do mar), a área do espelho d'água e o volume a ela associados, sejam por tabelas ou curvas chamadas Cota-Área-Volume (CAV). Sendo assim, por meio do conhecimento do nível das águas do reservatório, se verifica a área de seu espelho d'água e o volume que este possui no exato momento, fornecendo subsídio para se determinar vazões a serem utilizadas em seus diversos usos, manobras operacionais, a abertura ou fechamento de comportas, etc.

Com o passar do tempo há a alteração do relevo do fundo do reservatório, geralmente tendo como consequência a perda da capacidade de armazenamento devido ao assoreamento, sendo assim o levantamento topográfico prévio ao enchimento do reservatório não mais condiz com a atualidade e quanto maior a idade do reservatório menor será a fidelidade do dado pré-enchimento com a condição real (Estigoni *et al.*, 2009). Corrêa Filho e colaboradores (2005) afirmam que no Brasil diversos reservatórios têm realizado suas políticas de operação utilizando o volume útil do projeto do reservatório.

Segundo Miller Jr (2008), 14% do escoamento mundial é capturado e armazenado pelas 45 mil maiores represas do mundo. O Brasil possui um total 23.036 espelhos d'água com área superior a 20 hectares, destes 6928 são artificiais (Carvalho *et al.*, 2009). Segundo Bermann (2007) mais de 34.000 km<sup>2</sup> de espelhos d'água correspondem a reservatórios destinados a produção de energia.

No caso do uso para a geração de energia elétrica, o armazenamento de água pode ser considerado como um “armazenamento de energia”, considerando que nossa matriz energética é majoritariamente hidráulica, 70,10% da potência fiscalizada (ANEEL, 2012). Segundo o último Plano Decenal de Expansão de Energia (MME/EPE, 2010) que analisou a expansão de 2010 à 2019, estão previstas (para o período citado) a entrada em operação (empreendimentos já licenciados e a licenciar) um total de 37 Usinas Hidrelétricas – UHE, correspondendo a potência de 33.384 MW instalados, e de 2.923 MW para Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCH (não foram estimados a quantidade de reservatórios que serão construídos, somente a potência), evidenciando um grande acréscimo nos próximos anos da quantidade de reservatórios no país.

Baseado na matriz energética brasileira e sua previsão de expansão priorizando a baixa emissão de carbono por meio de geração hidrelétrica (Yapp, 2011; Carvalho Neto, 2012), estudos de assoreamento de reservatório são de suma importância para o país, sendo fundamentais para o planejamento energético nacional, além de serem de interesse das empresas concessionárias de energia.

Um grande passo no estudo dos problemas de assoreamento foi dado com a Resolução Conjunta N° 003 – ANEEL – ANA (ANEEL – ANA, 2010), a qual prevê o monitoramento hidrossedimentométrico, bem como a realização de levantamentos batimétricos periódicos, para determinação das reais condições de assoreamento dos reservatórios nacionais. Sendo o assoreamento um processo contínuo, com a atualização das curvas CAV previstas na resolução a cada 10 anos, pode-se ocorrer problemas na operação dos reservatórios neste intervalo. Deste modo, a modelação do comportamento dos sedimentos com previsão de cenários pode ser utilizada para avaliação do reservatório no intervalo entre os levantamentos batimétricos.

Apesar da significância da dinâmica de sedimentos em reservatórios, desvendar os processos nela envolvidos não é uma tarefa trivial, já que processos variam de acordo com as propriedades do sedimento, características físicas de tributários e dos lagos principais, operação do reservatório, e 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.

As características hidrodinâmicas influenciam os processos de suspensão e deposição, determinando a concentração de sedimentos na coluna d’água, que por sua vez, podem alterar a densidade da água, modificando processos hidrodinâmicos com a formação de correntes de densidade (Fischer *et al.*, 1979) e também podem ser causadas por diferenças de temperaturas e de salinidade. Quando associadas à presença de sedimentos, este fenômeno corresponde a uma parcela significativa da descarga de sedimentos coesivos, não podendo ser desconsiderado, porém seu

comportamento heterodinâmico difere do usual de um reservatório e geralmente modelos de transporte de sedimentos não são aptos a calcularem correntes de densidade. Algumas adaptações de modelos para a modelagem de correntes de densidade são apresentadas por Dallimore *et al.* (2003), Pondoe & Edge (2004) e Cancino e Neves (1999).

Apesar dos muitos estudos questões que vão desde os métodos e equipamentos utilizados para a amostragem e medida de descarga de sedimentos e técnicas de levantamentos batimétricos para quantificação de assoreamento até a modelagem do comportamento de produção, transporte e deposição de sedimentos, principalmente em se tratando do comportamento de sedimentos coesivos, muitos fenômenos ainda necessitam ser melhores entendidos. Outra lacuna apresentada é o real efeito do assoreamento nas funções de um reservatório. Estudos que quantificam a perda da geração energética e da capacidade de atendimento a abastecimento ainda são insipientes no Brasil e no mundo.

Desta forma, modelos computacionais, se corretamente validados, constituem ferramentas poderosas para avaliar os mecanismos dominantes na deposição e erosão de sedimentos em reservatórios. Esses modelos também podem 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, consequentemente levar ao prolongamento da vida útil dos mesmos, auxiliando na escolha e adoção de medidas preventivas e corretivas para mitigação destes problemas. Em particular, modelos de transporte de sedimentos acoplados a modelos hidrodinâmicos multidimensionais proporcionam uma descrição da variação espaço-temporal dos processos envolvidos na dinâmica de sedimentos.

Neste contexto, está em andamento um projeto do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica (P&D ANEEL) por meio da parceria entre a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC – USP), a empresa australiana “BMT WBM”, as empresas nacionais “SHS Engenharia Sustentável”, “Farol Consultoria e Pesquisa”, e a concessionária de energia “AES Tietê”, sendo esta última a financiadora do projeto.

O presente trabalho faz parte do projeto de P&D supracitado. Este artigo busca apresentar o estado da arte dos conceitos envolvidos na modelagem hidrodinâmica do transporte de sedimentos, focando principalmente no transporte de sedimentos coesivos e em suas propriedades mecânicas.

## 2. MODELAGEM HIDRODINÂMICA E DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Modelos hidrodinâmicos são utilizados para calcular o movimento da água em um corpo d'água e tem aplicações em diversas áreas da engenharia ambiental e de recursos hídricos, particularmente em problemas de transporte de sedimentos e qualidade de água. Os modelos de transporte de sedimentos são utilizados para caracterizar o transporte de calor e de material dissolvido e em suspensão (i.e. sedimentos) na coluna d'água em função das características hidrodinâmicas, representando os processos de advecção, convecção e dispersão em um corpo d'água. O intuito desses modelos é obter a variação do escoamento (i.e. velocidade, nível de água, e pressão) e concentração de escalares (i.e. temperatura, salinidade, poluentes, sedimentos) no espaço e no tempo em função de suas forçantes.

Em geral, num quadro de referência Euleriano (quando o observador não se movimenta com o fluido), os modelos hidrodinâmicos são baseados nas equações de continuidade e conservação da quantidade de movimento, também conhecida como equações de Navier-Stokes. Essas equações formam um conjunto não linear para o qual soluções analíticas não existem, de maneira que simplificações através de aproximações das características do escoamento e soluções numéricas são adotadas para sua solução. As equações mais comumente empregadas em problemas ambientais incluem a aproximação de pressão hidrostática, incompressibilidade da água, e a aproximação de Boussinesq, na qual a densidade é considerada apenas nos termos gravitacionais. Outra aproximação comumente adotada é a aproximação de Reynolds para os termos turbulentos. As equações mais comumente usadas em escoamentos ambientais são apresentadas em notação tensorial abaixo, conforme Equações 1, 2, 3 e 4 (e.g. Hodges, 2000):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = - \left( g \frac{\partial \eta}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \int_{x_0}^{\eta} \rho' dx_3 \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( v_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + e_{ij} f \bar{u}_j \quad i = 1 \text{ e } 2. \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \int_{x_0}^{\eta} u_i dx_3 = 0 \quad (3)$$

$$\rho = \rho(S, T, C) \quad (4)$$

Sendo:

$u$  = velocidade do escoamento;

$x$  = coordenadas cartesianas;

$i$  e  $j$  = direções das coordenadas (sendo  $i,j=1$  a direção longitudinal,  $i,j=2$  a direção transversal e  $i,j=3$  a direção vertical);

$h$  = nível d'água;

$r$  = densidade referencial da água;

$r'$  = desvio da densidade em relação à densidade referencial;

$e_{ij}$  = operador de produto tensorial;

$f$  = parâmetro de Coriolis ( $f = 2W$ ), onde  $W$  = é a velocidade de rotação da terra em função da latitude. Este termo contendo o parâmetro de Coriolis é comumente descartado para escoamentos em lagos e reservatórios cuja largura é pequena em relação ao comprimento;

$u_i$  = coeficiente de viscosidade turbulenta originado na aproximação de Reynolds. O efeito da viscosidade (cinemática) molecular foi descartado acima devido à sua magnitude pequena em comparação ao efeito das tensões turbulentas.

O cálculo de  $u_i$  requer uma equação de fechamento de turbulência. Uma relação das diversas equações de fechamento de turbulência em escoamentos ambientais é apresentada em Kantha e Clayson (2000). Modelos de fechamento comumente utilizados incluem o modelo de Smagorinsky (Ahsan & Blumberg, 1999), modelo de Mellor e Yamada de 2-1/2 níveis (Rueda & Schladow, 2003), modelo k-e (Joehnk & Umlauf, 2001; Stips *et al.*, 2002) e modelo k-w (Umlauf *et al.*, 2003). A Equação 4 representa uma equação de estado da densidade que em geral é função de temperatura ( $T$ ), salinidade ( $S$ ), e concentração de sedimentos ( $C$ ).

O modelo de transporte é representado pela Equação 5:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) + S \quad (5)$$

Sendo:

$C$  = concentração do escalar (i.e. temperatura, salinidade, sedimento, poluentes);

$D_{ij}$  = coeficiente de dispersão turbulenta (que também engloba processos de difusão molecular);

$S$  = termo fonte ou sumidouro.

Os termos de fonte ou sumidouro são caracterizados pelas condições de contorno e processos específicos associados ao transporte do escalar em questão. Por exemplo, para transporte de calor (i.e. temperatura), incluem-se efeitos de absorção de radiação solar, transferência de calor latente e sensível, etc. (Hodges, 2000), no transporte de sedimentos, incluem-se os termos de deposição, erosão, ressuspensão, etc. (Simões & Yang, 2006). Quando a velocidade obtida do escoamento hidrodinâmico é utilizada para o cálculo de transporte, e esse fornece valores para o cálculo de densidades no modelo hidrodinâmico, diz-se que os modelos hidrodinâmicos e de transporte estão acoplados.

As equações tridimensionais, como as apresentadas neste artigo, são as que melhor representam o fenômeno do transporte de sedimento (Cancino & Neves, 1999), porém, devido ao elevado esforço computacional, comumente são derivadas para maiores simplificações das equações. Por exemplo, as equações podem ser simplificadas para uma formulação bidimensional integrada verticalmente (Botelho, 2007), bidimensional lateralmente integrada (Cole & Wells, 2003), e unidimensional, tais quais as equações de Saint-Venant (Simões & Yang, 2006). Nota-se que as aproximações, unidimensional e bidimensional verticalmente integrada, assumem que o corpo d'água não é estratificado e os efeitos de densidade não podem ser explorados com acurácia, desta maneira tendo limitada aplicação no transporte de calor e sedimentos em reservatórios. Os modelos lateralmente integrados, em contrapartida, apesar de levarem em consideração os efeitos de densidade, assumem que variações laterais no escoamento são desprezíveis e por isso não são capazes de explorar com acurácia efeitos da curvatura de rios e reservatórios com largura razoavelmente superior à dos rios tributários.

Condições de contorno definem como o modelo é forçado, e incluem-se (no caso de lagos e reservatórios) o efeito das tensões cisalhantes do vento, do arrasto no fundo, bem como os escoamentos de entrada e saída nas equações hidrodinâmicas. No transporte de calor, incluem-se a radiação solar, radiação de ondas longas, temperatura e umidade específica do ar, bem como a temperatura dos escoamentos de entrada e absorção de calor pelos sedimentos. No transporte de sedimentos, em geral incluem-se a carga em suspensão e a carga de fundo.

As soluções das equações se dão em um domínio computacional que representa a área em estudo. Esse domínio é discretizado em uma malha (ou grade) na qual se definem os pontos em que as variáveis do escoamento e transporte são calculadas conforme a solução avança no tempo. Dentre os métodos numéricos, os mais adotados incluem-se os métodos de diferenças finitas, elementos finitos e volumes finitos (Toro, 1999; Eymard *et al.*, 2000). As malhas em contrapartida

podem ser classificadas como estruturadas ortogonais (Hodges, 2000), estruturadas e curvilíneas (Sheng, 1990), e não estruturadas ou flexíveis (e.g. Andrews *et al.*, 2009; DHI, 2009).

A literatura sobre o assunto é extensa, dada a vasta aplicação dessas equações em problemas de engenharia, limnologia e oceanografia, mas podemos citar os trabalhos pioneiros de Leendertse (1967, 1970), Edinger e Buchak (1975) e Leendertse e Liu (1978), no estabelecimento dos primeiros modelos bidimensionais verticalmente integrados, bidimensionais lateralmente integrados, e tridimensionais, respectivamente, para a aplicação do escoamento em estuários, lagos e baías. Um aumento expressivo da aplicação e desenvolvimento de modelos hidrodinâmicos se deu com o avanço da tecnologia computacional e de técnicas numéricas de solução de matrizes esparsas. No Brasil, a primeira publicação amplamente difundida sobre o assunto foi o livro *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*, vol. 1, lançado pela ABRH em 1989 (Wrobel *et al.*, 1989).

Atualmente, existem diversos pacotes de *software* para a aplicação dos modelos hidrodinâmicos e de transporte de sedimento com aplicações em lagos e reservatórios – e.g. CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2003), TUFLOW-FV (Andrews *et al.*, 2009), ELCOM (Hodges, 2000), EFDC (Hamrick, 1996), CH3D (Sheng, 1990), Mike 21 e 3 (DHI, 2009), dentre outros. Nota-se que com o desenvolvimento e a distribuição destes pacotes (incluindo-se interfaces de pré e pós-processamento), não há necessidade do usuário possuir grande conhecimento em desenvolvimento de códigos numéricos ou técnicas numéricas de solução das equações. No entanto, o entendimento das limitações dos modelos e julgamento profissional das soluções apresentadas são requisitos fundamentais para que um determinado modelo seja aplicado de forma satisfatória e suas respostas possam ser utilizadas com mérito. A calibração e validação de um modelo se fazem necessárias para se obter confiança nos seus resultados (Violeau *et al.*, 2002; Simões & Yang, 2006).

### 3. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Bacias de drenagem associadas com práticas de agricultura inadequada são em geral sujeitas a um grau acentuado de erosão e contribuem com cargas elevadas de sedimentos suspensos à calha dos rios. Durante períodos de chuva, a erosão do solo é induzida pelo *run-off* e é acentuada em áreas de encosta e barrancos (Randle *et al.*, 2006).

A carga em suspensão nos rios é geralmente predominante, mas o fluxo total de sedimentos em rios ainda conta com a carga do leito ou de arraste (*bedload*), que é estimada entre 2 a 15% da carga de sólidos totais (Strand & Pemberton, 1982). A composição desta carga depende do material

que compõe o leito do rio e é influenciada pela turbulência da água exercendo as forças de sustentação e arrasto no material do leito (Yang, 2006).

Os regimes de vazão do rio estão associados à precipitação e *run-off* na bacia de drenagem, e definem o estado turbulento das águas e o nível de energia para se manter tanto o transporte do leito como o transporte em suspensão.

Adicionalmente, os rios por serem mais rasos em relação ao corpo central dos reservatórios, tendem a sofrer variações de temperatura mais abruptas em função das trocas de calor com a atmosfera, de maneira que a densidade das águas entre o rio e o reservatório comumente dá origem as correntes de densidade subsequente ao escoamento de entrada (Fischer *et al.*, 1979; Botelho & Imberger, 2007).

Além da influência da temperatura, os sedimentos em suspensão também contribuem para a diferença de densidades, e em geral são usados como traçadores para indicar a posição e deslocamento das correntes de densidade (Carmack *et al.*, 1979; Hipsey *et al.*, 2004). Em geral, quando o efeito da concentração de sedimentos é maior que o de temperatura na diferença de densidades, as correntes são denominadas correntes de densidade turbinadas ou, simplesmente, correntes de turbidez (Morris & Fan, 1998).

Comumente, as correntes de densidade, e o transporte dos sedimentos em suspensão nelas contidos, são resultantes de uma maior densidade do escoamento de entrada, forçando o deslocamento do rio a um ponto de mergulho (*plunge point*) no local em que a inércia do escoamento não é suficiente para subverter as forças gravitacionais de empuxo (*buoyancy*). Como existem variações na vazão do escoamento, o local do ponto de mergulho é variável, e essa zona de variação do ponto de mergulho em geral corresponde à zona de deposição dos sedimentos mais grosseiros denominada delta (Morris & Fan 1998; Carvalho, 2008). À jusante do delta, o escoamento segue o leito do reservatório sendo denominado *underflow* e corresponde a uma zona de deposição dos sedimentos mais finos (Figura 1)

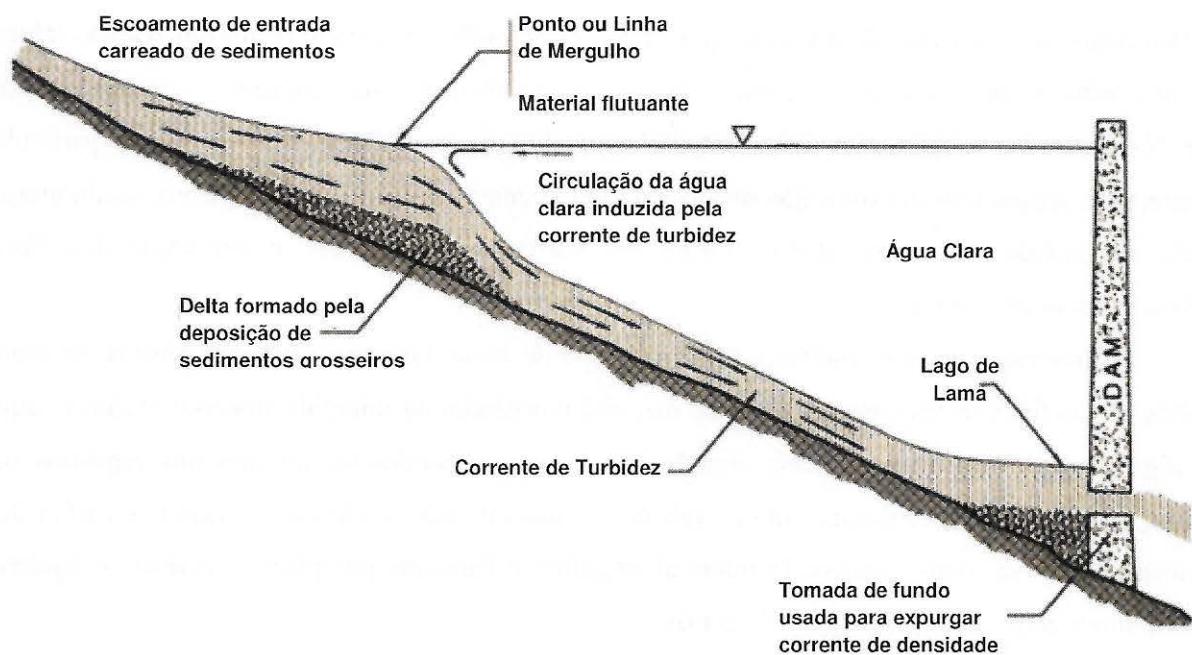


Figura 1 - Formação típica do delta.

Fonte: adaptado de Morris & Fan (1998).

Em reservatórios mais profundos, particularmente em zonas temperadas e glaciais, o *underflow* pode se deparar com águas mais densas que correspondem ao *metalimnion* (camada intermediária da coluna d'água correspondente às maiores variações verticais de temperatura e densidade), se desprendendo do leito e formando uma intrusão (também denominada do inglês *intrusion* ou *interflow*) neste nível de desprendimento (Effler *et al.*, 2006; Botelho & Imberger 2007; Chung *et al.*, 2009). Em geral, intrusões não se formam com correntes de turbidez, pois estas seguem como *underflow* até a jusante do reservatório.

#### 4. SEDIMENTOS COESIVOS

Por definição, os sedimentos são formados por material granular que se depositam na água através do efeito da gravidade (Winterwerp & Van Kesteren, 2004). A distribuição granulométrica e a composição dos sedimentos se configuram nos fatores mais importantes no comportamento mecânico dos sedimentos. De uma maneira simplista, a granulometria implica na resistência dos grãos aos esforços presentes no escoamento e a composição implica na capacidade do sedimento se ligar a outros compostos (outros grãos, poluentes, etc.).

Na prática de engenharia, sedimentos coesivos, em geral, correspondem aos sedimentos de granulometria mais finas, compostos por siltes e argilas (diâmetro mediano  $< 0,63$  mm) enquanto os sedimentos não coesivos são formados por areias, pedregulhos e partículas mais grosseiras (Huang *et al.*, 2006). O processo de transporte e deposição de sedimentos não coesivos é regido pelas Leis de Navier-Stokes a qual está fortemente relacionada com o tamanho e a massa das partículas, entretanto, sedimentos coesivos não obedecem diretamente o mesmo comportamento, sendo afetado pela capacidade de formar flocos, forma das partículas e tamanho, e densidade dos flocos (Berlamont *et al.*, 1993).

Sedimentos coesivos, muitas vezes chamados de lama, consistem de uma mistura de argila, siltes, areias finas (estes correspondem ao material inorgânico ou mineral), material orgânico, água, e algumas vezes gás. Os minerais inorgânicos consistem geralmente de minerais argilosos (i.e. sílica, alumina, montmorilonita, ilita e caulinita) e minerais não-argilosos (i.e. quartzo, carbonatos, feldspato e mica, entre outros). O material orgânico é formado por plantas, detritos e bactérias (Berlamont *et al.*, 1993; Huang *et al.*, 2006).

Devido a suas propriedades, os sedimentos coesivos estão intimamente ligados à qualidade da água. Suas características eletroquímicas fazem que diversos contaminantes como metais pesados e nutrientes se adsorvam nas partículas de sedimento. A turbidez consequente da alta concentração de sedimentos também diminui a penetração de luz, alterando a dinâmica limnológica, além de aumentar custos com o tratamento de água (Huang *et al.*, 2006).

De maneira geral, os sedimentos coesivos são facilmente mantidos em suspensão na turbulência dos rios. Porém, em reservatórios e estuários, o baixo gradiente energético do escoamento proporciona a deposição deste material, tendo assim, maior importância nestes ambientes.

As partículas de argila e material orgânico, em relação às propriedades da fase líquida (água intersticial), determinam o comportamento coesivo do sedimento. Winterwerp & Van Kesteren (2004) fazem uma descrição sucinta da estrutura física dos minerais argilosos, indicando que seu formato e distribuição de carga elétrica interagem com a água ambiente (dipolos) como fatores fundamentais para a coesão dos sedimentos. Essa distribuição de carga favorece a ligação de metais e outros poluentes orgânicos que no sedimento podem se adsorver. Essa capacidade coesiva faz com que as diferentes partículas se agreguem, formando flocos relativamente grandes apesar da granulometria fina.

## 4.1 Propriedades mecânicas

### Agregação ou Floculação

Em geral, as partículas finas desagregadas são muito pequenas, de maneira que a turbulência na coluna d'água é capaz de mantê-las em suspensão. As forças de ligação entre as partículas e a taxa de colisão, colaboram para a formação dos flocos que crescem ao se colidir com outros flocos e partículas.

Essas partículas também podem se dissociar devido às tensões turbulentas na coluna d'água. Devido à discrepância entre escalas espaciais do processo de agregação ( $<1\text{mm} - 10\text{ cm}$ ) e da modelagem de corpos d'água ( $10\text{m} - 10\text{ km}$ ), esse processo não é modelado diretamente, mas é parametrizado através do efeito da agregação na velocidade de deposição do sedimento. Vários equacionamentos são propostos na literatura que envolve uma relação proporcional entre concentração do sedimento em suspensão e a velocidade de deposição (Krone, 1962; Cole & Miles, 1983).

Em geral, há um pico em concentração no qual a agregação começa a ser inibida, de maneira que um fator de inibição é adicionado à parametrização (Thorn, 1981; Burban *et al.*, 1990). Van Rijn (1993) agregou estudos da velocidade de deposição em função da concentração dos sedimentos no qual pode ser apreciado o efeito do aumento e inibição da velocidade de deposição dos sedimentos de acordo com a sua concentração (Figura 2). Para reproduzir esse efeito, Huang e colaboradores (2006) propõem o método linear em trecho para aplicações práticas. As formulações de Richardson & Zaki (1954) para a inibição da velocidade de deposição do sedimento é proposta em DHI (2008).

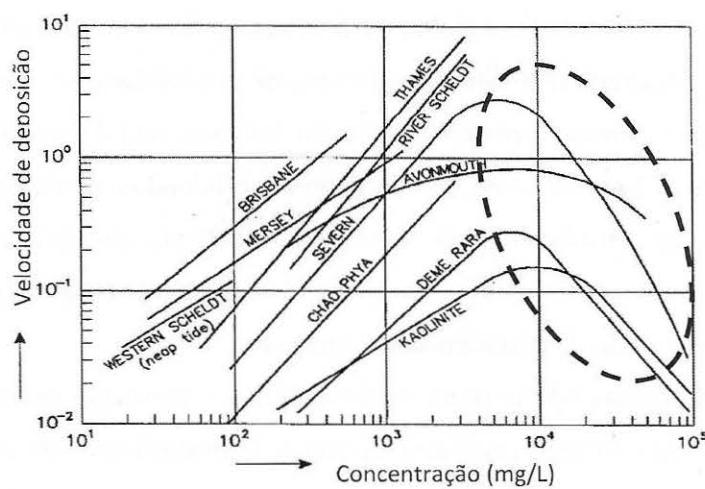


Figura 2 - Influência da concentração do sedimento na velocidade de deposição. A área assinalada pela linha tracejada mostra inibição da velocidade de deposição observada para alguns dos sítios estudados.

Fonte: adaptado de Van Rijn (1993).

### *Deposição*

A deposição é definida como a taxa de incorporação (adesão) dos sedimentos ao fundo do corpo d'água. No entanto, muitas partículas ou flocos não suportam as tensões de cisalhamento no fundo e se mantém em suspensão. A deposição pode ser modelada através da especificação de tensões de cisalhamento crítica para deposição.

Krone (1962) divide o processo em deposição total e deposição parcial, definindo tensões de cisalhamento total e parcial para cada classe de sedimento, levando em consideração uma probabilidade de deposição. A probabilidade de deposição leva em consideração a parcela dos sedimentos que não são reincorporadas ao escoamento, devido às tensões turbulentas do escoamento. Huang e colaboradores (2006) indicam que os fatores determinantes das tensões, total e parcial, não são entendidos completamente, de maneira que a definição destas tensões se configura em um dos principais parâmetros de calibração em estudos de modelagem.

### *Consolidação e Erosão*

Consolidação (ou adensamento) define os processos de estabilização e deformação dos sedimentos de acordo com os espaçamentos intersticiais e forças de ligação entre as partículas que compõe os sedimentos (Partheniades, 1984). Esse processo é pouco entendido, pois depende das propriedades eletroquímicas dos sedimentos, bem como atividade biogênica, influenciadas por ciclos sazonais. Em geral, cada reservatório apresenta um comportamento próprio.

Em um modelo bidimensional (verticalmente integrado), Teisson (1991) subdividiu o leito em camadas verticais com características diferentes (tempo de consolidação e tensão de cisalhamento crítica). Nessa estratégia a primeira camada em contato com a coluna d'água recebe os sedimentos do processo em deposição. Em intervalos de tempo pré-determinados, desde que a erosão não seja observada, as camadas se consolidam e são agregadas à camada inferior, com um aumento da tensão de cisalhamento crítica para erosão. Essa troca de massa entre as camadas se dá até a última camada modelada onde a tensão de cisalhamento é constante.

Erosão superficial corresponde ao processo de remoção de partículas individuais ou agregados pequenos da massa de solo do leito resultante de forças hidrodinâmicas de arrasto e sustentação (Huang *et al.*, 2006). Esse processo se diferencia da erosão em massa, na qual pedaços grandes de solo são separados da massa de solo principal, como em deslizamentos de barrancos ou durante

desprendimento de pedaços de solos em escoamentos torrenciais. Subsequente ao processo de erosão, se a turbulência da água propiciar, a ressuspensão de sedimentos acontece, em geral durante episódios de vento e considerável descarga do rio afluente (Filstrup & Lind, 2010).

A taxa de erosão em modelos computacionais é geralmente calculada em função da diferença da tensão de cisalhamento de fundo e a tensão crítica de erosão (Teisson, 1991; Huang *et al.*, 2006). Devido ao processo de consolidação, as camadas inferiores do sedimento depositado requerem que o fluxo d'água exerça uma maior tensão de cisalhamento para que esta sofra erosão, de modo que somente após a erosão de uma camada inteira, e se as tensões cisalhantes permitirem, é que há o processo erosivo nas camadas mais profundas. O processo é repetido até que a tensão seja inferior a tensão crítica de erosão da camada ou até que todas as camadas sejam erodidas (Teisson, 1991; Winterwerp & Van Kesteren, 2004).

Essa formulação é em geral aplicada devida a sua simplicidade, mas não incorpora efeitos do pH da água ou salinidade, que tendem a alterar a atração elétrica responsável pela coesão dos sedimentos (Winterwerp & Van Kesteren, 2004). Na formulação usual, a taxa crítica de erosão é relacionada à densidade do leito, resultante do processo de consolidação (Teisson, 1991) ou ao índice de plasticidade do sedimento (Winterwerp & Van Kesteren, 2004).

## 5. CONCLUSÕES

O campo de estudo da sedimentologia vêm ganhando destaque no cenário nacional. Um grande avanço foi dado com a Resolução Conjunta N° 003 – ANEEL – ANA (ANEEL – ANA, 2010), trazendo à tona os problemas do assoreamento que muitas vezes eram esquecidos ao se tratar da gestão de reservatórios. A referida resolução prevê a atualização da relação CAV a cada 10 anos, porém o assoreamento é um processo contínuo, e neste intervalo entre levantamentos batimétricos pode vir a causar problemas na exploração do reservatório.

Modelos computacionais de transporte e deposição de sedimentos podem ser empregados para calcular os efeitos do assoreamento em intervalos entre batimetrias. Dentre os modelos hidrodinâmicos se destacam os modelos tridimensionais como os mais adequados para a modelagem de transporte de sedimentos. Destaca-se também o papel dos sedimentos coesivos como parcela significativa do assoreamento, seus efeitos na criação de correntes de densidade e a dificuldade de se modelar esse processo.

Este artigo relata os principais conceitos envolvidos na modelagem heterodinâmica de reservatórios. Apresenta as equações fundamentais envolvidas no processo, os conceitos da

utilização de malhas e os principais métodos numéricos utilizados. Também são relacionados alguns pacotes comerciais de modelos de transporte de sedimentos.

O transporte de sedimento é abordado primeiramente de maneira mais generalista, onde são introduzidos os principais fenômenos da produção, transporte e deposição de sedimentos. Neste trabalho é tratado com maior profundidade o sedimento coesivo, suas propriedades mecânicas e os seus efeitos no comportamento. São destacados os conceitos mais difundidos até o momento sobre os fenômenos de agregação, deposição, consolidação e erosão dos sedimentos coesivos.

Em suma, este trabalho aborda os principais conceitos relacionados ao transporte de sedimentos coesivos, além de apresentar diversas referencias bibliográficas pertinentes ao tema, sendo assim, uma boa fonte de recursos para profissionais da área de sedimentologia e de modelagem hidrodinâmica.

Ressaltamos também o papel que o entendimento do comportamento dos sedimentos coesivos, bem como o desenvolvimento de modelos hidrodinâmicos tridimensionais de maior complexidade (capazes de considerar efeitos de correntes de densidade) desempenha no cenário atual, sendo estas umas das fronteiras do conhecimento da sedimentologia a serem transpostas nos próximos anos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a 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 Fundação Para o Incremento da Pesquisa e Aperfeiçoamento Industrial – FIPAI, ao Núcleo de Hidrometria do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP, à BMT WBM, à SHS Engenharia Sustentável, à Farol Consultoria e Pesquisa e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

## BIBLIOGRAFIA

- AHSAN, A.K.M.Q. & BLUMBERG, A.F. (1999). Three-dimensional hydrothermal model of Onondaga Lake, New York. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(9), pp. 912-923.
- ANDREWS, M.; TEAKLE, I.A.; RYAN, P. (2009). *Cairns Region Storm Tide Study*. Draft Report prepared for Cairns Regional Council. BMT WBM report R.B17180.001.

ANEEL (2012). Banco de Informação de Geração. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>. Consulta realizada em: 04/06/2012.

ANEEL – ANA (2010). *Resolução Conjunta nº 003: Estabelecer as condições e os procedimentos a serem observados pelos concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica para a instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas visando ao monitoramento pluviométrico, limimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água associado a aproveitamentos hidrelétricos, e dar outras providências*. Brasília - DF, 10 de Agosto de 2010. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2010003cj.pdf>. Consulta realizada em: 05/06/2012.

BERLAMONT, J.; OCKENDEN, M.; TOORMAN, E.; WINTERWERP, J. (1993). The characterization of cohesive sediment properties, *Coastal Engineering*, 21, pp. 105-128.

BERMANN, C. (2007). Impasses e controvérsias da hidroeletricidade. *Estudos Avançados* 21(59), pp. 139-153.

BOTELHO, D.A. (2007). *Non-hydrostatic modelling of stratified flow in lakes and reservoirs*, Ph.D. Thesis. University of Western Australia: Australia.

BOTELHO, D.A. & IMBERGER, J. (2007). Dissolved oxygen response to wind-inflow interactions in a stratified reservoir. *Limnology and Oceanography* 52(5): pp. 2027-2052.

BURBAN, P.Y.; XU, Y.U.; McNEIL, J.; LICL, W. (1990). Settling speeds of flocs in fresh water and seawater, *Journal of Geophysical Research*, 95 (C10): pp. 18213-18220.

CANCINO, L. & NEVES, R. (1999). Hydrodynamic and sediment suspension modeling in estuarine systems. Part I: Description of the numerical models, *Journal of Marine Systems*, 22, pp. 105-116.

CARMACK, E.C.; GRAY, C. B. J.; PHARO, C.H.; DALEY, R.J. (1979). Importance of lake-river interaction on seasonal patterns in the general circulation of Kamloops Lake, British Columbia. *Limnology and Oceanography*, 24(4), pp. 634-644

CARVALHO, M.S.B.S.; MARTINS, E.S.P.R.; SOARES, A.M.L. *et al.* (2009). *Levantamento dos espelhos d'água acima de 20ha em todo o território brasileiro através de sensoriamento remoto*,

XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil. pp. 1967-1974.

CARVALHO NETO, J.C. (2012). *Eletrobrás President discusses Plan for Energy Investments*, Power Engineering. Vol 116, Num 6, pp.70-72. Entrevista concedida à Marla Barnes e Michael Grossman.

CARVALHO, N.O. (2008). *Hidrossedimentologia Prática*. Rio de Janeiro: Interciência.

CHUNG, S.W.; HIPSEY, M.R.; IMBERGER, J. (2009). Modelling the propagation of turbid density inflows into a stratified lake: Daecheong Reservoir, Korea. *Environmental Modelling & Software*, 24(12): pp.1467-1482.

COLE, P. & MILES, G.V. (1983). Two-Dimensional Model of Mud Transport, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 109(1): pp. 1-12.

COLE, T.M. & WELLS, S.A. (2003). *CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.1*, Instruction Report EL-03-1, US Army Engineering and Research Development Center, Vicksburg, MS.

CORREA FILHO, C.R.R.; ALBERTIN, L.L.; MAUAD, F.F.; SIMIONATO, J.L.A.; MANGILE, F. (2005). *Levantamento batimétrico de um grande reservatório formado por barragem utilizando a sonda Acoustic Doppler Profiler ADP*. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa - PB. Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

DALLIMORE, C.J.; HODGES, B.R.; IMBERGER, J. (2003). Coupling an Underflow Model to a Three-Dimensional Hydrodynamic Model, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 129: pp. 748-757.

DHI (2009), *Mike 21 e 3 Flow Model FM. Hydrodynamic Module Short Description*. Disponível em [http://www.mikebydhi.com/upload/dhisoftwarearchive/shortdescriptions/marine/MIKE213\\_HD\\_FM\\_Short\\_Description.pdf](http://www.mikebydhi.com/upload/dhisoftwarearchive/shortdescriptions/marine/MIKE213_HD_FM_Short_Description.pdf).

DHI (2008). *Mike 21 Flow Model – Mud Transport Module User Guide*.

EDINGER, J.E. & BUCHAK, E.M. (1975). *A hydrodynamic, twodimensional reservoir model: The computational basis*. Prepared for U.S. Army Engineer Division, Ohio River, Cincinnati.

EFFLER, S.W.; PRESTIGIACOMO, A.; PENG, F.; BOLYGINA, K.B.; SMITH, D.G. (2006).

Resolution of turbidity patterns from runoff events in a water supply reservoir and the advantages of in situ beam attenuation measurements. *Lake and Reservoir Management*, 22, pp. 79-93.

ESTIGONI, M.V.; MATOS, A. J.; PIOLTINE, V.; ALBERTIN, L. L.; MAUAD, F. F. (2009). *Comparação de Diferentes Batimetrias do Reservatório da Usina Hidroelétrica do Lobo*, XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande, MS.

EYMARD, R.; GALLOUËT, T. R.; HERBIN, R. (2000). *The finite volume method Handbook of Numerical Analysis*, Editors: P.G. Ciarlet and J.L. Lions, vol. VII, 2000, pp. 713-1020.

FILSTRUP, C.T. & LIND, O.T. (2010). Sediment transport mechanisms influencing the spatiotemporal resuspension patterns in a shallow, polymeric reservoir. *Lake and Reservoir Management*, 26: pp. 85-94.

FISCHER, H.B., LIST, E. J., KOH, R. C. Y., IMBERGER, J. & BROOKS, N. H. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press.

HAMRICK, J.M. (1996), *User's Manual for the Environmental Fluid Dynamics Computer Code*, Special Report No. 331. in *Applied Marine Science and Ocean Engineering*, School of Marine Science, Virginia Institute of Marine Science, The College of William and Mary, Gloucester Point, VA.

HIPSEY, M.R.; ANTENUCCI, J.P.; BROOKES, J.D.; BURCH, M.D.; REGEL, R.H.; LINDEN, L. (2004). A three dimensional model of Cryptosporidium dynamics in lakes and reservoirs: A new tool for risk management. *International Journal of River Basin Management*, 2(3): pp. 181-197.

HODGES, B.R. (2000). *Numerical technique in CWR-ELCOM*. Centre for Water Research, University of Western Australia. Technical Report WP 1422-BH

HUANG, J.; HILLCARL, R.C.; GREIMANN, B.P. (2006). *Cohesive Sediment Transport* In: Erosion and Sedimentation Manual, U.S. Bureau of Reclamation.

JOEHNK, K.D. & UMLAUF, L. (2001). Modelling the metalimnetic oxygen minimum in a medium sized alpine lake. *Ecological Modelling*, 136 (1): pp. 67-80.

KANTHA, L.H. & CLAYSON, C.H. (2000). *Numerical models of oceans and oceanic processes*. Academic Press.

KRONE, R.B. (1962). *Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes*. Relatório Técnico, Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, California.

LEENDERTSE, J.J. (1967). *Aspects of a computational model for long water wave propagation*. Rand Corporation, Memorandum RH-5299-RR. Santa Monica.

LEENDERTSE, J.J. (1970). *A water quality simulation model for well mixed estuaries and coastal seas*. Rand Corporation, Memorandum RM-6230-RC. Santa Monica

LEENDERTSE, J.J. & LIU, S.K. (1978). *A three-dimensional turbulent energy model for non-homogeneous estuaries and coastal sea systems*. In J.C.J. Nihoul (ed.), *Hydrodynamics of Estuaries and Fjords*: pp. 387-405. Amsterdam: Elsevier.

MILLER Jr., G.T. (2008). *Ciência ambiental*. São Paulo: Thomson learning.

MME/EPE (2010). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2019*, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. Brasilia: MME/EPE.

MORRIS, G.L. & FAN, J. (1998). *Reservoir Sedimentation Handbook – Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use*. McGraw-Hill Book Co., New York. Electronic Version Ver. 1.04 December 2010.

PANDOE, W.W & EDGE B.L. (2004). Cohesive sediment transport in the 3Dhydrodynamic-baroclinic circulation model, study case for idealized tidal inlet, *Ocean Engineering*, 31, pp. 2227-2252.

PARTHENIADES, E. (1984). *A fundamental Framework for Cohesive Sediment Dynamics. Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*, in: Mehta, A.J. (ed.) Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies n.14, Springer-Verlag, pp. 219-250.

RANDLE, T.J.; YANG, C.T.; DARAIO, J. (2006). *Erosion and Reservoir Sedimentation* In: *Erosion and Sedimentation Manual*, U.S. Bureau of Reclamation.

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

RUEDA, F.J.; SCHLADOW, G. (2003). Dynamics of Large Polymictic Lake. II: Numerical

Simulations. *Journal of Hydraulic Engineering* 129(2): pp. 92-101.

SHENG, Y.P. (1990). Evolution of a Three-Dimensional Curvilinear-Grid Hydrodynamic Model for Estuaries, Lakes and Coastal Waters: CH3D. *Estuarine and Coastal Modeling* (M.L. Spaulding, Ed.), ASCE, pp. 40-49.

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

STIPS, A.; BURCHARD, H.; BOLDING, K.; EIFLER, W. (2002). Modelling of convective turbulence with a two-equation  $k-\epsilon$  turbulence closure scheme. *Ocean Dynamics*, 52(4), pp. 153-168.

STRAND, R.I.; PEMBERTON, E.L. (1982). *Reservoir Sedimentation Technical Guidelines for Bureau of Reclamation*, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 48 p.

TEISSON, C. (1991). Cohesive suspended sediment transport: feasibility and limitations of numerical modeling. *Journal of Hydraulic Research*, 29(6): pp. 755 – 769.

THORN, M.F.C. (1981). *Physical Processes of Siltation in Tidal Channels*, Proceedings of the Conference on Hydraulic Modelling Applied to Maritime Engineering Problems, Institution of Civil Engineers, London, England, pp. 47-55.

TORO, E.F. (1999). *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics*, Springer-Verlag.

UMLAUF, L.; BURCHARD, H.; HUTTER, K. (2003). Extending the  $k-\omega$  turbulence model towards oceanic applications. *Ocean Modelling* 5(3): pp. 195–218.

Van RIJN, L. (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*, Aqua Publications, The Netherlands.

VIOLEAU, D.; BOURBAN, S.; CHEVIET, C.; *et al.* (2002). Numerical simulation of cohesive sediment transport: intercomparison of several numerical models, *in*: Winterwerp, J.C. *et al.*. (Ed.) (2002). *Fine sediment dynamics in the marine environment. Proceedings in Marine Science*, 5: pp. 75-89.

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

WROBELI, L.C.; EIGER, S.; ROSMANN, P.C.; TUCCI, C.E.; CIRILLO, J.A.; CABRAL, J.P.; VIEIRA, R.V. (1989). *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*. ABRH.

YANG, J. (2006). *Erosion and Sedimentation Manual*. U.S. Bureau of Reclamation.

YAPP, R. (2011). A view from the TOP: Brazil's Renewable Energy success story, *Renewable World Magazine*, PennWell International Publications. Distribuição on line, vol. 14, num. 5, pp. 32-37.