

ANEXO E - DESCRIÇÃO DO MODELO SSFATE

A modelagem da dispersão do material ressuspensionado durante as atividades de dragagem foi realizada utilizando-se o SSFATE¹⁴, desenvolvido originalmente pela USACE¹⁵ em parceria com a **Applied Science Associates (ASA), Inc.** para estimar concentração de sedimentos ressuspensionados na coluna d'água e padrões de deposição resultantes de operações de dragagem (Johnson *et al.*, 2000).

O SSFATE é utilizado nos Estados Unidos para definir janelas ambientais (*environmental windows*) de tempo para dragagem em áreas sensíveis. As janelas ambientais são necessárias para proteger recursos biológicos e seus *habitats* e suas determinações são requeridas em projetos de dragagem (Reine *et al.*, 1998). Sedimentos em suspensão estão no foco de preocupações das agências ambientais, uma vez que a exposição de animais aquáticos a elevadas concentrações destes consiste em das principais fontes de impactos sobre tais organismos. De forma semelhante, o processo de sedimentação será importante quando consideramos organismos bentônicos, como ostras e macroalgas presentes nas proximidades do local de deposição dos sedimentos.

Assim, uma previsão acurada da dinâmica espacial dos sedimentos provenientes de tais atividades é considerada crítica no estabelecimento da necessidade de “janelas de proteção”.

O SSFATE possui características exclusivamente utilizadas para os estudos que envolvem peculiaridades das atividades de dragagem, com uma versatilidade e capacidade de simulação de cenários reais. O modelo permite a previsão do transporte e destino de diferentes classes granulométricas e da trajetória de partículas, no qual o padrão de circulação da área estudada pode ser importado de um modelo hidrodinâmico numérico ou definido graficamente através da interpolação de dados de campo. O modelo supre a necessidade de uma ferramenta de modelagem, que possa ser facilmente adaptada, para simular um largo espectro de cenários de dragagem, acomodando essencialmente qualquer

¹⁴ *Suspended Sediment Fate.*

¹⁵ *U.S. Army Corps of Engineers.*

configuração hidrodinâmica e a maioria dos tipos de dragas mais utilizadas (*cutterhead*, *hopper* e *clamshell*).

Em resumo, o SSFATE pode ser utilizado tanto para estudar a dispersão e deposição de sedimentos originários da ressuspensão durante as operações de dragagem quanto para simular o descarte de sedimentos dragados.

E.1 FORMULAÇÃO

Dependendo da resolução da grade numérica utilizada, o modelo SSFATE pode simular cenários muito próximos da realidade das operações de dragagem. Nestes cenários, os processos modelados são basicamente de campo afastado, nos quais são dominantes o transporte médio e a turbulência associada às correntes.

O SSFATE é um modelo de partículas para previsão do transporte e dispersão de material em suspensão. A advecção das partículas é baseada na simples relação de que uma partícula se move linearmente de acordo com a velocidade local, obtida a partir de um modelo hidrodinâmico, para um determinado passo de tempo. Assume-se que a difusão da partícula segue um processo simples de *random walk* (passeio aleatório).

As partículas de sedimento são divididas em cinco classes de tamanho como apresentadas na Tabela E1, e possuem comportamento distinto no modelo.

Tabela E1 - Classes de tamanho dos sedimentos (SSFATE).

CLASSE	TIPO DE SEDIMENTO	INTERVALO DE TAMANHO (MICRAS)
1	Argila	0 - 7
2	Silte Fino	8 - 35
3	Silte Grosso	36 - 74
4	Areia Fina	75 - 130
5	Areia Grossa	> 130

A seguir é descrita a base teórica do modelo, segundo nota técnica do DOER (2000).

E.1.1 Transporte de Sedimentos

As seguintes equações básicas determinam a localização de cada partícula em cada passo de tempo da simulação:

$$X^{n+1} = X^n + \Delta X \quad (\text{E.1.1-1})$$

$$Y^{n+1} = Y^n + \Delta Y \quad (\text{E.1.1-2})$$

$$Z^{n+1} = Z^n + \Delta Z \quad (\text{E.1.1-3})$$

onde

$$\Delta X = U\Delta T + L_x \quad (\text{E.1.1-4})$$

$$\Delta Y = V\Delta T + L_y \quad (\text{E.1.1-5})$$

$$\Delta Z = Ws_i\Delta T + L_z \quad (\text{E.1.1-6})$$

e

X, Y, Z = posição da partícula nas direções x (E-W), y (N-S) e vertical, respectivamente;

U, V = velocidade ambiente média nas direções x e y , respectivamente;

ΔT = passo de tempo;

Ws_i = velocidade de deposição da classe i de partículas;

L_x, L_y, L_z = distância de difusão da partícula nas direções x , y e z , respectivamente.

Assume-se que a difusão da partícula segue um processo simples de *random walk* (passeio aleatório). A distância de difusão, definida como a raiz quadrada do produto do coeficiente de difusão e do passo de tempo, é decomposta em deslocamentos X e Y através de uma função que considera uma variável aleatória. A distância de difusão Z é escalonada numa direção aleatória positiva ou negativa. As equações para a difusão dos deslocamentos horizontal e vertical são descritas como:

$$L_x = \sqrt{D_h \Delta T} \cos(2\pi R) \quad (\text{E.1.1-7})$$

$$L_y = \sqrt{D_h \Delta T} \sin(2\pi R) \quad (\text{E.1.1-8})$$

$$L_z = \sqrt{D_z \Delta T} (0,5 - R) \quad (\text{E.1.1-9})$$

onde

D_h, D_z = coeficientes horizontal e vertical de difusão, respectivamente;

R = número real aleatório entre 0 e 1.

O modelo de partículas permite ao usuário simular o transporte e o destino de classes de partículas em decantação, e.g. areias, siltes e argilas. O destino de misturas formadas por mais de um componente em suspensão é simulado por superposição linear. A aproximação para partículas é extremamente robusta e independente do sistema de grades. Assim, o método não apresenta difusão artificial próximo aos gradientes de concentração e pode ser facilmente utilizado para vários tipos de sedimento e diferentes tecnologias de dragagem (e.g. mecânica, hidráulica). O objetivo inicial do SSFATE é fornecer assistência em questões relacionadas com a necessidade de associar “janelas ambientais” com as operações de dragagem. Contudo, modelos como o STFATE, o qual modela a dinâmica de campo próximo de uma operação de descarte, poderia ser utilizado para fornecer a fonte de sedimento associada com as operações de descarte no SSFATE.

Em adição ao transporte e dispersão, também existe uma taxa de deposição das partículas de sedimento. A sedimentação de misturas de partículas, algumas das quais podem ser coesivas por natureza, é um processo complicado, embora previsível, com a interação de diferentes tamanhos de classes, *i.e.* a deposição de um tipo de partícula não é independente dos outros tipos. Estes processos foram adotados no SSFATE e são baseados em estudos prévios da USACE (Teeter, 1998).

Ao final de cada passo de tempo, a concentração de cada classe de sedimento C_i , assim como a concentração total C , é calculada numa grade

numérica de concentração. O tamanho de todas as células da grade não varia espacial e temporalmente, com o número total de células aumentando de acordo com movimento da pluma de sedimento em suspensão a partir da fonte de dragagem.

E.1.2 Velocidade de Deposição de Sedimentos

A velocidade de deposição de cada classe de tamanho de partícula, exceto para areia grossa, é dada por:

$$W_{S_i} = a \left(\frac{C}{\bar{C}_{ul}} \right)^{n_i} \quad (\text{E.1.2-1})$$

$$a = \frac{1}{C} \sum_i a_i C_i \quad (\text{E.1.2-2})$$

$$\bar{C}_{ul} = \frac{1}{C} \sum_i C_{ul_i} C_i \quad (\text{E.1.2-3})$$

$$\bar{C}_{ll} = \frac{1}{C} \sum_i C_{ll_i} C_i \quad (\text{E.1.2-4})$$

onde

C_{ul_i} , C_{ll_i} = limites de concentração superior e inferior, respectivamente, para uma acentuada deposição da classe i de grão;

a_i = velocidade de deposição da média máxima de uma classe de tamanho de partículas;

n_i = coeficiente empírico para cada classe de sedimentos;

C = concentração total para todas as classes de tamanho de grão (exceto areia grossa).

Se $C \geq \bar{C}_{ul}$ então

$$Ws_i = a \quad (E.1.2-5)$$

Ao passo que, se $C \leq \bar{C}_{ll}$, então

$$Ws_i = a \left(\frac{\bar{C}_{ll}}{\bar{C}_{ul}} \right)^{n_i} \quad (E.1.2-6)$$

A Tabela E2 apresenta alguns valores típicos de C_{ll_i} , C_{ul_i} , a_i e n_i para quatro tamanhos de grão considerados no SSFATE. O modelo também considera uma classe granulométrica superior a 4, equivalente à areia grossa (classe 5), com valor de a_i constante e igual a 0,1 m/s.

Tabela E2 - Valores típicos dos coeficientes de concentração.

CLASSE	TAMANHO (MICRAS)	C_{ll_i} (g/cc)	C_{ul_i} (g/cc)	a_i (m/s)	n_i
1	0-7 (argila)	50	1.000	0,0008	1,33
2	8-35 (silte fino)	150	3.000	0,0023	1,10
3	36-74 (silte grosso)	250	5.000	0,0038	0,90
4	75-130 (areia fina)	400	8.000	0,0106	0,80

E.1.3 Deposição de Sedimentos

A massa de sedimento é removida primeiramente a partir da maior classe de tamanho que ocupa cada célula. A deposição para as classes restantes é, então, computada, começando com a segunda maior classe de tamanho e avançando em direção às menores. Tal deposição é calculada da seguinte maneira:

Se $0 \leq P_i \leq 0,05$, então:

$$Flux_i = \frac{C_i Flux_{i+1}}{C_{i+1} + 1} \quad (E.1.3-1)$$

Por outro lado:

$$Flux_i = b_i C_i W_{s_i} P_i \quad (E.1.3-2)$$

onde,

P_i = probabilidade de deposição (descrita abaixo) para cada classe i de grão;

C_i = concentração de sedimento;

W_{s_i} = velocidade de deposição calculada;

b_i = parâmetro empírico que inclui todos os outros fatores que influenciam a deposição, além do atrito.

A Tabela E3 apresenta valores típicos para o coeficiente b_i , para as quatro menores classes de tamanho de grão.

Tabela E3 - Valores típicos para b_i .

CLASSE	b_i
1 (argila)	0,2
2 (silte fino)	0,4
3 (silte grosso)	0,6
4 (areia fina)	1,0

A probabilidade de deposição P_i é, então, calculada para cada tamanho de classe, como segue, utilizando uma tensão de atrito de fundo (τ) através do campo de correntes:

P_1 , para a classe de tamanho 1 (argila):

$$P_1 = \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{cd}} \right), \text{ se } \tau < \tau_{cd} \quad (E.1.3-3)$$

$$P_1 = 0, \text{ se } \tau > \tau_{cd} \quad (E.1.3-4)$$

onde τ_{cd} é a tensão de atrito crítica para a deposição da fração argila. Um valor típico para τ_{cd} é 0,016 Pa.

P_i , para os outros tamanhos de classe (2, 3 e 4):

$$P_i = 0, \text{ se } \tau \geq \tau_{ul_i} \quad (\text{E.1.3-5})$$

$$P_i = 1, \text{ se } \tau \leq \tau_{ll_i} \quad (\text{E.1.3-6})$$

onde,

τ_{ul_i} = tensão de atrito acima da qual nenhuma deposição ocorre para a classe de grão i ;

τ_{ll_i} = tensão de atrito abaixo da qual a probabilidade de deposição para a classe de grão i é 1,0;

Para valores de τ entre τ_{ll_i} e τ_{ul_i} , é utilizada uma interpolação linear. Valores típicos para τ_{ll_i} e τ_{ul_i} são mostrados na Tabela E4.

Tabela E4 - Valores típicos para τ_{ll_i} e τ_{ul_i} .

CLASSE	τ_{ll_i}	τ_{ul_i}
0	0,016	0,03
1	0,03	0,06
2	0,06	0,20
3	0,20	0,90

O SSFATE representa cada classe de sedimento através de um conjunto de partículas cujas posições são determinadas pelo método lagrangeano. A posição das partículas corresponde ao centro de uma nuvem da distribuição Gaussiana do sedimento designado. Uma série de “pacotes” de partículas lagrangeanas são liberadas (simulando o descarte de sedimento durante operações de dragagem) a cada passo de tempo do modelo. Cada “pacote” consiste de 25 partículas que representam os tipos de sedimento (argila, silte fino, silte grosso, areia fina e areia grossa) e as distribuições verticais. Para cada 5 “pacotes” liberados em

simulações de 5 dias, por exemplo, o número total de partículas lagrangeanas seria de 180.000 (25 x 5 pacotes por cada passo de tempo (5 min.) durante 5 dias). Partículas lagrangeanas não se depositam como um todo, mas sim como frações baseadas no cálculo do fluxo descrito nas formulações acima. A deposição real pode continuar ocorrendo indefinidamente a partir da massa de partículas remanescentes (para cada classe de tamanho e locação de deposição). A distribuição da massa depositada é mapeada na mesma grade de concentração na coluna d'água.

E.2 BIBLIOGRAFIA

DOER (DREDGING OPERATIONS AND ENVIRONMENTAL RESEARCH), 2000.

Description of the SSFATE numerical modeling system. Technical Note. ERDC-TN-DOER-E10.

JOHNSON, B.H., E. ANDERSON, T. ISAJI, & D.G. CLARKE, 2000. Description of the SSFATE numerical modeling system. DOER Technical Notes Collection (TN DOER-E10). U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. <http://www.wes.army.mil/el/dots/doer/pdf/doere10.pdf>.

REINE, K.J.; DICKERSON, D.D. & CLARKE, D.G. 1998. Environmental windows associated with dredging operations. DOER Technical Notes Collection (TN DOER-E2). U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

TEETER, A.M. 1998. Cohesive sediment modeling using multiple grain classes, Part I: settling and deposition. Proceedings of INTERCOH 98 - Coastal and Estuaries Fine Sediment Transport: Processes and Applications, South Korea.

