

# A MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL NA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

*José Eduardo Alamy Filho<sup>1</sup>; Márcio Ricardo Salla<sup>2</sup> & Harry Edmar Schulz<sup>3</sup>*

**RESUMO** --- Este trabalho tem por meta apresentar novos aspectos de modelagem e simulação dos processos de suspensão e transporte de sedimentos em um canal de leito aluvial. Nesse sentido, foram utilizadas as equações diferenciais que governam o escoamento (continuidade e Navier-Stokes), além da equação que governa a distribuição espacial e temporal da concentração de substâncias dispersas num escoamento (Advecção-Difusão). Esta última pode ser utilizada na estimativa do transporte de sedimentos, adicionando um fator advectivo que leva em conta a sedimentação das partículas. Os procedimentos da Simulação de Grandes Escalas (SGE) foram utilizados no tratamento matemático da turbulência, enquanto que o Método de Fronteira Imersa (MFI) foi utilizado para modelar a interface entre o fluido e o fundo do canal (constituído de areia fina). A solução numérica das equações utilizou um esquema explícito de Diferenças Finitas. Os resultados da simulação revelam que o lançamento preferencial de sedimentos ocorre por estruturas de grande escala formadas a partir das cristas das dunas. A despeito disso, outras estruturas interessantes foram capturadas, como o lançamento vertical em forma de “cogumelo”, além de movimentos contra-rotativos de fluido responsáveis pelo transporte de sedimentos para regiões distantes do leito do canal.

**ABSTRACT** --- This study presents new aspects of the modeling and simulation of sediment transport and suspensions in alluvial channels. The differential equations which governs the flow (Navier Stokes and continuity) and the distribution of disperse substances (advection-diffusion) were used. The last equation is used to evaluate the sediment transport, considering the additional parcel which accounts for sedimentation of particles. Large Eddy Simulation was used to quantify turbulence, while the Immersed Boundary Method was used to represent the moving bed, composed by fine sand. The numerical solution of the equations used the explicit Finite Differences Scheme. The results show that the sediments are introduced in the flow mainly through large scale structures, formed beyond the dune crests. Despite of this, other interesting structures were captured, as the vertical launch with the model of a mushroom, beyond of against-rotating movements of the fluid responsible by the sediments transport to farther regions from waterway's bottom.

**Palavras-chave:** transporte de sedimentos, modelagem matemática, Simulação de Grandes Escalas.

---

1) Professor Doutor da Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Federal de Uberlândia. Avenida João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1Y, Campus Santa Mônica, Uberlândia, MG, CEP: 38400-902, tel: (34) 3239-4159; e-mail: zeedu@feciv.ufu.br.

2) Professor Doutor da Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Federal de Uberlândia, MG. Avenida João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1Y, Campus Santa Mônica, Uberlândia, MG, CEP: 38400-902, tel: (34) 3239-4159; e-mail: mrsalla@feciv.ufu.br.

2) Professor Titular da Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Av. Trabalhador São-carlense, 400, São Carlos, SP, 13566-590. e-mail: heschulz@sc.usp.br

# 1 - INTRODUÇÃO

A modelagem matemática e a simulação numérica/computacional constituem importantes ferramentas para o diagnóstico e para a previsão de problemas decorrentes do lançamento de substâncias poluentes em corpos de água. Esta alternativa vem sendo paulatinamente alavancada pela evolução dos computadores, fator que tem permitido a solução numérica das equações diferenciais governantes, com um menor número de simplificações, e em tempos viáveis. A modelagem matemática do transporte de substâncias baseia-se na solução das equações para os campos hidrodinâmicos (continuidade e Navier-Stokes) e da equação para transporte de massa de substâncias dispersas no meio (Advecção-Difusão).

Dentre os principais processos poluentes de corpos de água podem-se citar o aporte e o transporte de sedimentos. A poluição por sedimentos suspensos pode ser originada da erosão acelerada das bacias, fator que atua como fonte difusa de poluição de rios lagos e reservatórios, além dos processos erosivos no próprio corpo de água, decorrentes do aumento das vazões durante as chuvas e outros eventos transitórios. Partículas de sedimentos suspensas também podem capturar na sua superfície outras formas de substâncias poluentes, fenômeno conhecido como adsorção.

As primeiras tentativas de quantificar o transporte de sedimentos, em canais de leitos aluviais, seguiram a tendência de buscar condições a partir das quais ocorre o movimento incipiente das partículas. Essas tentativas redundaram no desenvolvimento de critérios de suspensão, os quais estabelecem condições críticas de escoamento associadas com a iminência de suspensão das partículas de sedimento. Paralelamente aos critérios de suspensão, buscou-se quantificar a contribuição do leito dos canais em relação aos sedimentos transportados pelo escoamento. Nesse sentido, os modelos ditos clássicos surgiram a partir de meados do século passado, estabelecendo relações empíricas resultantes de observações experimentais intensas, além de considerável trabalho estocástico. Todavia, essas formulações clássicas baseiam-se apenas em características médias do escoamento, não incorporando os efeitos de estruturas turbulentas que são relevantes para a suspensão (ou ressuspensão) e transporte de partículas suspensas.

O conhecimento razoavelmente recente de estruturas de movimento, que possuem relações mais diretas com a ressuspensão e o transporte de sedimentos, vem trazendo novas diretrizes às pesquisas. O desenvolvimento de técnicas de visualização de escoamentos, o incremento da capacidade computacional (memória e processamento de informações), a melhoria das técnicas numéricas de solução de equações diferenciais parciais, além da relativa popularização dos computadores, constituíram fatores fundamentais para obtenção de respostas mais detalhadas acerca dos fenômenos que ocorrem nos escoamentos. Dentre esses fenômenos, está incluído o transporte

de sedimentos, além do transporte de outras cargas poluentes.

Este trabalho tem como objetivo principal a apresentação de aspectos de modelagem e simulação do transporte de plumas de sedimentos suspensos em canais. Conforme já foi comentado, esses procedimentos podem ser levados em conta no âmbito dos modelos de turbulência e na aplicação de ferramentas numéricas para a solução das equações diferenciais governantes. Nesse contexto, para o tratamento da turbulência do escoamento foram utilizados procedimentos da Simulação de Grandes Escalas (SGE), enquanto que o Método de Fronteira Imersa (MFI) foi aplicado para o tratamento da interface entre o fluido e os depósitos de fundo do canal. A equação de Advecção-Difusão foi utilizada para a quantificação temporal e espacial das concentrações de sedimentos suspensos.

## **2 – TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR ESTRUTURAS TURBULENTAS**

Conforme já foi comentado no item anterior, a partir de meados do século passado, notáveis contribuições científicas foram introduzidas no estudo do transporte de sedimentos em canais. Esses estudos incorporaram observações experimentais intensas, informações relacionadas basicamente ao escoamento médio e considerável trabalho estocástico. Modelos clássicos de transporte de sedimentos, como o de Einstein (1942, 1950) para transporte de fundo e suspensão, além do modelo de Van Rijn (1984b) para transporte em suspensão, são ainda amplamente utilizados em estudos de campo. Apesar da relevante carga conceitual que esses modelos introduziram na área, eles não podem ser considerados universais, uma vez que incorporam muito brandamente as informações acerca da mecânica da turbulência. Nesse aspecto, os modelos clássicos de transporte de sedimentos vêm perdendo espaço, no tocante a aplicações mais refinadas, à medida que os avanços no entendimento das estruturas turbulentas contribuem para uma melhor caracterização e descrição do fenômeno.

Observações laboratoriais de estruturas turbilhonares de grande escala, nos escoamentos em canais, têm revelado a importância da turbulência na erosão e suspensão das partículas de sedimentos (Garcia et al., 1995, 1996). Essas observações indicaram claramente que a suspensão incipiente das partículas está associada com estruturas turbulentas coerentes ao longo da parede de fundo do canal. Tais estruturas turbilhonares são ditas coerentes porque conseguem manter uma forma relativamente bem definida por um tempo superior ao seu tempo de rotação. Os turbilhões de grande escala contêm a maior parte da energia turbulenta, causando um impacto significativo no transporte de partículas suspensas. Nas regiões distantes das paredes, a turbulência também exerce influência na manutenção de sedimentos em suspensão. Assim, quando a velocidade de sedimentação é sobrepujada por velocidades instantâneas locais ascendentes, as partículas se

mantêm em suspensão no corpo do escoamento. Essas correntes ascendentes podem decorrer tanto de estruturas turbilhonares de grande, quanto de pequena escala, sendo o seu grau de influência dependente das dimensões e da densidade da partícula.

Os turbilhões de origem cisalhante representam um mecanismo fundamental para o transporte de sedimentos em canais aluviais. Esses domínios são geralmente caracterizados por fundos ondulados (ondulações, dunas ou anti-dunas). A presença das ondulações faz surgir duas regiões com velocidades de ordens de grandezas distintas, além de separar a camada limite nas suas cristas. Isto estabelece uma camada cisalhante livre, ao longo da qual há a formação de estruturas coerentes (ver figura 1). Chang e Scotti (2003) realizaram Simulações Numéricas Diretas (SND) em canais com fundos ondulados, comprovando a preponderância dessas estruturas turbilhonares no lançamento de partículas em direção ao corpo principal do escoamento.

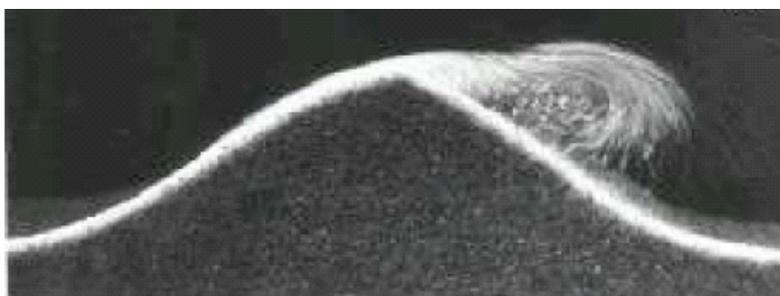


Figura 1 – Surgimento de turbilhões de grande escala com origem cisalhante a jusante das cristas de uma duna (retirado de Rousseaux et al. 2004).

É interessante notar que, em canais naturais, a origem de estruturas desta espécie requer a existência de uma superfície convexa, uma vez que o desprendimento dos vórtices ocorre a partir das cristas das ondulações.

### **3 – MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 – Equações governantes:**

O transporte de quantidade de movimento nos escoamentos é governado pelas chamadas equações de Navier-Stokes, obtidas a partir da aplicação da Segunda Lei de Newton num elemento infinitesimal de fluido, o qual se deforma em decorrência das tensões de cisalhamento. A aplicação das equações de quantidade de movimento deve caminhar em conjunto com o uso da equação da continuidade, suprindo, ao mesmo tempo, dois princípios físicos: a Segunda Lei de Newton (reproduzida por Navier-Stokes) e o princípio de conservação de massa (reproduzida pela equação da continuidade). O princípio de conservação de massa também pode ser aplicado a um composto transportado pelo fluido, resultando na chamada equação de Advecção-Difusão, governante do

transporte de massa, em termos de concentração do composto, no escoamento. Essas três equações são descritas como:

$$\rho \cdot \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \cdot \frac{\partial (u_j \cdot u_i)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + F_i \quad (\text{Navier-Stokes}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (\text{equação da continuidade para fluidos incompressíveis}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_j \cdot \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D \cdot \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \dot{g} \quad (\text{Advecção-Difusão}) \quad (3)$$

Nessas equações, os termos  $u_i$  e  $u_j$  representam as velocidades do fluido nas direções  $i$  e  $j$ , respectivamente;  $p$  representa a pressão,  $C$  a concentração de sedimentos,  $\rho$  a massa específica do fluido e  $\mu$  a sua viscosidade. Há ainda que se citar que o termo  $D$  representa o coeficiente de difusão de massa, ou simplesmente, a difusividade de uma substância transportada pelo escoamento. Na equação de Advecção-Difusão, o termo  $\dot{g}$  representa massa gerada (ou retirada) por unidade de tempo e volume. Aplicando essa equação para o caso de sedimentos, o referido termo pode ser substituído por uma expressão que leva em conta a sedimentação das partículas, de acordo com:

$$\dot{g} = \frac{\partial (w_s \cdot C)}{\partial x_2} \quad (4)$$

Na equação (4),  $w_s$  representa a velocidade de sedimentação das partículas e  $x_2$  corresponde à direção vertical.

É conveniente lembrar que a solução das equações governantes ocorre mediante o uso de métodos numéricos com seqüência de cálculo determinada por um algoritmo computacional. Nesse contexto, o presente trabalho utilizou o Método de Diferenças Finitas, dividindo o domínio de escoamento em pequenos elementos retangulares (pequenos, porém finitos) chamados de células. Este procedimento é conhecido por discretização.

### 3.2 – A Simulação de Grandes Escalas:

A Simulação de Grandes Escalas (SGE) (“*Large-eddy Simulation*”) é uma forma de tratamento matemático da turbulência, a qual conduz a um entendimento da dinâmica dos movimentos dos fluidos. Diante da falta de recursos computacionais aguçados o suficiente para solucionar todas as estruturas de movimento que surgem nos escoamentos turbulentos, a SGE busca

simular diretamente as maiores estruturas turbilhonares (estruturas de grande escala, ou escalas filtradas), as quais são capturadas pela discretização espacial. O efeito das pequenas estruturas (pequenas escalas de comprimento, ou escalas sub-malha) é aproximado por um modelo de turbulência, dito sub-malha. De fato, o cálculo das maiores escalas de turbulência, pela própria anisotropia relacionada à direção principal do escoamento, é um problema fundamentalmente dependente do tempo e do espaço, fator que exige a solução direta das equações governantes. Por outro lado, as estruturas turbilhonares de pequena escala, por apresentarem características mais isotrópicas e independentes das condições de contorno, são mais susceptíveis de serem parametrizadas.

O uso da SGE conduz à estimativa dos campos filtrados de velocidade, pressão e concentração. Esses campos não correspondem rigorosamente aos valores instantâneos dessas variáveis, ainda que conduzam a valores muito próximos. Nesse contexto, as equações governantes (1) a (3) são reescritas na seguinte forma:

$$\rho \cdot \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \cdot \frac{\partial (\bar{u}_j \cdot \bar{u}_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_{sm}) \cdot \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \bar{F}_i \quad (\text{Navier-Stokes filtradas})(5)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (\text{equação da continuidade filtrada para fluidos incompressíveis})(6)$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u}_j \cdot \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D_{sm} \cdot \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial (\bar{w}_s \cdot \bar{C})}{\partial x_2} \quad (\text{Advecção-Difusão filtrada})(7)$$

Note-se que, em relação às equações originais, houve pouca diferença. As barras sobrepostas indicam que as variáveis constituem valores filtrados, ao passo que os termos  $\mu_{sm}$  e  $D_{sm}$  representam, respectivamente, a viscosidade e a difusividade turbulentas sub-malha do escoamento, valores que são objeto de modelação. O chamado modelo de Smagorinsky é a metodologia mais utilizada no cálculo da viscosidade turbulenta sub-malha, a qual é calculada por uma formulação tipo comprimento de mistura, escrita como:

$$\mu_{sm} = \rho \cdot (C_s \cdot \Delta)^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \bar{S}_{ij} \cdot \bar{S}_{ij}} \quad (8)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

$$\Delta = \sqrt{\Delta x \cdot \Delta y} \quad (10)$$

Na equação (8), o termo  $C_s$  representa uma constante “ad-hoc” do modelo de Smagorinsky, cujo valor de 0,18 é normalmente recomendado na literatura. Na equação (10), o termo  $\Delta$  representa a espessura do filtro, calculada como a média geométrica dos lados das células de discretização.

No caso de sedimentos, é comum relacionar-se o coeficiente de difusão turbulenta com a viscosidade turbulenta do escoamento. Essa relação empírica é fornecida pela seguinte expressão:

$$D_{sm} = \Phi \cdot \frac{(\mu + \mu_{sm})}{\rho \cdot \sigma_c} \quad (11)$$

Na equação (11), o termo  $\sigma_c$  representa o número de Schmidt, normalmente tomado como unitário (Zedler e Street, 2001). O fator  $\Phi$  incorpora efeitos de interferência das partículas no escoamento e pode ser calculado por:

$$\Phi = 1 + \left( \frac{C}{0,65 \cdot \rho_s} \right)^{0,8} - 2 \cdot \left( \frac{C}{0,65 \cdot \rho_s} \right)^{0,4} \quad (12)$$

Na equação (12), o termo  $\rho_s$  representa a massa específica do sedimento.

Enfim, vale comentar que é a solução numérica das equações (5) a (11) que fornecerá os campos almejados de velocidade e concentração, permitindo observar como os sedimentos são transportados pelas correntes turbulentas do escoamento. No presente trabalho, essa solução foi obtida pelo Método de Passos Fracionados, esquema numérico explícito que vincula as equações de Navier-Stokes e da continuidade filtradas. Maiores detalhes acerca desse esquema numérico podem ser encontrados em Alamy Filho (2006), Lima e Silva (2002) e Lima e Silva et. al. (2003), entre outros. A solução da equação de Advecção-Difusão é direta, obtida por um esquema explícito a partir dos campos de velocidade já previamente calculados.

### 3.3 – Método de Fronteira Imersa:

Geometrias complexas e irregulares delimitantes de escoamentos naturais constituem fatores que dificultam consideravelmente a modelação numérica de um problema. Nesses casos, a discretização por uma malha de Diferenças Finitas tradicional geralmente não consegue cobrir toda a região analisada. A saída mais comum para esse agravante tem sido a discretização com malhas

não estruturadas ou com malhas não ortogonais. Ambos os casos introduzem uma série de etapas adicionais ao algoritmo de solução, as quais se relacionam com o tratamento da malha de discretização. Essas etapas intermediárias conduzem a um inevitável aumento do custo computacional, o qual se torna mais evidente no tratamento de domínios com geometrias móveis, conforme ocorre no transporte de sedimentos sobre fundos aluviais.

No contexto relacionado com a discretização de domínios irregulares, o Método de Fronteira Imersa (MFI) atua como uma ferramenta interessante, permitindo tratar escoamentos com uso de duas malhas, uma euleriana e outra lagrangeana. A chamada malha euleriana é responsável pela discretização da região analisada. Essa malha é ortogonal e fixa, mesmo para problemas com geometrias irregulares e que variam com o tempo. A chamada malha lagrangeana é representada por um conjunto de pontos que delineiam a geometria irregular sobre a qual ocorre o escoamento. Neste trabalho, a malha lagrangeana foi utilizada para modelar a fronteira entre os depósitos de areia, do fundo do canal, e o fluido em escoamento. A figura 2 ilustra como é feito o tratamento de um problema de geometria irregular com o uso do MFI.

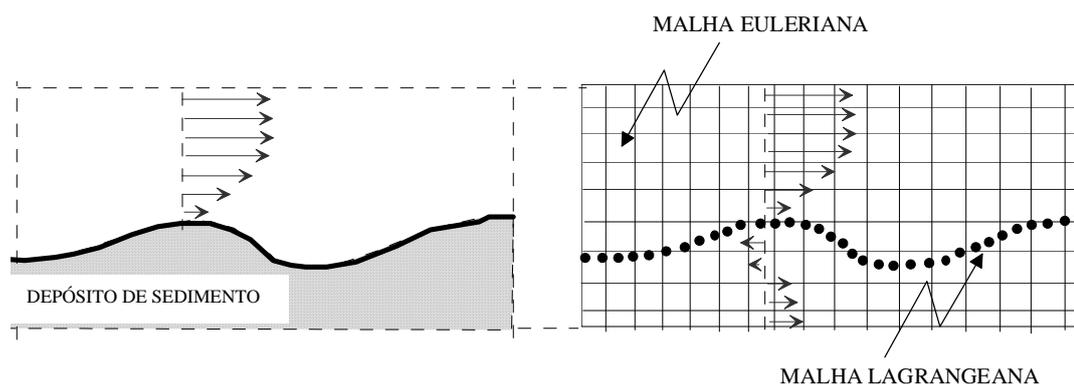


Figura 2 – Pelo Método de Fronteira Imersa, os depósitos de fundo do canal são modelados por uma malha lagrangeana, cujos pontos delimitam a sua interface com o escoamento. O domínio real do escoamento é estendido para um domínio virtual (computacional) retangular, passível de ser discretizado por uma malha de Diferenças Finitas cartesiana (malha euleriana).

É interessante notar que, com o uso do MFI, um domínio irregular pode ser estendido para um domínio retangular, passível de ser discretizado por uma malha ortogonal simples. No caso ilustrado pela figura 2, toda a região é simulada como se estivesse preenchida por fluido. Assim, há um escoamento virtual abaixo da interface lagrangeana, o qual não tem significado físico, uma vez que o interesse está focado na parte superior, onde realmente existe escoamento. A presença da parede (depósito de areia) é simulada virtualmente pela imposição de um campo de força disseminado a partir da malha lagrangeana. Esse campo de força constitui o termo fonte ( $\bar{F}_i$ ) escrito nas equações de Navier-Stokes filtradas (equação 5). A função do campo de força é impor a condição de não deslizamento entre fluido e parede. Assim, ao se aproximar da malha lagrangeana,

o fluido tem o seu vetor velocidade alterado pelo campo de força, reconhecendo, dessa forma, a presença de um contorno sólido. Os procedimentos de cálculo de  $\bar{F}_i$  fogem ao escopo deste trabalho, mas convém citar que foi utilizado o Modelo Físico Virtual (Lima e Silva, 2002; Lima e Silva et al., 2003), desenvolvido na Universidade Federal de Uberlândia. Detalhes acerca das diretrizes de cálculo podem ser encontrados em Lima e Silva (2002), Lima e Silva et al. (2003), Alamy Filho e Schulz (2005), Alamy Filho (2006), entre outros.

### 3.4 – Velocidade de sedimentação das partículas:

A sedimentação assume um papel fundamental no estudo do transporte de sedimentos, uma vez que, em geral, a massa específica das partículas supera em muito a massa específica da água, trazendo uma tendência de formação de depósitos. Apesar disso, movimentos turbulentos verticais podem sobrepujar essa tendência de sedimentação, transportando sedimentos a distâncias consideráveis do fundo, conforme será demonstrado nos resultados das simulações.

Convém comentar que a velocidade de sedimentação ( $w_s$ ) responde, na equação governante (advecção-difusão), como um fator advectivo, transportando partículas na direção vertical, no sentido do corpo do escoamento para o fundo do canal. Nessa etapa de modelagem, é conveniente considerar que a velocidade de sedimentação seja função da concentração de partículas, sendo que setores mais concentrados tendem a apresentar velocidades de sedimentação menores. Nesse contexto, este trabalho utilizou a formulação proposta por Schulz e Alamy Filho (2005), baseada no decaimento da energia cinética das partículas no processo de sedimentação. A referida formulação, desenvolvida analiticamente e posteriormente calibrada com dados experimentais (ver figura 3), é descrita a seguir:

$$w_s = w_o \cdot e^{\left[-\left(\sum_{i=2}^n \frac{\beta_i}{2}\right)\right]} \cdot e^{\left(\frac{\beta_0 \cdot \phi}{2 \cdot 1-\phi}\right)} \cdot (1-\phi)^{\frac{\beta_1}{2}} \cdot \prod_{i=2}^n e^{\left[\frac{\beta_i \cdot (1-\phi)^{i-1}}{2}\right]} \quad (13)$$

A equação (13) descreve uma série de potências em que o termo  $\phi$  representa a concentração volumétrica de sedimentos. A concentração volumétrica é um adimensional que descreve a fração em volume de sedimentos suspensos, podendo ser calculada em função da concentração e da massa específica do sedimento, de acordo com:  $\phi = \frac{\bar{c}}{\rho_s}$ . Ainda na equação (13), o termo  $w_o$  representa a velocidade terminal de sedimentação descrita pela Lei de Stokes.

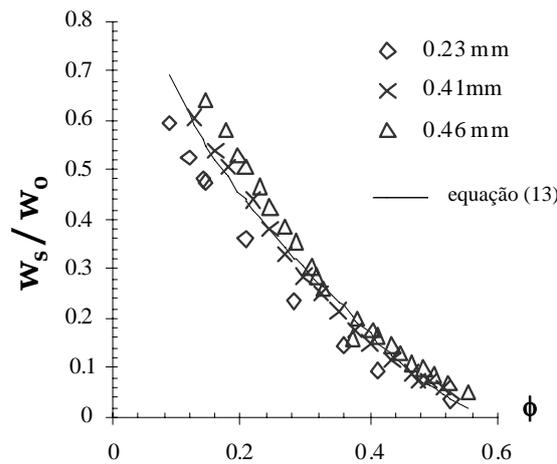


Figura 3 – Velocidade adimensional de sedimentação como função da concentração de sedimentos suspensos. Comparação entre a equação (13) e dados experimentais (TOMKINS et al., 2004) para sedimentação de partículas de areia com três diâmetros diferentes.

Ainda no tocante ao uso da equação (13), normalmente um truncamento de terceira ordem (ou seja, fazendo  $n = 3$ ) é suficiente para que a série assuma um comportamento condizente com curvas experimentais (ver figura 3). Para esta ordem de truncamento e, diante dos dados experimentais relacionados na figura 3, os parâmetros  $\beta_i$  foram calibrados, assumindo os seguintes valores:  $\beta_0 = 35,123$ ;  $\beta_1 = -82,710$ ;  $\beta_2 = 52,646$  e  $\beta_3 = 2,071$ .

### 3.5 – Critério para erosão incipiente do leito:

A estimativa da condição de ressuspensão iminente de sedimentos tem sido objeto de uma série de estudos experimentais, dentre os quais destacam-se os critérios de Shields (1936) e das Figuras de Erosão (Borges e Saraiva, 1980). Por este último critério, a velocidade de cisalhamento crítica pode ser calculada como uma função das massas específicas do sedimento e do fluido ( $\rho_s$  e  $\rho$ ), do diâmetro médio das partículas ( $d$ ) e da viscosidade do fluido ( $\mu$ ), de acordo com:

$$u_{*cr} = 0,192 \cdot \left( \frac{\rho_s \cdot g}{\rho} \right)^{0,411} \cdot d^{0,234} \cdot \left( \frac{\mu}{\rho} \right)^{0,178} \quad (14)$$

Na modelagem proposta, atingida a situação de ressuspensão iminente das partículas, concentrações de sedimentos são lançadas da malha lagrangeana (interface depósito/fluido) para o seio do escoamento. Essa condição de contorno é inserida por um fluxo vertical de sedimentos ( $\dot{f}$ ), estimado aqui, pela formulação de Van Rijn (1984):

$$\dot{f} = 3,3 \cdot 10^{-4} \cdot \left[ \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g \cdot \frac{\rho^2}{\mu^2} \right)^{1/3} \right]^{0,3} \cdot \left( \frac{u_*^2 - u_{*cr}^2}{u_{*cr}^2} \right)^{1,5} \cdot \rho_s \cdot \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g \cdot d \right)^{1/2} \quad (15)$$

Na equação (15), o termo  $g$  representa a aceleração da gravidade e o termo  $u_*$ , a velocidade de cisalhamento, obtida a partir dos campos de velocidade calculados numericamente.

### 3.6 – Experimento numérico:

As metodologias descritas nos itens anteriores foram aplicadas na simulação de um escoamento sobre um fundo aluvial hipotético. O número de Reynolds simulado foi de 12250, levando em conta a velocidade média ao longo da vertical e a profundidade do escoamento, como dimensão característica. O fundo do canal foi considerado como um depósito de areia fina de densidade 2,65 e diâmetro médio de 0,12 mm. A malha de discretização euleriana foi construída com 35000 células retangulares e a malha lagrangeana foi delineada com 701 pontos. A figura 4 ilustra a transformação do domínio real para o domínio computacional, tratado com o Método de Fronteira Imersa.

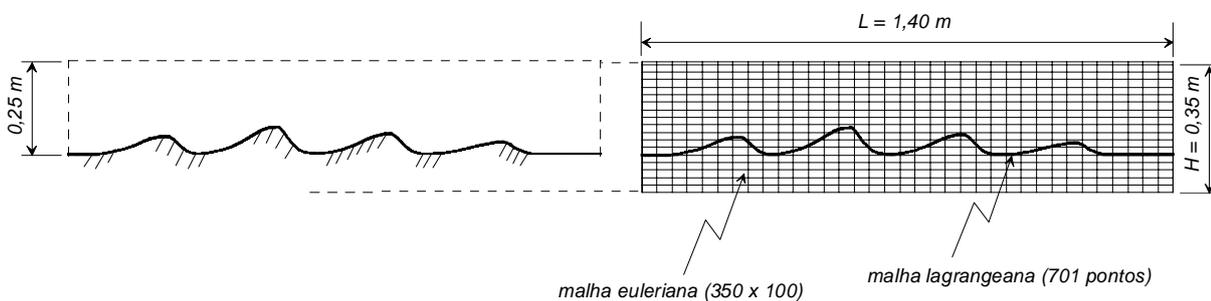


Figura 4 - Transformação do domínio real para o domínio computacional estendido.

O código computacional foi escrito em Fortran Power Station 4.0. A simulação numérica foi realizada com um micro-computador Pentium 4 (3.2 GHz) sem qualquer forma de processamento paralelo. Passos de tempo da ordem de  $10^{-3} \text{ s}$  determinaram a simulação de um minuto de escoamento em aproximadamente seis dias. Os resultados são mostrados no item seguinte.

## 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

A implementação computacional dos procedimentos de cálculo descritos no item anterior evidenciou a presença de estruturas turbilhonares que são fundamentais para o processo de suspensão, ressuspensão e transporte de sedimentos. Dentre essas estruturas destacam-se os

turbilhões coerentes de grande escala, formados a jusante das cristas das dunas de canais aluviais (ver figuras 5 e 6). Nesses canais, a presença de ondulações, determinadas pelos depósitos de sedimentos, estabelece duas regiões com velocidades de ordens de grandeza distintas, além de separar a camada limite nas suas cristas. Esse fator faz surgir uma camada cisalhante livre, ao longo da qual há a formação de grandes turbilhões. Esses turbilhões normalmente podem ser caracterizados como estruturas coerentes, uma vez que apresentam certo grau de organização em relação ao escoamento.

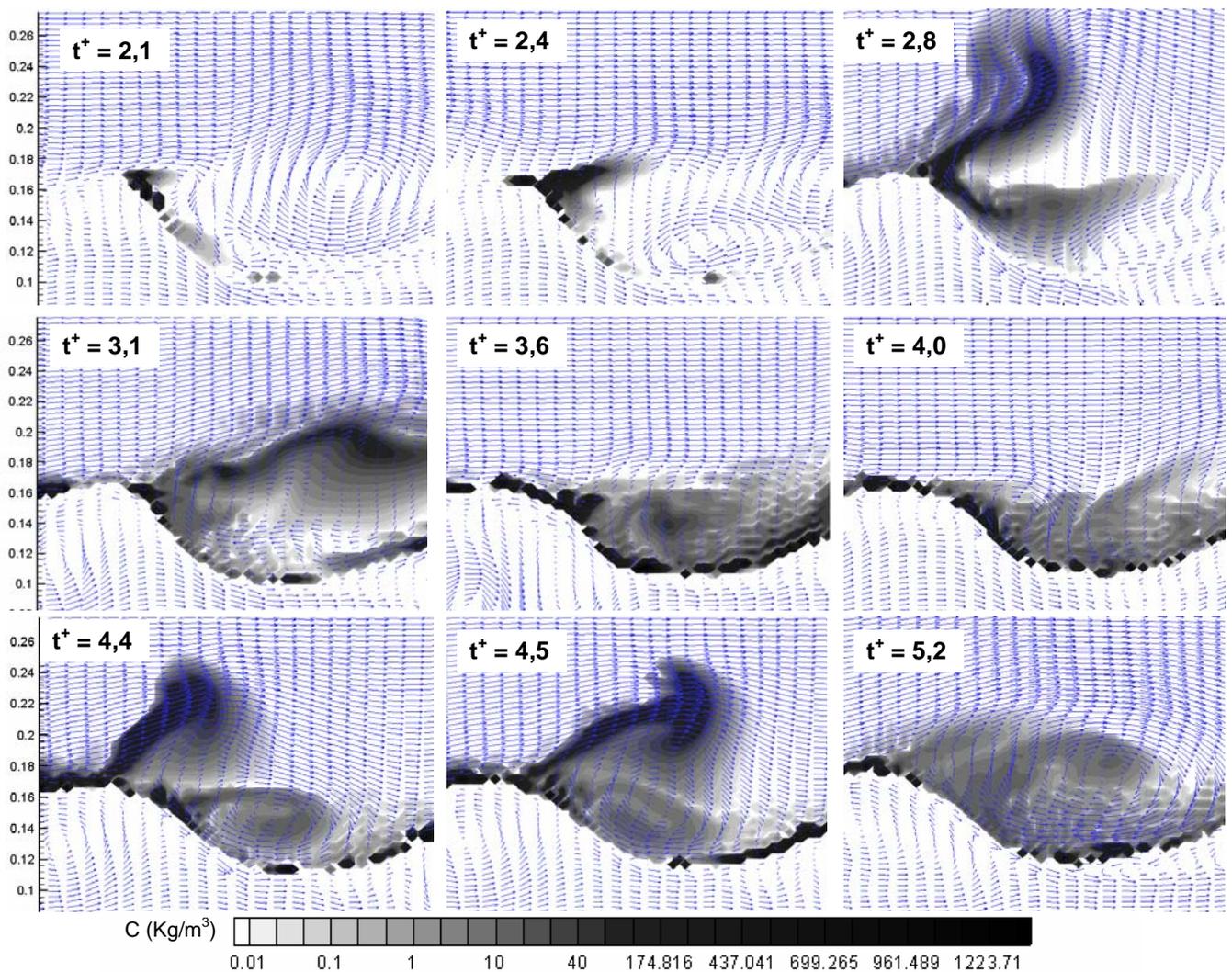


Figura 5 – Relação entre os vetores de velocidade e a concentração de sedimentos. A evolução temporal ilustra o lançamento de sedimentos a partir da crista da duna e a formação de camadas cisalhantes nos vales.

Na figura 5, convém citar que o tempo foi adimensionalizado como  $t^+ = t \cdot U / H$ , em que U é a velocidade média ao longo do domínio computacional estendido e H é a altura desse domínio. É também interessante notar a existência de um escoamento virtual abaixo da forma de fundo,

conseqüência da adoção do Método de Fronteira Imersa. A despeito disso, salienta-se que os campos inferiores de velocidade em nada interferem nos campos superiores, uma vez que o campo de força impede a perfuração da fronteira (malha lagrangeana).

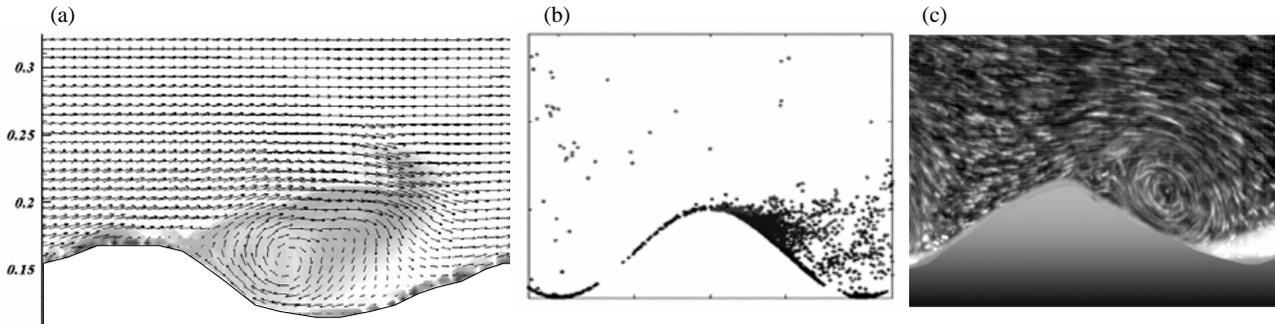


Figura 6 - Os turbilhões coerentes formados a jusante da crista das dunas constituem estruturas primordiais para o lançamento e transporte de sedimentos em canais aluviais. Na figura estão representados os resultados simulados no presente trabalho (a), simulações com modelos lagrangeanos (b) (Chang e Scotti, 2003) e visualizações experimentais (c) de Rousseaux et al. (2004).

O lançamento de sedimentos a partir das cristas das dunas, decorrente do surgimento de turbilhões coerentes nessas regiões, constitui o principal mecanismo de injeção de partículas suspensas no escoamento. De especial interesse é a correlação entre os movimentos do fluido e dos sedimentos. Diante disso, a figura 7 ilustra o transporte de sedimentos por uma estrutura turbilhonar coerente.

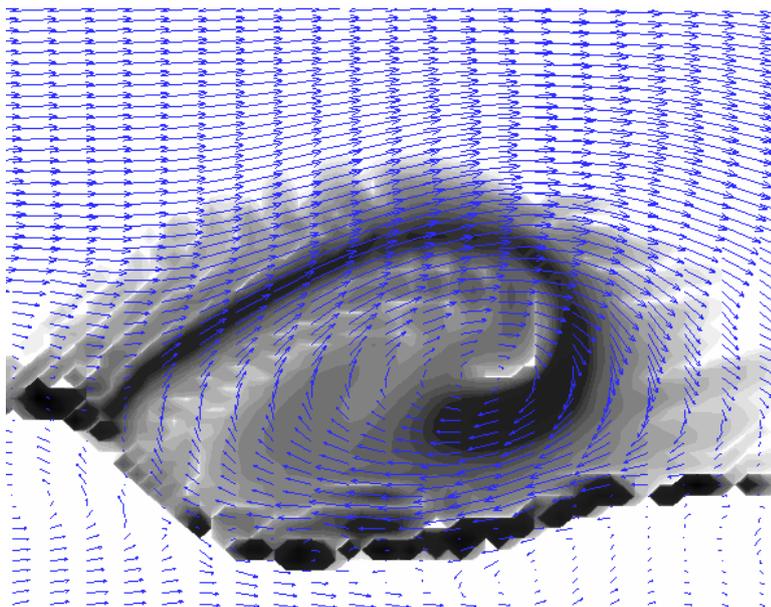


Figura 7 – Distribuição da concentração de partículas acompanhando o movimento de uma estrutura turbilhonar de grande escala.

A distribuição de sedimentos suspensos em forma de “cogumelo” constitui outra estrutura interessante que foi devidamente capturada pela simulação. Esses movimentos (ilustrados pela figura 8) não podem ser considerados estruturas tipo “grampo de cabelo”, muito comuns em instabilidades de camada limite, mas sim uma composição entre a velocidade de sedimentação e a velocidade do escoamento.

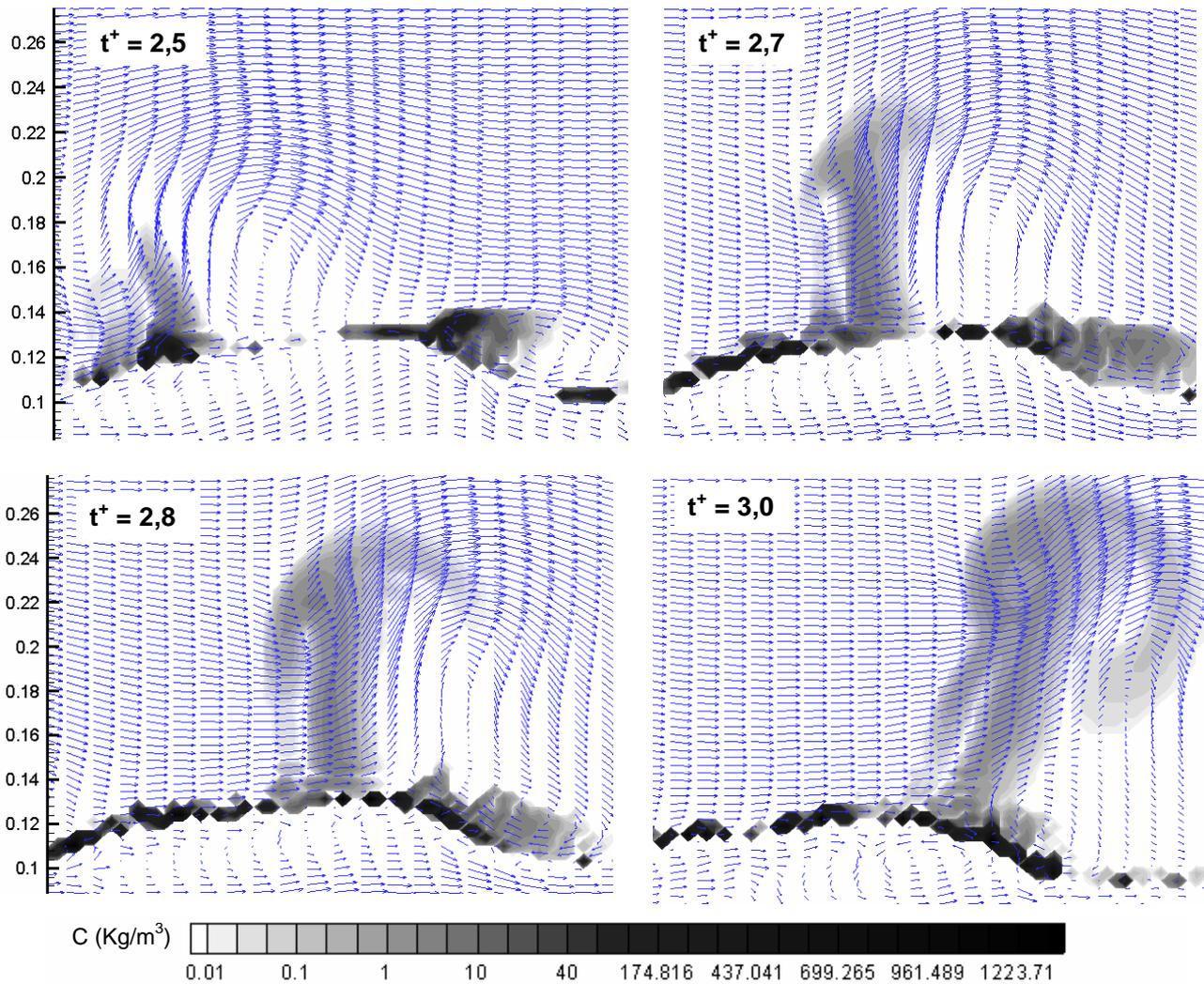


Figura 8 - Estruturas verticais de lançamento de sedimentos suspensos.

Comparando os campos de concentração da figura 8 com os campos da figura 5 (note-se que as escalas de concentração são as mesmas) percebe-se que a contribuição dos lançamentos verticais, no tocante ao aporte de sedimentos suspensos, é menor do que a contribuição dos turbilhões que se formam a jusante das cristas das dunas.

Sedimentos em suspensão também podem atingir alturas consideráveis dentro do escoamento, conforme ilustra a figura 9. Isto pode ser explicado pela indução de estruturas de movimento contra-rotativas, deslocando parcelas macroscópicas de fluido, desde as proximidades do fundo, para regiões distantes das paredes. Esses movimentos, definidos como “boils” de primeira espécie (Nezu e Nakagawa, 1993) carregam quantidades consideráveis de sedimentos para o corpo do escoamento. Os “boils” normalmente podem apresentar surgimento na superfície de rios e estuários, contribuindo não só para o carregamento de partículas suspensas até a superfície livre, mas também para o mecanismo de reaeração do curso de água.

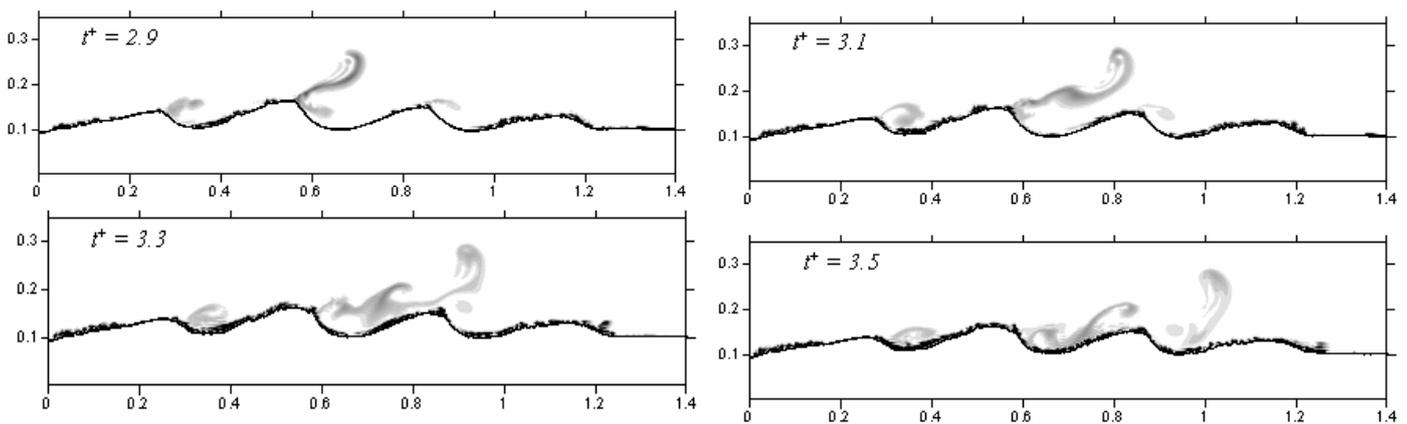


Figura 9 - Lançamento e transporte de sedimentos para regiões distantes das paredes (depósitos de fundo). Esse transporte é decorrente da presença de estruturas turbilhonares contra-rotativas cuja formação é induzida no fundo dos canais.

## 5 - CONCLUSÕES

Os resultados demonstram que o tratamento numérico das equações diferenciais que governam os movimentos dos fluidos e da equação que governa o transporte de massa de sedimentos suspensos, aliado à simulação computacional de escoamentos, permite estimar o surgimento de estruturas importantes para a suspensão (ressuspensão) e transporte de sedimentos.

O uso da equação de Advecção-Difusão permite avaliar a evolução espacial e temporal da concentração de sedimentos, constituindo uma alternativa viável para escoamentos em cursos naturais que, na sua maioria, transportam cargas consideráveis de partículas (concentrações volumétricas superiores a  $10^{-3}$ ). Comparações entre a simulação com a equação de Advecção-Difusão e aquelas que analisam os movimentos de partículas isoladas, revelam comportamentos semelhantes, com destaque para o lançamento de sedimentos para o interior do escoamento. Nesse contexto, verificou-se que as maiores concentrações de sedimentos são lançadas por estruturas turbilhonares de grande escala, formadas a partir das cristas das dunas. Outras estruturas de injeção de sedimentos também foram capturadas como aquelas que assumem forma aproximada de

“cogumelo” (lançamentos verticais), bem como os “boils” originados por movimentos contrarotativos de fluido.

A captura de estruturas relativamente refinadas, conforme a descrição anterior, foi possível mediante a aplicação dos procedimentos da Simulação de Grandes Escalas, a qual fornece, como produto, campos hidrodinâmicos e de concentração filtrados ou quase instantâneos.

As metodologias aqui descritas também podem ser aplicadas a outros tipos de poluentes, indicando uma alternativa potencialmente interessante para a previsão e diagnóstico do comportamento de plumas poluentes em cursos de água.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP, Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo apoio financeiro dado às pesquisas na área de turbulência e transporte de sedimentos, desenvolvidas no Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos.

## BIBLIOGRAFIA

ALAMY FILHO, J. E. (2006) Modelação numérica de processos de sedimentação em escoamentos turbulentos e análise da ressuspensão em canais. São Carlos. 2006. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo.

ALAMY FILHO, J. E.; SCHULZ, H.E. (2005) Simulação de escoamento sobre forma de fundo complexa utilizando o Método de Fronteira Imersa. XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 2005. Anais. João Pessoa PB.

BORGES, A.R.J.; SARAIVA, J.A.G. (1980) An erosion technique for assessing ground level winds. *Wind Engineering*, vol.1, Oxford:Pergamon Press, pp.235-242..

CHANG, Y.S.; SCOTTI, A. (2003) Entrainment and suspension of sediments into a turbulent flow over ripples. *Journal of Turbulence* (<http://jot.iop.org/>), vol. 19, No.4, pp. 2-18.

EINSTEIN, H. A. (1942) Formulae for the transportation of bed-load. *Trans. of ASCE*, v.107, p. 561-597.

EINSTEIN, H. A . (1950) The bed load function for sediment transportation in open channel flow. *United States Department of Agriculture, Technical Bulletin*, n. 1026, p. 25.

GARCIA, M.H.; NINO, Y.; LOPEZ, F. (1996) Chapter 3: Laboratory observations of particle entrainment into suspension by turbulent bursting. *Coherent flow structures in open channels*, Wiley, New York.

- LIMA E SILVA, A. L. F. (2002) Desenvolvimento e implementação de uma nova metodologia para modelagem de escoamentos sobre geometrias complexas: Método da Fronteira Imersa com Modelo Físico Virtual. Uberlândia. 2002. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia.
- LIMA E SILVA, A. L. F., SILVEIRA NETO, A., & DAMASCENO, J.J.R. (2003) Numerical simulation of two-dimensional flows over a circular cylinder using the immersed boundary method. *Journal of Computational Physics*, 189, pp.351-370.
- NEZU, I.; NAKAGAWA H. (1993) Turbulence in open-channel flows. *IAHR Monograph Series*, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- RIJN, L. C. van. (1984) Sediment pick-up functions. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol.110, No.10.
- RIJN, L.C. van. (1984b) Sediment transport, part II: suspended load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, v.110, n.11, p. 1613-1641.
- ROUSEAUX, G., YOSHIKAWA, H., WEISFREID, J.E. (2004) Dynamics of transient eddy above rolling-grain ripples. *Physics of fluids*, v.16, n.4, p.1049-1058.
- SCHULZ, H. E.; ALAMY FILHO, J. E. (2005) Velocidade de sedimentação para conjunto de partículas e sua dependência para com a concentração de sedimentos – uma abordagem partindo da quantificação da energia cinética, *Revista Ciência e Engenharia*, ano14, n. 2.
- SHIELDS, A. (1936) Anwendung der ahnlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung and die geschlebebewegung. Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, n.26.
- TOMKINS, M.R., BALDOCK, T.E., NIELSEN, P. (2004) Hindered Settling Velocity for Sand, Abstract ICCE.
- ZEDLER, E.A., STREET, R.L. (2001) Large-eddy simulation of sediment transport: currents over ripples. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, n.127, n.6, p. 444-452.