

JOSÉ EDUARDO ALAMY FILHO

**Modelação numérica de processos de
sedimentação em escoamentos turbulentos
e análise da ressuspensão em canais**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos,
da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos
para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Tit. Harry Edmar Schulz

São Carlos

2006

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da
Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP**

Alamy Filho, José Eduardo

A318m

Modelação numérica de processos de sedimentação em escoamentos turbulentos e análise da ressuspensão em canais / José Eduardo Alamy Filho. – São Carlos, 2006.

Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2006.

Área: Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Tit. Harry Edmar Schulz.

1. Turbulência. 2. Transporte de sedimentos. 3. Simulação de grandes escalas. 4. Método de fronteira imersa. I. Título.

*A tarde morria! Nas águas barrentas
As sombras das margens deitavam-se longas.
Na esguia atalaia das árvores secas
Ouvia-se um triste chorar de arapongas.*

*A tarde morria!... Dos ramos, das lascas,
Das pedras, do líquen, das heras, dos cardos
As trevas rasteiras com o ventre por terra
Saíam quais negros, cruéis leopardos.*

*A tarde morria! Mais funda nas águas
Lavava-se a galha do escuro ingazeiro...
Ao fresco arrepio dos ventos cortantes
Em músico estalo rangia o coqueiro.*

*Sussurro profundo! Marulho gigante!
Talvez – um silêncio!... Talvez – uma orquestra...
Da folha, do cálix, das asas, do inseto...
Do átomo – à estrela... do verme – à floresta!...*

*As garças metiam o bico vermelho
Por baixo das asas, da brisa ao açoite.
E a terra na vaga azul do infinito
Cobria a cabeça co'as penas da noite!*

*Somente por vezes, dos jungles das bordas
Dos golfos enormes daquela paragem,
Erguia a cabeça surpreso, inquieto,
Coberto de limos – um touro selvagem.*

*Então as marrecas, em torno boiando,
O vôo encurvavam medrosas, à toa...
E o tímido bando pedindo outras praias
Passava gritando por sobre a canoa!...*

Castro Alves (“Crepúsculo Sertanejo”)

Agradecimentos

Esta não é, certamente, a parte do texto mais difícil de escrever. Todavia, também não é das mais fáceis. A redação dos Agradecimentos remete a nossa memória a tempos passados, fazendo-nos, por eles, viajar até o presente. Escrever estas páginas tão sucintas é também recordar... Dessas lembranças, a primeira delas remete-se à primeira viagem a São Carlos, na ocasião em que vinha prestar a prova para o Mestrado. Cheguei a São Carlos para passar dois anos e acabei ficando uma boa temporada. Na verdade é isso que ocorre com muitos de nós: chegamos aqui, ficamos e, até prolongamos nossa estada por mais tempo. Mas a despedida é praticamente inexorável. São Carlos é o universo transitório de uma fase da vida transitória. Aqui, pode-se se dizer que o Brasil se encontra e, aos poucos, se despede. Talvez, não exista outra cidade onde se possa conhecer, de forma tão próxima e sem sair do lugar, a diversidade de culturas, costumes, sotaques do nosso país. Parece que essa “convergência de povos”, somada às distâncias das terras natais, contribui para o encadeamento de muitas amizades. A estes amigos, ficam meus agradecimentos, implícitos nessas palavras breves.

Os agradecimentos fundamentais remetem-se aos meus pais José Eduardo e Angela, aos meus irmãos Karla e João Paulo e aos meus avós Joffre e Maria Helena, Waldemar e Tereza. Sem eles nada disso aqui seria possível para mim. Conquistas rigorosamente individuais não existem, pois sempre há uma confluência de pensamentos e esforços de várias pessoas num sentido comum. Vocês, meus familiares, constituem a base de tudo e serão para sempre os alicerces sólidos de todos os meus triunfos.

Agradecimentos especiais são destinados à Nágela, pelo carinho e paciência, atenuando a minha ansiedade e, sobretudo, ajudando a me reerguer nos momentos em que eu achava que poderia sucumbir.

Sucumbir ... Muitas vezes, naqueles momentos em que as idéias, embora numerosas, parecem não produzir efeitos, esta palavra parece rodear nossos pensamentos. Não se resume a essência de um doutoramento num texto só, porque as idéias produzidas nesta fase precisam estar bem concatenadas. Neste sentido, cada elo é construído às expensas de muita leitura e muitas “metodologias intermediárias”, lentamente (e pacientemente) refinadas ao longo do tempo para produzir resultados paulatinamente melhores. Como, muitas vezes os passos não são longos, a palavra sucumbir nos surge quais abismos laterais que parecem estreitar a

caminhada até a nossa meta. Por isto, o apoio das pessoas que nos são queridas é imprescindível.

Agradeço ao amigo Leonardo Barra, por muitas vezes guiar-me pelos caminhos certos, aos amigos Peter Cheung, Tinil Carrijo, Klebber Formiga, Johannes, Caco e, aos companheiros mais próximos, Fernando Braga e Alexandre Kepler. Não poderia deixar de citar os amigos Marcelo Barroso, André Oliveira, Sérgio Luís, Leonardo Soares, Cristiano das Neves, Álvaro Fontana e Carlos, imortalizado em São Carlos como o popular “Cabral”. Também não poderia me esquecer dos amigos Hélio, Adelena, Luciana, Karina, Lara e Monique. Todos aqui, de certa forma, nos acompanhamos nas aflições e sucessos. Agradeço ao velho amigo Fabiano, por um voto de confiança que foi especialmente fundamental num momento difícil, além da amizade fraterna de muitos anos.

O futebol... Doutorar é caminhar com a cabeça fervilhando de idéias, por isto o futebol funcionava como uma espécie de refúgio descentralizador para muitos de nós. Aí, é difícil não lembrar do início de tudo. Das tardes de quinta-feira pelos idos de 1999 e dos personagens “atletas” Zeedu (no caso, eu mesmo), Vinícius, Tibério, Fábio, Jorge, João Fernando, Iran, Marcelo, Nikolas, Roger e os dois “Andrés”, o Oliveira e o Schuster. Isto no mestrado. No doutorado, o futebol marcou-se pelas manhãs de sábado e pela incomparável “Confraria dos Pernetas” nas noites de quarta. Aqui, deixo os meus agradecimentos aos bons amigos Alexandre (Fininho), Fernandão, Maurício, Chico Vela, Claudião e a todos os demais, pelos tantos momentos memoráveis.

Agradeço ao senhor Álvaro e à dona Zulmira pelo zelo constante durante todos estes anos.

Agradeço ao professor Harry Edmar Schulz, por ser mais que um orientador, por ser sempre um amigo e incentivador. Trabalhar com o professor Harry e poder absorver um pouco dos seus conhecimentos foi para mim, motivo de grande honra.

Agradeço especialmente aos professores Dagoberto Camargo Caria, Hans George Arens, Fazal Hussain Chaudhry, Swami Marcondes Villela, Dante Contin Neto, Harry Edmar Schulz e Aristeu da Silveira Neto por me guiarem nesse caminho “das águas”.

Não poderia deixar de agradecer a todos os bons amigos cujo apoio foi imprescindível para abrir o caminho até o final desta pesquisa. Tenho muita gratidão por todos.

A FAPESP (Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo) nos foi sempre atenciosa e seu apoio foi fundamental para a condução e conclusão deste trabalho.

Resumo

ALAMY FILHO, J. E. **Modelação numérica de processos de sedimentação em escoamentos turbulentos e análise da ressuspensão em canais.** 2006. 231 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

O estudo do transporte de sedimentos, partindo da estimativa de estruturas turbulentas relevantes, constituiu o principal foco deste trabalho. Assim, a equação de transporte de massa (Advecção-Difusão) foi aplicada em conjunto com as equações de Navier-Stokes e da Continuidade filtradas. Neste contexto, houve a necessidade de uma descrição conveniente da turbulência, o que ocorreu mediante a aplicação da Simulação de Grandes Escalas acoplada a modelos de viscosidade turbulenta sub-malha. O Método de Fronteira Imersa foi utilizado na modelação da interface sólido/fluido, representada pela geometria de fundo dos canais. As equações de Navier-Stokes filtradas e da Continuidade foram resolvidas numericamente pelo Método de Passos Fracionados, o qual estabeleceu o almejado acoplamento entre ambas. Na discretização das equações governantes foi utilizado o Método de Diferenças Finitas, aplicado sobre malhas deslocadas. Os esquemas explícitos de Adams-Bashforth (de segunda e quarta ordens) foram utilizados no avanço temporal das velocidades do escoamento e das concentrações de sedimentos. Uma nova formulação para a velocidade de sedimentação foi desenvolvida analiticamente, enquanto que eventuais fluxos de ressuspensão foram impostos como condição de contorno no fundo do canal. Todos os códigos computacionais, que estabeleceram as diretrizes e a lógica de cálculo, foram criados no contexto deste trabalho. Os resultados obtidos indicam que a Simulação de Grandes Escalas, associada ao Método de Fronteira Imersa, considerando velocidade de sedimentação conforme aqui modelada, e ainda utilizando a equação de Advecção-Difusão para o transporte de massa, constituem ferramentas altamente adequadas à estimativa do transporte de sedimentos pela água.

Palavras-chave: Turbulência, Transporte de sedimentos, Simulação de Grandes Escalas, Método de Fronteira Imersa.

Abstract

ALAMY FILHO, J. E. **Numerical modeling of settling processes in turbulent flows and channel re-suspension analysis.** 2006. 231 p. Thesis (Doctoral) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

The goal of this work is the research of sediment transport phenomena, deriving from outstanding turbulent eddies estimative. Thus, the mass transport equation (Advection-Diffusion) was connected with the filtered Navier-Stokes and Continuity equations. In this context, the Large-Eddy Simulation and sub-grid viscosity modeling established a convenient description of turbulence effects. The Immersed Boundary Method was applied to model solid/fluid interface, represented here by the shapes of channel bottom. The filtered Navier-Stokes and Continuity equations were solved by the Fractional Step Method. The equations were discretized with the Finite Difference Method, applied over staggered grids, whereas explicit Adams-Bashforth schemes (second and forth orders) were used in temporal advancement of velocities and sediment concentration fields. A new analytical formulation for settling velocity was obtained, while fortuitous re-suspension flux was applied like a boundary condition in the channel bottom. The computational code was totally developed in this work. The results of present simulations show that Large-Eddy Simulation coupled to the Immersed Boundary Method, considering, yet, the settling velocity of particles and the Advection-Diffusion equation for mass transport, constitute potential tools for sediment transport evaluation in water flows.

Keywords: Turbulence, Sediment transport, Large-Eddy Simulation, Immersed Boundary Method.

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – Nos escoamentos laminares, as perturbações são inibidas até que seja atingida uma situação de equilíbrio. Nos escoamentos turbulentos qualquer perturbação injetada é amplificada, tornando o sistema naturalmente instável	30
FIGURA 2.2 – As diversas escalas de turbulência podem coexistir, indicando a característica chamada de multiplicidade de escalas. Note-se que, numa simulação numérica, a captura de todas as escalas só é possível com uma discretização muito refinada	32
FIGURA 2.3 – O espectro de energia cinética turbulenta relaciona a escala de comprimento das estruturas turbulentas com o nível de energia que elas possuem	33
FIGURA 2.4 – Cascata de energia cinética turbulenta. A energia recebida pelas grandes estruturas turbilhonares é distribuída para as menores escalas, num sentido preferencial de transmissão, até que haja dissipação completa nas escalas viscosas	35
FIGURA 2.5 – Espectros de energia para diferentes números de Reynolds (retirado de BHATTACHARJEE e NO, 2001). Quanto mais o escoamento se aproxima de ser turbulento, maior é o número de escalas e, portanto, maior é a largura do espectro de energia	37
FIGURA 2.6 – Diagrama resumo sobre as diferentes formas de modelagem da turbulência	41
FIGURA 2.7 – Refinamentos espacial e temporal para a SND: as células devem ter, pelo menos, dimensões equivalentes às escalas dissipativas (ℓ_d) e os incrementos de tempo devem equivaler à duração destas escalas (τ). Estes dois aspectos permitem estimar numericamente campos de velocidade e pressão rigorosamente instantâneos	42
FIGURA 2.8 – Número de células (graus de liberdade) exigidas pela SND para diferentes números de Reynolds	43
FIGURA 2.9 – Na modelagem clássica, uma grandeza instantânea, como por exemplo a velocidade, é dividida em duas escalas: a média mais a sua flutuação temporal ($u_i = \bar{u}_i + u_i'$)	44
FIGURA 2.10 – Diferença entre campos de velocidade instantâneos e médios. A representação do escoamento apenas pela escala média temporal alivia as instabilidades	47
FIGURA 2.11 - Critérios para suspensão incipiente de sedimentos baseados nas condições de cisalhamento junto ao leito dos canais (retirado de VAN RIJN, 1984)	49

FIGURA 2.12 – Estruturas turbilhonares de origem cisalhante entre duas regiões de velocidades distintas	52
FIGURA 2.13 – Surgimento de turbilhões de grande escala com origem cisalhante a jusante das cristas de uma duna	52
FIGURA 2.14 – Origem das estruturas explosivas que ocorrem sobre o fundo de canais (retirado de SILVEIRA NETO, 2003): (a) vista frontal; (b) esquema de vista longitudinal; (c) vista ampliada	54
FIGURA 2.15 – Desenvolvimento longitudinal de estruturas explosivas sobre um fundo plano (retirado de PIOMELLI, 1999)	54
FIGURA 2.16 – Mecanismo de suspensão de sedimento do leito de um canal (retirado de RASHDI et al., 1990)	55
FIGURA 2.17 – Esquema dos vórtices de Görtler sobre uma superfície côncava (retirado de SILVEIRA NETO, 2003)	56
FIGURA 2.18 – Vórtices de Görtler que aparecem em seções transversais ao sentido preferencial do escoamento	57
FIGURA 3.1 – Divisão do espectro de energia cinética turbulenta para aplicação da SGE: as grandes escalas são estimadas diretamente, enquanto que um modelo de turbulência é aplicado, levando em conta o efeito das estruturas turbilhonares de pequena escala	68
FIGURA 3.2 – O domínio de escoamento é discretizado por um filtro de espessura Δ que captura as grandes escalas, mas que não retém as escalas sub-malha	69
FIGURA 3.3 – A divisão das escalas ocorre na região inercial do espectro de energia cinética turbulenta. As grandes escalas podem ser estipuladas aproximadamente de acordo com geometrias características do escoamento. As escalas dissipativas podem ser estimadas a partir da equação (3.2)	70
FIGURA 3.4 – Aplicação da filtragem sobre uma curva instantânea de uma variável genérica (ϕ). O efeito da operação proporciona uma suavização da curva original	71
FIGURA 3.5 – Representação de uma célula do domínio e das variáveis relevantes na operação de filtragem. Note-se que esta operação ocorre apenas dentro de cada célula discreta	73
FIGURA 3.6 – O filtro de Gauss leva em conta a influência da distância (atua como um peso) que cada elemento de volume está do centro da célula. Note-se que regiões fora da célula ainda são influenciadas	74
FIGURA 3.7 – Função filtro por volume: somente elementos de volume dentro da célula são relevantes, independentemente da sua distância ao centro da mesma	75

FIGURA 3.8 - Na filtragem por volume as grandezas resultantes (filtradas) representam a média (no espaço) das grandezas instantâneas dentro de cada célula	76
FIGURA 3.9 – A fixação da escala de corte determina o nível de refinamento imposto à malha. No caso (a) a escala de corte foi fixada na região de grandes estruturas turbilhonares, constituindo uma alternativa muito grosseira. No caso (b) houve fixação na faixa inercial, constituindo uma alternativa intermediária. Finalmente o caso (c) demonstra a fixação de uma escala de corte próxima da faixa dissipativa. Esta última alternativa fornece menores erros numéricos, embora demande um custo computacional bastante elevado	83
FIGURA 4.1 – Discretização com células ortogonais: os limites do domínio são substituídos por formas recortadas	86
FIGURA 4.2 – Discretização de um domínio com geometria irregular, utilizando malha não-estruturada	87
FIGURA 4.3 – Tratamento de um domínio com geometria irregular, utilizando discretização coincidente com a fronteira	88
FIGURA 4.4 - No Método de Fronteira Imersa, o domínio real de escoamento é estendido para um domínio regular, discretizado por uma malha fixa e cartesiana (euleriana), acoplada a outra malha (lagrangeana) constituída por um conjunto de pontos que representam apenas a interface imersa	90
FIGURA 4.5 – Esquema de tensões elásticas que produzem a ligação entre os pontos lagrangeanos	91
FIGURA 4.6 –Representação tridimensional da fronteira imersa por um conjunto de pontos dispostos paralelamente. O traçado de linhas horizontais e verticais, a partir de cada ponto lagrangeano $\vec{x}_k = (x_k, y_k, z_k)$, determina os pontos 1 e 2 (espaçados de dx), 3 e 4 (espaçados de dy) e 5 e 6 (espaçados de dz)	97
FIGURA 4.7 – Função de distribuição / interpolação utilizada no MFV	99
FIGURA 4.8 - Região de abrangência para interpolar velocidades e pressão no ponto auxiliar 4. Nota-se que as variáveis seguem um arranjo deslocado na malha euleriana. Este procedimento também é repetido para os demais pontos auxiliares	100
FIGURA 4.9 - A distribuição da força interfacial (\vec{f}) no corpo do escoamento provoca um campo de força resultante (\vec{F}) que faz a partícula de fluido reconhecer a fronteira sólida	103
FIGURA 5.1 – Malha deslocada nos casos 2D e 3D: as velocidades são armazenadas nas faces das células, enquanto que os escalares são armazenados no centro	106

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

