



Fábio Pereira Figueiredo

**Simulação Numérica e Computacional de Correntes
de Turbidez de Baixa Densidade Para Sedimentação
de Bacias**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Doutor pelo Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Luiz Fernando Campos Ramos Martha

Rio de Janeiro, janeiro de 2010



Fábio Pereira Figueiredo

**Simulação Numérica e Computacional de Correntes de
Turbidez de Baixa Densidade Para Sedimentação de
Bacias**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Luiz Fernando C. R. Martha

Presidente/Orientador
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Marco Antonio Schreiner Moraes

CENPES/Petrobras

Prof. Nelson Ferreira Fernandes

Instituto de Geociências - UFRJ

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial
do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 18 de janeiro de 2010.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Fábio Pereira Figueiredo

Graduou-se em Engenharia Civil com ênfase em Estruturas na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) em 2001, defendeu sua dissertação de Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas) na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) em 2005 e, atualmente trabalha como pesquisador no Tecgraf/PUC-Rio

Ficha Catalográfica

Figueiredo, Fábio Pereira

Simulação numérica e computacional de correntes de turbidez de baixa densidade para sedimentação de bacias / Fábio Pereira Figueiredo ; orientadores: Luiz Fernando Campos Ramos Martha. – 2010.

109 f. : il. (color.); 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Civil)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Correntes de turbidez. 3. Fluxos gravitacionais. 4. Simulação numérica. 5. Dinâmica dos fluidos. I. Martha, Luiz Fernando Campos Ramos. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Aos meus pais, Antônio José e Dalva;

Meu irmão, Flávio;

Minha esposa, Daniela.

Agradecimentos

Aos meus pais, Antônio José e Dalva Helena a minha eterna gratidão pelo apoio e incentivo que me deram ao longo de toda minha vida.

A minha esposa Daniela por toda dedicação, compreensão e amor. Ao meu irmão Flávio, demais familiares e amigos, por todo carinho e apoio.

Ao meu orientador Luiz Fernando Martha, pela oportunidade que me proporcionou de realizar esta pesquisa, e por toda contribuição dada neste trabalho.

Ao Prof. Márcio da Silveira Carvalho do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio por toda atenção, paciência e pela valiosa contribuição dada durante a fase de implementação computacional do modelo numérico.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Puc-Rio. A equipe do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Aos amigos e funcionários do *Department of Earth Science* da *Royal Holloway University of London* e em especial ao Prof. David Waltham, por toda atenção e apoio durante o período de pesquisas realizadas na Inglaterra.

Aos amigos do Tecgraf, pela amizade e companheirismo durante todos esses anos de convívio diário. Em especial a Rafael Sousa, Pedro Cambier, Gisele Holtz, André Derraik, Marcos Arruda, Isabelle Telles, Luiz Fernando Bitton, Alonso Juvinao e Mauro Carrion.

Ao CNPq, Tecgraf e Petrobras por proporcionarem todas as condições necessárias para que esta pesquisa pudesse ser realizada e pelo apoio financeiro.

Resumo

Figueiredo, Fábio Pereira; Martha, Luiz Fernando C. R. **Simulação Numérica e Computacional de Correntes de Turbidez de Baixa Densidade Para Sedimentação de Bacias**. Rio de Janeiro, 2010. 109p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Correntes de turbidez ocorrem tanto na natureza como em situações criadas pelo homem. Segundo alguns pesquisadores, grande parte das reservas de petróleo conhecidas no mundo estão armazenadas nos reservatórios de hidrocarbonetos formados a partir dos sistemas turbidíticos. Tendo em vista a importância dessas correntes, este trabalho pretende propor um modelo numérico consistente e com baixo custo computacional, capaz de auxiliar na previsão de sedimentação de bacias nos processos de modelagem estratigráfica no contexto do simulador numérico de sedimentação tridimensional com ênfase nos processos deposicionais em ambientes de talude plataforma e bacia, chamado *Steno*, e validar o modelo numérico proposto através de simulações físicas conduzidas no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O modelo numérico proposto é baseado nas equações de Navier-Stokes, que são resolvidas tirando-se a média na profundidade do perfil de velocidades característico. Além disso, uma aplicação gráfica tridimensional para simulação numérica de correntes de turbidez, chamada *Turb3D*, foi desenvolvida com base nas equações propostas. O programa possui uma interface gráfica amigável para o usuário no que diz respeito à entrada de dados, solução e visualização dos resultados. Os resultados obtidos mostraram que apesar do modelo numérico possuir um bom desempenho computacional, se comparado com os complexos modelos numéricos existentes, não foi possível reproduzir com precisão a evolução das correntes de turbidez e seus depósitos. Contudo, acredita-se que a abordagem dada ao problema de simulação numérica de correntes de turbidez apresentada neste trabalho pode fornecer bons resultados. Entretanto, é fundamental que seja dada continuidade a pesquisa, de modo que ajustes e melhorias ao modelo proposto possam ser realizadas.

Palavras-chave

Correntes de turbidez; fluxos gravitacionais; simulação numérica; dinâmica dos fluidos.

Abstract

Figueiredo, Fábio Pereira; Martha, Luiz Fernando C. R. **Numerical and Computational Simulation of Low Density Turbidity Currents for Basin Sedimentation.** Rio de Janeiro, 2010. 109p. DSc. Thesis - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Turbidity currents occur in both natural and man-made situations. In agreement with some researchers, most of the world's oil reserves are stored in hydrocarbon reservoir built by turbidity systems. Because of the importance of these currents, this work proposes a consistent and efficient numerical method for simulations of turbidity currents for basin sedimentations predictions in the stratigraphic modelling process, which will be incorporated to the numerical simulator of sedimentation 3D called *Steno*. In order to validate the proposed numerical model experiments were conducted at the Hydraulics Research Institute of Federal University of Rio Grande do Sul. The proposed numerical model is based on Navier-Stokes equations that are solved in the depth-average. Moreover, a three-dimensional graphic application for numerical simulations of turbidity currents called *Turb3D* was developed. The application user interface provides a common, user-friendly, graphical environment for pre-processing, solution and post-processing. Despite the good computational performance achieved by using this approach, the method presented did not reproduce accurately the evolution of turbidity current and their deposits. However, it is believed that the approach to the numeric simulation of the turbidity current problem given in this work can provide better results, although this research should continue and improvements should be made.

Keywords

Turbidity currents; gravitational flows; numeric simulations; fluid dynamics.

Sumário

| | | |
|--------|--|----|
| 1 | Introdução | 16 |
| 1.1. | Motivação | 18 |
| 1.2. | Revisão Bibliográfica | 21 |
| 1.3. | Objetivos | 26 |
| 1.4. | Organização da Tese | 26 |
| 2 | Correntes de Turbidez | 28 |
| 2.1. | Iniciação | 31 |
| 2.2. | Fluxos por Descarga (<i>Surges</i>) | 32 |
| 2.3. | Fluxos Contínuos (<i>Steady</i>) | 33 |
| 2.4. | Anatomia | 33 |
| 2.5. | Perfis Verticais Característicos | 36 |
| 2.6. | Perfil Característico de Velocidade | 36 |
| 2.7. | Perfil Característico de Concentração | 36 |
| 3 | Modelo Matemático | 38 |
| 3.1. | Conservação da Massa | 39 |
| 3.2. | Conservação da Quantidade de Movimento | 41 |
| 3.3. | Modelo Matemático Para as Correntes de Turbidez | 43 |
| 3.3.1. | Tensão de Cisalhamento em Fluxos Newtonianos Turbulentos | 44 |
| 3.3.2. | Transporte de Sedimentos e Deposição de Partículas | 49 |
| 3.4. | Resumo das Equações Propostas para as Correntes de Turbidez | 50 |
| 4 | Modelo Computacional | 51 |
| 4.1. | Técnicas Numéricas | 51 |
| 4.1.1. | Solução das Equações do Problema | 53 |
| 4.1.2. | Estabilidade | 60 |
| 4.1.3. | Algoritmo de Solução do Problema | 60 |
| 4.2. | Programa Para Simulação, Pré e Pós Processamento de Correntes de Turbidez. | 63 |
| 5 | Simulação Física | 69 |

| | |
|---|-----|
| 5.1. Metodologia | 70 |
| 5.2. Resultados | 73 |
| 5.2.1. Evolução | 74 |
| 5.2.2. Deposição | 76 |
| 6 Simulação Numérica | 80 |
| 6.1. Simulação do Ensaio 1 | 81 |
| 6.2. Simulação do Ensaio 2 | 84 |
| 6.3. Discussão dos Resultados | 87 |
| 6.3.1. Evolução | 87 |
| 6.3.2. Deposição | 89 |
| 7 Conclusões e Sugestões | 91 |
| 7.1. Conclusões | 91 |
| 7.2. Sugestões | 93 |
| 8 Referências Bibliográficas | 95 |
| Anexo A. Conceitos Básicos de Escoamentos Turbulentos | 101 |
| A.1. Aproximação Empírica | 105 |
| A.2. Distribuição da Velocidade Turbulenta | 108 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Corrente de gravidade de ar frio na atmosfera, visível devido à suspensão da areia e da poeira (Simpson, 1997) | 17 |
| Figura 2 – Tipos de correntes de densidade em ambiente marinho (Mulder & Alexander, 2001) | 17 |
| Figura 3 - Interface do sistema numérico de modelagem estratigráfica <i>Steno</i> ... | 19 |
| Figura 4 - Tanque T usado numa primeira validação das equações de correntes de densidade (Bitton, 2008)..... | 24 |
| Figura 5 - Comparação dos deslocamentos das correntes modeladas fisicamente e numericamente (Bitton, 2008)..... | 25 |
| Figura 6 – Afloramento turbidítico na região oeste da Irlanda (fonte: U.S. Geological Survey Earthquake Hazards Program)..... | 28 |
| Figura 7 – Corrente de turbidez escoando em um grande volume de água. (Simpson, 1997 - adaptada) | 29 |
| Figura 8 – Mecanismos de iniciação de correntes de turbidez: (a) volume finito e (b) fluxo contínuo (Mutti <i>et al</i> , 2009) | 32 |
| Figura 9 – Imagem da cabeça e corpo de uma corrente de gravidade salina mostrando os vórtices de Kelvin-Helmholtz, e uma vista esquemática dos lobos e ranhuras (Kneller e Buckee, 2000)..... | 34 |
| Figura 10 – Formas de instabilidade que ocorrem na parte frontal da corrente de turbidez movendo-se na superfície: (a) vórtices de Kelvin-Helmholtz e (b) complexo de lobos e ranhuras (Simpson, 1997) | 34 |
| Figura 11 – Diagrama da cabeça e do corpo de uma corrente de turbidez, mostrando um perfil de velocidades típico (Kneller e Buckee, 2000 - adaptada)..... | 36 |
| Figura 12 – Perfis verticais de velocidade e densidade/concentração (Kneller e Buckee, 2000)..... | 37 |
| Figura 13 - Volume de controle em coordenadas retangulares..... | 39 |
| Figura 14 – Tensões na direção x de um elemento infinitesimal de um fluido.... | 42 |
| Figura 15 - Gradiente de pressão no ponto P | 45 |
| Figura 16 - Exemplos de gradiente de pressão..... | 46 |
| Figura 17 - Esquema do perfil de velocidades próximo à parede | 47 |
| Figura 18 - Célula da malha deslocada. A altura é armazenada no centro enquanto que as velocidades são armazenadas no centro..... | 54 |

| | |
|---|----|
| Figura 19 – Discretização das derivadas presentes na equação de momento na direção x | 55 |
| Figura 20 – Discretização das derivadas presentes na equação de momento na direção y | 56 |
| Figura 21 – Discretização das derivadas presentes na equação de continuidade | 57 |
| Figura 22 – Índices utilizados para endereçamento das variáveis em uma malha deslocada com coordenadas i, j . (a) fracionário (b) inteiro..... | 59 |
| Figura 23 – Etapas do processo de solução do problema | 62 |
| Figura 24 – Diagrama de classes da API do Turb3D | 64 |
| Figura 25 – Interface gráfica do programa <i>Turb3D</i> | 65 |
| Figura 26 – Diálogo de entrada da malha da superfície..... | 66 |
| Figura 27 – Diálogo de dados do canal | 66 |
| Figura 28 – Diálogo de dados da simulação | 67 |
| Figura 29 – Diálogo de sedimentos | 67 |
| Figura 30 - Esquema do tanque utilizado nos ensaios..... | 70 |
| Figura 31 – Difusor acrílico usado para garantir a uniformidade do fluxo durante os ensaios..... | 71 |
| Figura 32 - Reservatório elevado, utilizados para armazenar a mistura | 72 |
| Figura 33 - Medidor de vazões conectado a entrada da tubulação..... | 72 |
| Figura 34 - Medição da espessura dos depósitos com a utilização de laser | 73 |
| Figura 35 – Evolução da corrente de turbidez com concentração de 1,91% em volume e sedimentos de 100 μm de diâmetro, nos seguintes tempos: (a) 10 s, (b) 60 s, (c) 120 s, (d) 180 s, (e) 240 s e (f) 300 s | 74 |
| Figura 36 – Evolução da corrente de turbidez com concentração de 1,85% em volume e sedimentos de 150 μm de diâmetro, nos seguintes tempos: (a) 10 s, (b) 60 s, (c) 120 s, (d) 180 s, (e) 240 s e (f) 300 s | 75 |
| Figura 37 – Geometria da deposição gerada pela corrente de turbidez com concentração de 1,91% em volume e sedimentos de 100 μm de diâmetro, medidas em metros. | 76 |
| Figura 38 – Vista lateral da deposição gerada pela corrente de turbidez com concentração de 1,91% em volume e sedimentos de 100 μm de diâmetro. (a) Geometria da deposição. | 77 |
| Figura 39 – Geometria da deposição gerada pela corrente de turbidez com concentração de 1,85% em volume e sedimentos de 150 μm , medidas em metros..... | 77 |

| | |
|--|----|
| Figura 40 – Vista lateral da deposição gerada pela corrente de turbidez com concentração de 1,85% em volume e sedimentos de 150 μm , medidas em metros..... | 78 |
| Figura 41 – Reconstrução das superfícies dos ensaios com o software <i>GoCad</i> ®. (a) Ensaio 1 (b) Ensaio 2..... | 79 |
| Figura 42 – Tela do programa Turb3D mostrando a deposição ocorrida para uma corrente de turbidez com sedimentos de 100 μm . Escala da deposição aumentada em 3 vezes..... | 81 |
| Figura 43 – Vista superior da evolução da corrente nos instantes (a) 10 s (b) 60 s..... | 82 |
| Figura 44 – Vista lateral da evolução da corrente nos instantes (a) 10 s (b) 60 s..... | 83 |
| Figura 45 – Vista superior do deposito ocorrido devido a simulação numérica da corrente com sedimentos de 100 μm | 83 |
| Figura 46 – Vista lateral do deposito ocorrido devido a simulação numérica da corrente com sedimentos de 100 μm | 84 |
| Figura 47 – Tela do programa Turb3D mostrando a deposição ocorrida para uma corrente de turbidez com sedimentos de 150 μm . Escala da deposição aumentada em 3 vezes..... | 84 |
| Figura 48 – Vista superior da evolução da corrente nos instantes (a) 10 s (b) 60 s..... | 85 |
| Figura 49 – Vista lateral da evolução da corrente nos instantes (a) 10 s (b) 60 s..... | 85 |
| Figura 50 – Vista superior do deposito ocorrido devido a simulação numérica da corrente com sedimentos de 150 μm | 86 |
| Figura 51 – Vista lateral do deposito ocorrido devido a simulação numérica da corrente com sedimentos de 150 μm | 86 |
| Figura 52 – Ajuste da relação $fz0$. (a) $fz0 = 125$ (b) $fz0 = 250$ (c) $fz0 = 500$.. | 88 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Características dos ensaios | 69 |
| Tabela 2 - Resumo dos resultados dos ensaios..... | 78 |
| Tabela 3 - Resumo dos resultados da evolução da corrente com sedimentos de 100 µm..... | 87 |
| Tabela 4 - Resumo dos resultados da evolução da corrente com sedimentos de 150 µm..... | 88 |
| Tabela 5 – Resumo dos resultados das deposições das correntes | 89 |

Lista de símbolos

Carcteres Romanos

c - concentração total da corrente de turbidez

c_k - concentração em volume do sedimento k

f - espessura fracionária da camada limite

f_b - coeficientes de atrito de Darcy-Weisbach na camada inferior

f_i - coeficientes de atrito de Darcy-Weisbach na camada superior

g - aceleração devido à gravidade

g' - aceleração devido à gravidade reduzida

h - espessura média da corrente de turbidez

H - coordenada do topo da corrente de turbidez

k - constante de Von kármán

L_k - carga de sedimentos associado ao grão k

p - pressão

s_k - taxa de sedimentação para o grão k

S - declividade

t - tempo

u - velocidade na direção x

u_* - velocidade de cisalhamento ou de atrito

\bar{u}_b - velocidade média na base

\bar{u}_t - velocidade média no topo

u' - velocidade vertical flutuante

\bar{U} - velocidade média da corrente de turbidez

v - velocidade na direção y

v_k - velocidade de queda do sedimento k

w - velocidade na direção z

z - altura acima da base da parede ou superfície sólida

z_0 - faixa de profundidade da camada limite

z_b - faixa de profundidade da camada limite

Caracteres Gregos

α - constante da condição de estabilidade de Courant

Δt - intervalo de tempo

Δx - distância entre as células do grid na direção x

Δy - distância entre as células do grid na direção y

$\Delta\rho$ - diferença de densidade entre o fluxo e o meio circundante

μ - viscosidade

ρ - densidade

ρ_w - densidade do meio circundante

ρ_f - densidade da corrente de turbidez