

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Luiz Fernando Rocha Bitton

**Verificação de um Modelo Matemático
Simplificado para Correntes de Turbidez**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Luiz Fernando Campos Ramos Martha

Rio de Janeiro
Janeiro de 2008



Luiz Fernando Rocha Bitton

**Verificação de um Modelo Matemático
Simplificado para Correntes de Turbidez**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha
Presidente/Orientador
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo
Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Luiz Eloy Vaz
Departamento de Engenharia Civil - UFRJ

Prof. Ana Luiza de Oliveira Borges
Departamento de Hidromecânica e Hidrologia – IPH / UFRGS

Prof. José Eugênio Leal
Coordenador Setorial
do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 21 de Janeiro de 2008

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

Luiz Fernando Rocha Bitton

Graduou-se em Engenharia Civil, pela PUC-Rio – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2005. Desenvolveu seu trabalho de pesquisa com ênfase em computação gráfica aplicada.

Ficha Catalográfica

Bitton, Luiz Fernando Rocha

Verificação de um modelo matemático simplificado para correntes de turbidez / Luiz Fernando Rocha Bitton ; orientador: Luiz Fernando Campos Ramos Martha. – 2008.

86 f. : il ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

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

CDD: 624

Agradecimentos

Primeiramente aos meus pais por me estimularem e apoiarem durante não somente este trabalho, mas também por toda minha vida.

Ao Luiz Fernando Martha, pela orientação nesta pesquisa e por todos os conselhos profissionais e pessoais.

A minha namorada Ana Luiza, que me acompanhou pelas minhas jornadas durante este mestrado.

Este trabalho também não seria possível sem o suporte técnico e financeiro do Tecgraf - PUC-Rio / PETROBRAS, principalmente por parte de José Eduardo Faccion e Antônio José Andrade Ramos, que apoiaram fortemente essa pesquisa.

Ao Earth Science Department da University of Leeds, por fornecer todos os equipamentos necessários ao trabalho experimental.

Ao Departamento de Geologia da Royal Holloway University of London, especialmente ao David Waltham e Gary Nichols por toda assistência.

A toda a equipe do Steno pelo suporte técnico.

E por último, porém igualmente importantes, aos meus amigos do Tecgraf - PUC-Rio pela troca de experiência, especialmente Gisele, Fábio, Rafael, Marcos, Alonso e Isabelle.

Resumo

Bitton, Luiz Fernando; Martha, Luiz Fernando Campos Ramos. **Verificação de um Modelo Matemático Simplificado para Correntes de Turbidez.** Rio de Janeiro, 2008. 86p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A combinação de modelos numéricos com modelos computacionais tem contribuído muito para o melhor entendimento matemático de fluxos gravitacionais, porém esses modelos não podem substituir a análise através de trabalhos experimentais. O uso de modelos físicos em escala provou ser essencial na validação de equações para modelagem de correntes de turbidez. Com o objetivo de diminuir o nível de dificuldade em modelar numericamente essas correntes e de gerar modelos computacionais de alto desempenho, algumas simplificações foram feitas durante o desenvolvimento das equações de velocidade. Dessa forma, para provar que tais simplificações não iriam alterar os resultados numéricos do modelo, foram realizados inúmeros experimentos, coletando informações sobre a evolução espaço-temporal de velocidades das correntes de turbidez não-confinadas com e sem partículas. Comparando os resultados do modelo numérico com os do modelo físico, foi concluído que, infelizmente, as aproximações influenciaram os resultados. Contudo, os dados e a comparação visual entre as simulações também revelaram alguns resultados encorajadores, os quais estimularão pesquisas futuras para se melhorar a precisão da equação de velocidade utilizada no modelo numérico.

Palavras-chave

correntes de turbidez; fluxos gravitacionais; correntes de densidade; modelagem numérica

Abstract

Bitton, Luiz Fernando.; Martha, Luiz Fernando Campos Ramos
Validation of Simplified Mathematical Model for Turbidity Currents. Rio de Janeiro, 2008. 86p. Master's Dissertation – Civil Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The combination between numerical and computer models has improved dramatically the mathematical understanding of gravity currents; however, these models can not replace the analysis by experimental work. The use of scaled analogue models, or physical models, proved to be essential in validating velocity equations for turbidity currents. In order to reduce the level of difficulty to model mathematically these currents, some approximations were applied during the development of the velocity equation. Therefore, willing to prove that these approximations would not compromise the numerical results, innumerous experiments were performed to acquire a spatio-temporal velocity evolution database for both unconfined particle free and particulate turbidity flows. Comparing the results from the numerical and physical simulations, it was concluded that, unfortunately, the approximations have influenced the numerical results. Nevertheless, the data and visual comparisons between the simulations also revealed some encouraging results, which will stimulate some future research to improve the accuracy of the depth-averaging velocity equation.

Keywords

Turbidity currents; gravity currents; density currents; numerical modeling; physical modeling

Sumário

1 Introdução	14
1.1. Correntes de Turbidez	14
1.2. Modelo Físico	16
1.3. Modelo Numérico	17
1.4. Objetivos da Pesquisa	21
2 Experimentos	22
2.1. Configuração	22
2.2. Procedimentos	27
2.3. Resultados	30
3 Simuladores	37
3.1. Simulador 1D	37
3.2. Simulador 2D	40
3.3. Algoritmo	44
4 Análise de Dados	50
4.1. Procedimentos	50
4.2. Resultados	54
5 Discussão dos Resultados	80
6 Conclusão	83
Referências Bibliográficas	85

Lista de figuras

Figura 1.1 – Volume de fluido com dimensões l , h e w	19
Figura 1.2 – Representação do início do deslocamento de uma corrente de densidade	20
Figura 2.1 – O tanque T	22
Figura 2.2 – O <i>grid</i> da plataforma	23
Figura 2.3 – A caixa selada (“ <i>lock box</i> ”)	24
Figura 2.4 – A caixa selada instalada	24
Figura 2.5 – O misturador industrial	25
Figura 2.6 – Partes do UVP, equipamento para medição de velocidades	26
Figura 2.7 – A configuração final do tanque T	26
Figura 2.8 – Curva de distribuição de granulometria da Ballotini utilizada	27
Figura 2.9 – Localização dos pontos para coleta de dados ao longo da plataforma	29
Figura 2.10 – Mapa de contorno dos dados da bateria 2.5%salina, ensaio 1 e corpo de velocidade 50	35
Figura 2.11 – Mapa de contorno dos dados da bateria 2.5%salina, ensaio 1 e corpo de velocidade 100	35
Figura 2.12 – Exemplo de dados com ruídos. Mapa de contorno dos dados da bateria 2.5%salina, ensaio 1 e corpo de velocidade 0	36
Figura 2.13 – Exemplo de dados com ruídos. Mapa de contorno dos dados da bateria 2.5%salina, ensaio 5 e corpo de velocidade 0	36
Figura 3.1 – Diálogo principal do simulador 1D	37
Figura 3.2 – Geometria do leito do mar	39
Figura 3.3 – Geometria inicial do fluxo	39
Figura 3.4 – Diálogo principal do simulador 2D	40
Figura 3.5 – Barra de controle	41
Figura 3.7 – Grupo Visualização	41
Figura 3.6 – Grupo simulação	41
Figura 3.8 – Grupo transdutores	41
Figura 3.9 – Simulação da corrente dentro do canal	42
Figura 3.10 – Gráfico das espessuras coletadas na simulação	42
Figura 3.11 – Gráfico das velocidades coletadas na simulação	43
Figura 3.12 – Simulação numérica de correntes de turbidez	43

Figura 3.13 – Escala de cores da textura 1D e sua coordenada S	49
Figura 4.1 – Simulador 1D modificado	51
Figura 4.2 – Análise pontual dentro do canal	51
Figura 4.3 – Curva de espessura da corrente resultante da análise pontual (mm/s x seg)	51
Figura 4.4 – Curva de velocidade resultante da análise pontual (mm/s x seg)	52
Figura 4.5 – Novo módulo para comparação das velocidades médias	53
Figura 4.6 – Comparação das curvas de espessura no final do canal para solução 2.5% salina	55
Figura 4.7 – Comparação das curvas de velocidade média no final do canal para solução 2.5% salina	55
Figura 4.8 – Comparação das curvas de espessura no final do canal para solução 5.0% salina	56
Figura 4.9 – Comparação das curvas de velocidade média no final do canal para solução 5.0% salina	56
Figura 4.10 – Comparação das curvas de espessura no final do canal para solução 2.5% sedimento	57
Figura 4.11 – Comparação das curvas de velocidade média no final do canal para solução 2.5% sedimento	57
Figura 4.12 – Pontos escolhidos para ilustração das análises pontuais	58
Figura 4.13 – Comparação da curva de espessura para o ponto 2	59
Figura 4.14 – Comparação da curva de espessura para o ponto 3	59
Figura 4.15 – Comparação da curva de espessura para o ponto 4	60
Figura 4.16 – Comparação da curva de espessura para o ponto 5	60
Figura 4.17 – Comparação da curva de espessura para o ponto 6	61
Figura 4.18 – Comparação da curva de espessura para o ponto 7	61
Figura 4.19 – Comparação da curva de espessura para o ponto 8	62
Figura 4.20 – Comparação da curva de espessura para o ponto 12	62
Figura 4.21 – Comparação da curva de espessura para o ponto 15	63
Figura 4.22 – Comparação da curva de espessura para o ponto 23	63
Figura 4.23 – Comparação da curva de espessura para o ponto 28	64
Figura 4.24 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 2	64
Figura 4.25 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 3	65
Figura 4.26 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 4	65
Figura 4.27 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 5	66
Figura 4.28 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 6	66

Figura 4.29 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 7	67
Figura 4.30 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 8	67
Figura 4.31 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 12	68
Figura 4.32 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 15	68
Figura 4.33 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 23	69
Figura 4.34 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 28	69
Figura 4.35 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 0 segundo.	70
Figura 4.36 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 1 segundo.	70
Figura 4.37 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 2 segundos.	71
Figura 4.38 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 3 segundos.	71
Figura 4.39 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 4 segundos.	71
Figura 4.40 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 5 segundos	72
Figura 4.41 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 6 segundos	72
Figura 4.42 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 7 segundos.	72
Figura 4.43 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 8 segundos	73
Figura 4.44 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 9 segundos	73
Figura 4.45 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 10 segundos	73
Figura 4.46 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 11 segundos	74
Figura 4.47 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 12 segundos	74
Figura 4.48 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 13 segundos	74
Figura 4.49 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 1 segundo	75
Figura 4.50 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 2 segundos	75
Figura 4.51 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 3 segundos	75
Figura 4.52 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 4 segundos	76
Figura 4.53 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 5 segundos	76
Figura 4.54 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 6 segundos	76
Figura 4.55 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 7 segundos	77
Figura 4.56 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 8 segundos	77
Figura 4.57 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 9 segundos	77
Figura 4.58 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 10 segundos	78
Figura 4.59 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 11 segundos	78
Figura 4.60 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 12 segundos	78
Figura 4.61 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 13 segundos	79
Figura 5.1 – Contraste entre as espessuras das correntes, experimental e modelada, a 13 segundo após a abertura da comporta da caixa selada	81
Figura 5.2 – Comparação dos deslocamentos das correntes modeladas	

fisicamente e numericamente

82

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Distribuição tamanho de grãos da Ballotini utilizada (Fonte: Lab. De Leeds; Dr. Gareth Keevil)	27
Tabela 2.2 – Formatação original dos arquivos UVP	32
Tabela 2.3 – Nova formatação criada para os arquivos menores	32

Lista de Símbolos

T	Espessura da corrente
t	Tempo de simulação
u	Velocidade na direção x
v	Velocidade na direção y
w	Velocidade na direção z
\bar{u}	Velocidade média na direção x
\bar{v}	Velocidade média na direção y
ρ_f, ρ	Densidade do fluido
ρ_w	Densidade do fluido ambiente
$\Delta\rho$	Diferença de densidade
\vec{F}	Vetor força resultante
\vec{a}	Vetor aceleração resultante
m	Massa do volume definido
g	Aceleração da gravidade
g'	Aceleração reduzida da gravidade
C	Coefficiente de atrito de Chezy
h	Profundidade do topo da corrente
h_f	Espessura do fluido
h_w	Espessura do fluido ambiente
τ	Tensão cisalhante
EDP	Equações diferenciais parciais
UDVP	Ultrasonic Doppler Velocity Profiling