

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 Alzuir 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
$\rho_f, \rho$	Densidade do fluido
$\rho_w$	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
$\tau$	Tensão cisalhante
<b>EDP</b>	Equações diferenciais parciais
<b>UDVP</b>	Ultrasonic Doppler Velocity Profiling

# 1 Introdução

## 1.1. Correntes de Turbidez

Dentre os agentes de transporte de sedimentos presentes na natureza, a água é sem dúvida o mais importante deles. Porém, esta pesquisa se concentra no estudo do comportamento de um mecanismo específico, chamado correntes de densidade. A grande diferença entre essas duas formas de transporte está na maneira com que as partículas de sedimentos são conduzidas. A água, por exemplo, conduz individualmente essas partículas através do arrasto, saltação ou suspensão, enquanto a corrente de densidade consiste numa mistura de sedimentos e fluido que se move devido à ação da gravidade e à diferença de densidade entre essa mistura e o fluido ambiente. Assim, as correntes de densidade consistem num sub-conjunto das correntes gravitacionais.

Correntes gravitacionais têm sido discutidas em vários estudos científicos, especialmente em geologia. Esta importância em particular se deve ao fato dessas correntes influenciarem substancialmente no sistema deposicional de águas profundas. Todavia, as correntes de densidade não ocorrem apenas em meios submarinos, mas também em ambientes sub-aéreos. Dois bons exemplos são avalanches de neve misturada com ar e núvens de poeira vulcânica se deslocando na encosta de um vulcão após sua erupção. Não é uma simples coincidência que os dois exemplos apresentados sejam eventos catastróficos, intrinsecamente, grande parte dessas correntes está relacionada a catástrofes.

O mecanismo de transporte conduzido pela ação da gravidade pode ser classificado em três grupos diferentes (Allen, 1997): (i) avalanches de rochas e deslizamento de terra causado por instabilidade; (ii) correntes de densidade com escoamento plástico e comportamento laminar; e (iii) correntes de densidade com comportamento turbulento, ou correntes de turbidez. Apesar das diferenças entre esses grupos serem nítidas, é possível um grupo se transformar no outro.

Para a formação de correntes de turbidez em ambiente submarino é indispensável a existência de uma mistura de água com sedimentos, resultando

geralmente numa solução mais densa que a água do ambiente. A diferença de densidade entre os dois fluidos é responsável pela ignição das correntes de turbidez em geral e, por mais sutil que seja essa diferença, é o suficiente para induzir a propagação da corrente. Além disso, se o leito do mar possuir uma inclinação, a componente do peso pode contribuir ainda mais para aceleração do fluxo.

Com base no número de Reynolds, pode-se afirmar que a taxa de propagação ao longo do tempo, ou seja, a velocidade, pode afetar diretamente a turbulência da corrente em questão (Waltham, 2004). A turbulência é o mecanismo pelo qual os sedimentos suspensos ao longo do fluxo permanecem em suspensão, exercendo assim um papel fundamental para as correntes de turbidez. Porém, ao mesmo tempo que ocorre turbulência, também é possível se ter mecanismo de suporte por grão dependendo da concentração local de sedimentos no fluxo (Choux et al., 2005). A concentração do fluxo varia conforme a propagação da corrente, por exemplo, se ela está se movendo rápido suficiente, sedimentos do leito do mar podem ser incorporados ao fluxo através da erosão, o que aumentaria a densidade da corrente, resultando num acréscimo de ambos, velocidade e taxa de erosão da mesma, como um ciclo auto-sustentável (Pratson et al., 2000).

Por outro lado, existem três processos que podem interromper este ciclo, e conseqüentemente, dissipar a corrente gravitacional. O primeiro deles é a incorporação de água. A água também pode ser incorporada à corrente enquanto a mesma propaga, aumentando seu volume total e diminuindo sua densidade através da diluição do fluxo. O segundo processo é a deposição dos sedimentos em suspensão no fluxo, que também diminui a densidade da corrente. Por último vem a tensão de cisalhamento, gerado não somente na interface entre o leito do mar e o fluxo, mas também na interface do fluxo com o fluido ambiente. Esse processo desacelera a corrente, retardando sua propagação em todas as direções. De fato, todos os três processos provocam perda de velocidade que leva a desaceleração da corrente (Pratson et al., 2000).

Concluindo, um modelo numérico de correntes de turbidez para ser completo deve levar em consideração erosão, incorporação de água, deposição, atrito, peso da corrente, pressão do fluido e conservação da energia cinética de turbulência.

## 1.2. Modelo Físico

Técnicas de visualização e coleta de dados de fluxos têm sido aplicadas não somente pela mecânica dos fluidos, mas também por outras disciplinas como a sedimentologia, disciplina da Geologia. Essas técnicas de visualização consistem basicamente em criar modelos em escala reduzida para simular fisicamente o fluxo desejado. Então, usando esses modelos, são realizados experimentos para coleta de dados e imagem. Considerando que o fluxo em foco nesta pesquisa é a corrente gravitacional, mais precisamente corrente de turbidez, alguns experimentos relatados e estudos previamente elaborados tiveram grande importância para o desenvolvimento deste trabalho.

Em 1995, um modelo físico foi utilizado no estudo dos efeitos de uma topografia induzida por sal na deposição de sedimentos provenientes de correntes de turbidez (Kneller & McCaffrey, 1995). Esse modelo foi feito em escala para simular um fluxo de gravidade transportando areia grossa, e, sua estrutura era composta por um tanque quadrado de 1m x 1m com um canal conectado em uma de suas arestas.

Em 1997, foram realizadas as primeiras medidas detalhadas de velocidades e distribuição de turbulência de correntes de gravidade. Até esta data, todo o conhecimento da dinâmica dessas correntes foram adquiridos principalmente através da visualização de fluxos (Kneller et al., 1997). Para se fazer essas medidas detalhadas, foram realizados experimentos com correntes de densidade salinas, utilizando anemômetro Doppler a laser e um sistema para definir o volume inicial do fluxo, chamado de “*lock-exchange*”, que será melhor explicado no capítulo seguinte.

Poucos anos depois, um novo método de medição foi introduzido para ajudar a registrar velocidades das correntes gravitacionais, o UDVP (“*Ultrasonic Doppler Velocity Profiling*”). Com esse novo equipamento foi possível medir velocidades tanto em fluxos compostos por soluções salinas, quanto em fluxos compostos por soluções com sedimentos (opacos). Dessa forma, permitiu-se provar que a utilização de solução salina, para simular correntes de turbidez de baixa densidade, era uma boa substituta da solução composta por sedimentos (Best et al., 2001).



Com o uso do equipamento de ultra-som UDVP foi possível desenvolver estudos mais avançados na área de correntes de densidade, tal como sua evolução espaço-temporal, que não havia sido feita até 2003. Anteriormente a 2003, todos os estudos referentes à coleta e análise de parâmetros dos fluxos turbulentos, na área de sedimentologia, consistiam numa série de medições ao longo do tempo num ponto específico da corrente. Assim, foram feitas diversas medições de parâmetros em vários pontos distintos de uma série de correntes de turbidez confinadas nominalmente idênticas, permitindo então, uma análise da evolução espaço-temporal de alguns parâmetros, como velocidade destas mesmas correntes (McCafrey et al., 2003, 2005).

Apesar da grande relevância dos trabalhos mencionados acima para esta pesquisa em questão, em nenhum deles pesquisou-se sobre a evolução espaço-temporal da velocidade, ou de qualquer outro parâmetro, das correntes de gravidade propagando sobre uma área plana. Em outras palavras, não é possível analisar como qualquer parâmetro evoluiria ao longo do tempo e do espaço para um fluxo turbulento não-confinado.

Sendo assim, tomando como base a última afirmação e o conhecimento adquirido pelos trabalhos anteriores, foi decidido que seria usado nesta pesquisa o mecanismo de “*lock-exchange*”, um tanque quadrado (1.5m x 1.5m), com um canal conectado a uma de suas arestas, e um equipamento de ultra-som para coletar e armazenar num banco de dados a evolução espaço-temporal de velocidades de correntes de turbidez não-confinadas.

### **1.3. Modelo Numérico**

De acordo com o que foi mencionado anteriormente, um modelo computacional para correntes de turbidez deveria levar em consideração todas as características do fluxo: erosão do leito, absorção de água pelo fluxo, deposição do fluxo, tensões na base, tensões com o fluido ambiente, peso do fluxo, pressão hidrostática do fluido da corrente e conservação da energia cinética de turbulência. Por outro lado, como um dos principais objetivos neste trabalho, conforme será explicado na próxima seção, é validar as mais simples equações capazes de modelar correntes de gravidade com fluxo turbulento, algumas simplificações foram feitas. A seguir, demonstra-se de forma geral as

simplificações adotadas por Waltham no desenvolvimento das principais equações utilizadas neste trabalho (Waltham & Davison, 2001):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial(Tu)}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g' \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{Cu|u|}{\rho h} - u \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2)$$

$$g' = g \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (3)$$

As equações (1) e (2) foram escritas propositalmente para o fluxo em apenas uma direção, pois facilita suas deduções. Na equação (1) da conservação de fluxo, a taxa de variação da espessura  $T$  no tempo depende da velocidade  $u$  do fluxo. Esta equação vem da simplificação da forma mais geral da equação de continuidade (4) (Asheson, 1990), que conserva massa em três dimensões espaciais:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = -\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) \quad (4)$$

onde,  $\rho$  é a densidade do fluido,  $u$ ,  $v$  e  $w$  são as velocidade do fluxo nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Integrando esta equação em  $z$  e considerando que a densidade é constante, chegou-se à equação (5), que, para chegar na equação (1) bastou considerar o fluxo em apenas uma direção,  $x$ . Na equação (5),  $\bar{u}$  e  $\bar{v}$  são as velocidade médias em  $z$  nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(T\bar{u}) - \frac{\partial}{\partial y}(T\bar{v}) \quad (5)$$

A equação (2) foi baseada na segunda lei de Newton. Tal lei afirma que a resultante das forças que agem num corpo é igual à taxa de variação do momento linear (quantidade de movimento) do mesmo em relação ao tempo, equação (6).

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (6)$$

Para somatório das forças atuantes num volume de fluido com dimensões  $l$ ,  $h$  e  $w$ , respectivamente comprimento, altura e largura, tem-se as forças

resultantes de tensões normais, representadas na figura 1.1 como  $P_1$  e  $P_2$ , e de tensões cisalhantes, representada na figura 1.1 como  $\tau$ . O somatório destas forças resultam na equação (7). Para calcular a massa desse volume, basta multiplicar seu volume por sua densidade, como mostra a equação (8).

$$F = (P_1 - P_2)hw + \tau wl \quad (7) \quad m = \rho hwl \quad (8)$$

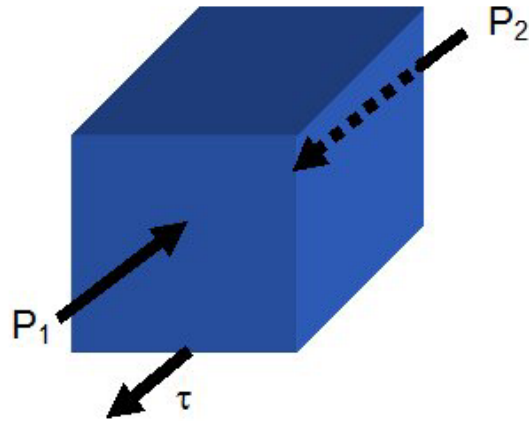


Figura 1.1 – Volume de fluido com dimensões  $l$ ,  $h$  e  $w$

Combinando as equações (6), (7) e (8), obtém-se a equação (9), onde o primeiro termo,  $(P_1 - P_2)/l$ , conhecido como gradiente de pressão, foi substituído por  $-\partial P / \partial x$ , como mostra a equação (10):

$$(P_1 - P_2)/l + \tau / h = \rho a \quad (9)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\tau}{h} = \rho a \quad (10)$$

Voltando para um fluxo com deslocamento em apenas uma direção,  $x$ , foi afirmado que o gradiente de pressão poderia ser escrito de acordo com a equação (11) (Waltham & Davison, 2001). Essa equação teve origem através do cálculo da diferença de pressão no ponto  $P$ , ilustrado na figura 1.2, onde  $h$ ,  $h_f$ ,  $h_w$ ,  $\rho_f$ ,  $\rho_w$  e  $\Delta\rho$  são respectivamente profundidade do ponto  $P$ , altura da coluna de fluido, altura da coluna de fluido ambiente, densidade do fluido, densidade do fluido ambiente e diferença entre as densidades do fluido e do fluido ambiente.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \Delta \rho g \frac{\partial h_f}{\partial x} \quad (11)$$

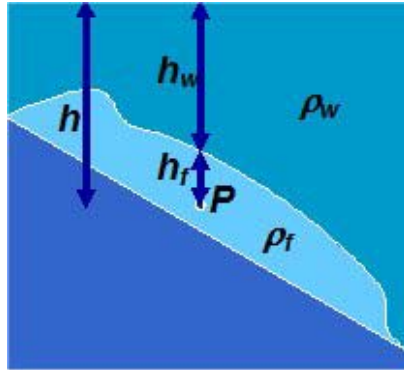


Figura 1.2 – Representação do início do deslocamento de uma corrente de densidade

Outras considerações feitas foram em relação às tensões cisalhantes. Considerou-se que o fluido da corrente era Newtoniano, que as tensões cisalhantes eram proporcionais ao quadrado da velocidade para um fluxo turbulento, e, que para esse mesmo fluxo a dependência das tensões cisalhantes com a sua espessura era desprezível. Então, tendo em vista essas simplificações, chegou-se a equação (12), onde  $C$  é um coeficiente de atrito de Chezy, que é proporcional à rugosidade e geometria da superfície de propagação da corrente.

$$\tau = C u |u| \quad (12)$$

A equação (3) da gravidade reduzida, é definida por uma proporção das densidades, onde  $\Delta \rho$  é a diferença entre a densidade da água e do fluido e  $\rho$  é a densidade do fluido. Dessa forma, substituindo as equações (3), (11) e (12) nos respectivos termos da equação (10), e, adotando um diferencial material ou substancial para a aceleração, exemplificada na equação (13) (Smith, 1985), obtém-se finalmente a equação da velocidade média descrita na equação (2).

$$a = \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \quad (13)$$

A equação mais complexa de se resolver numericamente é, sem dúvida, a numero (2). Essa equação é na verdade dividida em três termos: pressão, fricção e advecção, que são respectivamente o primeiro, segundo e terceiro

termos. Com o objetivo de simplificar a equação (2), ou ao menos não torná-la ainda mais complicada de se resolver, foi considerado que a densidade do fluxo turbulento não sofre variação ao longo de sua propagação. Essa simplificação foi baseada na suposição da taxa de sedimentação ser compensada pela taxa de erosão, e, no fato da taxa de incorporação de água pela corrente não ser muito relevante.

O trabalho desenvolvido nesta pesquisa tem como objetivo primordial provar que as aproximações matemáticas feitas com relação à densidade das correntes de turbidez, não comprometerão a qualidade e precisão do modelo numérico. Sendo assim, será gerado um algoritmo rápido e eficiente para modelagem e análise de correntes de turbidez.

#### **1.4. Objetivos da Pesquisa**

O principal objetivo neste trabalho é validar o uso da equação de velocidade média, escrita por Dr. Waltham, na modelagem de correntes de turbidez, equação (2). Para alcançar tal objetivo, uma metodologia empírica foi usada, a qual consiste em comparar os resultados da simulação numérica com os da simulação física. Para simulação numérica foi desenvolvido um sistema computacional, utilizando diferenças finitas para resolver as equações citadas acima, enquanto que para simulação física, foram realizados experimentos usando um tanque específico chamado “*T-tank*”, ou tanque T. Após executadas as simulações, os dados provenientes de ambas foram comparados um com o outro, para averiguar o quão precisas eram as equações. Nos próximos capítulos, a importância de cada simulação será explicada em mais detalhes.

## 2 Experimentos

### 2.1. Configuração

Com o propósito de criar um banco de dados sobre alguns atributos das correntes de turbidez, como velocidade, foram necessários inúmeros experimentos usando o laboratório de mecânica dos fluidos do departamento de Earth Science, da University of Leeds, Inglaterra. O tanque escolhido para todos esses experimentos foi o “*T-tank*”, ou tanque T. O nome do tanque provavelmente veio do seu formato em “T”, um canal conectado a uma superfície quadrado (figura 2.1), o qual será freqüentemente chamado de plataforma neste trabalho. Esse formato foi exatamente o motivo pelo qual o tanque foi escolhido. O tanque T é capaz de mostrar como o fluxo se comporta logo após ser liberado pelo canal, propagando-se sobre a plataforma e simulando um problema 3D.

Basicamente, o equipamento experimental é dividido em 5 partes importantes: o tanque T (figuras 2.1 e 2.2), a caixa selada (figuras 2.3 e 2.4), um misturador industrial (figura 2.5), um equipamento de ultra-som UVP (figura 2.6) e um *scanner* de depósitos (figura 2.7).



Figura 2.1 – O tanque T

O tanque T é composto por basicamente duas partes, o canal (1.50 m x 0.32 m) e a plataforma (1.55 m x 1.55 m). Junto com essa parte existem vários outros componentes menores, por exemplo, encanamentos para encher e drenar o tanque, compressores, mecanismo para inclinar o tanque, dentre outras ferramentas de auxílio. Apesar de todo esse aparato ser importante para os experimentos, o componente central do tanque para pesquisa é a plataforma, onde as medições são feitas. Para melhor visualização da propagação da corrente sobre a plataforma, foi desenhado um *grid* (10 cm x 10 cm) na mesma (figura 2.2).



Figura 2.2 – O *grid* da plataforma

Para se obter os dados desejados, foi feita uma pequena mudança no tanque T. No interior do seu canal foi instalada uma caixa de acrílico (figura 2.3), que foi responsável tanto por reter a solução densa da corrente quanto conduzi-la até a plataforma. De fato, essa caixa é chamada de “*lock box*” ou caixa selada (0.346m x 0.351m x 0.317m), conectada a um pequeno canal (0.984m x 0.317m), como se fossem uma única peça (figura 2.4). Primeiramente a solução da corrente é preparada num reservatório, em seguida bombeada para dentro da caixa selada e, finalmente, após o tanque cheio e aberta a porta da caixa, uma corrente de turbidez é formada e conduzida pelo canal até chegar a plataforma. A hélice dentro da caixa selada tem como função deixar a solução sempre homogênea, enquanto a porta não é aberta.

Este sistema de caixa selada, também conhecido como “*lock-exchange*”, já foi estudado e provado ser uma forma precisa de se modelar fluxos turbulentos de solução sem partículas, ou seja, solução salina, e mistura de baixa desidade com sedimentos (Alexander & Morris, 1994; Simpson, 1987).



Figura 2.3 – A caixa selada (“*lock box*”)



Figura 2.4 – A caixa selada instalada



O misturador industrial (figura 2.5) também é uma peça importante para os experimentos. Ele é responsável por preparar as soluções de diferentes densidades utilizadas para gerar as correntes de gravidade. Disponibilizaram-se dois misturadores conectados ao tanque T, entretanto não houve a necessidade de uso de ambos os misturadores ao mesmo tempo. Cada misturador possui uma capacidade volumétrica de dois mil litros. Para utilizá-lo é preciso enchê-lo com água, adicionar sal ou sedimento e por último liga-lo. Após pronta a solução, basta bombeá-la para dentro da caixa selada.



Figura 2.5 – O misturador industrial

Os dois últimos componentes importantes do experimento são os equipamentos de medição. Como os dados desejados são as velocidades e as espessuras do depósito (se utilizado solução com partículas) das correntes de turbidez, é essencial o uso de um medidor de velocidade por ultra-som UVP e de um *scanner* de depósitos. O UVP (ultrasonic velocity profiling) é utilizado para medir instantaneamente as velocidades de uma corrente em meio aquoso. Para isso o UVP é dividido em três partes, os transdutores, que emitem e recebem os pulsos de ultra-som; o hardware, que interpreta os dados adquiridos pelos transdutores; e um computador, para instalação do software do UVP e armazenamento dos dados coletados (figura 2.6). Nos experimentos realizados foram utilizados 10 transdutores posicionados em alturas diferentes: 6.5, 17, 27.5, 38, 59, 80, 101, 122, 143 e 164 milímetros (figura 2.7 com um círculo amarelo).

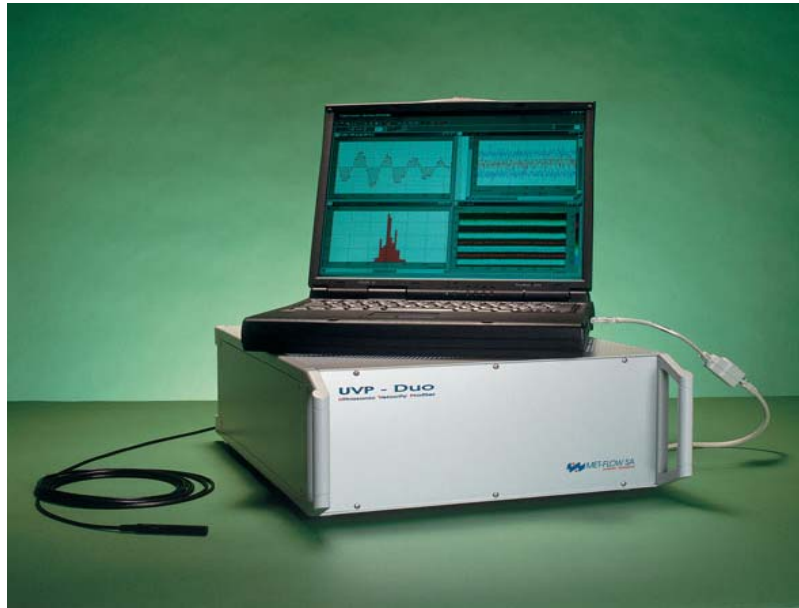


Figura 2.6 – Partes do UVP, equipamento para medição de velocidades

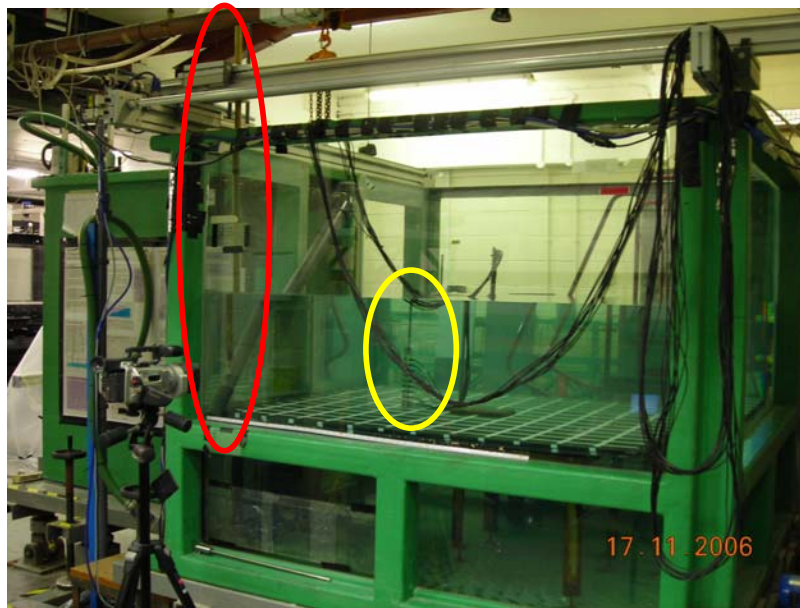


Figura 2.7 – A configuração final do tanque T

Uma vez o experimento de fluxo com partículas executado, cria-se um depósito de sedimentos ao longo da plataforma. O tanque T tem instalado em seu topo um equipamento específico para medir tal depósito, o *scanner a laser*. O laser sai de uma haste de metal (figura 2.7 em vermelho), que é capaz de medir dez mil pontos de espessura no depósito e leva aproximadamente 22 horas para ser efetuado. Após feita essa coleta, os dados são enviados para um computador conectado ao *scanner*, para que sejam armazenados e visualizados utilizando um *software* de reconstrução de superfícies, exemplo *Surfer*.

## 2.2. Procedimentos

Os experimentos foram desenvolvidos para simular fisicamente correntes de turbidez de baixa densidade para três concentrações diferentes, e, dessa maneira, foram separados em três baterias. Cada uma dessas baterias foi associada a uma concentração, 2.5% salina, 5.0% salina e 2.5% sedimento, todas calculadas em relação à massa, ou seja, se fez uma proporção entre as massas do soluto e do solvente para se obter a densidade desejada. Sendo assim, as duas primeiras baterias resultaram em experimentos de fluxos sem partículas, enquanto a última resultou em experimentos de fluxos com partículas (sedimento). Nos fluxos com partículas, foram usadas esferas de vidro, chamadas Ballotini, como sedimento. Estas esferas têm um diâmetro médio de aproximadamente 40 micras ou 0.040 milímetros, o que pode ser verificado na distribuição de tamanho de grãos, figura 2.8 e tabela 2.1.

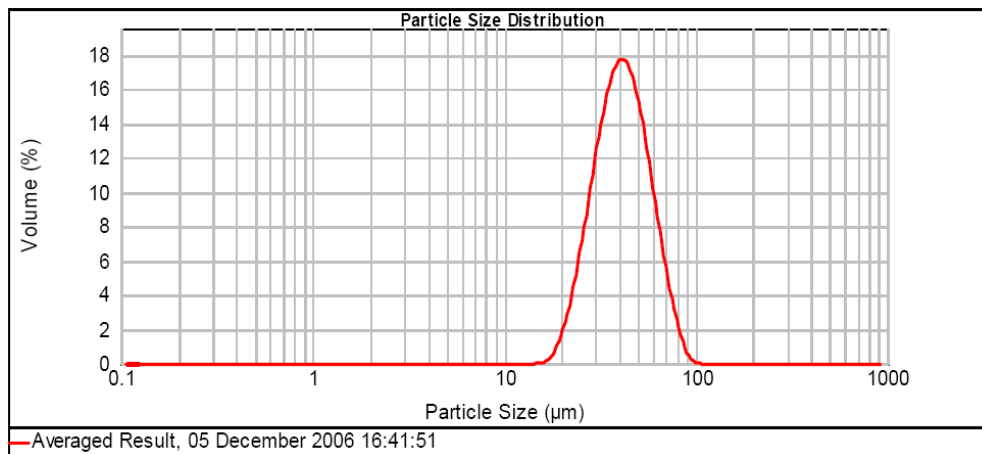


Figura 2.8 – Curva de distribuição de granulometria da Ballotini utilizada

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.00	120.226	0.00	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.00	13.163	0.00	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.00	15.136	0.00	158.489	0.00	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.00	17.378	0.07	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.00	19.953	0.83	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.00	22.909	2.65	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.00	26.303	5.59	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.00	30.200	9.27	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.00	34.674	12.90	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.00	39.811	15.41	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.00	45.709	15.96	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.00	52.481	14.31	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.00	60.256	11.01	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	0.00	69.183	7.08	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	0.00	79.433	3.68	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	0.00	91.201	1.17	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.00	10.000	0.00	104.713	0.07	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.00	11.482	0.00	120.226	0.00	1258.925	0.00		

Tabela 2.1 – Distribuição tamanho de grãos da Ballotini utilizada (Fonte: Lab. De Leeds;

Dr. Gareth Keevil)

Cada bateria de experimentos é constituída de vinte e nove ensaios, sendo os vinte e oito primeiros para aquisição de dados e vídeo, e o último para aquisição de vídeo, apenas. Este ensaio é indispensável uma vez que a inserção do instrumento para captura de dados no experimento, traz como consequência uma pequena distorção visual no fluxo. Levando em consideração que cada ensaio demora cerca de uma hora à uma hora e meia para ser executado, se faz necessária uma semana para que uma bateria de experimentos seja realizada por completo.

Um ensaio é composto por vários passos. O primeiro deles consiste em drenar e limpar o tanque T, caso o mesmo tenha sido utilizado anteriormente. Em seguida, a porta da caixa selada deve ser fecha e vedada com uma graxa de silicone, para evitar vazamento da solução. Após posicionar os transdutores do UVP em um lugar pré-selecionado da plataforma do tanque T, inicia-se o processo de enchimento do tanque de água até a marca de segurança, indicada na lateral do mesmo. Em paralelo ao preenchimento do tanque, a solução densa pode ser preparada usando o misturador, porém é necessário lembrar de parar a mistura e bombeá-la para dentro da caixa selada antes que o nível da água dentro do tanque atinja a base da caixa, caso contrário, a mesma flutuará.

Uma vez o tanque cheio, é recomendado que haja uma espera de, no mínimo, cinco minutos antes de se começar o próximo procedimento. Esse intervalo se deve ao fato da água continuar a se movimentar no interior do tanque logo após o mesmo ter sido totalmente cheio. Caso os cinco minutos não sejam respeitados e se realize a coleta de dados durante este período, a qualidade dos dados estará comprometida, pois o movimento da água causará ruídos no momento da coleta. Em paralelo a esse intervalo, continuou-se misturando a solução dentro da caixa selada, usando sua hélice, para que a mistura permanecesse homogênea e não precipitasse.

Até este ponto, todos os passos se referiam ao preparo do experimento. O experimento, de fato, começa logo após as câmeras serem ligadas, o UVP ser disparado e a porta da caixa selada ser aberta manualmente. Finalmente, devido à diferença de densidade entre a solução mais densa dentro da caixa e a água do tanque, a corrente de gravidade é fisicamente simulada. Após esperar por aproximadamente três minutos depois da porta aberta, têm-se as velocidades

coletadas e armazenadas no computador ligado ao UVP. Sendo assim, o armazenamento das velocidades demarca o final de um ensaio.

Todos os passos descritos acima devem ser seguidos precisamente para os vinte e oito ensaios de cada bateria. A única mudança ocorre quando o foco do ensaio passa a ser o vídeo ou o depósito, e não mais os dados de velocidade. Foi mencionado anteriormente que os transdutores deformam fisicamente a corrente e o depósito resultante do fluxo com sedimentos. Dessa forma, o uso tanto dos transdutores quanto do UVP tornou-se desnecessário nos ensaios de aquisição de vídeo e de espessuras do depósito. Para se medir essas espessuras, é preciso adicionar um passo extra no final do ensaio, que consiste em ligar o *scanner* e aguardar cerca de 22 horas para o mesmo medir dez mil pontos de espessura ao longo de todo o depósito.

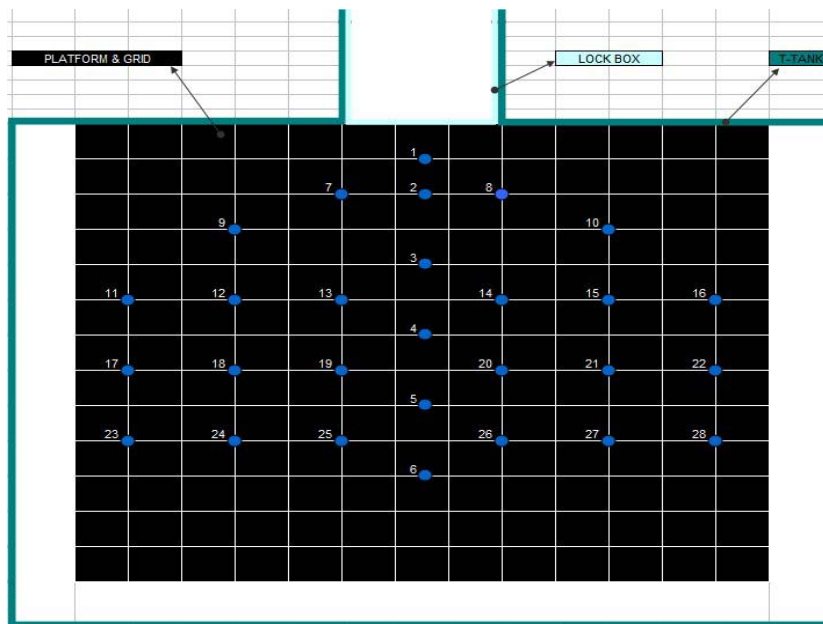


Figura 2.9 – Localização dos pontos para coleta de dados ao longo da plataforma

Para que seja feita a coleta de dados em qualquer ponto da plataforma, é preciso passar por todos os passos mencionados anteriormente, sendo que não é possível coletar dados em mais de um ponto ao mesmo tempo. Então, seria impraticável registrar os dados de velocidade para cada centímetro da plataforma do tanque T, uma vez que cada ensaio leva em média uma hora e

quinze minutos de duração. Por esse motivo vinte e oito pontos (figura 2.9) foram escolhidos ao longo da plataforma, que pareciam ser os pontos mais interessantes para se estudar o comportamento das correntes a serem simuladas, resultando assim em vinte e oito ensaios. A mesma configuração de pontos foi utilizada para todas as baterias, 2.5% salina, 5.0% salina e 2.5% sedimento.

### 2.3. Resultados

O primeiro tópico a ser discutido sobre os resultados da simulação física é a formatação dos dados. Como mencionado anteriormente, as velocidades são medidas através dos transdutores, que enviam esses dados para o equipamento de UVP, que por sua vez os reenvia para o programa do UVP instalado no computador conectado, onde finalmente é armazenado. O programa do UVP salva os dados em arquivos binários, o que é muito complicado de se trabalhar. Contudo, foi fornecido um outro programa que transforma facilmente os arquivos binários do UVP em arquivos texto.

Apesar de estar trabalhando com arquivos texto, a análise dos dados ainda é complexa. Esse problema se deve à velocidade de aquisição de dados do equipamento de UVP. Cada transdutor é capaz de medir velocidades em 128 pontos a sua frente num intervalo de tempo de 0.025 segundos. A distância entre cada um desses pontos de velocidade é chamada de corpo de velocidade, totalizando 128 corpos de velocidade idênticos. Para cada ensaio, cada transdutor registra 900 vezes. Então, como 10 transdutores foram utilizados, registrando cada um 128 corpos de velocidade e repetindo isso 900 vezes, resultou em 1.152.000 velocidades medidas para um único ensaio!!! Essa é a razão pela qual a análise dos dados é muito trabalhosa, muita informação agrupada em um único arquivo.

Partindo do princípio que os arquivos estavam sobrecarregados, adotou-se uma nova metodologia para análise dos dados. Quebrou-se cada arquivo sobrecarregado em arquivos menores, onde foram armazenados os dados de cada corpo de velocidade. Conseqüentemente, para cada ensaio foram gerados 128 arquivos menores. As tabelas a seguir, mostram os arquivos com a formatação original do equipamento de UVP e a nova formatação criada.

Um outro motivo importante para essa reformatação dos arquivos foi a questão de se querer uma maneira mais simples possível de se comparar os resultados experimentais com os do simulador 2D. Assim, procurou-se deixar os arquivos do UVP com a mesma formatação dos arquivos de saída do modelo computacional.

Analisando a tabela 2.2, a primeira linha mostra o nome do arquivo, seguido pela linha dois, que é apenas uma linha em branco. A linha três começa a ficar mais interessante, mostrando o número dos 128 corpos de velocidade, indo de 0 a 127. Logo após, na linha quatro, mostra-se as distâncias que cada corpo está dos transdutores, por exemplo, o corpo de velocidade número 0 começa a uma distância de 5 mm, enquanto o corpo número 127 está a 98,98 mm dos transdutores. A próxima linha não contém nenhuma informação relevante para esta pesquisa.

Seguindo para a linha seis desse mesmo arquivo, encontra-se uma legenda para orientação das próximas linhas. A primeira coluna dessa legenda indica o perfil de velocidade (*“profile”*) que está diretamente ligado aos transdutores; a segunda coluna indica o tempo (*“time”*), em segundos, que foi registrado o perfil; e a última coluna mostra o perfil de velocidade registrado (*“velocity”*), em mm/s. Exemplificando, no tempo 0.00 segundos o primeiro pulso ultra-sônico (US) é emitido pelo primeiro transdutor, que se encontra na base do equipamento, passando pelos 128 corpos de velocidade para registrar o perfil de velocidade número 0. Por volta de 0.025 segundos mais tarde, o segundo pulso US é emitido pelo segundo transdutor, em cima do primeiro, coletando os dados para o perfil de velocidade número 1. Essa lógica se mantém até o perfil nove, que corresponde ao pulso US emitido pelo último transdutor, o mais alto, marcando o final do primeiro ciclo. Um ciclo ocorre quando todos os transdutores enviam um pulso US, um de cada vez. Quando termina um ciclo, um novo começa automaticamente armazenando dados no perfil de velocidade subsequente. Em aproximadamente 3 minutos, o equipamento de UVP consegue completar 900 ciclos, indo da linha 7 até 9006, coletando 9000 perfis de velocidade, de 0 a 8999.

Profiles of C:/RHUL/Leeds/Experiments/Salinity_2.5%/Run_03/Run3.mfprof measurement									
Channel #	0	1	2	...	125	126	127		
Distance [mm]	5	5.74	6.48	...	97.5	98.24	98.98		
Distance*cos [mm]	0	0	0	...	0	0	0		
Profile #	Time [s]	Velocity [mm/s]							
LINHA 7	0	0.000	0.00	0.00	0.00	...	0.00	0.00	0.00
LINHA 8	1	0.025	396.90	0.00	0.00	...	0.00	0.00	-3.13
LINHA 9	2	0.049	12.50	0.00	0.00	...	3.13	6.25	0.00
LINHA 10	3	0.073	396.90	0.00	0.00	...	-3.13	3.13	0.00
LINHA 11	4	0.098	12.50	0.00	0.00	...	0.00	0.00	-3.13
LINHA 12	5	0.122	0.00	0.00	0.00	...	0.00	-3.13	-9.38
LINHA 13	6	0.146	400.00	0.00	0.00	...	3.13	3.13	3.13
LINHA 14	7	0.170	15.62	0.00	0.00	...	3.13	0.00	0.00
LINHA 15	8	0.195	365.60	0.00	0.00	...	0.00	0.00	0.00
LINHA 16	9	0.219	9.38	0.00	0.00	...	0.00	0.00	3.13
LINHA 17	10	0.243	390.60	0.00	0.00	...	0.00	0.00	0.00
LINHA 18	11	0.267	375.00	0.00	0.00	...	0.00	3.13	3.13
LINHA 19	12	0.292	-396.90	0.00	0.00	...	0.00	0.00	0.00
LINHA 20	13	0.316	396.90	0.00	0.00	...	3.13	15.62	21.88
LINHA 21	14	0.340	396.90	0.00	0.00	...	3.13	-6.25	9.38
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
LINHA 9002	8995	218.80	387.50	0.00	0.00	...	-15.62	-9.38	-9.38
LINHA 9003	8996	218.80	-375.00	0.00	0.00	...	0.00	-15.62	-15.62
LINHA 9004	8997	218.90	400.00	0.00	0.00	...	-9.38	-9.38	-9.38
LINHA 9005	8998	218.90	396.90	0.00	0.00	...	0.00	0.00	0.00
LINHA 9006	8999	218.90	12.50	0.00	0.00	...	0.00	-6.25	9.38

Tabela 2.2 – Formatação original dos arquivos UVP

LINHA	t	z	u
LINHA 2	0	6.5	0.00
LINHA 3	0.025	17	-3.13
LINHA 4	0.049	27.5	0.00
LINHA 5	0.073	38	0.00
LINHA 6	0.098	59	-3.13
LINHA 7	0.122	80	-9.38
LINHA 8	0.146	101	3.13
LINHA 9	0.17	122	0.00
LINHA 10	0.195	143	0.00
LINHA 11	0.219	164	3.13
LINHA 12	0.243	6.5	0.00
LINHA 13	0.267	17	3.13
LINHA 14	0.292	27.5	0.00
LINHA 15	0.316	38	21.88
...	...	...	...
LINHA 8997	218.8	80	-9.38
LINHA 8998	218.8	101	-15.62
LINHA 8999	218.9	122	-9.38
LINHA 9000	218.9	143	0.00
LINHA 9001	218.9	164	9.38

Tabela 2.3 – Nova formatação criada para os arquivos menores



Seguindo para a tabela 2.3, encontra-se a nova formatação criada para separar os arquivos maiores em arquivos simplificados. Para isto foi desenvolvido um programa de computador muito simples, em que basta fornecer o arquivo UVP original e o corpo de velocidade que se deseja analisar, para que o filtro e a reformatação seja feita. Dentro desse novo arquivo encontra-se na primeira coluna (t) o tempo que a velocidade foi medida, na segunda coluna (z) a altura na qual foi feita a medição e na terceira e última coluna (u) a velocidade registrada. Ou seja, esse novo arquivo representa o histórico de velocidades de um ponto específico da plataforma do tanque.

O motivo para este trabalho extra de quebrar arquivos complexos em arquivos mais simplificados, se deve ao fato de ser mais fácil visualizar os dados em arquivos com uma menor quantidade de informações e verificar se existe algo de errado ou não com os dados. Para visualizar esses dados pode ser usado qualquer programa capaz de interpolar e gerar mapa de contorno de um arquivo com três colunas. Então, foi fornecido um código escrito em IDL, que possibilitou a visualização dos arquivos simplificados (figuras 2.9 até 2.12).

Os gráficos mencionados mostram o mapa de contorno do tempo *versus* altura *versus* velocidade; o tempo é plotado no eixo X, a altura no eixo Y e a velocidade representada pelas cores. Para cada velocidade medida a um tempo determinado e a uma determinada altura, associa-se uma cor. As velocidades mais baixas são representadas com as cores frias (azul, roxo...), enquanto as velocidades mais altas são representadas com as cores mais quentes (vermelho, amarelo...). Entretanto, como os transdutores foram posicionados no sentido oposto do fluxo, as velocidades foram medidas de forma invertida, invertendo também todo o esquema de cores. Ou seja, as cores mais frias representam as maiores velocidades e as mais quentes as menores.

Nesses mapas de contorno é possível se ver a formação típica de uma corrente de turbidez, chamada de formação cabeça e cauda, que veio do inglês "*head and tail*". Por exemplo, o ponto mais alto na figura 2.10 e 2.11 é a cabeça da corrente, que passou há aproximadamente 25 segundos pelo ponto de medição. Em seguida, a cauda da corrente passa entre 35 e 50 segundos, quando o equipamento de UVP pára de medir com precisão.

Após ter-se analisado uma quantidade elevada de mapas de contornos, observou-se que certos arquivos não demonstravam uma formação típica de correntes de turbidez. De fato, esses arquivos não demonstravam nenhuma formação (figuras 2.12 e 2.13). Os dados provenientes desses arquivos são dados de baixa qualidade com ruídos, pois em algum momento da fase de medição foi introduzido um erro. Tal erro experimental pode ter sido resultante de um mau preparo do experimento ou simplesmente de uma limitação dos equipamentos.

Nos primeiros seis ensaios da bateria 2.5% salina, ocorreu um erro de procedimento, uma vez que o tempo de 5 min de espera após o tanque ter sido completamente cheio não foi respeitado. Conseqüentemente, a água dentro do tanque T ainda estava se movendo no momento em que se abriu a porta da caixa selada, afetando as correntes. Os dados provenientes desses ensaios foram conferidos e, felizmente, apenas dois dos seis ensaios tiveram que ser refeitos. Dessa forma, o trabalho extra de reformatar os arquivos e gerar mapas de contorno foi justificado, uma vez que o uso dessas técnicas certificou a qualidade dos dados experimentais.

Junto com o erro de execução, também houve limitações no equipamento de UVP. Detectou-se uma quantidade muito grande de ruídos, sendo a maioria entre os corpos de velocidade 0 e 40. Como esses corpos são os mais próximos aos transdutores, concluiu-se que o equipamento estava registrando não somente o fluxo, mas também o refluxo resultante da reflexão da corrente ao bater nos transdutores. De qualquer forma, esse erro não compromete os experimentos, pois ainda restam 88 corpos de velocidade para análise, que corresponde a 792.000 velocidades para cada ensaio.

Quanto às espessuras coletadas do depósito do fluxo com sedimentos, obtiveram-se resultados insatisfatórios!!! Infelizmente o depósito era fino demais para ser medido, onde até mesmo as fitas utilizadas para demarcar o *grid* eram mais espessas que o depósito. É muito provável que esse problema tenha sido causado pela baixa concentração e baixo volume da solução utilizada para simular a corrente, acarretando em pouco sedimento para se ter um depósito razoável.

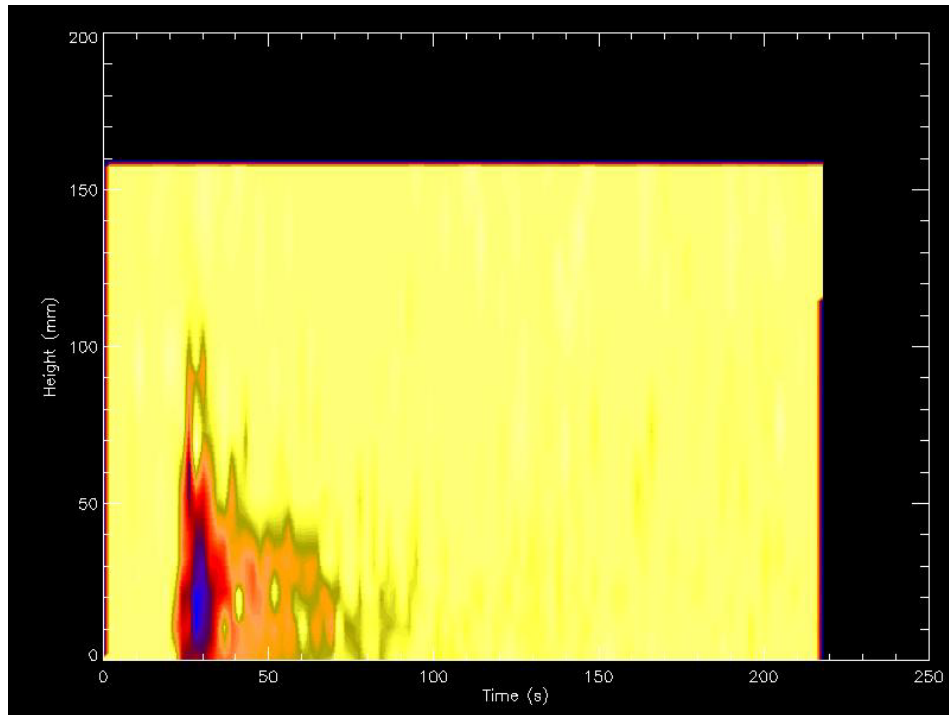


Figura 2.10 – Mapa de contorno dos dados da bateria 2.5%salina, ensaio 1 e corpo de velocidade 50

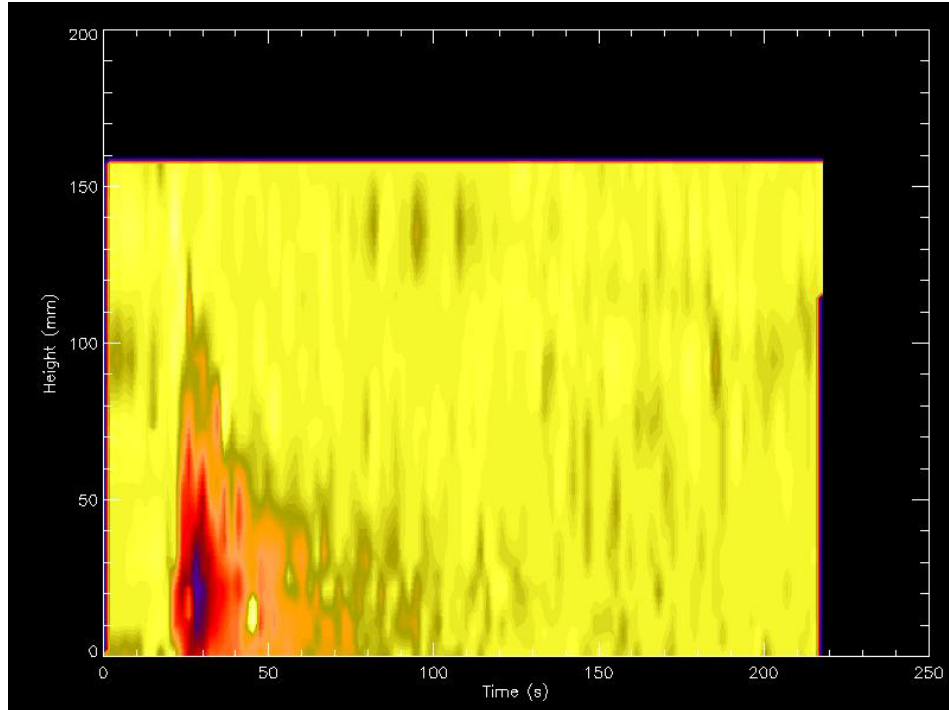


Figura 2.11 – Mapa de contorno dos dados da bateria 2.5%salina, ensaio 1 e corpo de velocidade 100

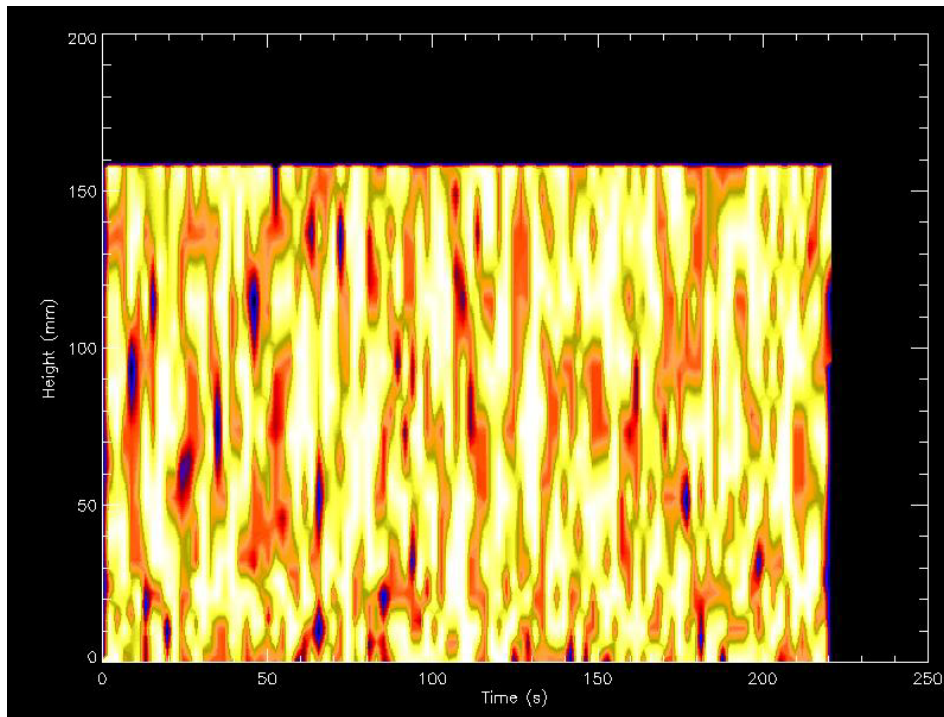


Figura 2.12 – Exemplo de dados com ruídos. Mapa de contorno dos dados da bateria 2.5%salina, ensaio 1 e corpo de velocidade 0

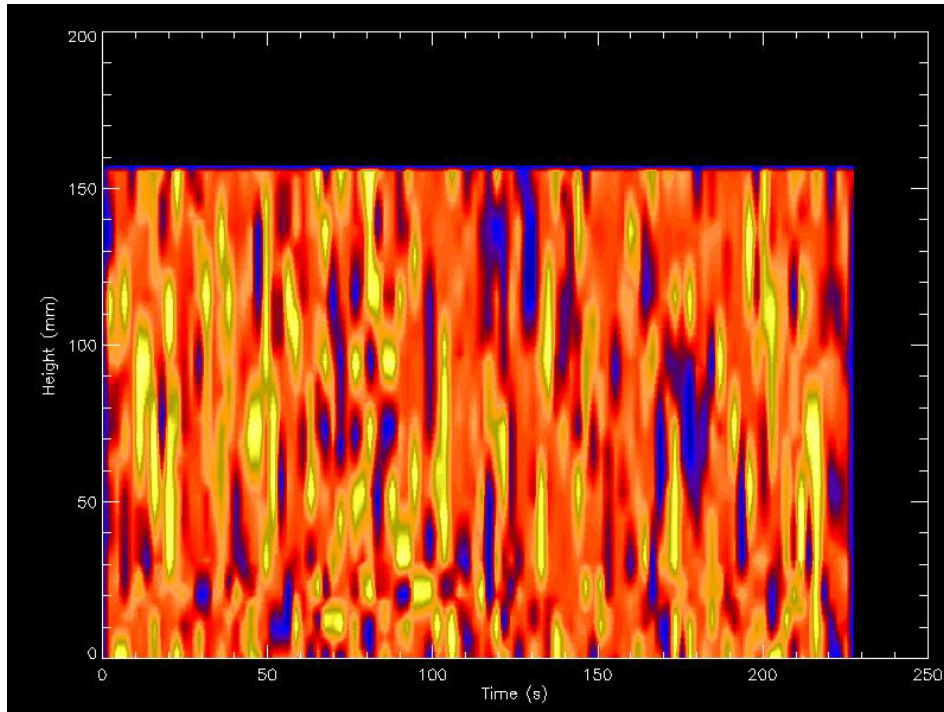


Figura 2.13 – Exemplo de dados com ruídos. Mapa de contorno dos dados da bateria 2.5%salina, ensaio 5 e corpo de velocidade 0

## 3 Simuladores

### 3.1. Simulador 1D

O primeiro modelo computacional a ser desenvolvido foi o simulador 1D (figura 3.1), que mostra o comportamento da corrente gravitacional em apenas uma direção. Esse programa foi criado usando a linguagem de programação orientada a objetos C++ no ambiente Microsoft Visual Studio 2005. Para a elaboração da interface e os elementos gráficos 2D, utilizou-se bibliotecas geradas no Tecgraf - PUC-Rio, as mais relevantes são:

- IUP - ferramenta portátil para construção de interface ao usuário (<http://www.tecgraf.puc-rio.br/iup>).
- CD - biblioteca gráfica 2D (<http://www.tecgraf.puc-rio.br/iup>).
- XY - ferramenta para plotar em gráficos x-y.



Figura 3.1 – Diálogo principal do simulador 1D

O principal objetivo em desenvolver tal simulador 1D foi aprender mais sobre equações diferenciais parciais (EDP), especialmente a equação da conservação de fluxo, e como resolvê-las numericamente. Então, o método

usado para resolver essas equações foi o Método de Diferenças Finitas, que é a ferramenta matemática mais simples de resolver EDP's.

A implementação desse método numérico para resolver a versão 1D mais simples das equações diferenciais parciais, citadas no capítulo 1, trouxe um conhecimento essencial para a implementação do algoritmo 2D. Mas se a criação do simulador 1D envolve solucionar EDP's, o que faz ele ser mais simples que o simulador 2D? Primeiramente o simples fato de estar trabalhando com um problema 1D, e não 2D, já faz com que as equações fiquem mais fáceis de se resolver, se tem menos termos para calcular durante a resolução. Além disso, a equação da conservação de fluxo foi simplificada, adotando uma velocidade constante ao longo do tempo. Esta simplificação realmente reduziu a complexidade do problema, uma vez que não era necessário calcular novas velocidades para cada passo da simulação.

As figuras 3.2 e 3.3 ilustram como esse programa funciona. O usuário deve prover dados de entrada, sendo o primeiro deles a topografia do fundo do mar, que é fornecida preenchendo a tabela à esquerda, na figura 3.2, com as coordenadas do leito. Então, o programa interpola automaticamente tais pontos para gerar o leito do mar, representados pela linha amarela escura no primeiro gráfico da mesma figura. O segundo gráfico não é utilizado nesse ponto.

A figura 3.3 ilustra o segundo dado de entrada a ser fornecido ao programa, que é a geometria do fluxo inicial. Clicando no tab "*Initial Flow*" uma nova tabela aparece, a qual deve ser preenchida da mesma forma que a tabela do leito do mar. Ao mesmo tempo em que a tabela é preenchida, uma linha azul escura é desenhada automaticamente no primeiro gráfico da mesma figura, esta linha representa a corrente. O usuário também poderia alterar os parâmetros do fluxo, como densidade, mas nesse estágio da pesquisa procurou-se simplificar o máximo o programa, fixando tudo em código. Essa simplificação não ocorre no simulador 2D.

Após verificada a eficácia do simulador 1D, o que será explicado com detalhes na seção 4.2 do capítulo 4 de análise dos dados, duas melhorias foram feitas no programa 1D. A primeira foi a alteração da velocidade que estava sendo considerada constante no decorrer da simulação, para uma velocidade atualizada a cada passo da simulação. A outra melhoria consiste em uma nova

ferramenta, implementada para fazer uma análise pontual da corrente. Essa ferramenta também será descrita no capítulo 4 de análise na seção 4.1.

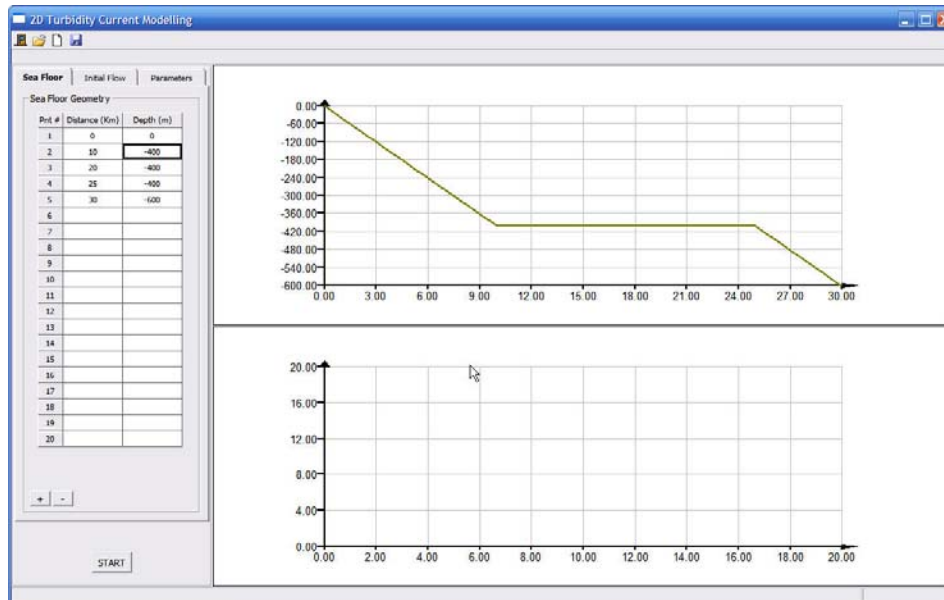


Figura 3.2 – Geometria do leito do mar

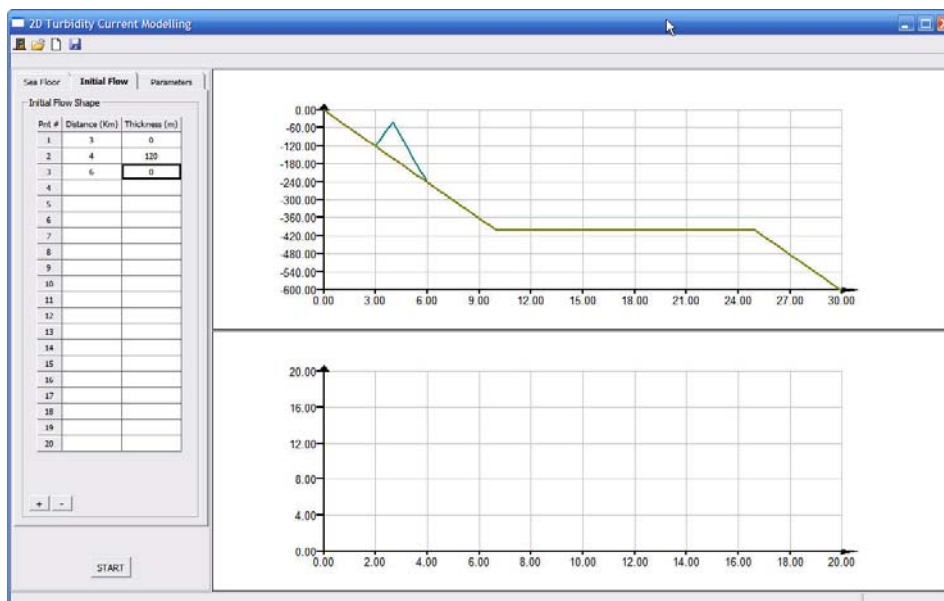


Figura 3.3 – Geometria inicial do fluxo

### 3.2. Simulador 2D

O simulador 2D (figura 3.4) foi gerado também com a função de resolver as equações diferenciais parciais, citadas na seção 1.3, que modelam o comportamento das correntes de turbidez, porém dessa vez sem simplificações. Desenvolveu-se o programa usando o mesmo ambiente Microsoft Visual 2005 e a mesma linguagem de programação C++. As bibliotecas do Tecgraf - PUC-Rio também continuaram a ser usadas, mas para parte gráfica 3D foi incluída a biblioteca OpenGL (“*Open Graphics Library*”).

Os principais objetivos ao desenvolver-se o simulador 2D foram não somente simular correntes de turbidez, mas também reproduzir de forma mais precisa possível o tanque T usado na fase experimental. O motivo para simular ambos se deve ao foco da pesquisa, que é validar as equações do Dr. Waltham através da comparação dos resultados provenientes dos experimentos com os do simulador. Em outras palavras, procurou-se recriar os experimentos no simulador para facilitar a comparação dos resultados.

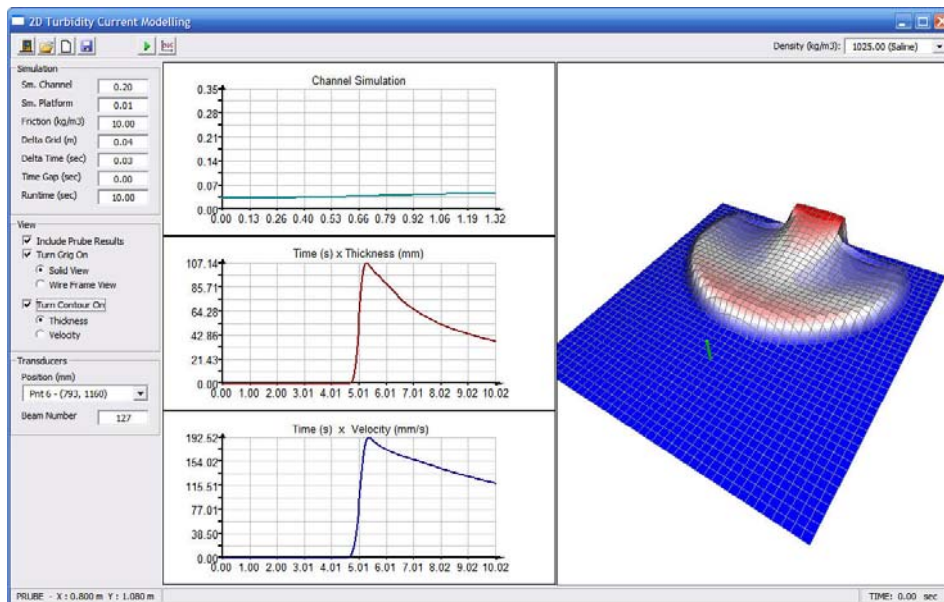


Figura 3.4 – Diálogo principal do simulador 2D

A interface do programa pode ser dividida em três partes principais: a barra de controle, o quadro de opções e a área de visualização. A barra de controle é mostrada na figura 3.5 e é responsável por gerenciar algumas funções do simulador, tais como: gerenciar arquivos (quartos primeiros botões à esquerda), começar a simulação (botão “*Play*”) e comparar resultados (botão com ícone de



comparação de gráficos) e controlar a densidade da corrente (“*drop list*” a direita).



Figura 3.5 – Barra de controle

Enquanto isso, o quadro de opções pode ser subdividido em três grupos: simulação, visualização e transdutores. O grupo simulação (figura 3.6) permite o usuário configurar alguns atributos da simulação, como o tempo de duração, o fator de suavização, fator de atrito, dentre outros. Já no grupo visualização (figura 3.7) encontra-se algumas opções para melhorar a interpretação gráfica dos resultados do simulador. Uma opção interessante é o *contour*, que pode ser calculado tanto em função da espessura da corrente quanto da velocidade da mesma. O último grupo refere-se aos transdutores (figura 3.8), que permite o usuário escolher em qual dos 28 pontos da plataforma (figura 2.9) se deseja coletar os dados de velocidade. Esses pontos estão exatamente na mesma posição que nos experimentos, justamente para facilitar a comparação dos dados. O ponto escolhido é destacado com um pequeno bastão verde (figura 3.12).

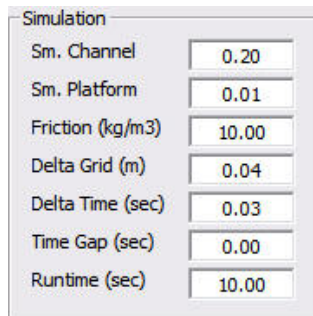


Figura 3.6 – Grupo simulação

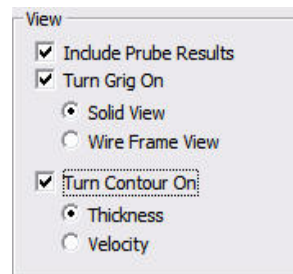


Figura 3.7 – Grupo Visualização

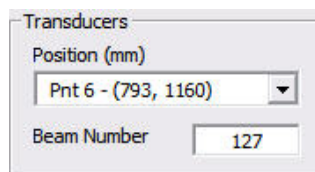


Figura 3.8 – Grupo transdutores

Indo para terceira e última parte da interface, área de visualização, encontra-se quatro canvases criados para ilustrar a simulação e mostrar alguns resultados pertinentes. O primeiro canvas (figura 3.9) ilustra a simulação da corrente enquanto confinada no canal do tanque. Como o fluxo dentro do canal pode ser modelado como um problema 1D, optou-se por uma ilustração simples num gráfico X-Y. Os próximos dois canvases mostram gráficos dos dados da corrente coletados durante a simulação, Tempo versus Espessura (figura 3.10) e Tempo versus Velocidade (figura 3.11). O último canvas (figura 3.12) ilustra a simulação numérica 2D da corrente de turbidez sobre a plataforma do tanque T.

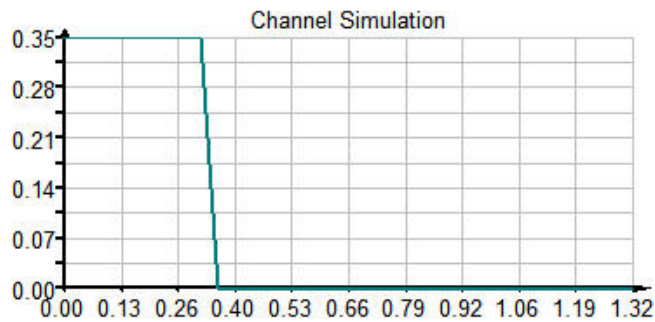


Figura 3.9 – Simulação da corrente dentro do canal

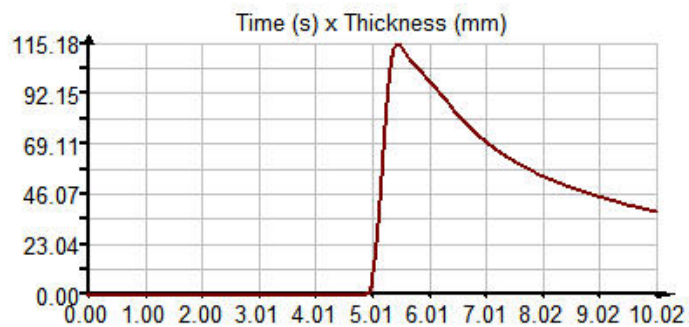


Figura 3.10 – Gráfico das espessuras coletadas na simulação

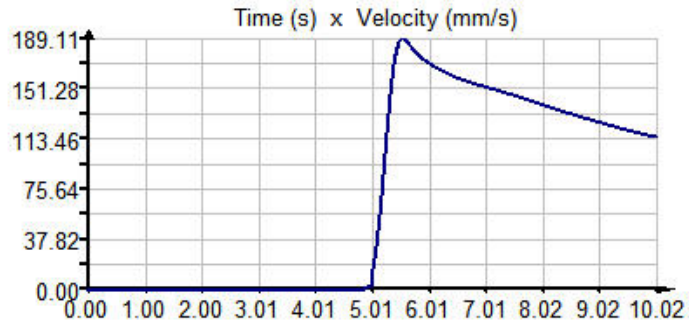


Figura 3.11 – Gráfico das velocidades coletadas na simulação

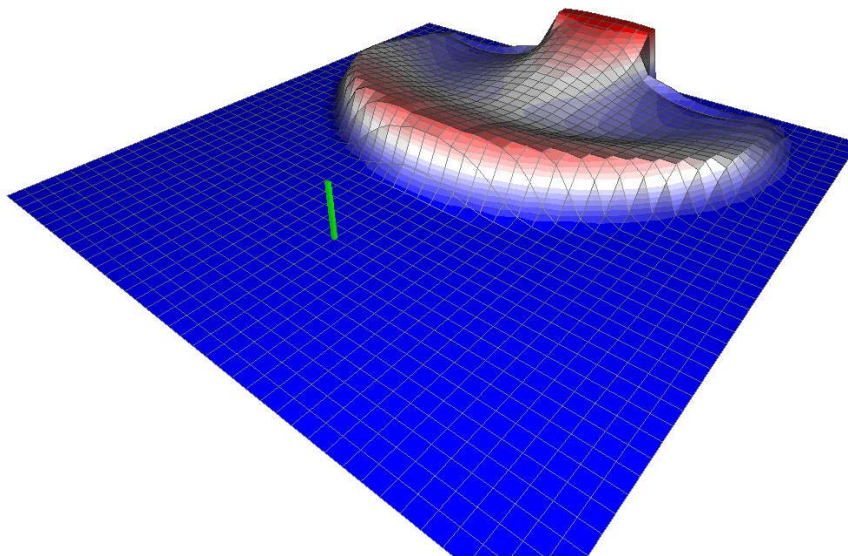


Figura 3.12 – Simulação numérica de correntes de turbidez

A execução do simulador 2D é trivial. Uma vez iniciado o programa, todos os parâmetros e atributos da simulação são carregados com valores pré-definidos através de diversos testes do programa. Então, basta o usuário pressionar o botão “*play*” para que a simulação comece. Porém, se os resultados não forem satisfatórios, é possível ajustar os parâmetros desejados e rodar uma nova simulação para se obter novos resultados. Para comparar os resultados numéricos com os experimentais, criou-se uma ferramenta capaz de comparar graficamente os dois: basta pressionar o botão à direita do botão “*play*” com o ícone de comparação de gráficos. Esta ferramenta será melhor explicada no capítulo 4 de análise dos dados.

### 3.3. Algoritmo

Conforme mencionado anteriormente, desenvolveu-se todo o algoritmo usando linguagem de programação orientada a objetos, C++. Com o objetivo de manter o código o mais simples possível, foram criadas apenas cinco classes:

- *Main\_Dialog*
- *List*
- *Draw*
- *Current\_Flow*
- *Comparison*

De uma maneira geral, as classes foram distribuídas de forma que cada uma ficasse com um papel específico dentro do programa. A classe “*Main\_Dialog*” é responsável pelo gerenciamento do programa, incluindo a interface com o usuário, a entrada de dados e a própria simulação. Já a classe “*List*” foi criada com o objetivo de organizar os resultados do programa utilizando uma estrutura de dados do tipo lista encadeada (Celes, 2004). O papel designado para a classe “*Draw*”, como o nome sugere, foi o de gerenciar as rotinas de desenho da parte gráfica dos resultados da simulação 2D. Enquanto isso, a classe “*Current\_Flow*”, ficou responsável por não somente armazenar informações da simulação, mas como também calcular a própria. Por último, vem a classe “*Comparison*”, que tem como objetivo gerenciar as funções de comparação dos resultados numéricos com os resultados experimentais.

A função mais importante do simulador para essa pesquisa é a “*Simulation*”, a qual é disparada assim que o botão “*Play*” da interface é pressionado. Esta função é o cérebro do modelo computacional, pois nela se encontra todo o cálculo das espessuras e velocidades da corrente para cada passo da simulação, concentrando praticamente todo o esforço matemático do programa. Além disso, a “*Simulation*” também é responsável por chamar as rotinas de desenho, para a visualização da simulação.

O algoritmo da função “*Simulation*” busca solucionar numericamente as equações diferenciais parciais, descritas na seção 1.3, utilizando o método das diferenças finitas de forma explícita, ou seja, partindo de valores conhecidos

para se chegar a valores desconhecidos. A idéia desse método consiste em substituir, de forma aproximada, as derivadas das EDP's por diferenças finitas. Então, foram consideradas três formas, “*forward difference*” (14), “*backward difference*” (15) e “*central difference*” (16), sendo suas aplicações orientadas por Dr. Waltham. Nas equações a seguir,  $f'(x)$  é a derivada da função no ponto  $x$  e  $h$  é um valor não nulo, porém tendendo a zero.

$$f'(x) \cong \frac{\{f(x+h) - f(x-h)\}}{2h} \quad (14)$$

$$f'(x) \cong \frac{\{f(x+h) - f(x)\}}{h} \quad (15)$$

$$f'(x) \cong \frac{\{f(x) - f(x-h)\}}{h} \quad (16)$$

Dois outros pontos importantes no algoritmo dessa função são: as condições de contorno e a suavização dos resultados. Para as condições de contorno, foi adotada uma metodologia que consiste em utilizar a variação do penúltimo valor no último valor a ser calculado. A suavização dos resultados a cada passo da simulação se fez muito importante para a estabilidade do simulador, pois sem ela o programa se tornava instável. Se trata de uma suavização simples de três pontos, calculando a média aritmética desses pontos e multiplicando por um fator arbitrário de suavização.

Um ponto interessante é que no lugar da suavização havia sido utilizado um termo de difusão, utilizando o método de Crank-Nicholson para resolvê-lo (Press et al, 1997), porém foi constatado que a suavização, além de apresentar um esforço computacional menor, também mostrou dar mais estabilidade ao algoritmo.

No esquema a seguir, mostra-se o passo a passo do algoritmo desenvolvido para a função “*simulation*”.

**Passo 1:**

- Inicialização geral das variáveis
- Inicialização dos vetores e matrizes de velocidade e de espessura como o valor 0.0

**Passo 2:**

- Criação do “loop” para o tempo de simulação

...

*Loop ( tempo de simulação )*

{

**Passo 2.1:**

- Incrementar variável do tempo de simulação

**Passo 2.2:**

- Cálculo dos novos vetores de velocidade e espessura do canal

...

{

**Passo 2.2.1:**

- Cálculo do termo de atrito
- Cálculo do termo de pressão hidrostática → [“Central Difference”]
- Cálculo do termo de advecção → [“Backward Difference”]

**Passo 2.2.2:**

- Cálculo do vetor de velocidade

**Passo 2.2.3:**

- Cálculo do vetor de espessuras → [“Backward Difference”]

**Passo 2.2.4:**

- Aplicar condições de contorno
- Aplicar suavização

**Passo 2.2.5:**

- Plotar resultados

}

...

**Passo 2.3:**

- Conexão entre o canal e a plataforma

**Passo 2.4:**

- Cálculo das novas matrizes de velocidade e espessura da plataforma

...

{

**Passo 2.4.1:**

- Cálculo dos termos de advecção para as componentes X e Y

...  
{

*If ( vel > 0.0 ) → [ "Backward Difference" ]*

*Else if ( vel < 0.0 ) → [ "Forward Difference" ]*

*Else → [ "Central Difference" ]*

}

...

**Passo 2.4.2:**

- Cálculo dos termos de pressão hidrostática para as componentes X e Y → [ Central Difference ]

**Passo 2.4.3:**

- Cálculo dos termos de atrito para as componentes X e Y

**Passo 2.4.4:**

- Cálculo da matriz de velocidade

**Passo 2.4.5:**

- Cálculo da matriz de espessuras

...  
{

*If ( vel > 0.0 ) → [ "Backward Difference" ]*

*Else if ( vel < 0.0 ) → [ "Forward Difference" ]*

*Else → [ "Central Difference" ]*

}

...

**Passo 2.4.6:**

- Aplicar condições de contorno

**Passo 2.4.7:**

- Armazenar as matrizes finais de velocidade e espessura para análise pontual

**Passo 2.4.8:**

- Desenhar a corrente atualizada na plataforma

}

...

}

...

Todos os passos desse esquema são importantes. Porém, podemos destacar como passo essencial a ligação do canal com a plataforma do tanque T. Conforme mostrado, para cada passo de tempo da simulação é necessário calcular, primeiramente, os parâmetros da corrente dentro do canal para depois se calcular fora do canal, ou seja, na plataforma. Essa metodologia é totalmente pertinente, pois o canal funciona como um provedor para o fluxo sobre a plataforma, alimentando o mesmo com novas velocidades e espessuras ao longo da simulação. Como resultado, o fluxo do canal influencia diretamente as condições de contorno do modelo da plataforma.

Vale ressaltar a importância da função de desenho do simulador 2D, pois se a mesma não for implementada de maneira eficaz, poderá comprometer significativamente o desempenho do algoritmo. Por isso, procurou-se utilizar funções do OpenGL que otimizassem o processamento do algoritmo, por exemplo ao passar os pontos para a placa gráfica, optou-se por passar vetores com todos os pontos a serem desenhados, ao invés de se passar ponto a ponto.

Com esta rotina de desenho, é possível não somente visualizar a simulação, mas como também fornecer opções de visualização ao usuário, como malha de discretização e mapa de contorno. A malha de discretização da plataforma auxilia o usuário com relação ao posicionamento, ou seja, saber o que acontece com cada elemento da malha ao longo da simulação. A implementação desta malha na rotina de desenho foi feita de forma muito simples, utilizando um método chamado "*Polygon Offset*". Tal método consiste em renderizar primeiramente o plano da plataforma, com uma profundidade imperceptível, e depois renderizar as linhas da malha, sem profundidade.

Quanto ao mapa de contorno, tem-se que sua finalidade é fazer um mapeamento de propriedade, auxiliando o usuário a interpretar o que está ocorrendo com a corrente em tempo real da simulação. O mapa de contorno pode ser calculado de duas maneiras, em função da espessura do fluxo e em função da velocidade média do fluxo. Para cada passo da simulação é calculado e desenhado um novo mapa de contorno, mostrando, por exemplo, a espessura máxima da corrente no passo. Para implementação desse mapa de propriedades, fez-se uso de uma técnica de visualização do OpenGL conhecido



como aplicação de textura 1D. Essa técnica consiste, basicamente, em criar uma textura com uma escala de cores, por exemplo a figura 3.13 com 16 cores, e uma coordenada de textura, no caso  $S$ , para o mapeamento nas primitivas do OpenGL. Uma vez definido o valor máximo e mínimo da propriedade, se faz uma interpolação de 0 a 1 definindo as coordenadas de textura  $S$ , e, depois se passa todas as coordenada, de textura e do objeto, para o OpenGL fazer a associação com as cores da escala e desenhar na tela.

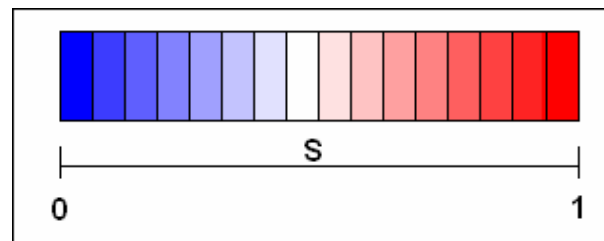


Figura 3.13 – Escala de cores da textura 1D e sua coordenada  $S$

## 4 Análise de Dados

### 4.1.Procedimentos

A idéia inicial para a comparação dos dados foi separá-los em series de 28 ensaios, com a mesma concentração, para depois combinar esses ensaios em uma única série. A combinação dos dados resultaria na reconstrução das velocidades do fluxo sobre a plataforma ao longo da simulação, ou seja, resultaria na evolução espaço-temporal das velocidades da corrente. Por exemplo, no instante 0.0 segundo não tem nenhum fluxo dentro do tanque T, então as velocidades medidas nos 28 pontos da plataforma são de 0.0 mm/s. De fato, enquanto o fluxo se desloca ao longo do canal, todas as medidas de velocidade na plataforma devem ser nulas. Porém, quando a corrente começar seu deslocamento sobre a plataforma, geralmente 3 segundos após a abertura da comporta da caixa selada, será possível reorganizar as velocidades armazenadas para se gerar um campo de velocidade num dado instante do experimento.

Infelizmente a metodologia descrita acima não foi possível ser implementada devido ao tempo de abertura da comporta da caixa selada. Cada experimento foi realizado de forma totalmente independente um do outro, então o tempo de abertura da comporta não foi necessariamente o mesmo para todos os experimentos. Esse tempo era importante pois demarcava o início do deslocamento da corrente, então, deveria ter sido cronometrado precisamente. Contudo, este problema foi contornado cronometrando o tempo de abertura da comporta através dos vídeos gravados dos experimentos, mas de qualquer forma, isso não comprometeria a análise dos dados.

Decidiu-se então, que a melhor maneira de se comparar os resultados experimentais com os do modelo computacional, seria utilizando uma análise pontual dos dados. A idéia dessa análise é gerar históricos dos parâmetros, espessura ou velocidade, das correntes simuladas para qualquer ponto desejado do tanque T. Em outras palavras, essa análise é capaz de armazenar e plotar

num gráfico as espessuras ou as velocidades da corrente ao longo de toda simulação para um ponto específico. Por isso o nome de análise pontual.

Com isso, o primeiro passo tomado para implementar essa análise foi modificar o simulador 1D (figura 4.1), desenvolvendo uma ferramenta capaz de armazenar as informações desejadas para qualquer ponto do canal do simulador. Uma vez selecionado o ponto, representado pela reta vertical vermelha na figura 4.2, a simulação é iniciada e após seu término os históricos das espessuras e das velocidades, para esse ponto, são plotados nos seus respectivos gráficos, como mostram as figuras 4.3 e 4.4.

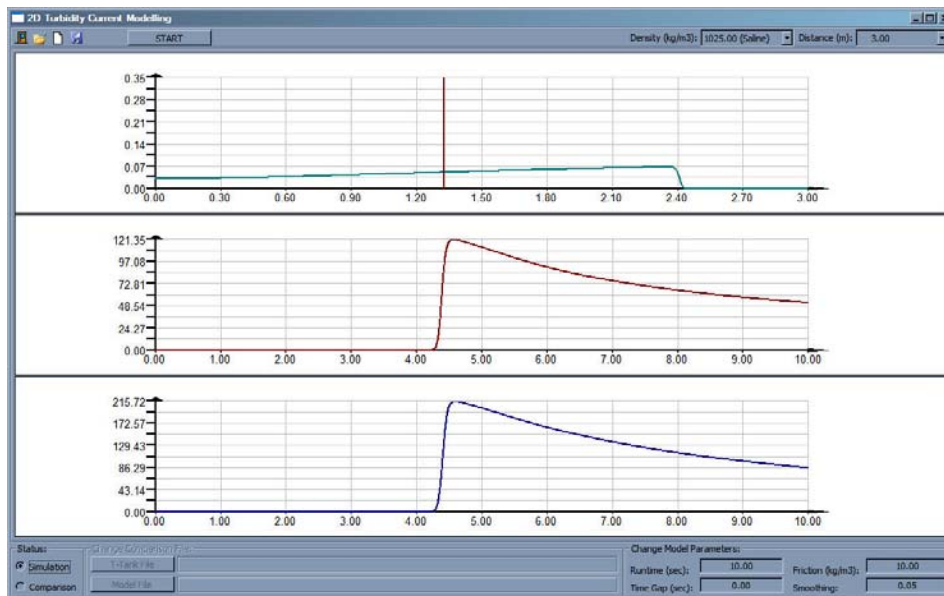


Figura 4.1 – Simulador 1D modificado

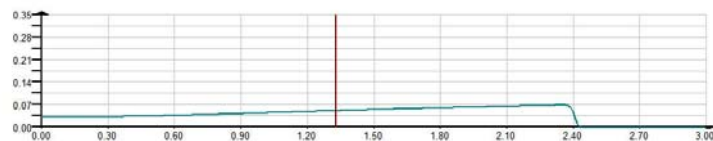


Figura 4.2 – Análise pontual dentro do canal

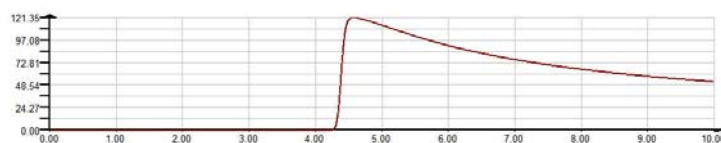


Figura 4.3 – Curva de espessura da corrente resultante da análise pontual (mm/s x seg)

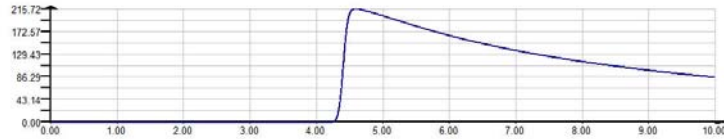


Figura 4.4 – Curva de velocidade resultante da análise pontual (mm/s x seg)

A modificação do simulador 1D teve o propósito particular de fazer uma verificação das equações utilizadas na modelagem numérica 1D. Essa verificação foi feita utilizando a ferramenta de análise pontual, a qual tornou possível coletar dados da corrente exatamente no final do canal do simulador 1D. Então, esses dados foram comparados com os dados experimentais do primeiro ponto da plataforma (figura 2.9 ou 4.12), que está localizado a 10.0 centímetros do final do canal. Foi explicado, no capítulo 2, seção 2.3, que os transdutores podiam medir 128 corpos de velocidades a sua frente, e o último deles ficava a precisamente 9.898 centímetros de distância, o que é perto o suficiente de 10 cm.

Esta etapa de verificação do simulador 1D foi extremamente importante, pois o algoritmo do simulador 2D foi baseado no algoritmo do simulador 1D, sendo assim, necessário testar as equações para depois se dar início à modelagem 2D.

Prosseguindo com as alterações do simulador 1D, um novo módulo foi criado (figura 4.5) para ajudar na comparação das velocidades experimentais com as do modelo. Mas antes de se comparar as velocidades é preciso se comparar as espessuras do fluxo. Então, foi fornecido um outro programa, similar ao programa usado no capítulo 2, capaz de plotar o mapa de contorno de um experimento superposto de uma nova curva de espessura (figura 4.6), coletada do modelo. Essa comparação é muito importante para verificar se a forma do fluxo experimental era similar a do modelo.

Após comparada as formas dos fluxos, foi necessário implementar uma nova rotina capaz de automatizar o cálculo da velocidade média para qualquer arquivo de dados de velocidade dos experimentos. As figuras 4.6, 4.8 e 4.10 ajudam a ilustrar como foi feito esse cálculo. Primeiramente, as velocidades consideradas no cálculo são as que estão somente no interior do fluxo, para isso, a curva de espessuras fornecida pelo modelo funcionou como um limite.

Em outras palavras, as velocidades experimentais medidas a uma altura inferior a curva de espessura do modelo são levadas em consideração no cálculo, enquanto as velocidades medidas a cima desta curva são descartadas. Esta aproximação deve funcionar de maneira satisfatória, uma vez constatada uma boa similaridade entre as formas da curva experimental e numérica. Dessa maneira, para cada ciclo medido (definição de ciclo no capítulo 2, seção 2.3), calculou-se um tempo médio e uma velocidade média, ponderada de acordo com a altura de cada transdutor. Para finalizar, plotou-se um gráfico com estas informações - tempo médio vs. velocidade média do ciclo - fazendo assim uma comparação gráfica com os resultados numéricos (figura4.5).

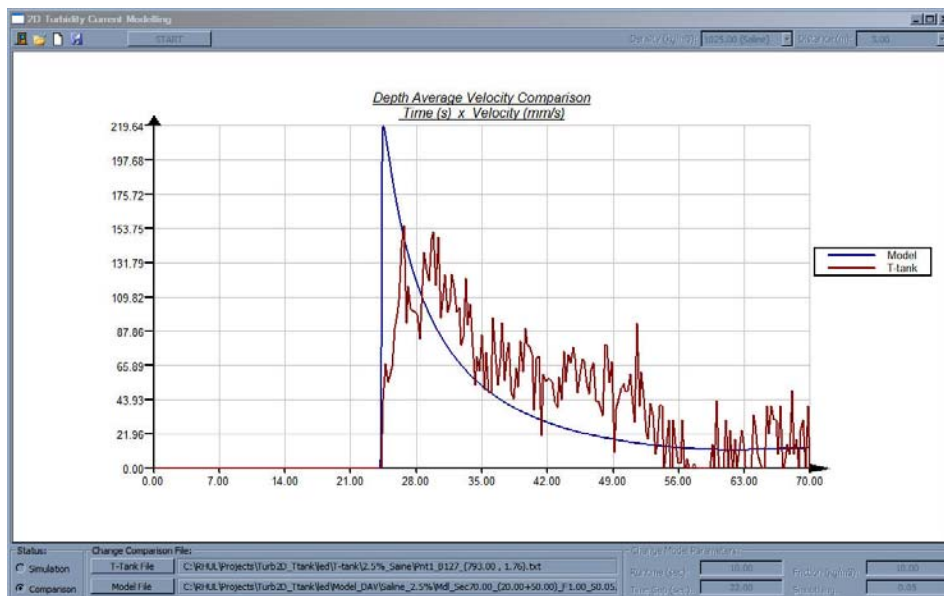


Figura 4.5 – Novo módulo para comparação das velocidades médias

No módulo de comparação de velocidades, todos os procedimentos são executados de forma automática. A única tarefa do usuário será em carregar os arquivos do simulador e do experimento para a comparação, pressionando seus respectivos botões na interface. Os resultados da pré-análise do modelo 2D serão mostrados na próxima seção deste mesmo capítulo.

Uma vez verificada a qualidade dos dados gerados pelas equações usadas no modelo computacional 1D, o desenvolvimento do modelo 2D foi iniciado. Grande parte dos procedimentos do simulador 2D foi apresentada no capítulo anterior, na seção 3.2, porém dois novos procedimentos foram incluídos neste ponto da pesquisa: (i) rotina de análise pontual, (ii) e o módulo de

comparação. Ambos os procedimentos já foram explicados para o simulador 1D, e para o simulador 2D, não há praticamente mudança alguma. A análise pontual do simulador 2D pode ser feita em qualquer um dos 28 pontos da plataforma, sendo representada por um bastão verde (figura 3.13) e não mais por uma linha vertical vermelha (figura 4.2). Quanto ao módulo de comparação do simulador 2D, ele funciona exatamente da mesma maneira que no modelo 1D, tendo a mesma interface.

## 4.2. Resultados

O primeiro grupo de resultados, representado pelas primeiras seis figuras abaixo, mostra a análise pontual feita exatamente no final do canal, usando o modelo 1D. As figuras 4.6, 4.8 e 4.10 mostram a comparação entre as curvas de espessura provenientes do simulador 1D (representado pela linha preta) e do experimento (representado pelo contour). Já as figuras 4.7, 4.9 e 4.11 mostram a comparação das curvas de velocidade média geradas pelo simulador 1D e pelo experimento, representados, respectivamente, pelas linhas azul e vermelha. Cada par de figuras se refere aos resultados dos experimentos com soluções 2.5% salina, 5.0% salina e 2.5% sedimento, mantendo-se a respectiva ordem.

De uma forma geral, esses resultados parecem muito encorajadores! Aparentemente, as equações utilizadas para modelar as correntes de turbidez no simulador 1D estão funcionando bem. Nota-se um resultado muito bom na comparação das espessuras, e um resultado similar na comparação das velocidades médias, apesar de nenhum filtro ter sido utilizado para melhorar a qualidade dos dados experimentais. Conseqüentemente, esses resultados motivaram a pesquisa e permitiram um novo passo: o desenvolvimento de um algoritmo para modelar matematicamente as correntes de turbidez, para ser utilizado num simulador versão 2D.

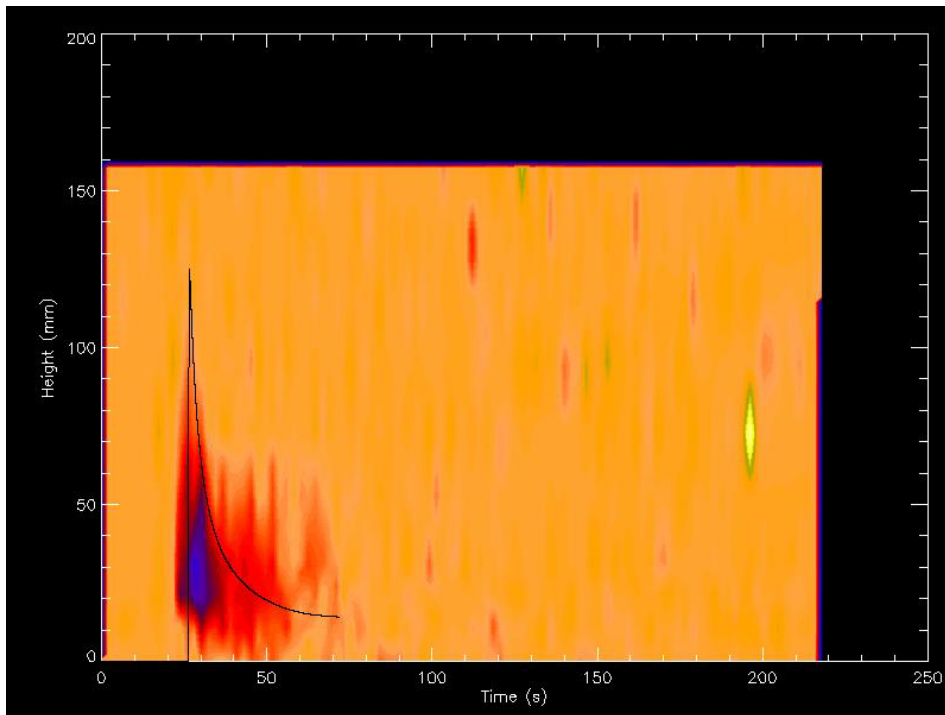


Figura 4.6 – Comparação das curvas de espessura no final do canal para solução 2.5% salina

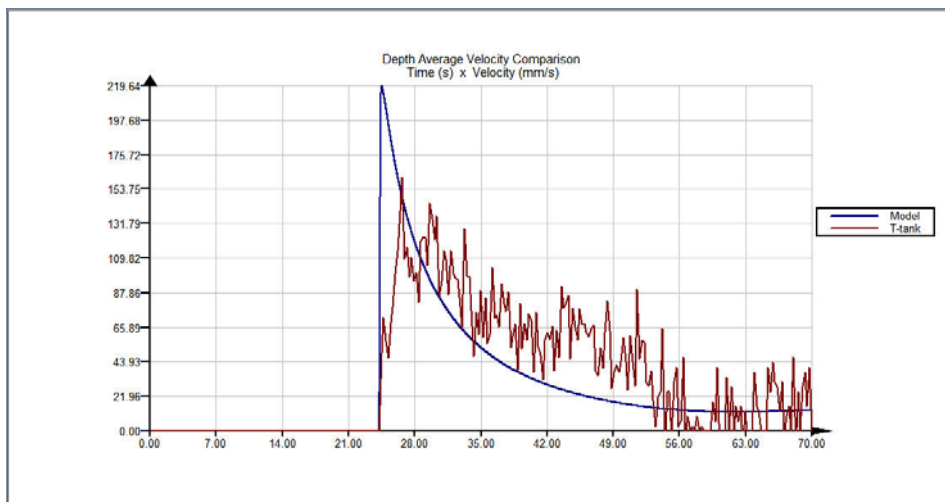


Figura 4.7 – Comparação das curvas de velocidade média no final do canal para solução 2.5% salina

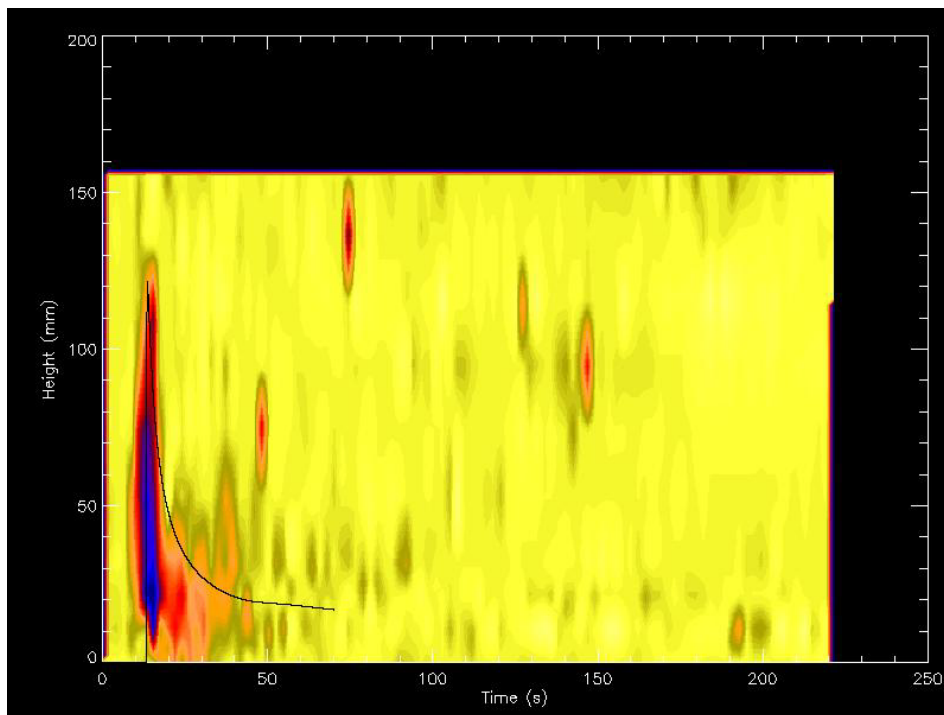


Figura 4.8 – Comparação das curvas de espessura no final do canal para solução 5.0% salina

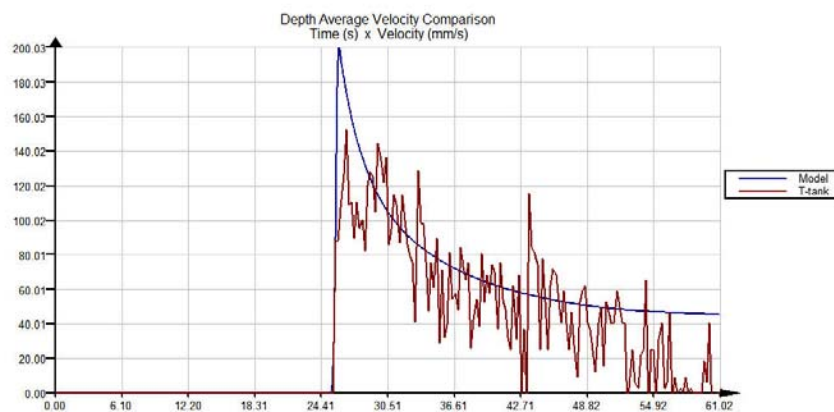


Figura 4.9 – Comparação das curvas de velocidade média no final do canal para solução 5.0% salina



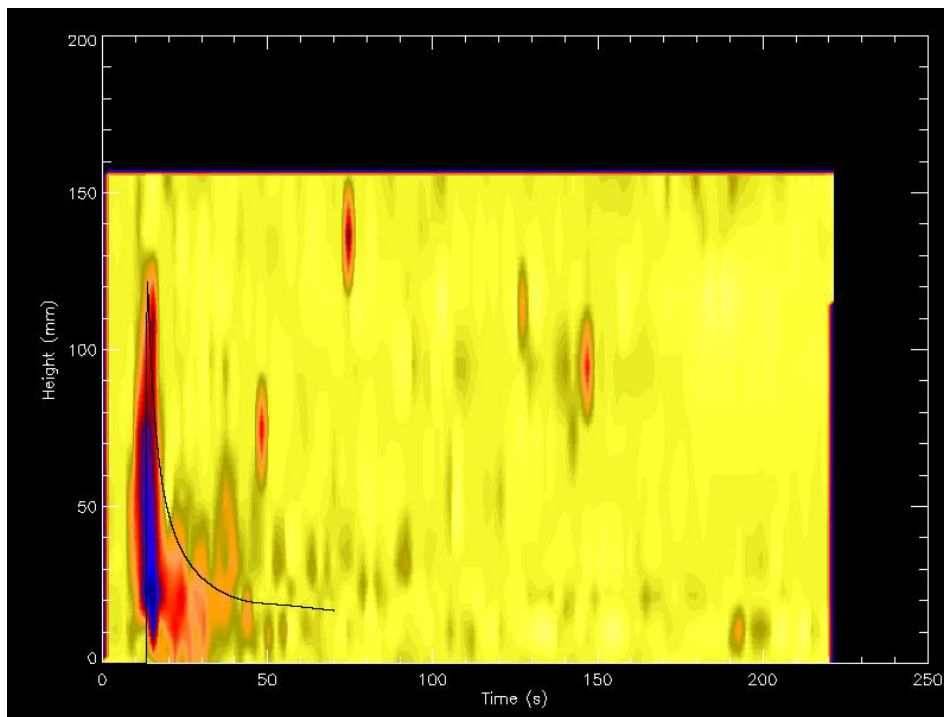


Figura 4.10 – Comparação das curvas de espessura no final do canal para solução 2.5% sedimento

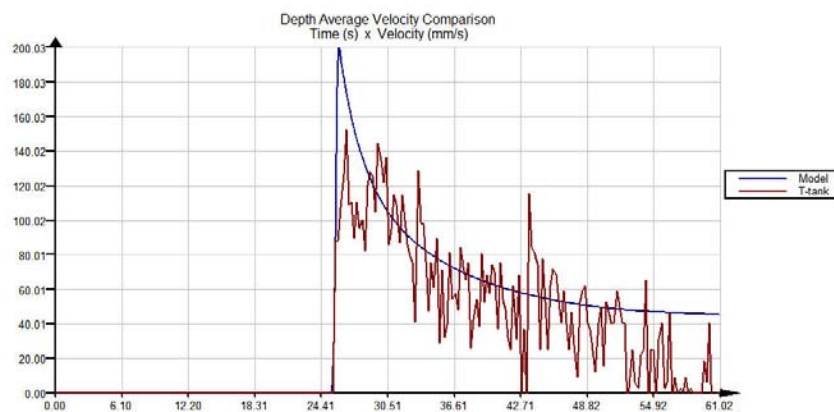


Figura 4.11 – Comparação das curvas de velocidade média no final do canal para solução 2.5% sedimento

O próximo grupo de resultados mostra algumas comparações entre os dados experimentais e os dados gerados no simulador 2D. Como as conclusões foram similares para as soluções 2.5% salina, 5.0% salina e 2.5% sedimento, apenas os resultados da solução 2.5% salina são apresentados nesta pesquisa.

As comparações dos dados de velocidade e de espessura foram feitas para todos os 28 pontos da plataforma do tanque T, usando diversos corpos de velocidade, dentre os 128 possíveis. Porém, com o objetivo de condensar os resultados e ressaltar as principais conclusões, foram escolhidos apenas 11 pontos, dentre os 28 da plataforma, para se mostrar os resultados da análise pontual. Esses 11 pontos são destacados com um círculo vermelho na figura 4.12. As figuras 4.13 até 4.23 ilustram respectivamente as comparações das curvas de espessura para os pontos 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 15, 23 e 28, enquanto as figuras 4.24 até 4.34 ilustram respectivamente as comparações das curvas de velocidade média para o mesmo conjunto de pontos. O primeiro ponto da plataforma não foi escolhido, pois os seus resultados já foram mostrados previamente.

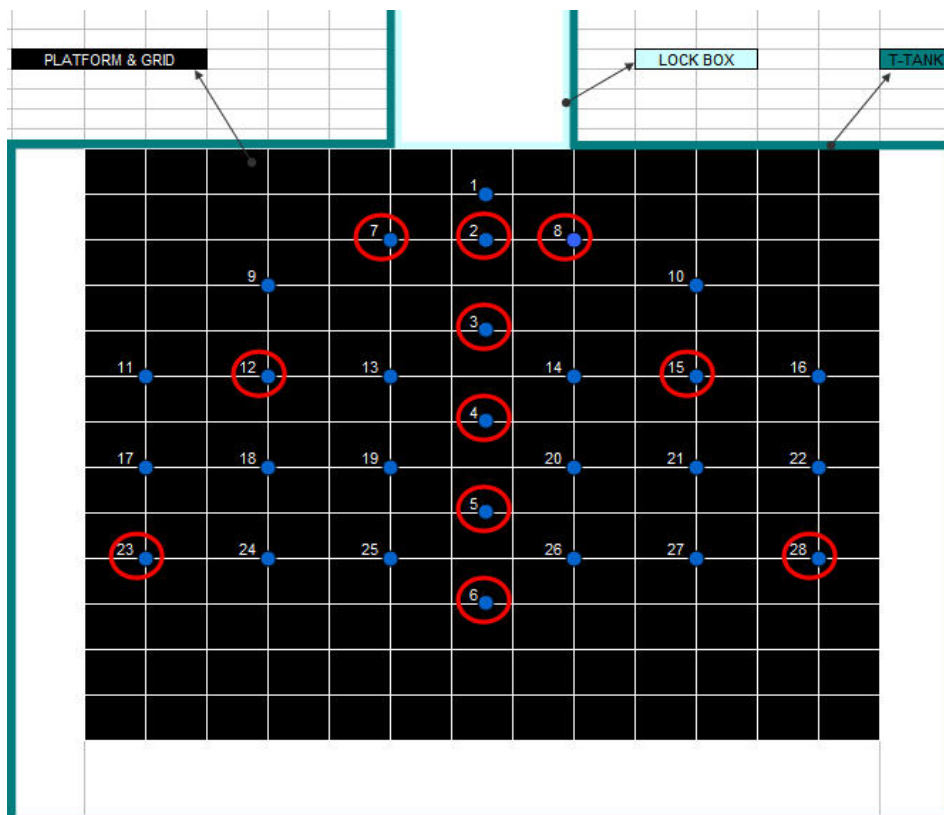


Figura 4.12 – Pontos escolhidos para ilustração das análises pontuais

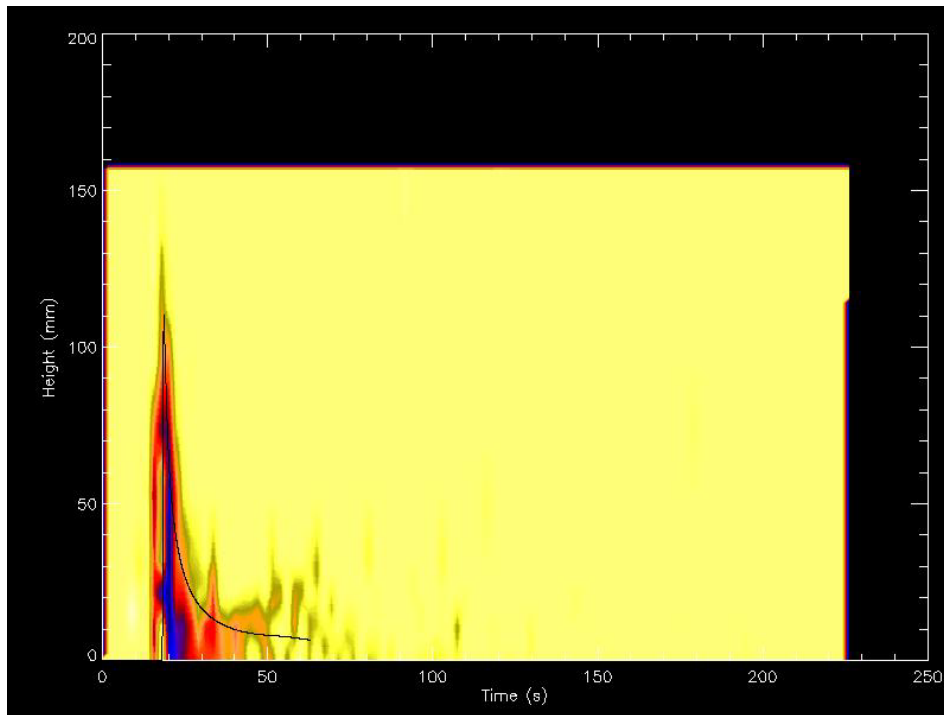


Figura 4.13 – Comparação da curva de espessura para o ponto 2

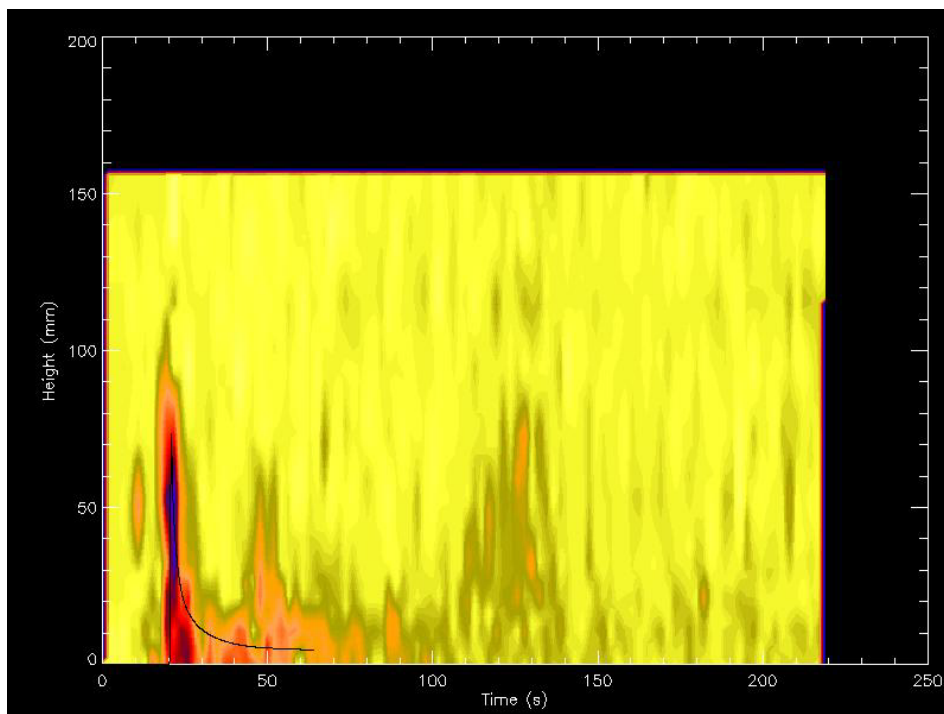


Figura 4.14 – Comparação da curva de espessura para o ponto 3

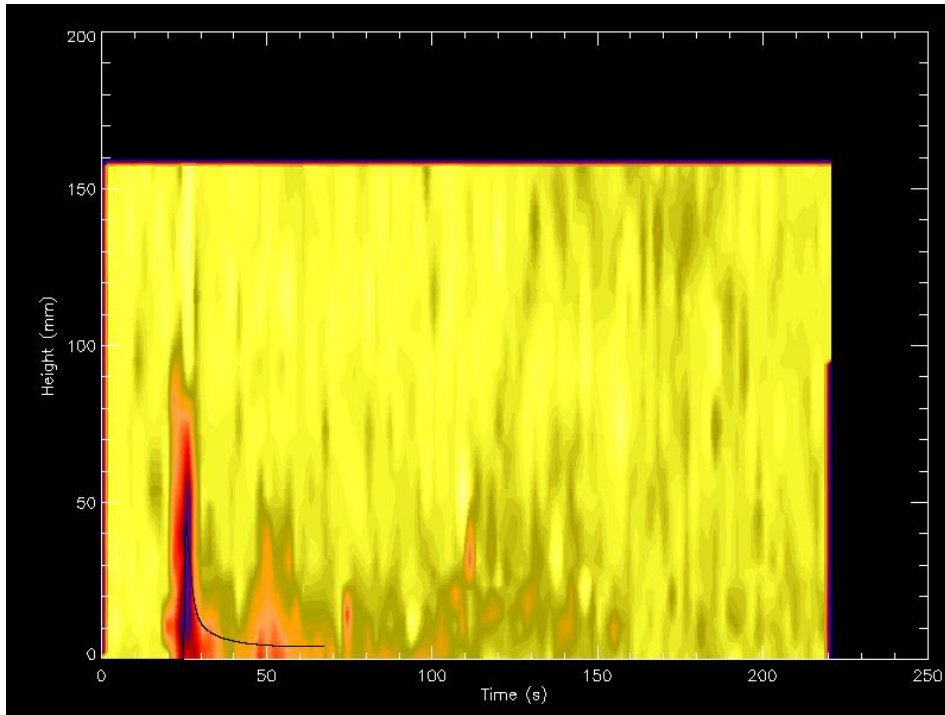


Figura 4.15 – Comparação da curva de espessura para o ponto 4

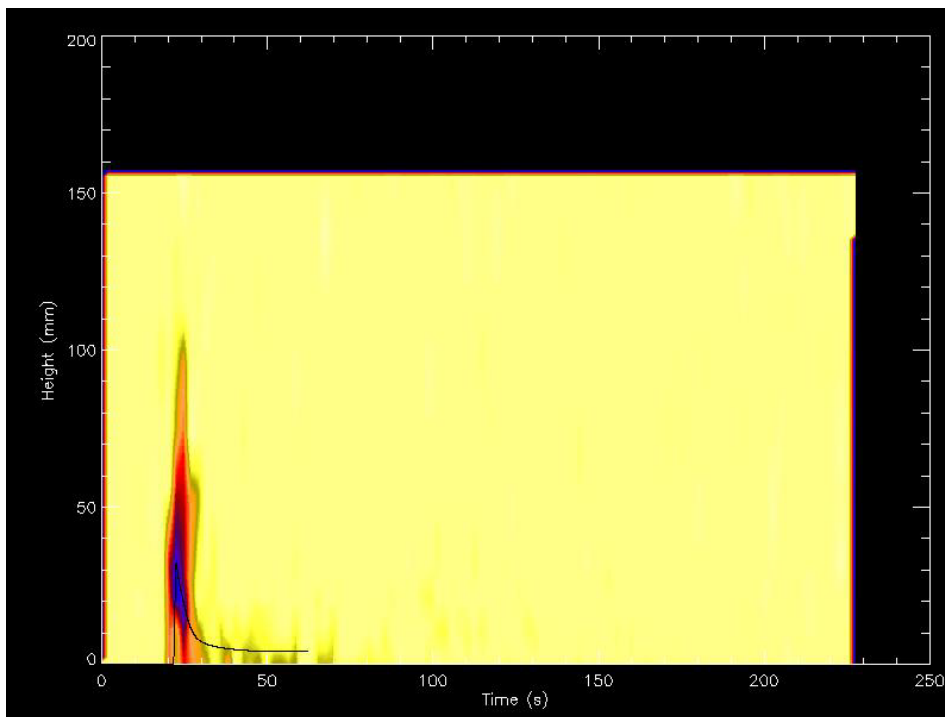


Figura 4.16 – Comparação da curva de espessura para o ponto 5

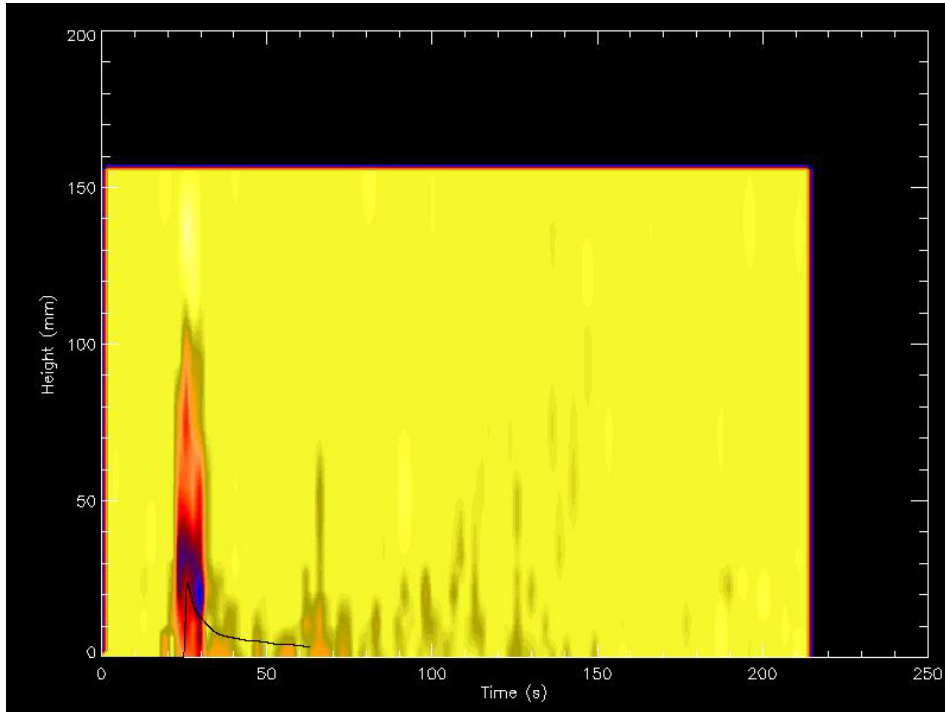


Figura 4.17 – Comparação da curva de espessura para o ponto 6

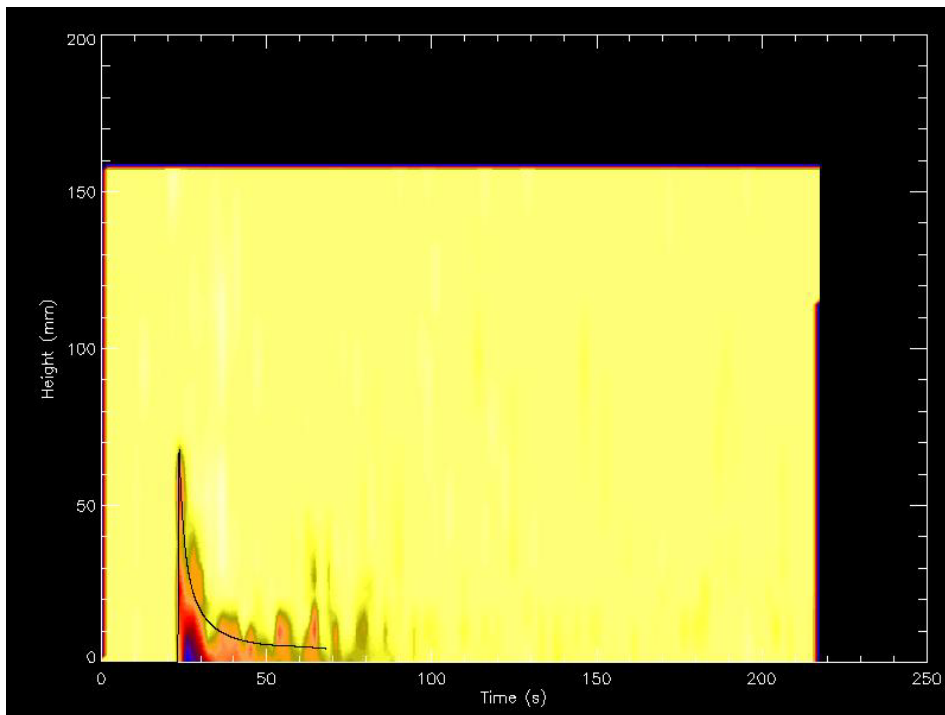


Figura 4.18 – Comparação da curva de espessura para o ponto 7

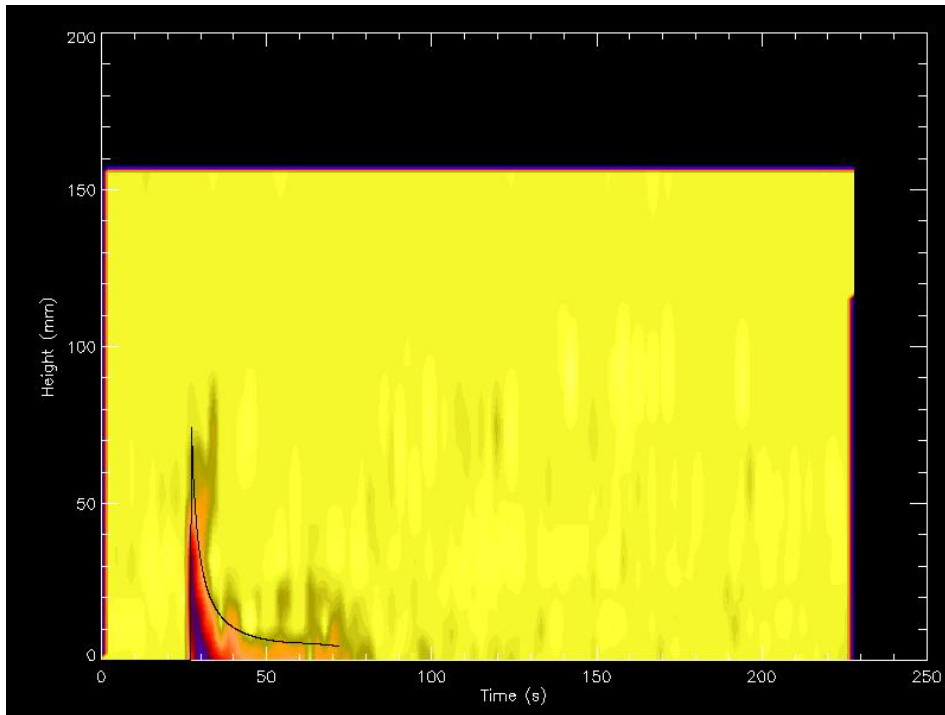


Figura 4.19 – Comparação da curva de espessura para o ponto 8

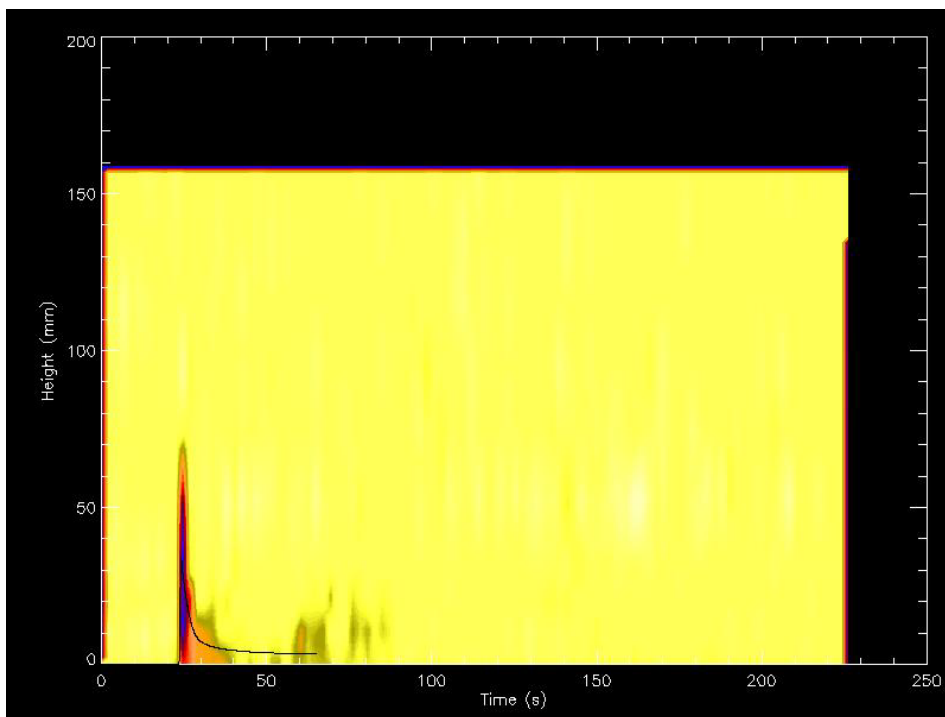


Figura 4.20 – Comparação da curva de espessura para o ponto 12

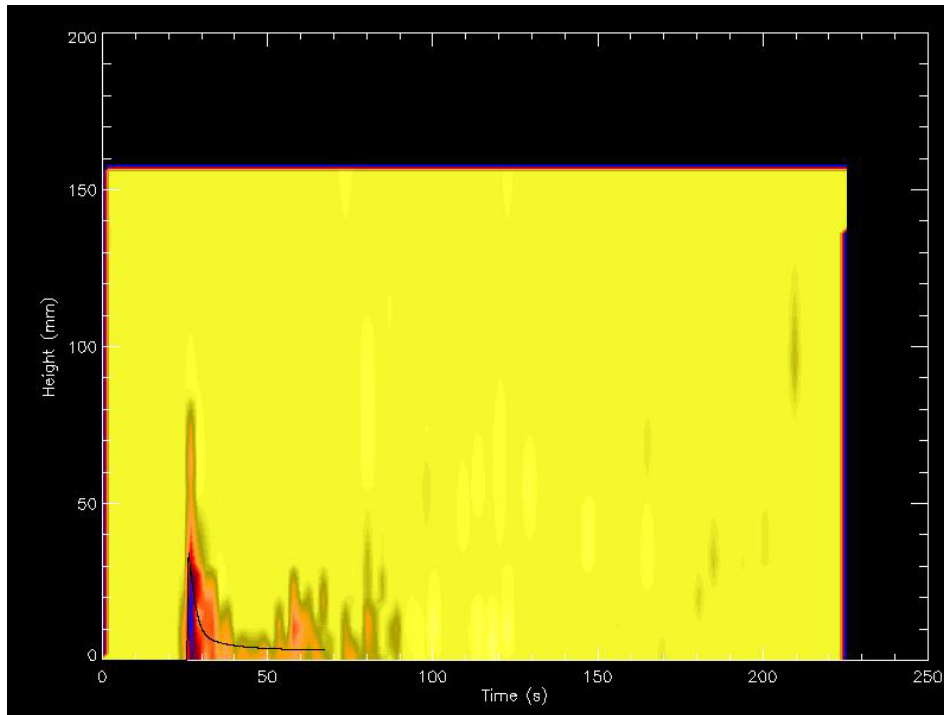


Figura 4.21 – Comparação da curva de espessura para o ponto 15

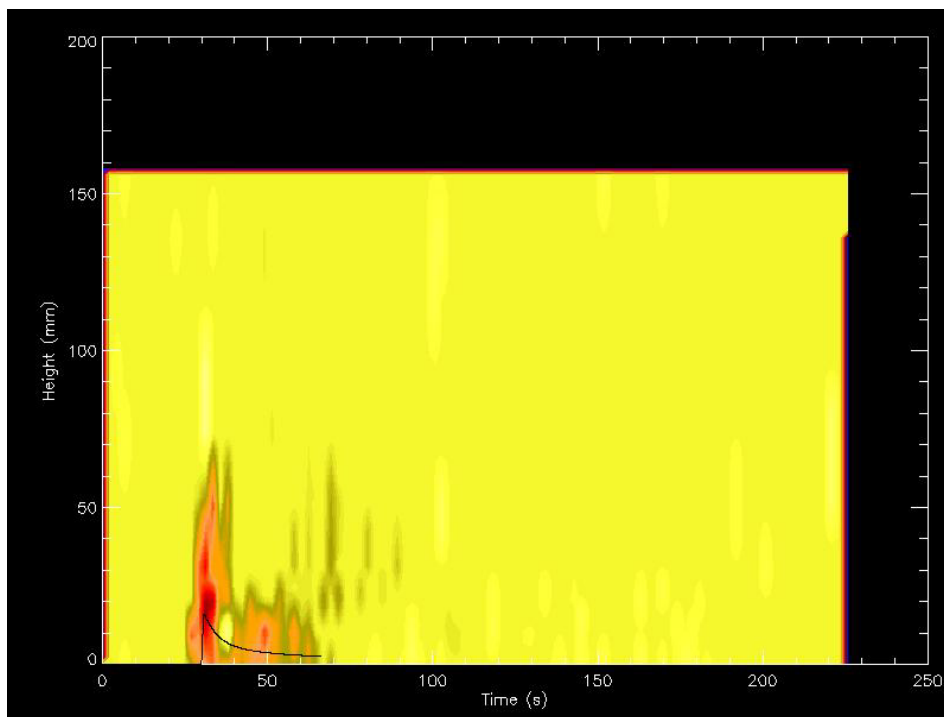


Figura 4.22 – Comparação da curva de espessura para o ponto 23

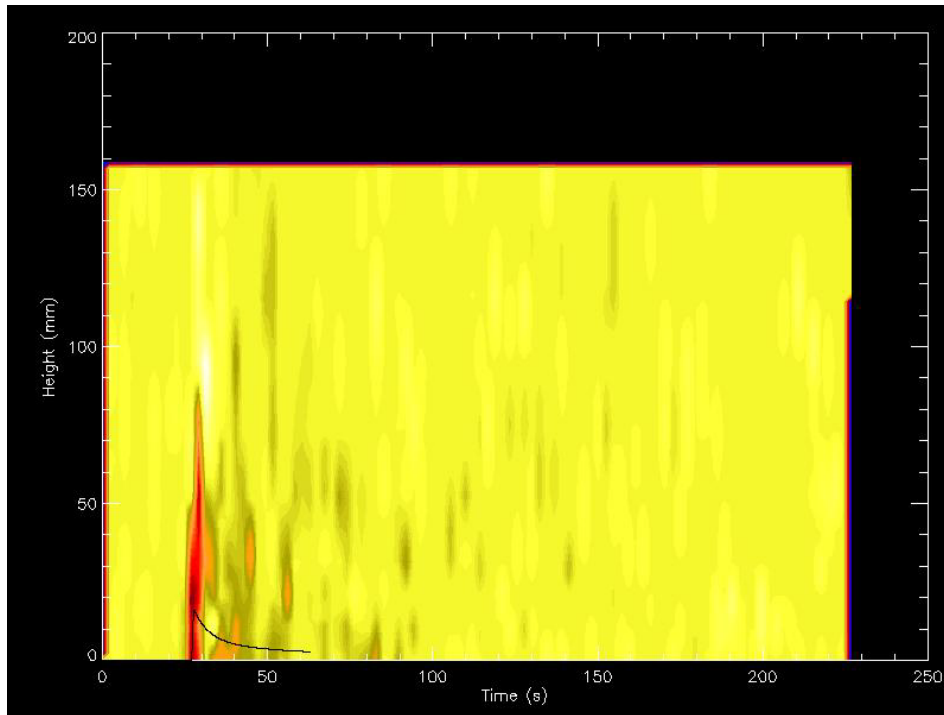


Figura 4.23 – Comparação da curva de espessura para o ponto 28

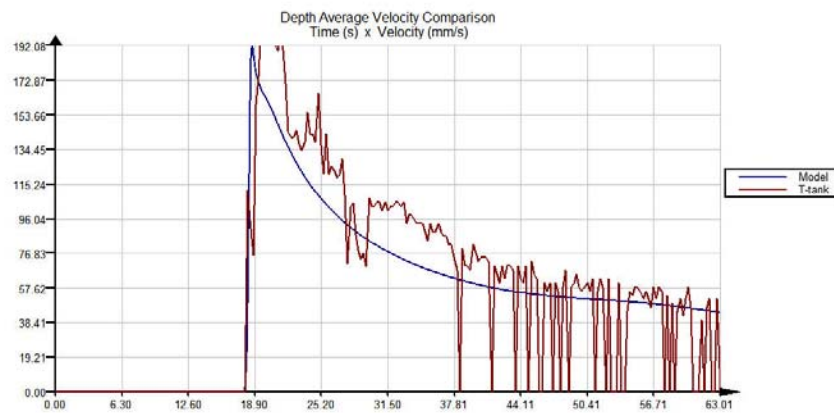


Figura 4.24 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 2



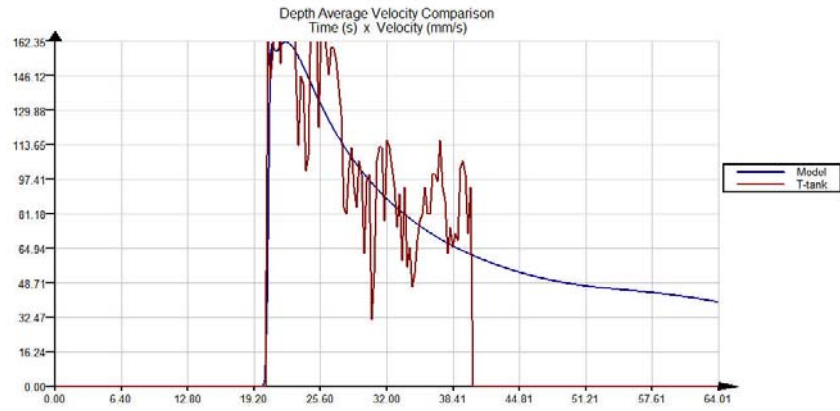


Figura 4.25 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 3

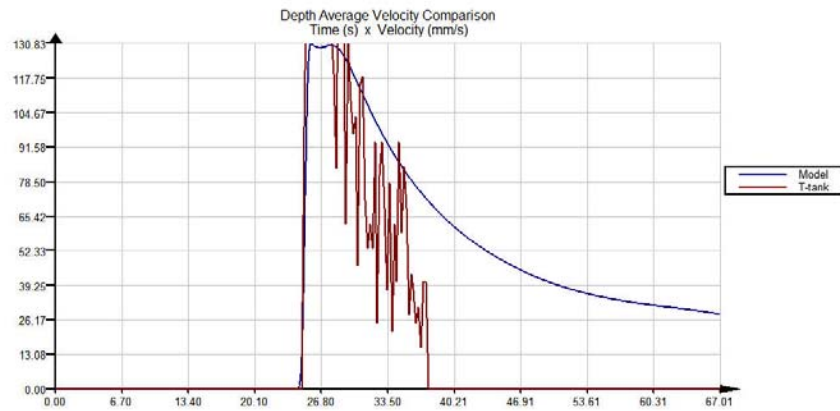


Figura 4.26 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 4

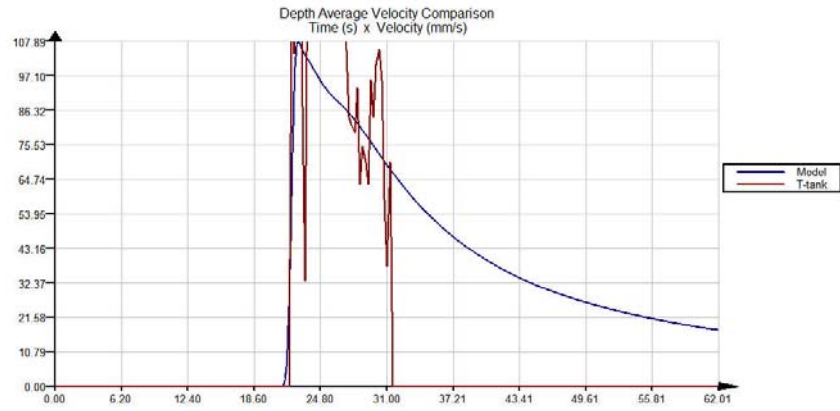


Figura 4.27 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 5

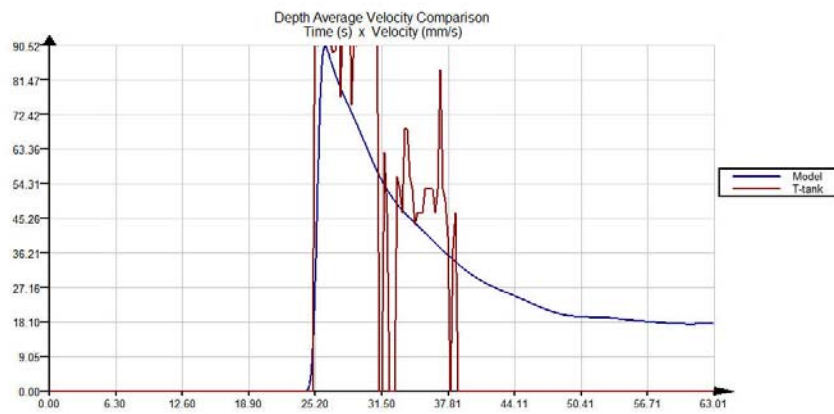


Figura 4.28 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 6

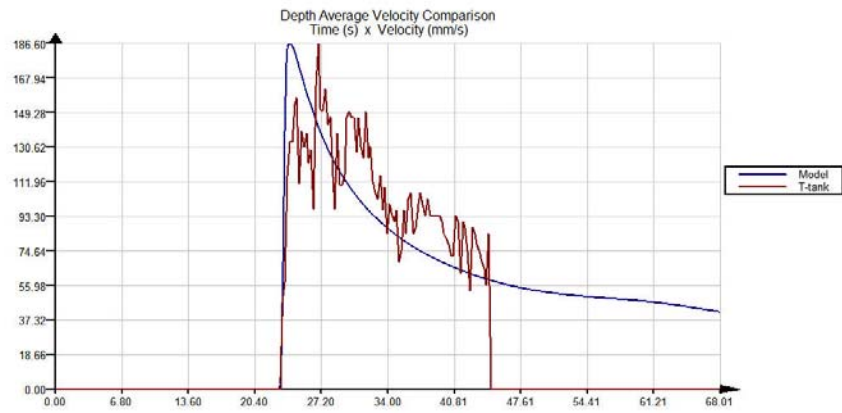


Figura 4.29 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 7

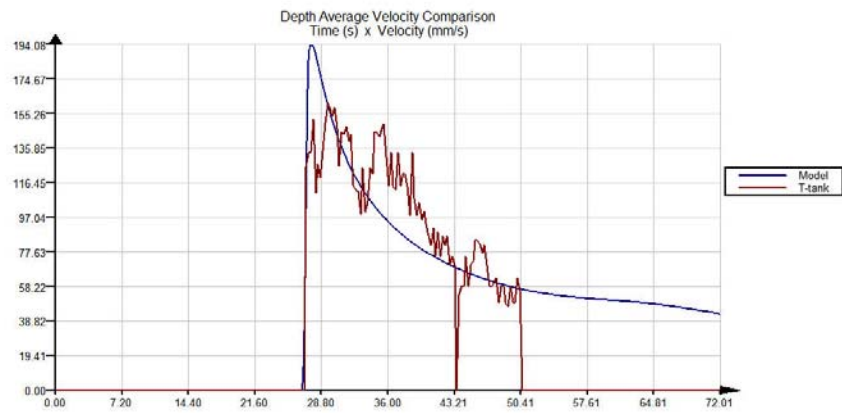


Figura 4.30 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 8

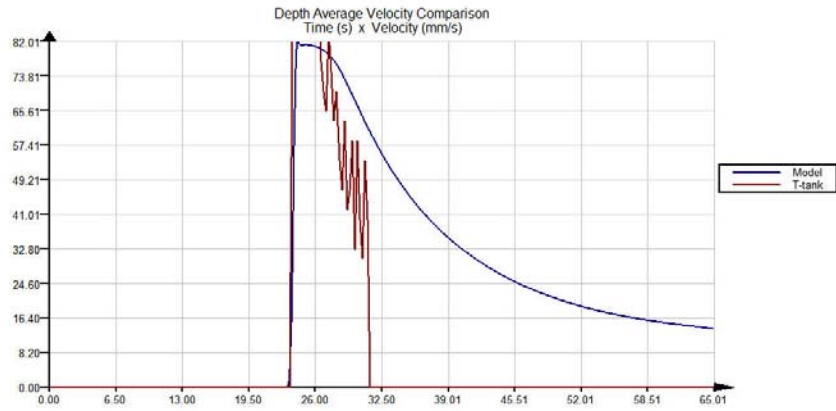


Figura 4.31 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 12



Figura 4.32 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 15

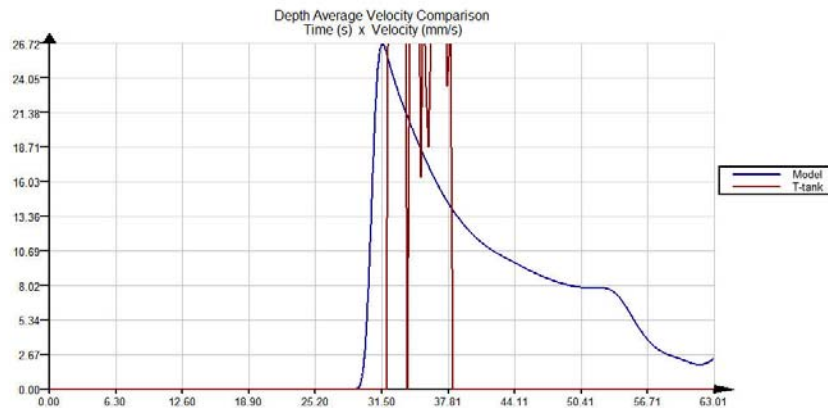


Figura 4.33 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 23

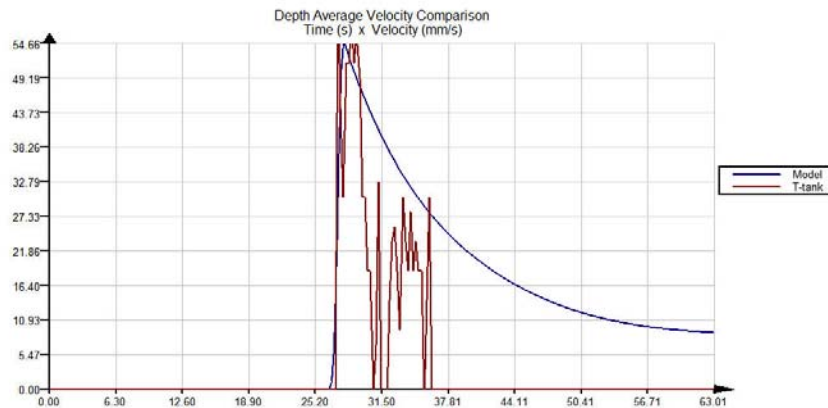


Figura 4.34 – Comparação da curva de velocidade média para o ponto 28

O último grupo de resultados mostra um conjunto de imagens das simulações física e numérica, tiradas dos vídeos dos experimentos e do simulador 2D. É muito importante ter-se em mente que estes dois conjuntos de imagens, dos experimentos e do simulador 2D, não podem ser comparados entre si de forma precisa, devido ao ângulo da câmera de vídeo com o tanque T. Essas figuras têm o propósito de ilustrar, separadamente, o comportamento das correntes ao longo das simulações.

As imagens foram coletadas em ordem crescente do deslocamento, para que seja possível obter um melhor entendimento do deslocamento e crescimento da corrente. A seqüência tem início no exato momento em que a corrente alcança a plataforma, chamado este de tempo 0. Deste ponto em diante, as fotos foram tiradas a cada segundo, indo de 1 a 13 segundos. Assim, as figuras 4.35 até 4.48 mostram a visão lateral e de topo da corrente no experimento, enquanto as figuras 4.49 até 4.62 mostram a visão lateral e de topo da corrente no simulador 2D.

Novamente com o objetivo de condensar os resultados, essas imagens foram tiradas dos experimentos que usaram somente solução 2.5% sedimento, pois estes apresentavam o melhor contraste com a plataforma. Contudo, exatamente o mesmo comportamento foi observado nas concentrações salinas.

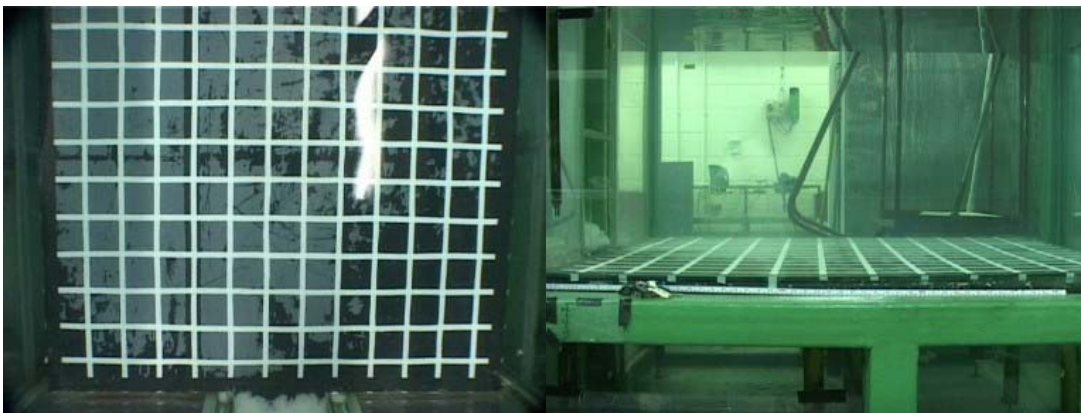


Figura 4.35 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 0 segundo.



Figura 4.36 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 1 segundo.

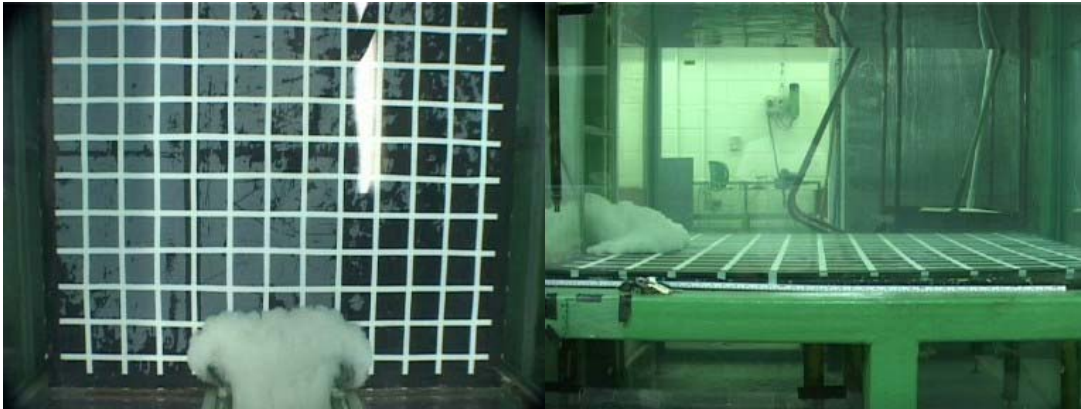


Figura 4.37 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 2 segundos.



Figura 4.38 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 3 segundos.



Figura 4.39 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 4 segundos.



Figura 4.40 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 5 segundos



Figura 4.41 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 6 segundos

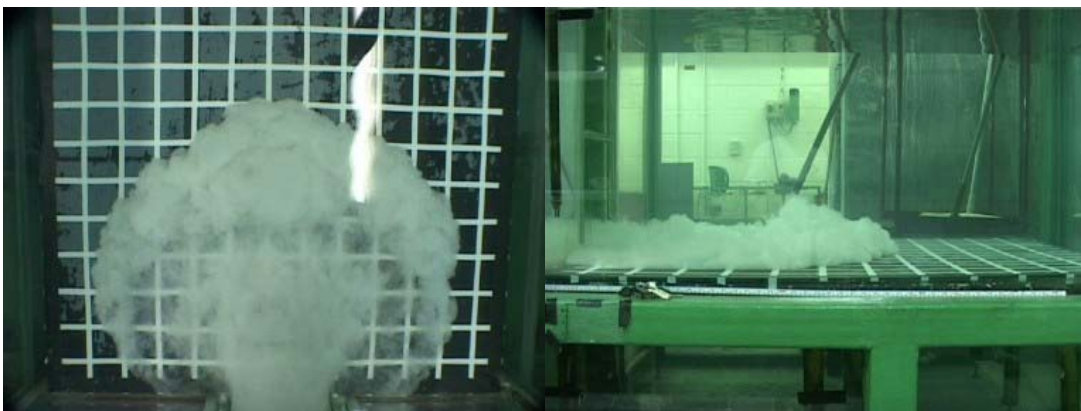


Figura 4.42 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 7 segundos.





Figura 4.43 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 8 segundos



Figura 4.44 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 9 segundos



Figura 4.45 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 10 segundos

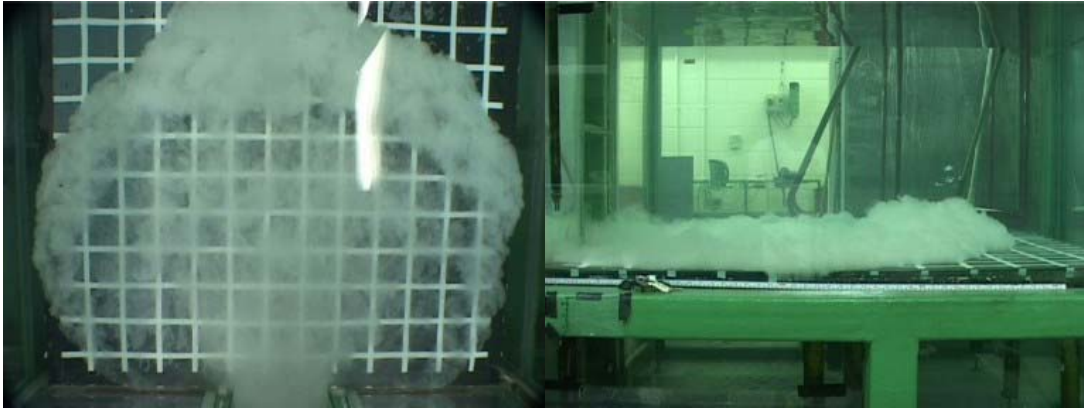


Figura 4.46 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 11 segundos

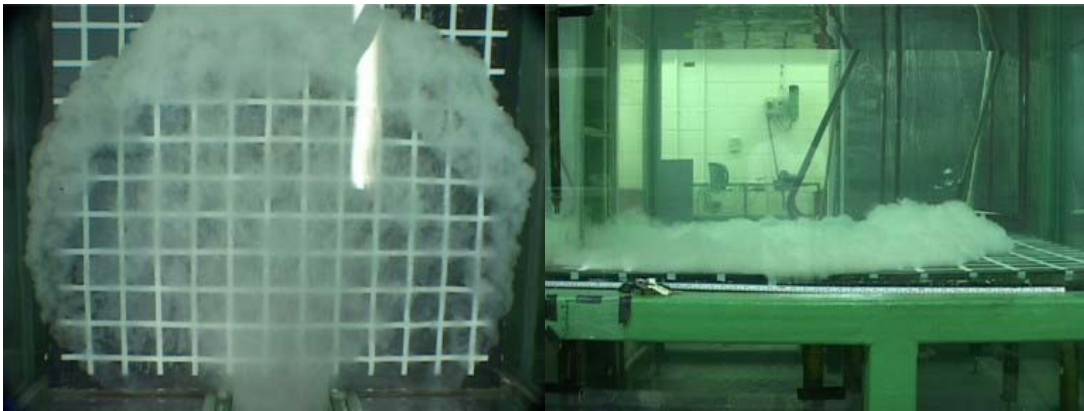


Figura 4.47 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 12 segundos



Figura 4.48 – Visão do topo e lateral do experimento no tempo 13 segundos

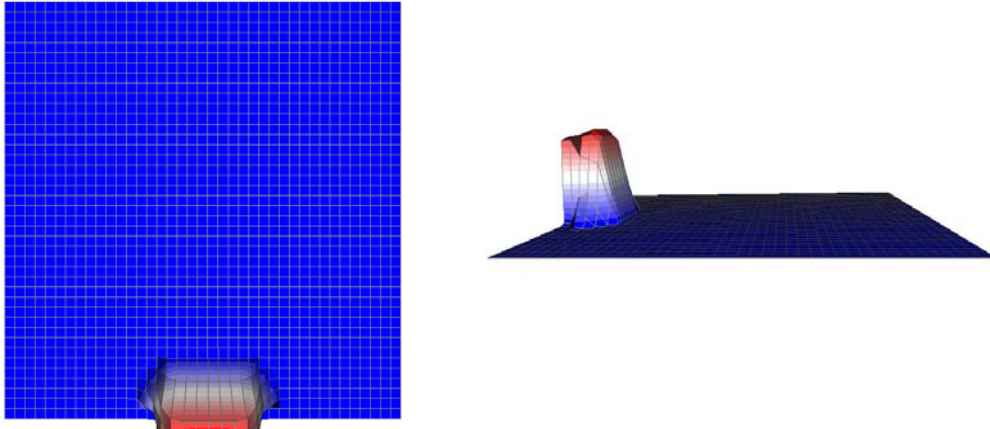


Figura 4.49 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 1 segundo

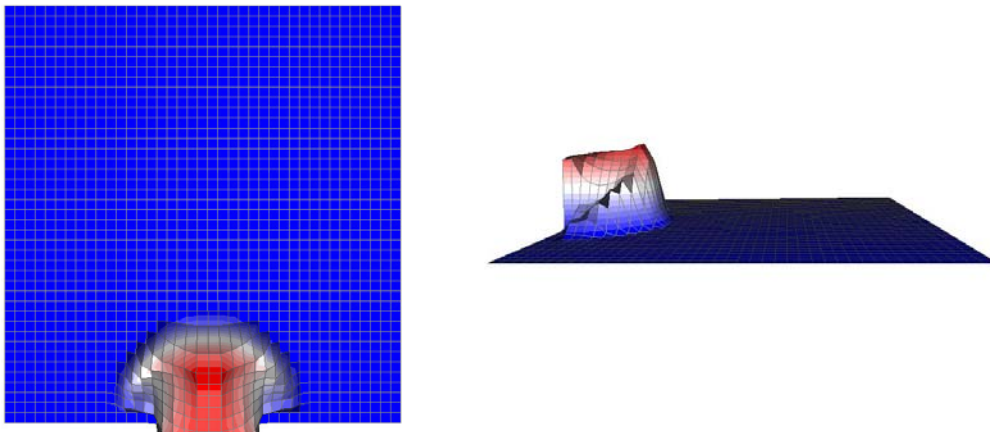


Figura 4.50 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 2 segundos

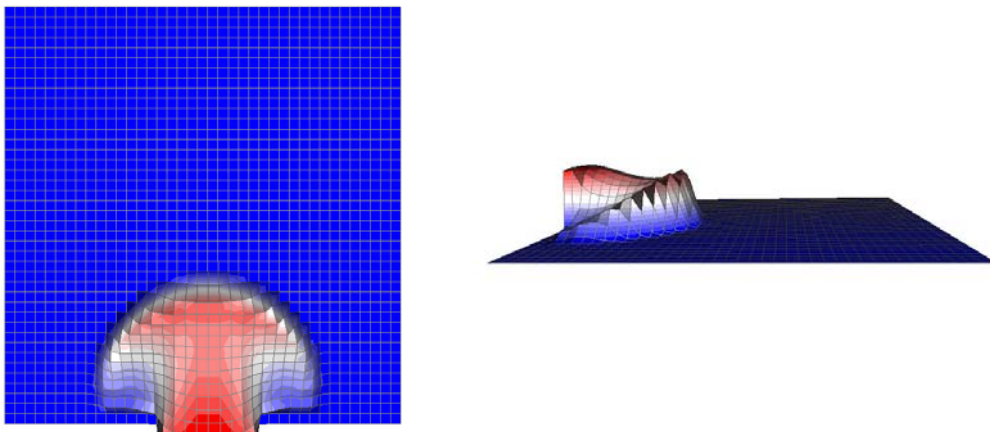


Figura 4.51 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 3 segundos

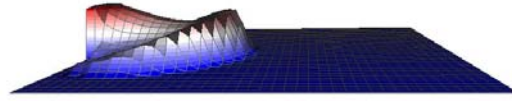
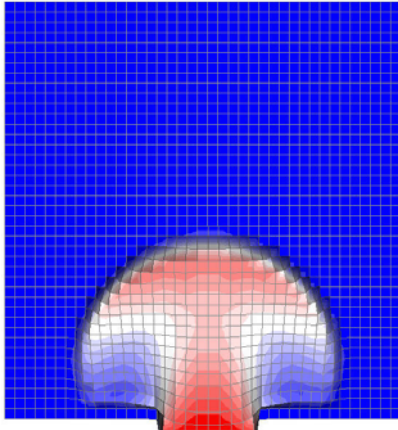


Figura 4.52 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 4 segundos

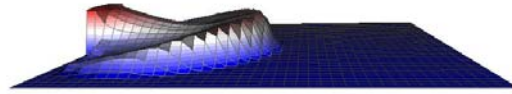
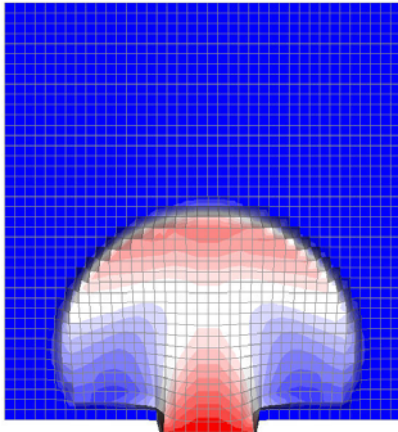


Figura 4.53 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 5 segundos

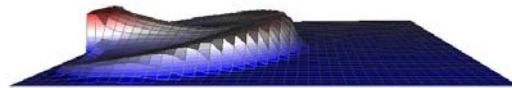
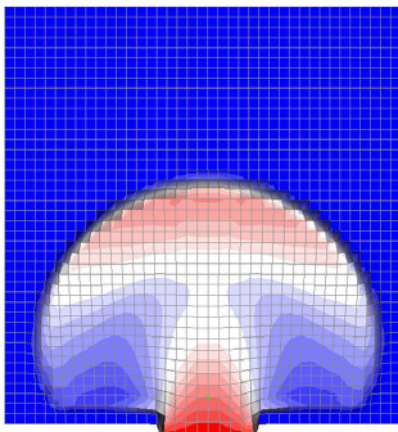


Figura 4.54 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 6 segundos

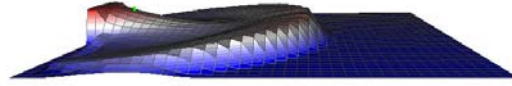
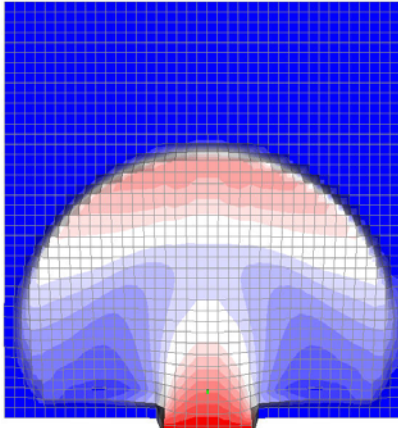


Figura 4.55 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 7 segundos

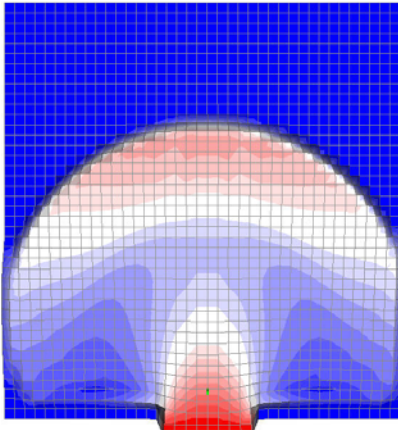


Figura 4.56 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 8 segundos

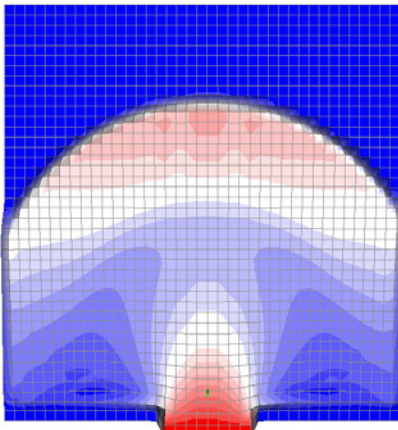


Figura 4.57 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 9 segundos

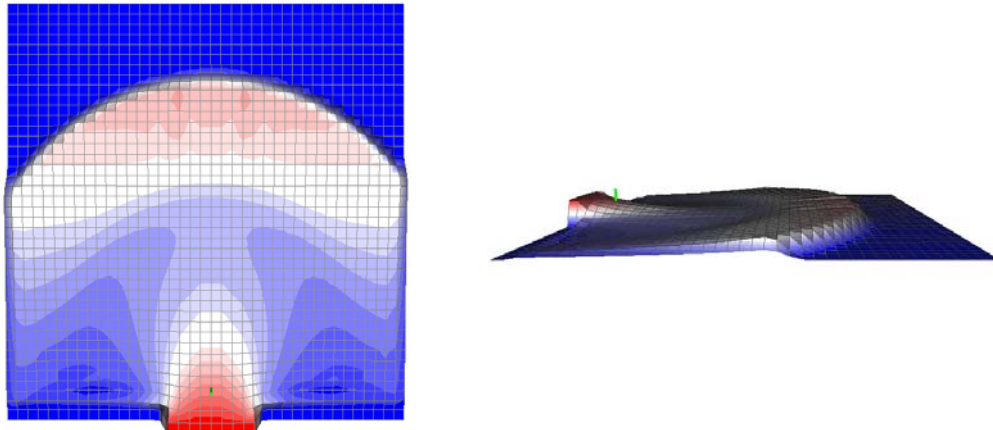


Figura 4.58 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 10 segundos

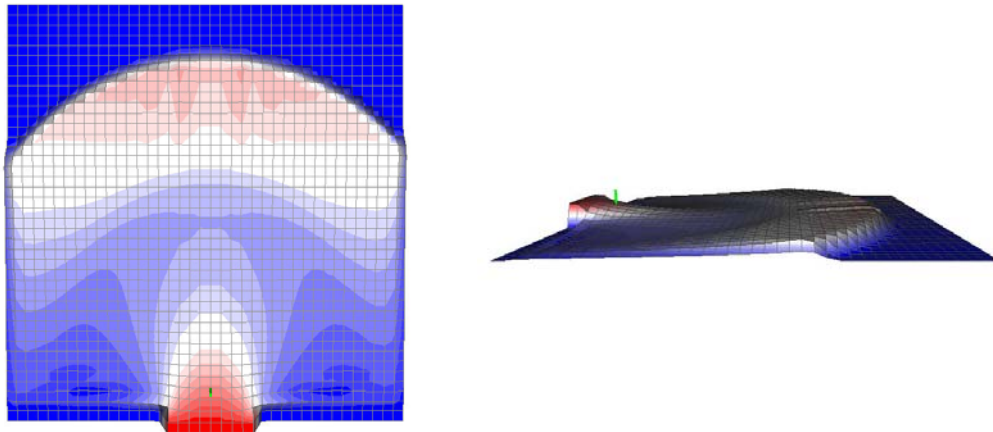


Figura 4.59 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 11 segundos

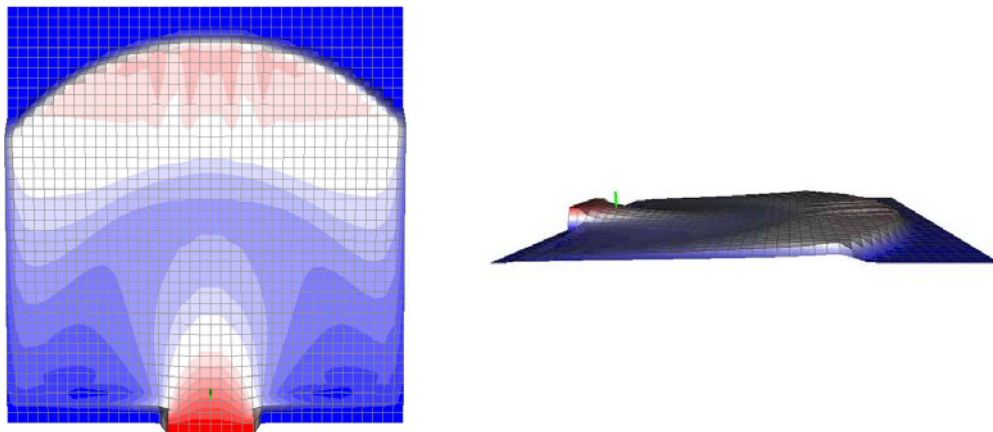


Figura 4.60 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 12 segundos

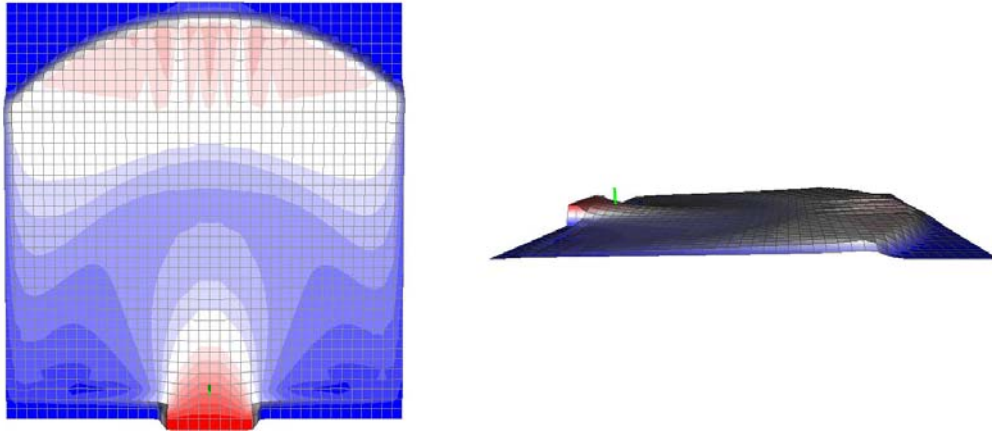


Figura 4.61 – Visão do topo e lateral do simulador 2D no tempo 13 segundos

## 5 Discussão dos Resultados

Os resultados das comparações dos dados experimentais com os do simulador 2D, apresentados no capítulo anterior, indicaram que as equações utilizadas para modelar matematicamente correntes de turbidez, não foram eficazes. Embora isso não queira dizer que estas sejam completamente inúteis: este fato indica que serão necessários trabalhos complementares para que as mesmas fiquem mais precisas.

Analisando o primeiro grupo de resultados da seção 4.2, é possível afirmar que o modelo 1D alcançou uma precisão satisfatória, quando a corrente estava na iminência de sair do canal para se espalhar pela plataforma. Nenhuma coleta de dados foi realizada no interior do canal, pois o foco da pesquisa estava voltado para a propagação da corrente não-confinada. Talvez o modelo 1D devesse ser testado com “dados 1D”.

Ainda analisando os resultados referentes ao final do canal (figuras 4.6, 4.8 e 4.10), observou-se que a comparação das curvas de espessura apresentou uma concordância muito interessante. A comparação mostrou que a cabeça de ambas as correntes, experimental e numérica, chegaram ao final do canal ao mesmo tempo, aproximadamente e, ainda apresentaram uma notável semelhança entre suas espessuras para todas as concentrações (2.5% salina, 5.0% salina e 2.5%sedimento). Por outro lado, também é notável o rápido declínio da curva de espessura oriunda do simulador 1D, ao contrário do mapa de contorno dos experimentos, que possui um declínio mais suave. Um bom ponto para se começar a pesquisar o motivo desse problema, seria no coeficiente de atrito. Talvez uma nova lei de fricção pudesse melhorar os resultados.

Em relação à comparação das curvas de velocidade média para o ponto no final do canal (figuras 4.7, 4.9 e 4.11), pode-se afirmar que foi alcançado um resultado encorajador. Conforme mencionado anteriormente, alguns filtros poderiam ser aplicados nos dados experimentais antes de serem comparados



com os do modelo numérico, pois assim se diminuiria os ruídos e melhoraria a qualidade dos dados.

No segundo grupo de resultados, foi encontrado o maior e mais complexo problema, referente ao modelo 2D. Analisando a comparação das curvas de espessura, notou-se algo decepcionante. Para o início da plataforma, como ressaltado acima, as correntes coincidem satisfatoriamente, porém, conforme as correntes vão se afastando do canal, começa a surgir uma discordância significativa entre elas. Sendo assim, o cálculo de velocidade média é extremamente afetado.

Tal discordância se deve ao fato da cabeça da corrente do simulador 2D ter apresentado uma grande diminuição do ponto 2 ao 6 da plataforma, de acordo com as figuras 4.13 até 4.17. Esse mesmo comportamento foi observado nos pontos laterais 7, 8, 12, 15, 23 e 28, ilustrado nas figuras 4.18 até 4.23. Ao mesmo tempo, nessa mesma seqüência de figuras, o mapa de contorno prova que a cabeça da corrente não deveria ter diminuído tanto e nem tão rapidamente, pelo contrário, a cabeça deveria se manter com uma espessura constante, ou até mesmo aumentar de volume, de uma ponta da plataforma à outra.

Têm-se duas possíveis explicações para esse efeito não esperado. Uma das explicações seria que a corrente estaria constantemente mudando sua densidade; e a outra explicação seria provocada por algum efeito de Bernouli, que estaria inflando a cabeça da corrente através da diferença de pressão entre a solução da corrente e o fluido ambiente.

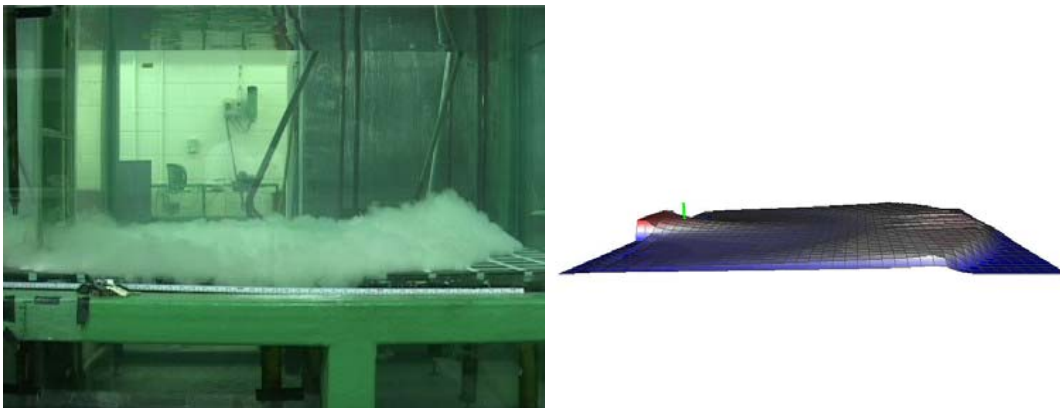


Figura 5.1 – Contraste entre as espessuras das correntes, experimental e modelada, a 13 segundo após a abertura da comporta da caixa selada

O último grupo de resultados mostra novamente a diferença entre os comportamentos das cabeças das correntes. A visão lateral das figuras 4.35 até 4.48 prova que a cabeça da corrente não somente se mantém elevada, mas como também aumenta seu tamanho. Em contraste a isso, a visão lateral das figuras 4.49 até 4.61, mostra que o fluxo do simulador 3D perde espessura do início até o fim da simulação. Um bom exemplo desse contraste se encontra na figura 5.1.

A figura 5.2 mostra uma comparação grosseira do deslocamento das correntes, experimental e modelada, sobre a plataforma. Verifica-se que o deslocamento na direção do fluxo se assemelha bastante para as duas correntes, porém, na outra direção perpendicular ao fluxo, o simulador parece ter um deslocamento um pouco mais rápido do que o experimento. Contudo, não se pode concluir nada além disso a partir da comparação dessas imagens, pois como ressaltado anteriormente, a câmera de vídeo não foi alinhada de forma perfeita com a plataforma do tanque T.

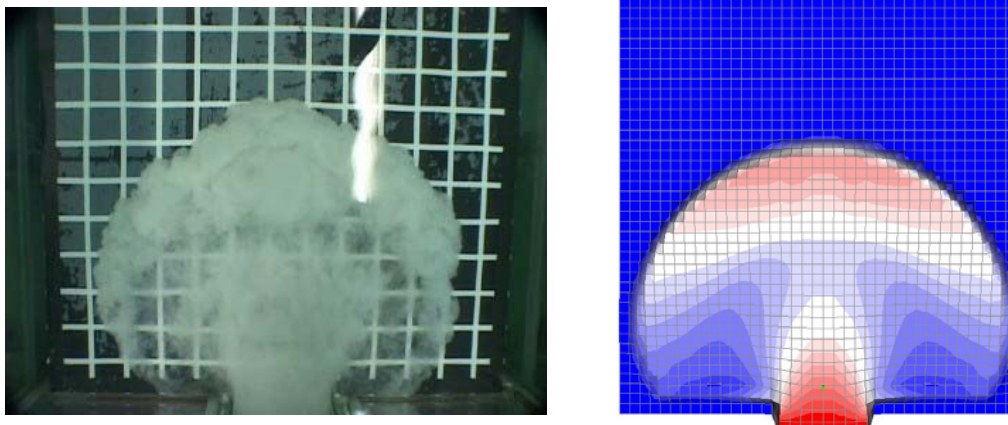


Figura 5.2 – Comparação dos deslocamentos das correntes modeladas fisicamente e numericamente

## 6 Conclusão

O foco principal desta pesquisa foi validar a equação de velocidade média do Dr. Waltham, utilizada na modelagem numérica das correntes de turbidez. Para isso, foi utilizada uma metodologia empírica, comparando resultados oriundos de um simulador físico, com os resultados da modelagem numérica do fenômeno. A simulação física concentrou-se em executar experimentos com o tanque T, enquanto a modelagem numérica foi feita através do método matemático de diferenças finitas, o qual foi implementado e visualizado com um programa de computador desenvolvido especialmente para essa pesquisa.

Numa primeira comparação dos resultados, uma versão simplificada do modelo numérico foi testada com os dados coletados exatamente no final do canal do tanque T. Como neste ponto do tanque a corrente ainda se encontrava confinada, avaliou-se a precisão da equação de velocidade média para problemas 1D. A comparação revelou resultados otimistas, uma vez que os gráficos das curvas de espessura e velocidade, dos experimentos e do modelo, apresentavam uma semelhança muito grande. Contudo, esses resultados despertaram a questão se o modelo numérico teria funcionado para qualquer outro ponto dentro do canal.

Seguindo com as análises, os dados coletados de correntes não-confinadas foram comparados com os dados de saída do simulador 2D. Essa comparação revelou uma discordância significativa entre as espessuras das cabeças das correntes simuladas fisicamente e numericamente. No modelo numérico, a cabeça da corrente começa com uma espessura elevada, porém, durante o período da simulação, sua espessura vai caindo drasticamente. Enquanto isso, no modelo físico, a cabeça da corrente começa com praticamente a mesma espessura do modelo numérico, porém, ao longo da simulação essa espessura não somente se mantém, como também é capaz de se elevar. T tamanha discordância afeta diretamente o cálculo da velocidade média, comprometendo a comparação das simulações.

Concluiu-se que havia dois possíveis motivos causadores desta discordância. O primeiro seria que a equação de velocidade média não considera variações na densidade da corrente, conseqüentemente despreza a absorção de água pelo fluxo ao longo da simulação, o que parecia estar inflando a cabeça da corrente. O outro motivo seria um efeito de Bernoulli que atua na cabeça da corrente, fazendo com que a mesma eleve seu tamanho. Sendo assim, o modelo numérico deveria levar em consideração um desses motivos, ou talvez ambos.

Apesar da equação de velocidade média não ter funcionado exatamente da forma que se esperava, ainda foi possível obter alguns bons resultados com o modelo 1D e com a comparação entre os deslocamentos das correntes dos experimentos e o simulador 2D. Com isso, esta pesquisa certamente irá estimular trabalhos futuros, como: (i) testar o modelo 2D com dados provenientes de correntes de turbidez confinadas; (ii) incorporar densidade variável na equação de velocidade média; (iii) considerar efeito de Bernoulli; (iv) e implementar processo de deposição no algoritmo. Um exemplo de trabalho futuro é a pesquisa de doutorado do aluno Fabio Pereira Figueiredo, que já deu início a novos experimentos no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) / UFRGS.

Concluído, o desenvolvimento de modelos numéricos e gráficos têm sido de grande importância, em termos de melhor visualização e entendimento matemático, para as correntes de gravidade, todavia, provou-se que esses modelos não podem substituir a análise através de ensaios experimentais.

## Referências Bibliográficas

1. Allen, P. A. (1997). *Earth Surface Processes*. Blackwell Science. 404p.
2. Best, J. L., Kirkbride, A. D., Peakall, J. (2001). Mean flow and turbulence structure of sediment-laden gravity currents: new insights using ultrasonic Doppler velocity profiling. *Special Publications of the International Association of Sedimentologists*, 31, 159-172.
3. Celes, W., Cerqueira, R., Rangel, J.L. (2004). *Introdução a Estruturas de Dados - com técnicas de programação em C*. Ed. Campus. 320p.
4. Choux, C. M., Baas, J. H., McCaffrey, W. D., J. H., Haughton, P. D. W. (2003). Comparison of spatio-temporal evolution of experimental particulate gravity flows at two different initial concentrations, based on velocity, grain size and density data. *Sedimentary Geology*, 179, 49-69.
5. Kneller, B. C., Bennett, S. J., McCaffrey, W. D. (1997). Velocity and turbulence structure of density currents and internal solitary waves: potential sediment transport and the formation of wave ripples in deep water. *Sedimentary Geology*, 112, 235-250.
6. Kneller, B. C., McCaffrey, W. D. (1995). *GCSSEPM Foundation 16<sup>th</sup> Annual Research Conference Salt, Sediment and Hydrocarbons*.
7. McCaffrey, W. D., Choux, C. M., Baas, J. H., Haughton, P. D. W. (2003). Spatio-temporal evolution of velocity structure, concentration and grain size stratification within experimental particulate gravity currents. *Marine and Petroleum Geology*, 20, 851-860.
8. Pratson, L. F., Imran, J., Parker, G., Syvitski, J. P. M., Hutton, E. (2000). Debris flows versus turbidity currents: a modeling comparison of their dynamics and deposits. in A. H. Bouma and C. G. Stone, eds. *Fine-grained turbidite systems*. AAPG Memoir 72 /SEPM Special Publication (68), 57–72.

9. Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P. (1997) Numerical Recipes in C (2<sup>nd</sup> edn). Cambridge University Press.
10. Simpson, J. E. (1997). Gravity Currents. Cambridge University Press. 2<sup>nd</sup> ed. 238p.
11. Smith, G. D. (1985). Numerical Solution of Partial Differential Equations (3<sup>rd</sup> edn). Clarendon Press, Oxford.
12. Waltham, D. (2004). Flow transformations in particulate gravity currents. *Journal of Sedimentary Research*, 74(1), 129-134.
13. Waltham, D., Davison, I. (2001). Obstacle and Sinks: Effects on Turbidite Flow on Deepwater Continental Margins. *GCSSEPM Foundation 21<sup>st</sup> Annual Research Conference Petroleum Systems of Deep-Water Basins*.