

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**EFEITO DAS ESCALAS DE SIMULAÇÃO SOBRE OS PADRÕES DEPOSICIONAIS
DE FLUXOS TURBIDÍTICOS**

DANIEL ULLMANN DE BRITO

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientadora: Ana Luiza de Oliveira Borges

Banca Examinadora:

Dr. Adriano R. Viana
Prof. Dr. Ricardo Norberto Ayup Zouain
Prof. Dr. Luiz Emílio Sá Brito de Almeida

PETROBRAS
CECO/UFRGS
IPH/UFRGS

Porto Alegre, Maio de 2005.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

EFEITO DAS ESCALAS DE SIMULAÇÃO SOBRE OS PADRÕES DEPOSICIONAIS DE
FLUXOS TURBIDÍTICOS

DANIEL ULLMANN DE BRITO

Orientadora: Ana Luiza de Oliveira Borges

Colaborador: Rogério Dornelles Maestri

Porto Alegre, Maio de 2005.

APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob orientação da Professora Ana Luiza de Oliveira Borges. Inserindo-se na linha de pesquisa de Estudo e Modelagem dos Processos Hídricos, os experimentos foram realizados junto ao setor de Hidráulica Aplicada (Pavilhão Fluvial) em instalações destinadas ao uso do Núcleo de Estudos em Correntes de Densidade (NECOD).

Ao longo desses praticamente dois anos de trabalho e dedicação, muitas vezes me deparei com obstáculos e dificuldades. Felizmente, o desânimo e a incerteza iniciais, nessas ocasiões, foram prontamente transformados em combustível para enfrentar e superar os desafios que se apresentaram graças ao incentivo e auxílio incondicionais que recebi de diversas pessoas. A todas elas, mencionadas a seguir ou não, quero dedicar esta dissertação e registrar minha mais profunda gratidão e reconhecimento.

A meus pais, Renato e Bernadete, que me ensinaram o valor do estudo e do trabalho e, principalmente, a não desistir nunca dos meus objetivos. A minha irmã Renata, por todo incentivo e conselhos e, também, por ser um exemplo de dedicação e obstinação na busca dos seus sonhos. Aos meus familiares e amigos(as) por todos os momentos de alegria e especialmente por estarem sempre prontos a me ajudar nas horas em que mais precisei.

A minha orientadora, professora Ana Luiza de Oliveira Borges, que com seu conhecimento e paciência esteve sempre pronta a me auxiliar, contribuindo de forma decisiva para o sucesso deste trabalho.

Ao professor Rogério Dornelles Maestri por me estimular a desenvolver um trabalho de qualidade e a acreditar no meu potencial.

À Ana, ao Maestri e ao NECOD pelas oportunidades e pelo aprendizado, tanto profissional quanto pessoal, ao longo dos últimos quatro anos de convivência.

Aos colegas do pós-graduação Alexandre Mahler, Antônio Cosme Delrey, Celso Guirro, Marcelo Ávila, Rafael Manica, Ricardo Eifler, Richard Ducker e Rodrigo Sartor por todo o auxílio e, principalmente, por me ajudarem a manter o bom humor acima de tudo.

Aos bolsistas Eduardo Puhl, Joana Souza, Juliano Chapon, Paulo Pasquali e Renata Giacomel pelo auxílio, tanto na realização dos experimentos, quanto na coleta de dados.

À empresa PETRÓLEO BRASILEIRO S/A, e em especial aos geólogos Adriano Viana e Ciro Appi, que através do financiamento da FINEP/CTPETRO, permitiu o

desenvolvimento e manutenção de um projeto de pesquisa inovador, desafiante e de alto nível, sob o ponto de vista científico e tecnológico.

A todo grupo de apoio composto pelos funcionários do Projeto e do IPH, em especial ao Marco Aurélio da Rosa, que de alguma forma auxiliaram na condução desta pesquisa.

Ao curso de Pós-graduação, ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao CNPQ, que com seu apoio, permitiram a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta simulações físicas de correntes de densidade não-conservativas desenvolvendo-se num canal bidimensional de grande porte (5,00x0,40x1,00m) e declividade variável. A metodologia empregada foi desenvolvida em estudos anteriores (Manica, 2002 e Ávila, 2003) para ensaios em canal de pequeno porte e adaptada para o canal de maior porte, objetivando gerar subsídios para o estudo dos efeitos da escala de simulação sobre os padrões deposicionais de correntes de turbidez. As correntes foram formadas por uma mistura de água e carvão com massa específica em torno de 1023 kg/m^3 . A granulometria dos carvões utilizados ficou entre 0,062-0,297mm para o Carvão 207 e entre 0,062-0,177mm para o Carvão 205.

Os experimentos foram divididos em três etapas. Na primeira etapa, foram simuladas correntes simples com o objetivo de realizar a transposição da metodologia de simulação física de correntes de turbidez do canal de pequeno porte para o canal de grande porte. Os dados obtidos foram comparados com os resultados pré-existentes do canal de pequeno porte provenientes dos estudos de Ávila (2003). Na segunda etapa foram simuladas correntes consecutivas, as quais foram compostas de um total de quatro fluxos por ensaio. Novamente, os dados obtidos foram comparados com os resultados pré-existentes dos estudos de Ávila (2003). Finalmente, na terceira etapa, foram simuladas correntes simples sobre canal com declividades de $-0,5^\circ$ e $2,0^\circ$. As correntes geradas durante a segunda e a terceira etapas também tiveram seus parâmetros geométricos (alturas da cabeça e do corpo) e hidrodinâmicos (velocidades e acelerações da cabeça) comparados com dados pré-existentes de simulações com correntes conservativas (Fabian, 2002).

Os resultados obtidos demonstraram que os depósitos gerados durante a primeira etapa foram os que mais se assemelharam aos dados pré-existentes de Ávila (2003) no que se refere às distribuições longitudinais e verticais. Também se observou que as correntes não-conservativas não apresentaram variações significativas das alturas da cabeça e do corpo para as declividades ensaiadas. Tais observações acerca dos depósitos e da hidrodinâmica sugerem que, para que se garanta a eliminação de efeitos de escala, devem ser mantidas constantes: a massa específica do sedimento empregado na mistura, as condições de admissão da mesma e também o valor do número de Froude Densimétrico. Também há indícios de que variações nos parâmetros geométricos das correntes podem estar associadas com a massa específica do sedimento empregado para a simulação e com as condições de admissão da mistura.

ABSTRACT

This study presents physical simulations of non-conservative density currents in a bi-dimensional variable slope channel (5,00x0,40x1x00m). The experimental procedure was adapted from Manica (2002) and Ávila (2003), which worked with smaller dimension experiments. The data generated through the simulations was used to evaluate the effects of scale changes over the depositional patterns created by turbidity currents. A mixture of fresh water and mineral coal with density around 1023 kg/m^3 composed the currents. The coal grain size ranged from 0,062 to 0,297mm for 207 Coal and from 0,062 to 0,177mm for 205 Coal.

The experiments were conducted in three different stages. Single currents were simulated aiming to adapt the experimental procedures from the smaller channel to the larger channel during first stage. Successive simulated currents, totalizing four flows for experiment, took place at second stage. The resulting data from first and second stages were compared with those available from the earlier study of Ávila (2003). Single currents developing over slopes of $-0,5^\circ$ and $2,0^\circ$ were simulated during third stage. Geometrical (head and body height) and hydrodynamical (head velocity and acceleration) features of second and third stage currents were compared with those available from the earlier study of Fabian (2002).

The results showed that first stage deposits were the most similar to those of Ávila (2003) concerning sediment vertical and longitudinal distribution. Furthermore non-conservative currents haven't presented significative variations of head and body height values for the different channel slopes. Such observations concerning depositional patterns as well as the currents hydrodynamics have suggested that scale effects can be suppressed if the sediment density, triggering mechanisms and Densiometric Froude Number were kept constant. Besides geometric features of the currents may be linked to the density of the sediment used for the simulation and to the triggering mechanisms.

SUMÁRIO

| | |
|--|------------|
| APRESENTAÇÃO | III |
| RESUMO..... | V |
| ABSTRACT..... | VI |
| SUMÁRIO..... | VII |
| LISTA DE FIGURAS | X |
| LISTA DE TABELAS | XV |
| LISTA DE SÍMBOLOS | XVI |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 CONTEXTO | 2 |
| 3 OBJETIVOS | 4 |
| 3.1 OBJETIVOS GERAIS | 4 |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 4 |
| 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 4.1 DEPÓSITOS TURBIDÍTICOS..... | 5 |
| 4.2 SIMULAÇÃO FÍSICA DE CORRENTES DE DENSIDADE | 8 |
| 4.2.1 Semelhança física | 8 |
| 4.2.2 Parâmetros adimensionais que descrevem o fenômeno | 8 |
| 4.2.3 Efeitos de escala e problemas enfrentados na simulação física de correntes de densidade | 11 |
| 5 APARATO EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS | 12 |
| 5.1 CANAL BIDIMENSIONAL | 12 |
| 5.2 EQUIPAMENTOS PARA AQUISIÇÃO DE IMAGENS..... | 15 |
| 5.3 MEDIDOR ELETROMAGNÉTICO DE VAZÃO | 16 |
| 5.4 AGITADOR ELETROMECAÂNICO | 16 |
| 5.5 MEDIDOR DE DISTÂNCIA A LASER | 17 |
| 5.6 ANALISADOR DE PARTÍCULAS A LASER | 18 |
| 5.7 ECÓGRAFO MÉDICO | 19 |
| 5.8 PENEIRADOR DE INTENSIDADE VARIÁVEL..... | 20 |
| 5.9 PIPETADOR | 20 |
| 6 ENSAIOS REALIZADOS | 21 |

| | |
|--|-----------|
| 6.1 ENSAIOS PRIMEIRA FASE: CORRENTES SIMPLES | 21 |
| 6.1.1 Plano de ensaios..... | 22 |
| 6.1.2 Metodologia experimental..... | 23 |
| 6.1.2.1 Ensaios | 23 |
| 6.1.2.2 Obtenção e registro de dados | 26 |
| 6.1.3 Resultados | 29 |
| 6.2 ENSAIOS SEGUNDA FASE: CORRENTES CONSECUTIVAS | 35 |
| 6.2.1 Plano de ensaios..... | 36 |
| 6.2.2 Metodologia..... | 37 |
| 6.2.2.1 Ensaios | 37 |
| 6.2.2.2 Obtenção e registro de dados | 38 |
| 6.2.3 Resultados | 40 |
| 6.3 ENSAIOS TERCEIRA FASE: CORRENTES SIMPLES SOBRE DECLIVIDADE NÃO NULA | 46 |
| 6.3.1 Plano de ensaios..... | 47 |
| 6.3.2 Metodologia..... | 48 |
| 6.3.2.1 Ensaios | 48 |
| 6.3.2.2 Obtenção e registro de dados | 48 |
| 6.3.3 Resultados | 49 |
| 7 ANÁLISE DE RESULTADOS | 55 |
| 7.1 AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS E GEOMÉTRICOS DAS CORRENTES ENSAIADAS..... | 55 |
| 7.1.1 Correntes simples..... | 56 |
| 7.1.2 Correntes sucessivas | 56 |
| 7.1.3 Correntes simples sobre declividade não nula | 56 |
| 7.1.3.1 Variação espacial da velocidade de avanço da cabeça da corrente | 56 |
| 7.1.3.2 Variação espacial das alturas da cabeça e do corpo da corrente..... | 60 |
| 7.1.3.3 Velocidade média da cabeça da corrente | 64 |
| 7.1.3.4 Aceleração média da cabeça da corrente | 65 |
| 7.2 AVALIAÇÃO DOS DEPÓSITOS SEDIMENTARES GERADOS PELAS CORRENTES ENSAIADAS.. | 66 |
| 7.2.1 Correntes simples..... | 66 |
| 7.2.1.1 Distribuição longitudinal | 66 |
| 7.2.1.2 Perfil vertical | 69 |
| 7.2.2 Correntes consecutivas | 72 |
| 7.2.2.1 Distribuição longitudinal | 73 |
| 7.2.2.2 Perfil vertical | 76 |

| | |
|--|-----------|
| 7.2.3 Correntes simples sobre declividade não nula | 77 |
| 7.2.3.1 Distribuição longitudinal | 80 |
| 7.2.3.2 Perfil vertical | 84 |
| 7.3 ANÁLISE DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS, GEOMÉTRICOS E DEPOSICIONAIS MÉDIOS..... | 84 |
| 7.3.1 Quanto às velocidades desenvolvidas pelas correntes | 88 |
| 7.3.2 Quanto às alturas apresentadas pelas cabeças das correntes | 89 |
| 7.3.3 Quanto aos padrões deposicionais gerados em diferentes escalas de simulação..... | 91 |
| 8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 93 |
| 8.1 QUANTO AO SUCESSO DO PROCESSO DE TRANSPOSIÇÃO DA METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO FÍSICA | 93 |
| 8.2 QUANTO À COMPARAÇÃO DOS PADRÕES DEPOSICIONAIS GERADOS COM OS DADOS PRÉ-EXISTENTES | 94 |
| 8.3 QUANTO ÀS MODIFICAÇÕES NOS DEPÓSITOS GERADOS INDUZIDAS PELA DECLIVIDADE NÃO NULA..... | 94 |
| 8.4 QUANTO À SEMELHANÇA DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E HIDRODINÂMICOS DE CORRENTES CONSERVATIVAS E NÃO-CONSERVATIVAS..... | 95 |
| 8.5 QUANTO À SEMELHANÇA ENTRE OS DEPÓSITOS GERADOS NAS SIMULAÇÕES E OS DEPÓSITOS NATURAIS | 95 |
| 8.6 QUANTO À REALIZAÇÃO DE NOVOS ESTUDOS..... | 96 |
| 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 98 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 4.1: Corrente turbidítica de alta densidade segundo a definição de Postma (Postma et al, 1988). | 6 |
| Figura 5.1: Canal bidimensional de geometria simplificada na configuração original. | 14 |
| Figura 5.2: Difusor para admissão de mistura implantado no canal. | 14 |
| Figura 5.3: Canal bidimensional de geometria simplificada na configuração atual, após a implantação das modificações. | 14 |
| Figura 5.4: Reservatórios de alimentação e estrutura de suporte. | 15 |
| Figura 5.5: Filmadora Sony DCR-TRV110. | 15 |
| Figura 5.6: Filmadora Sony DCR-TRV120. | 15 |
| Figura 5.7: Câmera fotográfica digital Sony MVC-FD95. | 16 |
| Figura 5.8: Medidor eletromagnético de vazão Rosemount 570TM. | 16 |
| Figura 5.9: Agitador eletromecânico. | 17 |
| Figura 5.10: Conversor de frequência. | 17 |
| Figura 5.11: Mesa de coordenadas, medidor laser e demais acessórios. | 17 |
| Figura 5.12: Analisador de partículas a laser (Cilas 1180). | 19 |
| Figura 5.13: Desenho esquemático do ecógrafo médico. | 19 |
| Figura 5.14: Peneirador de intensidade variável. | 19 |
| Figura 5.15: Esquema das dimensões do pipetador. | 20 |
| Figura 6.1: Esquema da metodologia experimental referente ao período da simulação. | 25 |
| Figura 6.2: Pontos de medição dos parâmetros geométricos. | 27 |
| Figura 6.3: Esquema da metodologia de amostragem empregada na primeira fase. | 28 |
| Figura 6.4: Imagem em planta de depósito gerado no ensaio 1 com emprego de difusor de 6 orifícios. | 29 |
| Figura 6.5: Imagem em planta de depósito gerado no ensaio 3 com emprego de difusor de 10 orifícios. | 29 |
| Figura 6.6: Gráfico da distribuição granulométrica longitudinal média dos ensaios 3 e 4. | 31 |
| Figura 6.7: Valores da massa específica em diferentes alturas das correntes da primeira fase. | 33 |
| Figura 6.8: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 3. | 34 |

| | |
|--|----|
| Figura 6.9: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 4. | 34 |
| Figura 6.10: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 5. | 34 |
| Figura 6.11: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 3 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser. | 34 |
| Figura 6.12: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 4 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser. | 34 |
| Figura 6.13: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 5 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser. | 34 |
| Figura 6.14: Esquema da metodologia de amostragem empregada na segunda fase. | 39 |
| Figura 6.15: Gráfico da distribuição granulométrica longitudinal média considerando os resultados dos ensaios 6 e 10. | 42 |
| Figura 6.16: Valores da massa específica em diferentes alturas das correntes da segunda fase. | 43 |
| Figura 6.17: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 6. | 44 |
| Figura 6.18: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 7. | 44 |
| Figura 6.19: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 8. | 44 |
| Figura 6.20: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 6 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser. | 44 |
| Figura 6.21: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 7 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser. | 44 |
| Figura 6.22: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 8 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser. | 44 |
| Figura 6.23: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 9. | 45 |
| Figura 6.24: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 10. | 45 |
| Figura 6.25: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 11. | 45 |
| Figura 6.26: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 9 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser. | 45 |
| Figura 6.27: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 10 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser. | 45 |
| Figura 6.28: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 11 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser. | 45 |
| Figura 6.29: Imagem em planta de depósito gerado pelo ensaio 3 (1a fase). | 50 |
| Figura 6.30: Imagem em planta de depósito gerado pelo ensaio 18 (3a fase). | 50 |

| | |
|--|----|
| Figura 6.31: Valores da massa específica em diferentes alturas das correntes da terceira fase. | 51 |
| Figura 6.32: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 12 | 53 |
| Figura 6.33: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 13 | 53 |
| Figura 6.34: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 15 | 53 |
| Figura 6.35: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 12 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser. | 53 |
| Figura 6.36: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 13 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser. | 53 |
| Figura 6.37: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 15 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser. | 53 |
| Figura 6.38: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 16 | 54 |
| Figura 6.39: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 17 | 54 |
| Figura 6.40: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 18 | 54 |
| Figura 6.41: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 16 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser. | 54 |
| Figura 6.42: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 17 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser. | 54 |
| Figura 6.43: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 18 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser. | 54 |
| Figura 7.1: Tendências da variação espacial da velocidade de avanço das correntes ao longo do canal. | 57 |
| Figura 7.2: Velocidade média de correntes não-conservativas e conservativas (Fabian, 2002) simuladas em canal com declividade de $-0,5^\circ$ | 58 |
| Figura 7.3: Velocidade média de correntes não-conservativas e conservativas (Fabian, 2002) simuladas em canal com declividade de 0° | 58 |
| Figura 7.4: Velocidade média de correntes não-conservativas e conservativas (Fabian, 2002) simuladas em canal com declividade de 2° | 59 |
| Figura 7.5: Alturas médias da cabeça das correntes ao longo do canal..... | 60 |
| Figura 7.6: Alturas médias do corpo das correntes ao longo do canal. | 60 |
| Figura 7.7: Alturas médias da cabeça e do corpo de correntes não-conservativas e conservativas (Fabian, 2002) simuladas em canal com declividade de $-0,5^\circ$ | 61 |
| Figura 7.8: Alturas médias da cabeça e do corpo de correntes não-conservativas e conservativas (Fabian, 2002) simuladas em canal com declividade de $0,0^\circ$ | 62 |

| | |
|---|----|
| Figura 7.9: Alturas médias da cabeça e do corpo de correntes não-conservativas e conservativas (Fabian, 2002) simuladas em canal com declividade de $2,0^\circ$ | 63 |
| Figura 7.10: Imagem da corrente simulada no ensaio 10 obtida por câmera de vídeo..... | 64 |
| Figura 7.11: Imagem da corrente simulada no ensaio 10 obtida por ultrassom. | 64 |
| Figura 7.12: Variação da velocidade média de correntes conservativas (Fabian, 2002) e não-conservativas em função da declividade do canal. | 65 |
| Figura 7.13: Variação da aceleração média de correntes conservativas (Fabian, 2002) e não-conservativas em função da declividade do canal. | 65 |
| Figura 7.14: Imagem em planta do depósito gerado no primeiro metro do canal pela passagem da corrente de turbidez simulada no ensaio 5. | 67 |
| Figura 7.15: Média da distribuição granulométrica longitudinal dos ensaios da primeira fase. | 68 |
| Figura 7.16: Distribuição granulométrica longitudinal média dos ensaios da primeira fase dos estudos de Ávila (2003). | 68 |
| Figura 7.17: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 20-30 dos ensaios da primeira fase. | 70 |
| Figura 7.18: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 00-20 dos ensaios da primeira fase dos estudos de Ávila (2003). | 70 |
| Figura 7.19: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 50-60 dos ensaios da primeira fase. | 71 |
| Figura 7.20: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 20-40 dos ensaios da primeira fase dos estudos de Ávila (2003). | 71 |
| Figura 7.21: Imagem em planta do depósito gerado no primeiro metro e meio do canal pela passagem das correntes de turbidez simuladas no ensaio 10..... | 73 |
| Figura 7.22: Média da distribuição granulométrica longitudinal dos ensaios da segunda fase. | 75 |
| Figura 7.23: Distribuição granulométrica longitudinal média dos ensaios da terceira fase dos estudos de Ávila (2003). | 75 |
| Figura 7.24: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 20-30 dos ensaios da segunda fase..... | 78 |
| Figura 7.25: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 50-60 dos ensaios da segunda fase..... | 78 |
| Figura 7.26: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 20-40 dos ensaios da terceira fase.de Ávila (2003). | 79 |
| Figura 7.27: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 40-60 dos ensaios da terceira fase de Ávila (2003). | 79 |

| | |
|--|----|
| Figura 7.28: Espessura do perfil longitudinal médio dos depósitos da terceira fase. | 80 |
| Figura 7.29: Imagem em planta do depósito gerado no primeiro metro e meio do canal pela passagem da corrente de turbidez simulada no ensaio 13 com declividade de 2° | 81 |
| Figura 7.30: Imagem em planta do depósito gerado no primeiro metro e meio do canal pela passagem da corrente de turbidez simulada no ensaio 18 com declividade de -0,5° | 81 |
| Figura 7.31: Média da distribuição granulométrica longitudinal dos ensaios 12, 13 e 15 realizados em canal com declividade de 2° | 82 |
| Figura 7.32: Média da distribuição granulométrica longitudinal dos ensaios 16, 17 e 18 realizados em canal com declividade de -0,5° | 82 |
| Figura 7.33: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 20-30 dos ensaios no canal com 2 graus. | 85 |
| Figura 7.34: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 20-30 dos ensaios no canal com -0,5 graus. | 85 |
| Figura 7.35 – Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 50-60 dos ensaios no canal com 2 graus. | 86 |
| Figura 7.36: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 50-60 dos ensaios no canal com -0,5 graus. | 86 |
| Figura 7.37: Velocidade média das correntes não-conservativas ensaiadas em função da massa específica da mistura injetada e da declividade do canal. | 89 |
| Figura 7.38: Altura das cabeças das correntes simuladas em função da velocidade e da declividade. | 90 |
| Figura 7.39: Altura das cabeças das correntes não-conservativas simuladas em função da massa específica da mistura injetada e da declividade. | 91 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 6.1: Plano de ensaios da primeira fase. | 22 |
| Tabela 6.2: Ensaios do grupo A da primeira fase de estudos de Ávila (2003). | 23 |
| Tabela 6.3: Ensaios realizados na primeira fase. | 30 |
| Tabela 6.4: Resultados da primeira fase. | 32 |
| Tabela 6.5: Plano de ensaios da segunda fase. | 37 |
| Tabela 6.6: Ensaios da terceira fase de estudos de Ávila (2003). | 37 |
| Tabela 6.7: Ensaios realizados na segunda fase. | 40 |
| Tabela 6.8: Resultados da segunda fase. | 41 |
| Tabela 6.9: Plano de ensaios da terceira fase. | 48 |
| Tabela 6.10: Ensaios de correntes conservativas de Fabian (2002). | 48 |
| Tabela 6.11: Ensaios realizados na terceira fase. | 49 |
| Tabela 6.12: Resultados da terceira fase (2,0 graus). | 52 |
| Tabela 6.13: Resultados da terceira fase (-0,5 graus). | 52 |
| Tabela 7.1: Velocidade média de correntes conservativas (Fabian 2002) e não-conservativas. | 59 |
| Tabela 7.2: Resultados médios das três fases de estudos e de Ávila (2003). | 87 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------------------|---|
| S | desvio padrão |
| C | concentração |
| C_v | concentração volumétrica |
| S | declividade |
| D | diâmetro do grão (m) |
| h | espessura do fluxo (m) |
| f₀ | fator de perda de carga junto ao fundo |
| f_i | fator de perda de carga na interface |
| g | gravidade (m/s ²) |
| g` | gravidade reduzida (m/s ²) |
| <i>r_w</i> | massa específica da água (kg/m ³) |
| <i>r_f</i> | massa específica da mistura (kg/m ³) |
| <i>r_m</i> | massa específica do material (kg/m ³) |
| u* | velocidade de cisalhamento (m/s) |
| ω | velocidade de queda da partícula (m/s) |
| U | velocidade média (m/s) |
| v | viscosidade cinemática (m ² /s) |

1 INTRODUÇÃO

Dentre os processos vinculados à sedimentação em águas oceânicas profundas, destaca-se o papel exercido pelas correntes de turbidez. Tal denominação é empregada para descrever o escoamento que se estabelece quando uma massa fluida se desloca no interior de um ambiente composto por uma camada de líquido, sendo a força motriz desse movimento explicada pela diferença de massas específicas existente entre a corrente e o ambiente. No caso das correntes de turbidez, essa diferença de massas específicas resulta de variações nas quantidades de sólidos suspensos e/ou dissolvidos que são transportados pelo escoamento.

A importância desses fluxos reside no fato que os mesmos são responsáveis pela formação de depósitos turbidíticos. Tais rochas, devido às suas propriedades de porosidade e permeabilidade, caracterizam-se, em certas condições, como potenciais reservatórios de hidrocarbonetos. Sendo assim, o estudo das correntes de turbidez tem atraído, ao longo dos anos, os esforços de diversos centros de pesquisa em vários países do mundo, uma vez que, envolve grande interesse econômico, principalmente por parte da indústria do petróleo.

No âmbito internacional, podemos destacar a atuação da Universidade de Leeds, Reino Unido; do Instituto Francês de Pesquisa Marinha, Ifremer; do CEMAGREF de Grenoble, da Universidade de Bordeaux 1 e do Instituto Francês de Petróleo - IFP, todos na França, além da Universidade da Califórnia e do Laboratório de Hidráulica de Saint Anthony Falls em Minnesota, ambos nos Estados Unidos. Em território nacional, alguns estudos têm sido desenvolvidos pelo Centro de Pesquisa da Petrobrás, CENPES, e pelo Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade, NECOD da UFRGS.

O presente trabalho empregou a modelagem física de correntes de turbidez como meio para estudar o efeito da escala de simulação sobre o desenvolvimento da corrente, bem como, da sua influência sobre os padrões deposicionais gerados.

2 CONTEXTO

No Brasil, parcela predominante das reservas petrolíferas disponíveis encontra-se em áreas de águas profundas, mais especificamente em sistemas deposicionais turbidíticos dos campos gigantes das Bacias de Campos e Santos, em profundidades que não raro superam os 2000m. Apesar do grande avanço do desenvolvimento teórico/analítico dos fenômenos envolvidos no processo de formação e desenvolvimento dos fluxos de densidades, muito pouco tem sido estudado, em âmbito nacional, com relação à simulação física de escoamentos tridimensionais não-conservativos.

No contexto da importância dos fluxos turbidíticos como elemento de transferência e transporte dos sedimentos desde a plataforma continental até a planície abissal, percurso ao longo do qual esta carga irá se depositar, e da possibilidade de representar esses processos experimentalmente, através da modelagem física em escala reduzida, é que está inserido o NECOD, Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade. Vinculado ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas, o qual acumula vasta experiência no campo da modelagem física, o NECOD surgiu oficialmente em janeiro de 2002 como uma parceria entre a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e a Petrobrás.

O NECOD tem como objetivos a construção, a instrumentação e a operação de modelos físicos capazes de simular correntes de turbidez, visando tanto atividades de pesquisa na área de correntes gravitacionais, quanto a formação de recursos humanos capacitados a atuar nessa área de interesse. A atividade de modelagem física, por sua vez, tem como função o fornecimento de subsídios para avaliação de estruturas e mecanismos de transporte inerentes às correntes de turbidez, bem como, dos depósitos sedimentares delas originados. De posse de informações dessa natureza e do domínio dos processos de modelagem física, torna-se possível então estabelecer modelos preditivos capazes de auxiliar no processo decisório envolvido nas atividades de exploração de petróleo, reduzindo incertezas.

As atividades do NECOD, na área de fluxos gravitacionais, tiveram início antes mesmo da implantação formal do Núcleo. Já em 2000, foram realizados os primeiros experimentos com correntes conservativas que culminaram no trabalho de Fabian (2002). Após o desenvolvimento de metodologia para simulação de correntes conservativas, iniciou-se uma nova etapa de trabalho com um estudo para simulação de correntes não-conservativas e avaliação de padrões deposicionais, conforme relatado no trabalho de Manica (2002). Finalmente, no trabalho de Ávila (2003), foi realizado um estudo marcado pela sucessão de eventos e pela descrição da estrutura interna dos depósitos sedimentares gerados. Nas próximas etapas de estudos do Núcleo, o objetivo principal será a introdução de modelos

físicos de maiores dimensões e de geometria mais complexa, principalmente no que se refere à topografia. Antes disso, no entanto, torna-se necessário avaliar o comportamento das metodologias de simulação desenvolvidas até então frente à redução das escalas que se pretende introduzir nos modelos.

O presente trabalho visou dar continuidade às atividades de pesquisa descritas, sendo, para esse fim, realizada a transposição de metodologia, previamente desenvolvida pelo grupo para a modelagem física de fluxos de turbidez e utilizada por Ávila (2003), de um canal de pequenas dimensões (fluxo unidimensional), para um canal de maior porte (fluxo bidimensional). Espera-se que a redução na escala permitirá um estudo mais detalhado dos depósitos gerados, contribuindo para um melhor entendimento sobre os processos de transporte e padrões de deposição destas correntes, as quais se constituem na principal fonte de formação dos sistemas deposicionais turbidíticos que contêm os reservatórios de óleo.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVOS GERAIS

- Transpor a metodologia de simulação física de depósitos e seqüências deposicionais turbidíticas para canal de grande porte avaliando os efeitos de escala induzidos.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar os padrões deposicionais gerados no canal de grande porte com os dados pré-existentes gerados no canal de pequeno porte.
- Observar possíveis modificações nos depósitos gerados em virtude de variações introduzidas na declividade do canal de grande porte.
- Verificar semelhanças entre parâmetros geométricos e hidrodinâmicos de correntes conservativas e não-conservativas.
- Procurar semelhanças dos depósitos gerados nas simulações físicas com as descrições de correntes/depósitos de alta densidade conforme bibliografia e observações de campo.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 DEPÓSITOS TURBIDÍTICOS

Os depósitos turbidíticos podem gerar rochas sedimentares oriundas dos processos de transporte, deposição e acumulação de sedimentos em ambientes como margens e fundos de rios, lagos e mares. Os sedimentos que são transportados até a região deposicional através de fluxos gravitacionais denominados correntes de turbidez, são usualmente depositados sob a forma de extensos leques compostos de diversos estratos ou camadas. Devido às suas características de porosidade (espaços vazios capazes de armazenar fluidos) e permeabilidade (boa conexão entre os poros, facilitando o fluxo de fluidos), os turbiditos reúnem propriedades essenciais para atuarem como reservatórios de petróleo.

No Brasil, os depósitos turbidíticos, que são encontrados freqüentemente nas bacias da margem continental, apresentam grande importância econômica, pois abrigam cerca de 90% do petróleo até hoje descoberto. Estudos desenvolvidos nessas áreas demonstraram que os sistemas turbidíticos canalizados estão amplamente distribuídos nas bacias brasileiras (Bruhn e Moraes, 1989). Tais registros podem ser observados especialmente no preenchimento de conjuntos de cânions submarinos distribuídos ao longo de quase todas as bacias da margem continental leste do Brasil.

O processo de preenchimento desses sistemas canalizados pode, portanto, ser associado à ocorrência de sucessivos pulsos de transferência ou a processos de aporte contínuo de sedimentos, dando origem a espessos estratos sedimentares (Stow et al., 2000). A capacidade de armazenar hidrocarbonetos desses estratos, por sua vez, encontra-se intimamente ligada a sua espessura e porosidade, sendo os reservatórios de maior qualidade usualmente denominados depósitos turbidíticos maciços ou de alta densidade. Assim, a origem de tais estruturas passou a ser associada a um tipo específico de corrente de turbidez, que na literatura convencionou-se chamar de fluxo gravitacional de alta densidade ou também de corrente turbidítica de alta densidade (CTAD).

Em 1950, Kuenen procurou vincular a formação de depósitos sedimentares em ambiente marinho profundo aos fluxos de alta densidade. No ano seguinte, o mesmo autor (Kuenen, 1951), descreveu um modelo de CTAD consistindo de uma frente altamente concentrada seguida de uma esteira menos densa, sendo também observado um gradiente de concentrações e velocidades ao longo do perfil da corrente com valores crescentes em direção à base. Já Lowe (1982) define as correntes de alta densidade baseado no tamanho dos

sedimentos transportados. Finalmente Postma et al. (1988), apresentaram definição semelhante à de Kuenen, descrevendo o fluxo de alta densidade como um escoamento estratificado, constituído de uma camada basal mais concentrada e de fluxo laminar e de uma camada superior menos concentrada e de fluxo turbulento, conforme ilustrado pela figura 1.

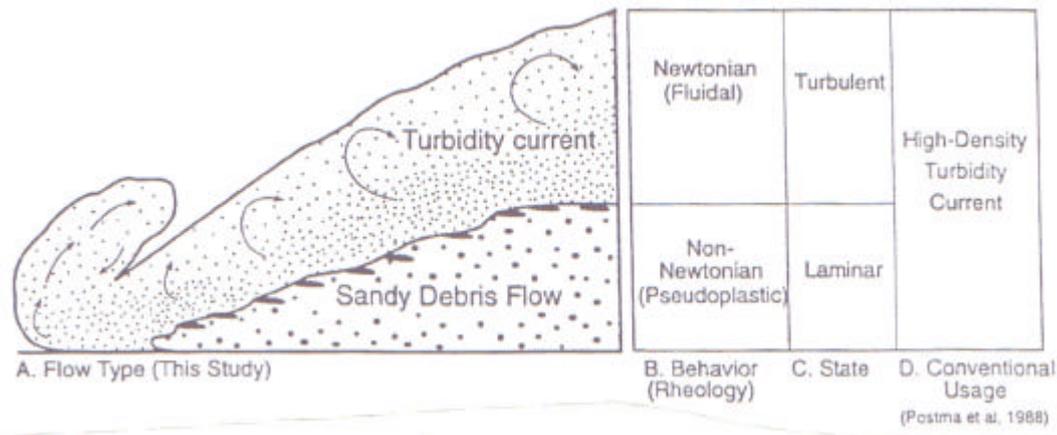


Figura 4.1: Corrente turbidítica de alta densidade segundo a definição de Postma (Postma et al, 1988).

Lowe (1982) afirmou ainda que, apesar da caracterização exata das correntes turbidíticas de alta densidade permanecer apenas no campo das conjecturas, havia até então evidência suficiente de que fluxos turbulentos de alta densidade são muito eficientes no processo de transporte e deposição de sedimentos em águas oceânicas profundas. Tais evidências são, em grande parte, fruto de resultados experimentais de trabalhos como o de Middleton (1967), que utilizou a modelagem física em escala reduzida na abordagem do problema.

Já no que se refere à geometria e aos padrões deposicionais, a descrição dos leques turbidíticos, segundo as definições clássicas da literatura (Mutti e Ricci Lucchi, 1972; Mutti e Ricci Lucchi, 1975, entre outros), pode ser dividida em três segmentos distintos. Na porção mais proximal, haveria ocorrência de conglomerados e arenitos maciços. No leque médio, compartimentado em lobos deposicionais, seriam observados arenitos maciços estratificados e turbiditos clássicos (Seqüência de Bouma) na porção não canalizada. Finalmente, na porção distal, haveria predominância de franjas de turbiditos clássicos (sedimento mais grosso na base e mais fino no topo) e presença de sedimentos finos.

Trabalhos mais recentes, como o de Mutti et al. (2003), também descrevem as seqüências de preenchimento de sistemas deposicionais turbidíticos através de três trechos

característicos. O primeiro deles seria dominado por porções canalizadas com forte ocorrência de erosão. Na extremidade dessas porções canalizadas, observaria-se então a existência de lobos deposicionais e arenitos, ficando o material mais fino concentrado na região distal da bacia, o qual corresponderia ao terceiro trecho.

No Brasil, Bruhn e Moraes (1988), relataram a ocorrência de quatro tipos principais de reservatórios turbidíticos (complexos de canais, lobos canalizados, lobos não canalizados e franjas). Segundo os mesmos autores, reservatórios turbidíticos arenosos e conglomeráticos ocorrem em 116 acumulações de óleo e 42 jazidas de gás, encontradas nas bacias sedimentares de Campos, Espírito Santo, Recôncavo, Sergipe-Alagoas, Potiguar, Ceará e Barreirinhas.

Para a caracterização desses reservatórios são usualmente empregados métodos geológicos, geoquímicos e geofísicos. O primeiro método consiste nos mapeamentos e análise de afloramentos, visando a identificação das estruturas existentes no subsolo. Já a geoquímica se ocupa da identificação das chamadas rochas geradoras de petróleo e da detecção de resíduos mínimos de hidrocarbonetos que possam ter escapado de reservatórios. Finalmente, dentre os métodos geofísicos, destaca-se o emprego da sísmica, a qual se baseia na reflexão de ondas sísmicas, originadas na superfície, por camadas de rocha subterrânea.

A qualidade dos dados obtidos na caracterização das rochas reservatório pelos processos descritos acima é a chave para o sucesso da atividade de exploração de petróleo. Isso ocorre, pois é através desses dados que é realizada a modelagem tridimensional da geometria externa, bem como, a descrição das heterogeneidades internas das rochas reservatórios. As limitações de resolução e do grau de detalhamento obtido, inerentes aos métodos geológicos, geoquímicos e geofísicos, no entanto, criam a necessidade de utilização de ferramentas alternativas nessas abordagens.

Nesse sentido, a possibilidade de representar os processos de sedimentação em águas profundas em escala reduzida, tornou a modelagem física uma opção interessante para a representação tridimensional de reservatórios. Na realidade, a modelagem física já é, nos dias de hoje, uma ferramenta largamente empregada no estudo dos processos de sedimentação em águas oceânicas profundas e que tem se mostrado muito adequada para tratar dessa problemática.

4.2 SIMULAÇÃO FÍSICA DE CORRENTES DE DENSIDADE

4.2.1 Semelhança física

A possibilidade de representar os fluxos turbidíticos experimentalmente, através do emprego da simulação física em escala reduzida, torna este tipo de modelagem uma abordagem muito interessante no que se refere ao melhor entendimento desse complexo fenômeno. Na realidade, o processo de simulação física já se converteu, nos dias de hoje, numa importante ferramenta para o estabelecimento de modelos preditivos confiáveis, capazes de auxiliar no processo decisório envolvido nas atividades de exploração de petróleo em ambiente marinho profundo. A validade e adequação das respostas produzidas por tais modelos, no entanto, depende do respeito às leis de semelhança na construção e operação dos modelos. Assim a concepção dos mesmos deve levar em conta tanto aspectos geométricos quanto características específicas do comportamento do fenômeno. Nesse sentido, devem ser observadas principalmente as noções de semelhança referentes aos comportamentos dinâmico e cinemático dos fluxos que se pretende estudar.

De acordo com as teorias de semelhança, largamente empregadas na área de mecânica dos fluidos, uma forma de se garantir a similaridade entre o comportamento de modelos e protótipos é o emprego da análise dimensional. Esse tipo de abordagem por sua vez, compreende duas etapas básicas que devem ser observadas. Na primeira delas, devem ser elencadas todas as grandezas que influenciam o fenômeno de interesse. Na segunda etapa, essas grandezas devem ser agrupadas através de relações funcionais, as quais irão permitir que as mesmas sejam relacionadas de maneira a formar números adimensionais. A manutenção de valores idênticos para tais números adimensionais, tanto no caso do modelo quanto do protótipo, é a chave para que se garanta a validade e adequação das respostas produzidas através da modelagem física. O processo de obtenção dos grupos adimensionais, descrito acima sintetiza o que se costuma denominar em mecânica dos fluidos como Teorema dos Pi (π) de Buckingham (Motta, 1972).

4.2.2 Parâmetros adimensionais que descrevem o fenômeno

Na aplicação da análise dimensional, Middleton (1966) afirma que as grandezas de interesse envolvidas no estudo de correntes de densidade são a diferença de densidade entre a

corrente e o fluido ambiente ($g' = g \frac{Df}{Dr} = (r_f - r_w)/r_w$), a velocidade média (U), a espessura do fluxo (h), a declividade (S) e os fatores de perda de carga junto ao fundo (f_o) e na interface (f_i). Considerando que o fator (f_i) depende do número de Reynolds, então devemos considerar a viscosidade cinemática (ν). Assim, levando em conta tais grandezas, chegamos a uma função da forma:

$$f_1(g', U, h, S, f_i, f_o, \mathbf{n}) = 0 \quad (4.1)$$

ou escrevendo as variáveis na forma de números adimensionais:

$$f_2\left(\frac{U}{\sqrt{g'h}}, \frac{Uh}{\mathbf{n}}, S, f_i, f_o\right) = 0 \quad (4.2)$$

onde:

$$\frac{U}{\sqrt{g'h}} = \text{Número de Froude densimétrico}$$

$$\frac{Uh}{\mathbf{n}} = \text{Número de Reynolds}$$

O autor afirma ainda que, segundo evidências experimentais, a influência do Número de Reynolds é pequena se comparada a do Número de Froude, podendo-se então desprezar o primeiro. Isso simplifica a equação (4.2) de forma que:

$$f_3\left(\frac{U}{\sqrt{g'h}}, S, f_i, f_o\right) = 0 \quad (4.3)$$

A expressão (4.3) representa a equação geral, na forma adimensional, para a construção de modelos reduzidos adequados de correntes de densidade em regime permanente e uniforme.

Como dentre as correntes de densidade existentes, há interesse especial por aquelas que transportam sedimentos, as quais podem ser denominadas correntes de turbidez, torna-se necessário adequar a expressão (4.3) à presença do material sedimentar. Nesse caso, a solução salina ou suspensão de partículas muito finas deve ser substituída por uma suspensão de material mais grosso. Esse fato nos obriga a adicionar à equação (4.3) termos como o diâmetro médio do grão (D), o desvio padrão (σ) e a concentração em volume (C), resultando em:

$$f_4 \left(\frac{U}{\sqrt{g'h}}, S, f_i, f_o, \frac{u_* D}{\mathbf{n}}, \mathbf{s}, C \right) = 0 \quad (4.3)$$

onde:

$$\frac{u_* D}{\mathbf{n}} = \text{Número de Reynolds do Grão}$$

Considerando-se ainda, como uma simplificação, que o comportamento hidrodinâmico do sedimento pode ser expresso pela velocidade de queda (w) do mesmo, medida para a concentração de interesse (C), pode-se obter a expressão a seguir:

$$f_5 \left(\frac{U}{\sqrt{g'h}}, S, f_i, f_o, w/U, \mathbf{s} \right) = 0 \quad (4.5)$$

A partir da análise da expressão (4.5), os seguintes comentários acerca da modelagem física de correntes de turbidez em escala reduzida podem ser postulados:

- O Número de Froude do modelo e do protótipo devem ser similares, para que o regime do escoamento seja semelhante. Deve-se atentar também para que a declividade do modelo seja ligeiramente aumentada em relação ao protótipo (basculamento);
- Sendo respeitado o número de Froude, as rugosidades do fundo e da interface superior devem ser similares;
- O respeito ao Número de Froude implica que, necessariamente, a velocidade no modelo será inferior à do protótipo;
- A velocidade de queda do sedimento deve ser adequadamente reduzida em escala. Isso indica que deve ser empregado sedimento com densidade menor que a do sedimento transportado por correntes naturais;
- A granulometria e a concentração do sedimento afetam o processo de sedimentação.

4.2.3 Efeitos de escala e problemas enfrentados na simulação física de correntes de densidade

Através do emprego da análise dimensional, podem ser definidos os grupos adimensionais que devem ser respeitados para que se garanta a semelhança entre modelo e protótipo na simulação física de correntes de densidade. Além disso, a consideração da análise dimensional no estudo do comportamento hidráulico de correntes de turbidez pode auxiliar, em muito, o estabelecimento, bem como, a generalização de leis para correntes de gravidade de diversos tipos.

Middleton (1966), valendo-se do uso da análise dimensional, concluiu que para reproduzir o comportamento de correntes de turbidez em escala reduzida é imprescindível que se respeite o número de Froude. Além disso, segundo o mesmo autor, é necessário que se atente para a devida redução em escala da velocidade de queda do material empregado para representar o sedimento. Isso implica que o material utilizado na simulação seja menos denso do que o material transportado por correntes de turbidez reais. Sendo assim, fica implícito, ao contrário do que é observado em alguns estudos de modelagem física de fluxos gravitacionais encontrados na bibliografia, como o de Laval et al. (1988), que não é possível utilizar, para fins de simulação física em escala reduzida de correntes de turbidez, o mesmo material sedimentar transportado por fluxos naturais.

5 APARATO EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS

5.1 CANAL BIDIMENSIONAL

A modelagem física do processo foi realizada num canal bidimensional de geometria simplificada e declividade variável. Tal canal, construído em aço e vidro, é suportado por uma estrutura metálica em treliça, a qual é composta por barras de perfil “L” de 40 x 40mm e espessura de 4mm. A treliça apresenta um comprimento total de 5,45m e uma altura de 50cm. Na concepção de tal estrutura, levando em conta a necessidade de permitir a variação de declividade do canal, idealizou-se uma estrutura bi-apoiada. Um dos apoios é um cavalete metálico, fixo ao chão, o qual suporta a treliça através de um eixo de rotação. O outro ponto de apoio é composto por um parafuso com 2,54cm de diâmetro em sua extremidade superior. A estrutura de suporte do parafuso permite levantar ou baixar o canal, variando a declividade. Para servir de apoio aos vidros, os quais formam a parede do canal, foram fixadas por solda, nas laterais, barras metálicas de perfil “I” com dimensões de 150cm de comprimento, seção transversal com alma de 8cm, abas com 6cm e espessura de 0,4cm.

Na região de jusante do canal, uma câmara de dissipação foi idealizada para impedir que o escoamento que atingisse a extremidade final do mesmo não sofresse reflexão na parede de fundo. Tal câmara é formada por chapas metálicas e tem dimensões iguais a 1,00 m de comprimento; 2,00 m de altura e 0,47 m de largura. O fundo desse compartimento encontra-se 1,00m abaixo do fundo do canal, sendo que a parte superior do mesmo coincide com a altura do canal. Nas laterais e na parte oposta ao canal, existem janelas de vidro que permitem a visualização do escoamento.

Internamente o canal apresenta fundo e paredes de vidro. As placas de vidro que formam o fundo estão niveladas e são apoiadas sobre a treliça metálica através de uma camada de silicone. Além de suporte, o silicone atua como vedação entre as placas. As juntas entre as placas de vidro foram cuidadosamente alisadas para ter mínima influência no escoamento. As placas de vidro da parede são apoiadas nos perfis “I” e fixadas com uma camada de silicone.

A configuração inicial do canal, apresentada nos parágrafos anteriores, foi inicialmente concebida para o estudo da dinâmica de correntes conservativas, ou seja, correntes que não geram depósitos sedimentares (Fabian, 2002). Com a introdução de ensaios de correntes não-conservativas, isto é, que depositam o material transportado, tornou-se

necessário realizar algumas adaptações no mesmo, principalmente no que diz respeito a sua configuração interior.

Na sua configuração original, o canal podia ser dividido em três partes distintas: um compartimento inicial isolado por uma comporta, um compartimento intermediário e uma câmara de dispersão (figura 5.1). No compartimento inicial (1,50 x 0,40 x 1,00m), ficava armazenada a mistura utilizada para simular a corrente. No compartimento intermediário (5,00 x 0,40 x 1,00m), ocorria o desenvolvimento da corrente de turbidez e finalmente, na extremidade do canal, a mesma mergulhava na câmara de dispersão (1,00 x 0,47 x 2,00m).

Para estudar as correntes de turbidez, de acordo com os objetivos descritos anteriormente, foram realizadas duas modificações básicas na estrutura do canal. Inicialmente, visando a qualificação e amostragem dos depósitos sedimentares que se pretendia gerar, foi instalada uma plataforma de acrílico ao longo do canal, de modo a reduzir a distância entre o leito e a linha d'água para 0,60m (figura 5.3). Essa medida também contribuiu para aumentar a profundidade da zona de dispersão para 2,40m, diminuindo assim possíveis efeitos de reflexão da corrente. Por fim, o mecanismo de admissão da mistura foi alterado pela introdução de uma canalização e de um difusor (figura 5.2), a exemplo do que foi feito em estudos anteriores (Ávila, 2003 e Sartor et al., 2002).

A alimentação do canal, a qual podia dar-se de duas formas distintas, foi mantida praticamente inalterada, com exceção da instalação do difusor e da canalização. Há uma alimentação de água pura e outra para a mistura utilizada nas simulações. A água pura é empregada para encher o canal e constituir o fluido ambiente. Já a mistura, por sua vez, é injetada no canal após o preenchimento do mesmo com o fluido ambiente. O enchimento do canal é feito através de recalque de água captada no reservatório do laboratório. O volume necessário para o enchimento do canal varia, conforme a declividade, ficando em torno de 4,0m³.

A estrutura montada para o preparo e armazenamento da mistura utilizada nas simulações consiste em quatro reservatórios de 1m³. Eles são interligados através de tubulações, mas podem ser operados separadamente. Os reservatórios são apoiados sobre estrutura metálica, a qual lhes confere uma cota mínima de 4m de altura, ficando acima do nível do canal (figura 5.4). A solução preparada pode, portanto, ser injetada na tubulação de alimentação do canal por gravidade. A configuração de quatro reservatórios permite agilidade no preparo dos ensaios, podendo se preparar misturas de massa específica distinta e volume



Figura 5.1: Canal bidimensional de geometria simplificada na configuração original.



Figura 5.2: Difusor para admissão de mistura implantado no canal.

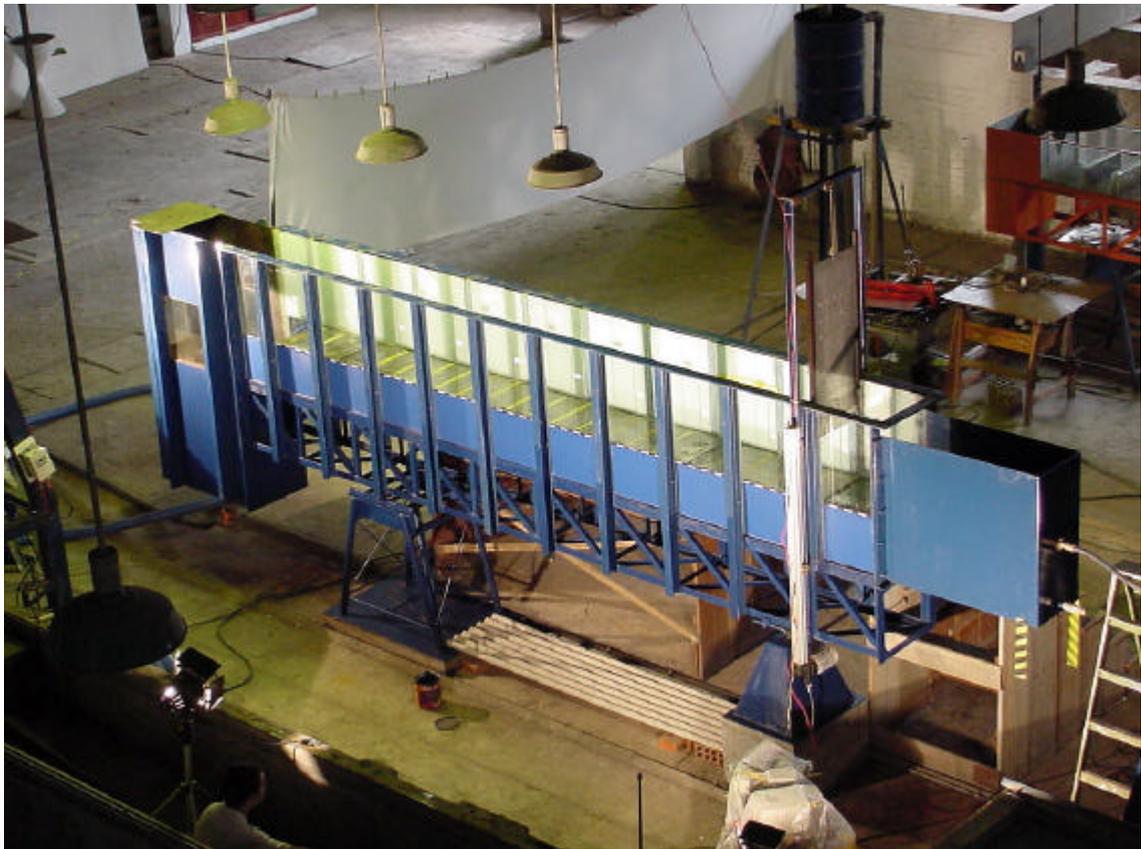


Figura 5.3: Canal bidimensional de geometria simplificada na configuração atual, após a implantação das modificações.

suficiente para repetir os ensaios com a mesma mistura. As únicas modificações introduzidas na estrutura montada para o preparo e armazenamento da mistura foram a substituição da canalização por uma de diâmetro superior e a instalação de um medidor eletromagnético de vazão à montante do canal. O aumento do diâmetro da canalização visou evitar problemas de

sedimentação no seu interior propiciados pelo acúmulo do carvão contido na mistura preparada para as simulações.



Figura 5.4: Reservatórios de alimentação e estrutura de suporte.

5.2 EQUIPAMENTOS PARA AQUISIÇÃO DE IMAGENS

Os experimentos realizados foram registrados, para fins de posterior análise e tratamento de imagens, com emprego de duas câmeras de vídeo digitais convenientemente posicionadas sobre tripés. Os modelos utilizados, ambos da marca Sony, foram o DCR-TRV110 com zoom digital de 360x (figura 5.5) e o DCR-TRV120 com zoom digital de 450x (figura 5.6). O sistema de gravação dos modelos é digital de 8mm com resolução de 500 linhas. O zoom ótico é de 25x e a taxa de transferência de 29,97 quadros por segundo.



Figura 5.5: Filmadora Sony DCR-TRV110.



Figura 5.6: Filmadora Sony DCR-TRV120



Figura 5.7: Câmera fotográfica digital
Sony MVC-FD95.



Figura 5.8: Medidor eletromagnético de vazão
Rosemount 570TM.

Já os depósitos sedimentares gerados, por sua vez, foram registrados, tanto em planta quanto em perfil, com o emprego de uma câmera fotográfica digital modelo Sony MVC-FD95 (figura 5.7). A mesma possui resolução de 1600x1200 e 2,1 Mega Pixels. O zoom óptico é de 10x e o digital de 20x.

5.3 MEDIDOR ELETROMAGNÉTICO DE VAZÃO

Um medidor eletromagnético de vazão, modelo Rosemount 570TM (figura 5.8), foi utilizado para garantir o controle dos volumes de mistura injetados no canal e a vazão de injeção, no decorrer de cada ensaio. O princípio de funcionamento do medidor é baseado na Lei de Faraday, segundo a qual um objeto condutor que se move em um campo magnético gera uma força eletromotriz.

5.4 AGITADOR ELETROMECAÂNICO

Para fins de garantir uma maior homogeneidade da mistura empregada para as simulações realizadas, foi instalado, no interior do reservatório de alimentação, um agitador eletromecânico (figura 5.9). O agitador é composto por um motor cujo eixo encontra-se conectado a uma hélice de quatro pás. A velocidade de rotação da hélice do agitador é controlada através de um conversor de frequência (figura 5.10), podendo ser ajustada conforme a necessidade.



Figura 5.9: Agitador eletromecânico.



Figura 5.10: Conversor de frequência.

5.5 MEDIDOR DE DISTÂNCIA A LASER

Com o objetivo de realizar o levantamento das superfícies, bem como do perfil dos depósitos resultantes das correntes ensaiadas, utilizou-se um medidor de distância a laser instalado sobre uma mesa de coordenadas. O medidor propriamente dito, denominado MD250ADV, é um leitor de distâncias capaz de realizar medidas dinâmicas com uma velocidade de até 100 medidas por segundo, podendo as mesmas serem pontuais ou contínuas.



Figura 5.11: Mesa de coordenadas, medidor laser e demais acessórios.

O sistema completo é composto pela unidade leitora, a qual é instalada sobre uma mesa de coordenadas automatizada, uma unidade de processamento e um cabo que conecta ambas. A unidade de leitura possui um diodo laser com colimador, uma lente captadora e um sensor de imagem. O funcionamento baseia-se numa triangulação óptica por laser, na qual o feixe de laser gera um ponto luminoso sobre a superfície de interesse. O ponto é então captado pela lente, a qual projeta a imagem sobre o sensor. A posição aparente é transmitida para o sistema de processamento, onde então é calculada a posição real. A incerteza da medida realizada é da ordem de 0,1mm. Ao final da operação de medição os dados obtidos são transferidos da unidade de processamento para um computador.

A mesa de coordenadas que movimenta o leitor, por sua vez, foi desenvolvida pelo setor de instrumentação do NECOD e é construída em estrutura de alumínio, possuindo motores de corrente contínua com redutores de velocidade. O sistema é controlado por uma placa digital microprocessada, com entradas e saídas analógicas e digitais, que comanda o movimento dos motores. A rotina de movimentação deve ser programada no display e teclado que ficam conectados à mesa, delimitando o número de linhas e colunas a serem medidas e, além disso, definindo o espaçamento entre cada medida realizada. O dispositivo de leitura, já instalado junto à mesa de coordenadas conectada ao teclado, a unidade de processamento e o computador para transferência dos dados podem ser visualizados na figura 5.11.

5.6 ANALISADOR DE PARTÍCULAS A LASER

Para realizar a análise granulométrica do material amostrado dos depósitos formados após os ensaios foi utilizado um analisador de partículas a laser (granulômetro), equipamento capaz de fornecer dados granulométricos completos de amostras a partir de pequenas quantidades de material. O equipamento também permite analisar o material mesmo em estado úmido, o que elimina o longo tempo necessário à secagem em estufa, procedimento indispensável à análise granulométrica tradicional.

O analisador de partículas a laser, modelo Cilas 1180 (figura 5.12), emprega uma tecnologia que lhe permite diferenciar partículas com diâmetros variando entre 0,04 e 2500 μ m. Para isso o equipamento utiliza-se dos fenômenos da difração e da difusão de um feixe de raio laser. Duas teorias distintas são utilizadas para a análise da granulometria, sendo que a escolha de uma ou outra é feita em função do tamanho das partículas que se deseja medir.



Figura 5.12: Analisador de partículas a laser (Cilas 1180).

5.7 ECÓGRAFO MÉDICO

Para avaliação de estruturas internas do escoamento utilizou-se um ecógrafo médico, modelo LOGIQ α 100 MP TM – General Electric, normalmente empregado para fazer exames clínicos, dotado de uma sonda linear (figura 5.13). O equipamento dispõe de memória e capacidade para transferir imagens para PC ou impressora. A seleção apropriada de parâmetros de controle de scan (varredura) proporciona a obtenção de imagens de alta qualidade. A qualidade da visualização é aprimorada pelas diferentes rotinas de medição e cálculo disponíveis no sistema. Os ensaios realizados foram registrados através de um videocassete conectado à saída de vídeo.



Figura 5.13: Desenho esquemático do ecógrafo médico.



Figura 5.14: Peneirador de intensidade variável.

5.8 PENEIRADOR DE INTENSIDADE VARIÁVEL

Em virtude da necessidade de restringir as faixas granulométricas de grandes quantidades de material para a realização dos experimentos, foi empregado um peneirador de intensidade variável (figura 5.14). O peneirador é movimentado por um motor elétrico comandado por um conversor de frequência que permite o ajuste da intensidade de peneiramento. As peneiras utilizadas possuem as dimensões de 1,0 x 0,6 x 0,15m.

5.9 PIPETADOR

Com o objetivo de avaliar o perfil vertical de concentrações das correntes de turbidez ensaiadas em um ponto específico do canal, foi desenvolvido no NECOD um equipamento denominado pipetador. O mesmo é constituído de três condutos de cobre, colocados verticalmente ao longo da seção transversal do canal, os quais tem suas extremidades inferiores posicionadas a distâncias diferentes do fundo do mesmo (figura 5.15). As outras extremidades dos condutos de cobre são conectadas a mangueiras plásticas que os vinculam a recipientes de vidro. Finalmente cada um dos recipientes de vidro está conectado, também por mangueiras plásticas, a uma bomba de vácuo.

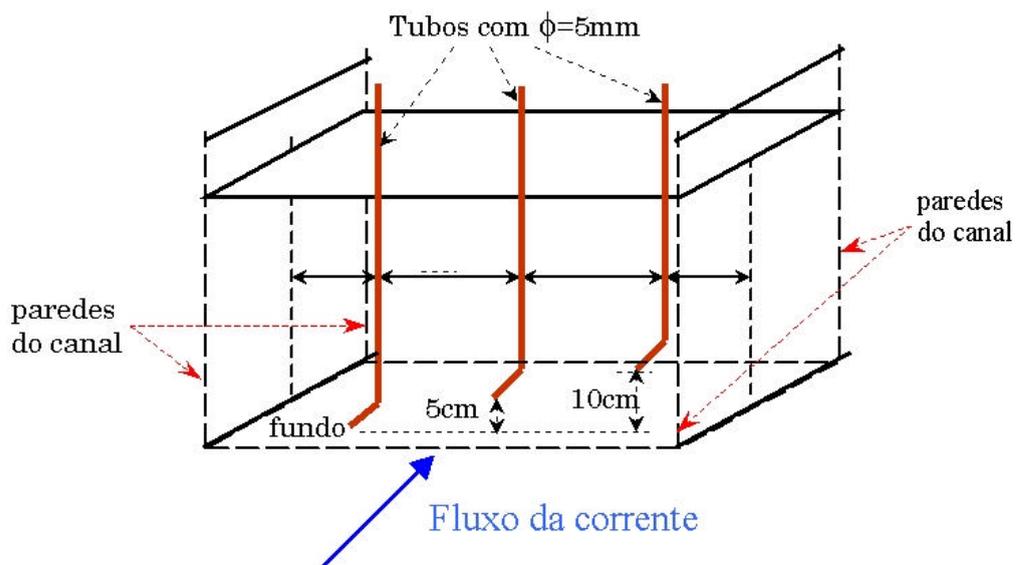


Figura 5.15: Esquema das dimensões do pipetador.

6 ENSAIOS REALIZADOS

Visando atingir os objetivos anteriormente descritos, três tipos distintos de ensaios foram realizados. O estudo foi iniciado com a simulação de correntes simples e prosseguiu com a simulação de correntes consecutivas, sendo que nessas duas primeiras etapas, as correntes desenvolveram-se sobre canal com declividade nula. Na última etapa, correntes simples foram novamente simuladas, no entanto, desta vez desenvolvendo-se sobre canal com declividades positiva e negativa. Independentemente da etapa à qual o referido ensaio se encontra vinculado, a metodologia experimental utilizada, descrita em maiores detalhes no item 6.1.2.1, salvo dito o contrário, foi basicamente a mesma.

6.1 ENSAIOS PRIMEIRA FASE: CORRENTES SIMPLES

O objetivo principal dessa primeira etapa foi realizar a transposição da metodologia de simulação física de correntes de turbidez, previamente desenvolvida para o canal de pequeno porte por Manica (2002), para o canal de grande porte. Assim, uma vez feitas as adaptações que se julgou necessárias às instalações experimentais, conforme descrito no item 5.1, procedeu-se à realização de simulações com correntes simples e declividade do canal nula.

Corrente simples é a denominação utilizada no NECOD para descrever um único pulso de material injetado no canal. Assim, a alimentação da mistura utilizada para a simulação é iniciada e mantida até que se atinja o volume desejado, quando é então interrompida, dando origem a um único fluxo gravitacional. Como resultado, após o desenvolvimento da corrente e posterior deposição do material sedimentar transportado, obtém-se um registro deposicional composto de uma só camada.

Os depósitos turbidíticos encontrados na natureza podem se apresentar na forma de extensos pacotes de material sedimentar (Mutti e Normark, 1991). Tais estratos podem ser compostos de espessas camadas de sedimentos, resultantes de um único e longo pulso de material transportado, ou seja, uma corrente simples, conforme a nomenclatura empregada no NECOD. Apesar disso, o que usualmente ocorre, é o empilhamento de diversas camadas de depósitos, resultantes de sucessivas correntes de turbidez.

Dessa forma, uma corrente simples seria o fenômeno de transporte e deposição responsável pela formação da unidade básica de um depósito turbidítico. Assim, essa primeira fase de ensaios, com a simulação de correntes simples, é muito importante para o presente

estudo, pois do sucesso da mesma depende a qualidade e confiabilidade das informações que se pretende gerar nas etapas seguintes.

6.1.1 Plano de ensaios

Sendo o objetivo principal dessa primeira etapa o de realizar a transposição da metodologia de simulação física de correntes de turbidez do canal de pequeno porte para o canal de grande porte, foi necessário estabelecer parâmetros de comparação para os resultados gerados, de maneira que fosse possível avaliar o sucesso ou insucesso da mesma. Nesse sentido, de posse dos dados referentes à primeira fase dos estudos de Ávila (2003), relativos à simulação física de correntes de turbidez no canal de pequeno porte, foi elaborado um plano de ensaios para o canal de grande porte.

Visando manter-se a máxima similaridade possível entre os ensaios de Ávila (2003) e os ensaios do presente estudo, buscou-se, na medida do possível, adaptar as características dos experimentos do canal de pequeno porte para o canal de grande porte. Assim foram previstos inicialmente cinco ensaios de correntes simples, conforme descrito na tabela 6.1. Tais ensaios tiveram suas características baseadas nos ensaios do Grupo A, descritos na tabela 6.2, referentes à primeira fase de estudos de Ávila (2003).

Comparando entre si as características dos ensaios descritos em cada uma das tabelas apresentadas, observam-se diferenças com relação à granulometria empregada e ao volume de mistura injetado. No tocante à granulometria, as diferenças presentes no limite inferior da faixa de material utilizado são fruto de modificações que ocorreram no NECOD no período de tempo compreendido entre 2003 e hoje. O material antes peneirado manualmente, agora é separado por meio de peneirador automatizado, o que acabou introduzindo uma pequena diferença na malha da peneira relativa ao limite granulométrico inferior, que passou de 0,053 para 0,062mm. Já o estabelecimento do volume de material injetado foi baseado em experiências anteriores realizadas no canal de grande porte. Assim a quantidade de 50 litros foi determinada como sendo um volume suficiente para resultar num registro sedimentar significativo no canal, passível de ser posteriormente analisado.

Tabela 6.1: Plano de ensaios da primeira fase.

| Número de Repetições | Tipo de Material | $\rho_{\text{material}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$ | $\rho_{\text{corrente}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$ | Volume de Mistura (l) | Granulometria (mm) | Declividade do Canal (graus) |
|----------------------|------------------|--|--|-----------------------|--------------------|------------------------------|
| 5 | Carvão 207 | 1365 | 1023 | 50 | 0,062-0,297 | 0° |

Tabela 6.2: Ensaio do grupo A da primeira fase de estudos de Ávila (2003).

| Ensaio | Tipo de Material | $\rho_{\text{material}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$ | $\rho_{\text{corrente}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$ | Volume de Mistura (l) | Granulometria (mm) | Declividade do Canal (graus) |
|--------|------------------|--|--|-----------------------|--------------------|------------------------------|
| 11 | Carvão 207 | 1365 | 1022 | 4,2 | 0,053-0,297 | 0° |
| 12 | | | 1023 | | | |
| 13 | | | 1023 | | | |

6.1.2 Metodologia experimental

6.1.2.1 Ensaio

A simulação física das correntes de turbidez foi realizada a partir de uma mistura de água e carvão, conforme metodologia estabelecida por estudos anteriores (Manica, 2002). Os procedimentos experimentais propriamente ditos compreenderam a preparação da mistura de água e carvão (a qual dá origem à corrente de densidade), o preenchimento do canal com fluido ambiente, a admissão da mistura de água e carvão no canal preenchido com fluido ambiente, o período de sedimentação do material, a drenagem do canal, o período de secagem do depósito e, finalmente, a aquisição de dados e a limpeza do canal.

A preparação da mistura de água e carvão foi feita em reservatórios de fibra de vidro localizados à montante do canal. Inicialmente, água em volume adequado foi adicionada ao reservatório através de equipamento de recalque dotado de mangueira flexível. Feito isso, acrescentou-se a quantidade necessária de Carvão 207, para produzir uma mistura de água e carvão com a massa específica desejada. A definição da quantidade de material necessária em função da massa específica desejada foi determinada através da expressão a seguir:

$$\rho_f = \rho_w + (\rho_m - \rho_w) \cdot C_v \quad (6.1)$$

onde:

ρ_f = massa específica da mistura (kg/m³)

ρ_w = massa específica da água (kg/m³)

ρ_m = massa específica do material (kg/m³)

C_v = concentração volumétrica

Cabe salientar que, em função dos volumes de mistura utilizados para cada um dos experimentos serem muito maiores do que os utilizados até então nas instalações de menor porte, houve uma maior dificuldade na manutenção de uma massa específica constante ao

longo do ensaio. Para diminuir a ocorrência de problemas como esse e pelo grande volume de material a ser misturado, optou-se pela instalação de um agitador eletromecânico no interior do reservatório de alimentação do canal. Além disso, também providenciou-se a coleta de amostras da mistura de água e carvão antes e depois da realização dos ensaios para garantir um controle maior da massa específica utilizada nos ensaios. Apesar dessas medidas de controle, observou-se, através da análise das amostras de mistura retiradas, que a manutenção da massa específica desejada constante ao longo do ensaio é uma tarefa mais complicada em instalações de maior porte e que, no entanto, a variação verificada para tais valores permaneceu dentro de limites toleráveis, conforme será apresentado no item 6.1.3.

Terminada a preparação da mistura que irá originar as correntes de turbidez, procedeu-se então ao preenchimento do canal com fluido ambiente. Essa operação foi realizada através do mesmo equipamento de recalque dotado de mangueira flexível. O canal foi então preenchido com água até o limite máximo, sendo a mangueira flexível retirada após o final da operação.

Ao fim da etapa descrita no parágrafo anterior e, estando previamente preparada a mistura de água e carvão, iniciava-se a fase de simulação propriamente dita. Nesse momento, a mistura era injetada no canal, através de tubulação que o conecta aos reservatórios de montante, dando origem à corrente de turbidez. Tanto o volume de mistura injetado quanto a vazão de injeção eram monitorados através do medidor eletromagnético de vazão, descrito no item 5.3, e controlados pelo registro de gaveta localizado antes do medidor. Após atingido o volume de 50 litros de mistura injetada no canal, a alimentação era cortada e iniciava-se então o período de sedimentação do material. A metodologia experimental referente ao período da simulação pode ser melhor visualizada através da figura 6.1.

O período de sedimentação, que durava cerca de 24 horas, era destinado à formação dos depósitos gerados pela corrente de turbidez. Durante esse mesmo intervalo de tempo, fazia-se a lenta drenagem do canal, através de um registro existente na porção de jusante, localizado junto ao fundo do mesmo. Encerrado o processo de sedimentação e drenagem, prosseguia-se ao período de secagem do depósito, o qual, em virtude da grande espessura dos depósitos, era acelerado pela utilização de dois refletores de 1000w de potência cada. Feito isso, prosseguia-se à aquisição de dados, descrita no item 6.1.2.2. a seguir e, posteriormente, à limpeza do canal.

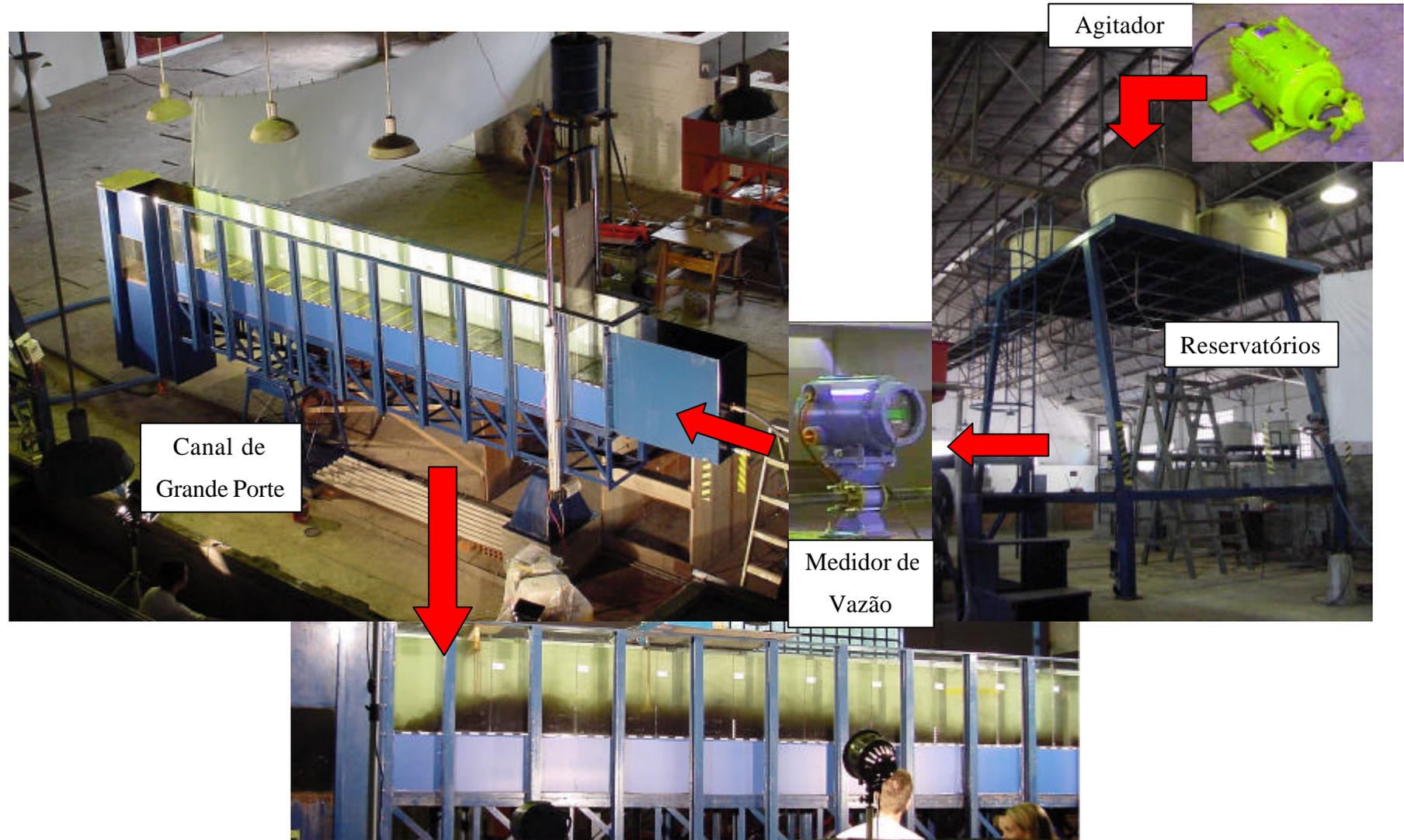


Figura 6.1: Esquema da metodologia experimental referente ao período da simulação. As flechas indicam o sentido do fluxo de mistura que dá origem à corrente desde os reservatórios, passando pelo medidor de vazão e sendo injetada no canal. A imagem abaixo retrata uma corrente de turbidez se desenvolvendo no canal de grande porte.

6.1.2.2 Obtenção e registro de dados

O fenômeno foi registrado com o uso de câmeras de vídeo digitais para posterior tratamento de imagens e avaliação de parâmetros através de uso de softwares específicos. Também foram colhidas amostras da corrente, com a utilização de pipetador, para avaliação de sua massa específica. As estruturas internas da corrente de turbidez foram registradas através de emprego de um ecógrafo médico, conforme metodologia desenvolvida anteriormente (Brito et al., 2002). Os depósitos gerados foram fotografados, tiveram suas feições registradas com utilização de um distanciômetro laser e foram amostrados para posterior análise granulométrica. Dessa forma, foram gerados subsídios para uma avaliação da estrutura interna dos depósitos, bem como, da arquitetura deposicional, tanto em planta como em perfil.

As imagens fornecidas pelas câmeras de vídeo digitais, registradas com zooms de 1 e 2m respectivamente, serviram basicamente a dois propósitos: a medição de velocidades e acelerações, bem como, a determinação dos parâmetros geométricos de altura da cabeça e do corpo da corrente. Em ambos os casos, as imagens foram inicialmente transferidas para o computador, sendo posteriormente discretizadas em quadros, os quais respeitaram intervalos de cerca de 2 segundos, com a utilização do software de edição de imagens Adobe Premiere.

Para a determinação das velocidades e acelerações, os quadros sucessivos, obtidos anteriormente, foram utilizados em outro software de tratamento de imagem, denominado Image Tool. Tal software permitiu a obtenção da distância percorrida pela corrente entre dois quadros sucessivos. De posse dessa informação e do tempo transcorrido entre os quadros, foi possível calcular a velocidade instantânea da corrente de turbidez nesse ponto específico. Da mesma forma, partindo da velocidade e do tempo transcorrido entre os quadros, foi calculada a aceleração instantânea.

Para a determinação dos parâmetros geométricos de altura da cabeça e do corpo da corrente também foi utilizado o software de tratamento de imagens denominado Image Tool. Nesse caso, no entanto, foram utilizados quadros de imagens com zoom de 100cm para a medição da altura da cabeça e com zoom de 200cm para a medição da altura do corpo. No caso da altura da cabeça, uma medida foi realizada a cada quadro, sendo o intervalo entre os quadros de 25cm. Já no caso da altura do corpo, em torno de sete medidas foram realizadas a cada quadro, sendo o intervalo entre os quadros de aproximadamente 200cm. Em ambos os casos, as medidas foram realizadas com a utilização do mesmo recurso de obtenção de distâncias anteriormente empregado para medir os deslocamentos da corrente. Visando a padronização das medidas, arbitrou-se a medição da altura da cabeça no ponto onde se

observa a mudança de declividade da frente da corrente. Já para a altura do corpo, convencionou-se medir a altura do corpo acrescida da espessura da camada de mistura que se forma na região imediatamente acima da corrente, uma vez que, no caso de correntes não-conservativas é uma tarefa difícil delinear precisamente a interface de tais estruturas. A figura 6.2 ilustra os pontos de medição dos parâmetros geométricos.

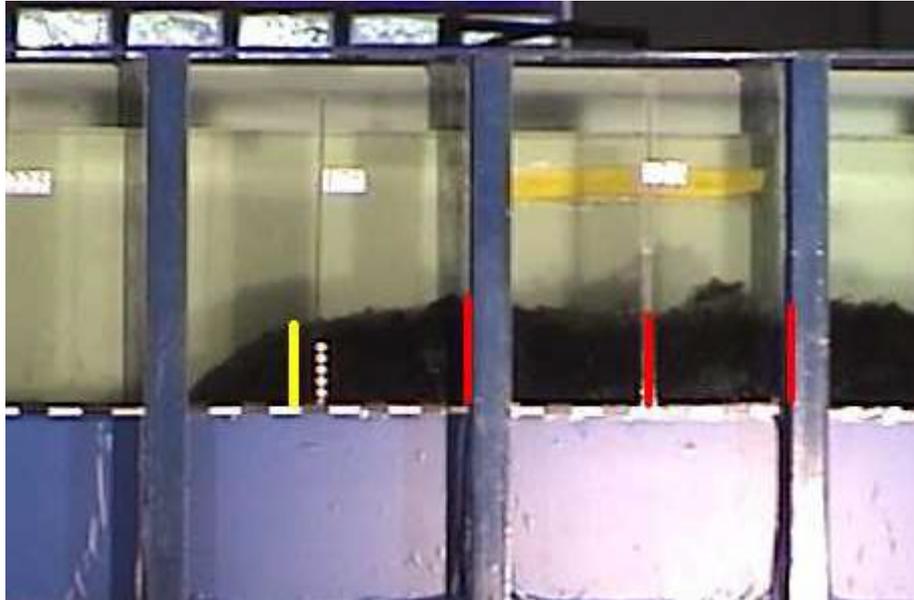


Figura 6.2: Pontos de medição dos parâmetros geométricos. A linha em amarelo indica o ponto onde convencionou-se medir a altura da cabeça da corrente. Já as linhas em vermelho, por sua vez, indicam a região onde arbitrou-se realizar a medição da altura do corpo.

Com o intuito de levantar informações sobre características internas do escoamento, em pontos específicos do canal, também foram utilizados, durante os experimentos, os equipamentos denominados ecógrafo médico e o pipetador. O primeiro, posicionado na seção localizada a 3,75m do difusor, registrou imagens internas da cabeça e do corpo da corrente. Já o pipetador, posicionado na seção localizada a 4,75m do difusor, foi acionado quando da passagem da cabeça da corrente e gerou dados que possibilitam a construção de perfis de concentração do escoamento.

Os depósitos resultantes da passagem dos fluxos de turbidez foram fotografados tanto em planta quanto em perfil, sendo suas feições também registradas com utilização de um distanciômetro laser. As fotografias em planta foram feitas ao longo de todo o comprimento do canal. Já as fotografias de perfil, bem como, a utilização do distanciômetro laser ficaram restritas aos primeiros 1,5m do canal. Esse procedimento foi adotado, uma vez que, desse ponto em diante, a espessura irrisória dos depósitos impediu a aquisição de dados de

qualidade satisfatória. Finalmente, os dados adquiridos pelo distanciômetro, quando inseridos no computador e tratados com o software adequado, no caso o Surfer 8.0, deram origem a uma representação tridimensional do depósito, a qual pode fornecer dados de geometria e de formas de leito.

Por fim, encerrada a aquisição de dados descrita anteriormente, procedeu-se à coleta de amostras dos depósitos sedimentares gerados para posterior análise granulométrica. Novamente, baseando-se em experimentos semelhantes realizados por Ávila (2003), foi estabelecida uma metodologia de coleta de amostras. A exemplo do que foi realizado no canal de pequeno porte, os depósitos gerados por correntes simples foram, quando possível, coletados em dois horizontes de amostragem, denominados topo e base. No canal de grande porte, isso foi viável ao longo do primeiro metro de comprimento, sendo que, desse ponto em diante, a amostragem foi realizada em estrato único. A coleta, no sentido longitudinal do canal, foi realizada de 5 em 5cm nos 10 primeiros centímetros de comprimento, de 10 em 10cm dos 10 centímetros até o término do primeiro metro, de 25 em 25cm no segundo e terceiro metros e, finalmente, de 50 em 50cm do terceiro metro em diante. A figura 6.3 ilustra, em planta e em perfil, a metodologia de amostragem empregada nessa primeira fase.

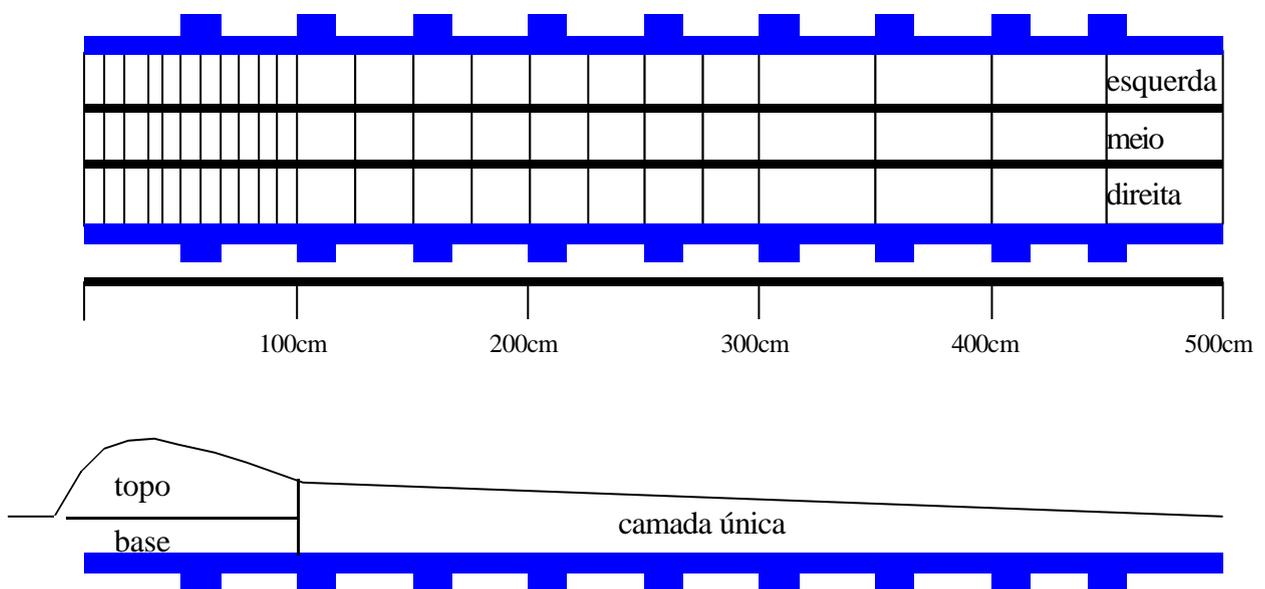


Figura 6.3: Esquema da metodologia de amostragem empregada na primeira fase em planta (acima) e perfil (abaixo).

Além disso, a seção transversal do canal foi dividida em três segmentos de amostragem distintos, denominados esquerda, centro e direita, de forma a gerar subsídios para

a avaliação de um possível efeito das paredes sobre o escoamento e, conseqüentemente, sobre os padrões deposicionais gerados. Assim, o número de amostras, que no sentido longitudinal já totalizava 34 pontos de coleta, foi multiplicado por três, contabilizando um total de 102 amostras por ensaio de corrente simples. Dessa forma, foram gerados dados para uma avaliação da estrutura interna dos depósitos, bem como, da arquitetura deposicional.

6.1.3 Resultados

De acordo com o que foi apresentado no item 6.1.1, referente ao plano de ensaios, foram inicialmente realizados cinco ensaios de correntes simples. Suas características bem como, alguns dos resultados obtidos, estão descritos na tabela 6.3. A partir da observação dos depósitos sedimentares gerados pelos dois primeiros ensaios, no entanto, considerou-se necessária a adoção de algumas pequenas modificações na estrutura do canal. Na realidade, houve uma preocupação em tentar melhorar e uniformizar a distribuição do fluxo de material injetado no canal, realizando uma modificação nas condições do difusor.



Figura 6.4: Imagem em planta de depósito gerado no ensaio 1 com emprego de difusor de 6 orifícios.

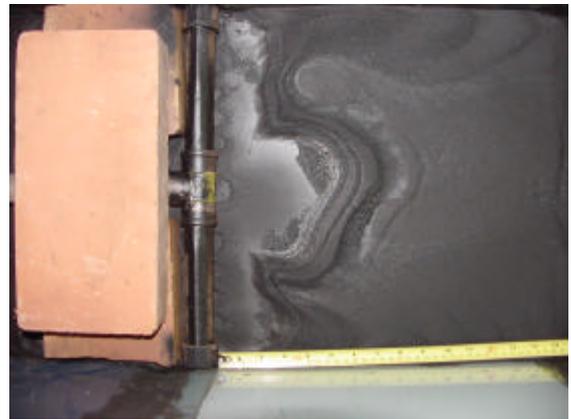


Figura 6.5: Imagem em planta de depósito gerado no ensaio 3 com emprego de difusor de 10 orifícios.

Inicialmente contando com 6 orifícios, o difusor foi modificado de maneira que passou a possuir 10 orifícios. Assim, a intensidade do jato através de cada orifício foi diminuída e tornou-se mais uniforme. Isso pode ser concluído a partir das imagens que ilustram os depósitos resultantes de simulações feitas com o difusor nas duas condições descritas. Pode-se observar na figura 6.5 (difusor com 10 orifícios) que as feições do depósito gerado apresentam-se mais uniformes do que na figura 6.4 (difusor com 6 orifícios).

Dessa forma, em virtude das modificações implantadas na estrutura do canal, os dois primeiros ensaios realizados foram considerados preliminares. Após as alterações, foi realizado um terceiro ensaio e, uma vez consideradas satisfatórias as condições de geração da corrente e de seus respectivos depósitos, deu-se início aos estudos da primeira fase propriamente ditos. Assim foram realizados ainda mais dois ensaios, nas mesmas condições do terceiro, totalizando 3 ensaios referentes à primeira fase de estudos.

Tabela 6.3: Ensaios realizados na primeira fase.

| Número do Ensaio | Tipo de Material | Difusor (nº de orifícios) | $\rho_{\text{pretendido}}$ (kg/m ³) | ρ_{obtido} (kg/m ³) | Volume de Mistura (l) | Granulometria (mm) | Declividade do Canal (graus) |
|------------------|------------------|---------------------------|---|---|-----------------------|--------------------|------------------------------|
| 1 | Carvão 207 | 6 | 1023 | - | 50 | 0,062-0,297 | 0° |
| 2 | | | | 1014,98 | | | |
| 3 | | 10 | | 1009,70 | | | |
| 4 | | | | 1015,48 | | | |
| 5 | | | | 1015,80 | | | |

A amostragem dos depósitos gerados por cada uma das cinco correntes, descritas na tabela anterior, foi realizada de acordo com a metodologia descrita no item 6.1.2.2 Apesar disso, após a realização da análise granulométrica das cerca de 408 amostras geradas pelos quatro primeiros ensaios, constatou-se que o tempo despendido, mesmo levando-se em conta a utilização do analisador de partículas a laser, foi demasiado extenso. Assim, por questões de praticidade e de racionalização do tempo de análise das amostras, considerou-se a possibilidade de reduzir o número de amostras submetidas à análise granulométrica.

Como primeira hipótese para essa redução, considerou-se realizar a análise somente do segmento de amostras referente ao centro da seção transversal do canal. Visando investigar e validar essa metodologia, foi realizado o procedimento descrito a seguir. De posse dos dados granulométricos completos, referentes aos ensaios 3 e 4, foi calculada a média dos D_{50} dos depósitos gerados ao longo do canal para cada uma das seções transversais (esquerda, centro e direita). Esses dados foram então plotados, resultando na figura 6.6.

Da observação da referida figura, pode-se inferir que a variação dos valores de D_{50} , para cada uma das três seções transversais representadas, é mais significativa principalmente ao longo do primeiro metro do canal. Esse fato pode ser justificado pela hipótese de que nesse trecho ainda há uma influência marcante do jato, que se forma na saída do difusor, sobre o escoamento. Assim, somente a partir do final do primeiro metro de comprimento do canal, é

que poderia considerar-se que a corrente de turbidez está completamente desenvolvida. Essa idéia se reflete nos depósitos, os quais desse ponto em diante, conforme ilustrado na figura 6.6, tornam-se granulometricamente muito semelhantes.

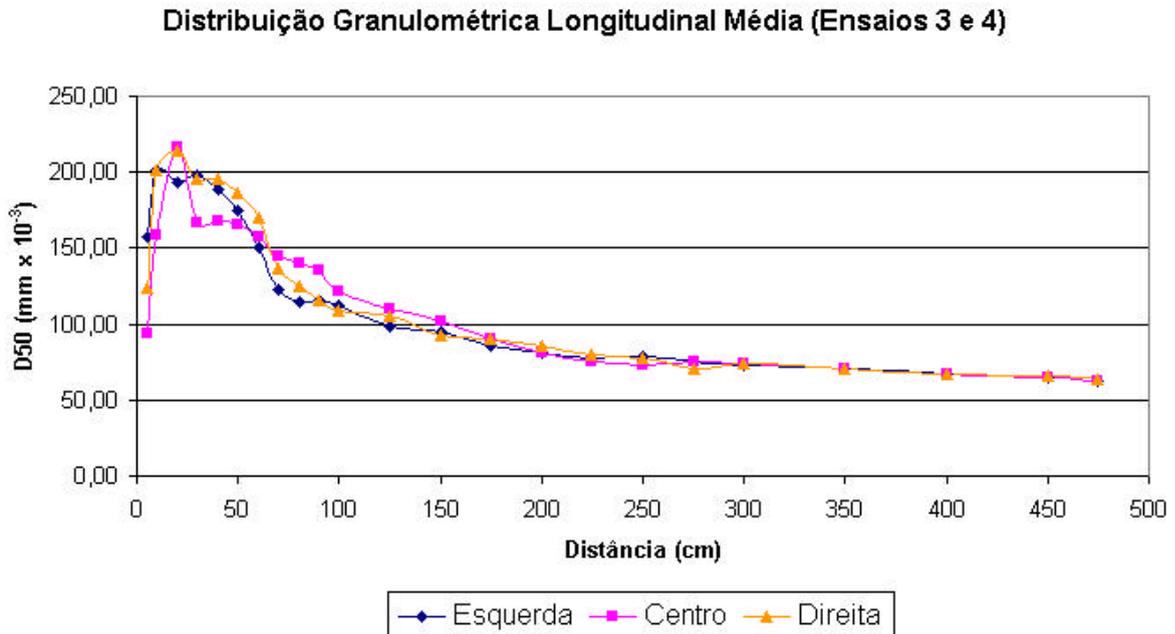


Figura 6.6: Gráfico da distribuição granulométrica longitudinal média dos ensaios 3 e 4.

Feitas as considerações anteriores, pareceu razoável considerar que o perfil granulométrico longitudinal, gerado pela passagem das correntes de turbidez, poderia ser representado pelas amostras recolhidas ao longo de qualquer uma das três seções transversais em que o canal foi dividido. Dessa maneira, estabeleceu-se que a análise seria feita somente para a seção central, aproximadamente de 30 em 30cm para o primeiro metro do canal, de 50 em 50cm para o segundo e terceiro metros e de 100 em 100cm do terceiro metro em diante. Esse procedimento conduziu a um total de 14 amostras a serem analisadas por ensaio. Apesar disso, o número de amostras coletadas permaneceu inalterado. Esse procedimento foi adotado visando garantir subsídios para possíveis análises granulométricas complementares a serem realizadas caso necessário.

A tabela 6.4 sintetiza outros resultados obtidos na primeira fase. São apresentados dados hidrodinâmicos e geométricos do escoamento, bem como, características da mistura injetada e dos depósitos formados. Ao final da tabela, a coluna denominada “Comp. zona

Tabela 6.4: Resultados da primeira fase.

| Primeira Fase (0,0 graus) | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-------------------|--------|-------------------|-------|--|--------------------|---------------------|---------------------|----------|---|--------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|
| Ensaio | Velocidade (cm/s) | | Altura Média (cm) | | Mistura Injetada | | Vazão Média (l/min) | Froude Densimétrico | Reynolds | ρ_{material} (kg/m ³) | Comp. zona deposição (%) | | D ₅₀ médio por zona (mm) | |
| | Média | Desvio | Cabeça | Corpo | $\rho_{\text{médio}}$ (kg/m ³) | Concentração (g/l) | | | | | 1 ^a | 2 ^a | 1 ^a | 2 ^a |
| 01 | 3,36 | 1,87 | 13,74 | 22,30 | 1014,00 | 63,06 | * | 0,22 | 7009,79 | 1365 | 18 | 82 | 0,1532 | 0,7790 |
| 02 | 3,87 | 4,49 | 13,70 | 19,96 | 1014,98 | 66,75 | 18,00 | 0,25 | 8038,13 | | | | | |
| 03 | 3,32 | 1,01 | 11,35 | 13,78 | 1009,70 | 47,09 | 17,50 | 0,28 | 5720,73 | | | | | |
| 04 | 3,34 | 1,35 | 10,70 | 17,84 | 1015,48 | 68,52 | 18,00 | 0,24 | 5433,00 | | | | | |
| 05 | 3,42 | 1,08 | 11,27 | 16,57 | 1015,80 | 69,75 | 18,00 | 0,24 | 5849,78 | | | | | |
| Média | 3,36 | 1,15 | 11,11 | 16,06 | 1013,99 | 63,06 | 17,83 | 0,25 | 5667,84 | 1365 | 18 | 82 | 0,1532 | 0,7790 |

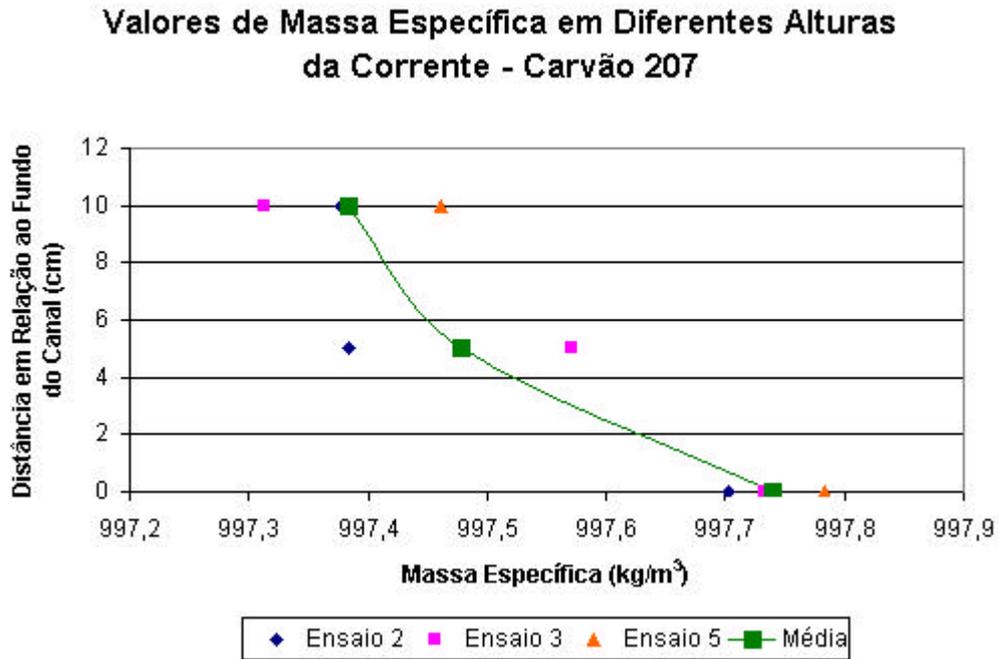


Figura 6.7: Valores da massa específica em diferentes alturas das correntes da primeira fase.

deposição” corresponde ao comprimento, em porcentagem relativa ao comprimento total do canal, das duas zonas de deposição formadas. A cada uma dessas zonas deposicionais podem ser associadas uma ou mais classes de tamanho de grão predominante, como será demonstrado posteriormente na seção de análise de resultados.

Quanto ao sucesso do processo de transposição da metodologia de simulação física de correntes de turbidez, o qual consistiu na adaptação das instalações experimentais e da metodologia previamente existente, do canal de pequeno porte para o canal de grande porte, de um ponto de vista qualitativo, pode-se considerar que o objetivo foi atingido. Essa afirmação pode ser feita com base no fato de que as correntes foram simuladas de maneira satisfatória, conforme indica a distribuição de valores de massa específica na figura 6.7. De acordo com tais dados, obtidos a partir do emprego do pipetador, o perfil vertical de massa específica das correntes cresce em direção à base do escoamento, o que caracteriza um perfil clássico de concentrações para o interior de uma corrente de turbidez.

Além disso, o sucesso do processo de transposição também é indicado pelo fato de que, além das correntes terem sido simuladas de maneira satisfatória, as mesmas também deram origem a depósitos sedimentares. Estes apresentaram uma configuração semelhante à observada no canal de pequeno porte, isto é, depósitos mais espessos na região proximal.

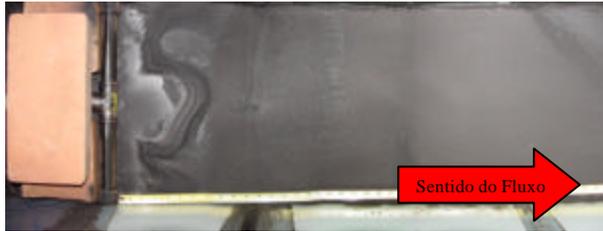


Figura 6.8: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 3.

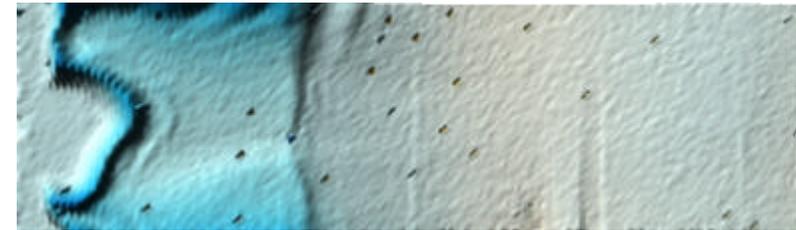


Figura 6.11: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 3 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser.



Figura 6.9: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 4.

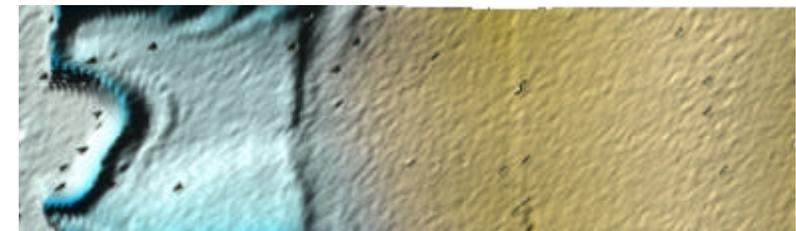


Figura 6.12: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 4 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser.



Figura 6.10: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 5.

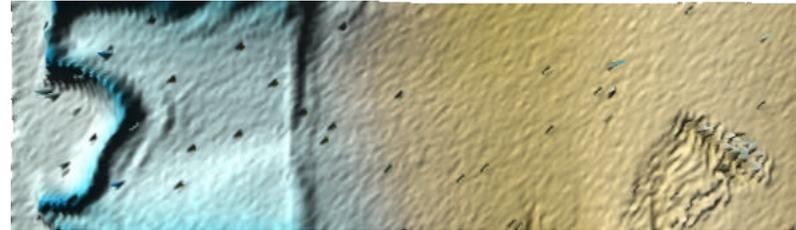


Figura 6.13: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 5 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser.

As figuras 6.8 a 6.13 representam as superfícies dos depósitos gerados nos ensaios 3, 4 e 5 na forma de fotografias e, para fins de comparação, de imagens provenientes do tratamento dos dados adquiridos pelo distanciômetro laser. O comprimento da região representada pelo distanciômetro restringe-se aos cerca de 1,1m iniciais do canal e varia em torno desse valor no caso das fotografias.

Mesmo que o processo de transposição tenha sido considerado satisfatório algumas dificuldades foram enfrentadas nas simulações e na coleta de dados. Durante o processo de simulação houve dificuldades na manutenção de uma massa específica constante para a mistura devido ao grande volume de material a ser empregado. Também houve dificuldade para atingir o valor da massa específica desejada para a mistura, conforme pode-se observar comparando as colunas que registram os valores da massa específica pretendida e obtida para os ensaios na tabela 6.3. A visualização do perfil longitudinal dos depósitos também foi prejudicada em função do volume de material depositado exigir muito tempo para uma completa secagem. Apesar desses aspectos negativos apresentados pelas simulações e do fato de que, aparentemente, a transposição foi realizada com sucesso, somente uma análise mais profunda dos dados colhidos a partir dos depósitos permitirá avaliar o grau de semelhança obtido com a mesma. Tal análise será oportunamente abordada na seção de análise de resultados.

6.2 ENSAIOS SEGUNDA FASE: CORRENTES CONSECUTIVAS

Finalizada a primeira fase de estudos e, conseqüentemente, transposta a metodologia de simulação física de correntes de densidade para o canal de grande porte, a qual consistiu na adaptação das instalações experimentais e da metodologia previamente existente, procedeu-se à realização dos ensaios da segunda fase. Na presente etapa, o objetivo principal foi o de realizar a simulação de correntes consecutivas, novamente a exemplo do que já havia sido feito para o canal de pequeno porte por Ávila (2003).

Correntes consecutivas é a denominação utilizada no NECOD para descrever as simulações de fluxos gravitacionais onde duas ou mais correntes são lançadas, em intervalos de tempo regulares, antes que o material transportado pelos primeiros fluxos tenha sido completamente sedimentado. A metodologia a ser empregada para tal fim é muito semelhante àquela que foi utilizada para as correntes simples. Neste caso, no entanto, a alimentação da mistura utilizada para a simulação é iniciada e mantida até que se atinja o volume desejado, sendo então interrompida e posteriormente reiniciada, dando origem a diversos fluxos

gravitacionais sucessivos. Esse processo é repetido de acordo com a quantidade de correntes sucessivas que se deseja gerar.

Como resultado, após o desenvolvimento das correntes e posterior deposição do material sedimentar transportado, obtém-se um registro deposicional composto de um número de camadas idêntico ao número de fluxos simulados. Assim são gerados depósitos turbidíticos, semelhantes aos depósitos encontrados na natureza, resultantes do empilhamento de diversas camadas de sedimento, os quais também são fruto de sucessivas correntes de turbidez. Devido a esse fato, o sucesso desse tipo de simulação em laboratório é imprescindível para a viabilização de estudos, em escala reduzida, de geração de reservatórios análogos.

6.2.1 Plano de ensaios

Sendo o objetivo principal da presente etapa o de realizar a simulação de correntes consecutivas, novamente a exemplo do que já havia sido feito para a primeira fase de estudos, os ensaios realizados foram baseados na metodologia desenvolvida por Ávila (2003), o qual abordou a simulação de correntes consecutivas no canal de pequeno porte. Assim seus resultados foram adotados como um parâmetro de comparação para os dados gerados pelas correntes consecutivas no canal de grande porte.

Objetivando-se manter a máxima semelhança possível entre os ensaios de Ávila (2003) e os ensaios do presente estudo, buscou-se novamente, na medida do possível, adaptar as características dos experimentos do canal de pequeno porte para o canal de grande porte. Foram previstos cinco ensaios de correntes consecutivas, compostos de quatro fluxos cada um, conforme descrito na tabela 6.5. Tais ensaios foram concebidos a partir das características dos ensaios realizados por Ávila (2003), em sua terceira fase, sumarizada na tabela 6.6.

Comparando entre si as características dos ensaios descritos em cada uma das tabelas apresentadas, observam-se diferenças com relação à granulometria empregada, quanto ao volume de mistura injetado e quanto ao tipo de material utilizado. A diferença na faixa granulométrica utilizada é resultante de uma simplificação introduzida nessa etapa do estudo. Em virtude da grande quantidade de material utilizada em cada ensaio, o peneiramento prévio do carvão foi dispensado por questões de economia de tempo. Assim a faixa granulométrica utilizada passou a coincidir com a faixa predominante apresentada pelo Carvão 205 na origem, a qual fica compreendida entre 0,062-0,177mm. Já com relação ao volume injetado,

como ocorreu com os ensaios da primeira fase, o mesmo foi estabelecido com base na experiência adquirida em estudos anteriores.

Tabela 6.5: Plano de ensaios da segunda fase.

| Número de Repetições | Número de Correntes por Ensaio | Tipo de Material | $\rho_{\text{material}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$ | $\rho_{\text{corrente}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$ | Volume de Mistura por Corrente (l) | Granulometria (mm) | Declividade do Canal (graus) |
|----------------------|--------------------------------|------------------|--|--|------------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| 5 | 4 | Carvão 205 | 1190 | 1023 | 50 | Extensa (0,062-0,177) | 0° |

Tabela 6.6: Ensaios da terceira fase de estudos de Ávila (2003).

| Ensaios | Número de Correntes por Ensaio | Tipo de Material | $\rho_{\text{material}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$ | $\rho_{\text{corrente}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$ | Volume de Mistura por Corrente (l) | Granulometria (mm) | Declividade do Canal (graus) |
|---------|--------------------------------|------------------|--|--|------------------------------------|--------------------|------------------------------|
| 20 | 4 | Carvão 207 | 1365 | 1023 | 4,2 | 0,053-0,297 | 0° |
| 22 | | | | | | | |

Já a diferença relativa ao tipo de material utilizado é proveniente do fato de que o Carvão 207 teve sua produção descontinuada pelo fabricante (Empresa Rio Deserto S.A. de Criciúma/SC). Em vista desse fato, foi adotado, para dar continuidade aos ensaios, o Carvão 205, o qual já foi utilizado em outros estudos realizados no NECOD. Tal material foi empregado inclusive por Ávila (2003) na primeira fase de seus estudos, onde o mesmo concluiu que os depósitos gerados por correntes com carvões dos tipos 205 e 207 apresentaram características bastante semelhantes.

6.2.2 Metodologia

6.2.2.1 Ensaios

A simulação física das correntes de turbidez consecutivas foi realizada de maneira praticamente análoga aos experimentos conduzidos durante a primeira fase, cuja metodologia foi descrita no item 6.1.2.1 Os procedimentos experimentais compreenderam novamente a preparação da mistura de água e carvão, o preenchimento do canal com fluido ambiente, a admissão da mistura de água e carvão no canal, o período de sedimentação do material, a drenagem do canal, o período de secagem do depósito e, por último, a aquisição de dados e a limpeza do canal.

Conforme abordado no item 6.2.1, o Carvão 207 foi substituído pelo Carvão 205 pelo motivo de que o primeiro deixou de ser produzido. Além disso, outra diferença com relação à metodologia empregada durante a primeira fase de estudos, foi o fato de dispensar-se o peneiramento, o qual foi anteriormente utilizado para restringir a faixa granulométrica do material utilizado na preparação da mistura. De acordo com o que já foi explanado no item anterior, essa medida poupou o enorme tempo que seria despendido no peneiramento do material, uma vez que, nesta fase de estudos o número de quatro correntes por ensaio implicou no emprego de um grande volume de carvão.

Outra diferença com relação aos ensaios da primeira fase diz respeito ao número de correntes injetadas ao longo de cada experimento. O procedimento de injeção da mistura propriamente dito é o mesmo utilizado anteriormente. Nesse caso, no entanto, após atingido o volume de 50 litros de mistura, a alimentação era cortada e iniciada novamente após um intervalo de tempo de cerca de um minuto, conforme procedimento adotado no pequeno canal. Essa operação foi repetida quatro vezes durante cada ensaio, dando origem assim a quatro fluxos. Ao término da quarta corrente, iniciava-se novamente o período de sedimentação do material, a drenagem do canal, o período de secagem do depósito, a aquisição de dados e, finalmente, a limpeza do canal.

6.2.2.2 Obtenção e registro de dados

A exemplo da metodologia experimental, a metodologia para avaliação de resultados também foi muito semelhante à empregada durante a primeira fase de estudos. Novamente o fenômeno foi registrado através de câmeras de vídeo digitais para posterior tratamento de imagens e avaliação de parâmetros com uso de softwares específicos. Também foram colhidas amostras da corrente, com a utilização de pipetador, para avaliação de sua massa específica. As estruturas internas da corrente de turbidez foram registradas através de emprego de um ecógrafo médico. Os depósitos gerados foram outra vez fotografados, tiveram suas feições registradas com utilização de um distanciômetro laser e foram amostrados para posterior análise granulométrica.

Quanto ao tratamento dos dados adquiridos, procedeu-se de maneira semelhante a que foi descrita no item 6.1.2.2 para a grande maioria dos parâmetros que foram avaliados. As características hidrodinâmicas de velocidade e aceleração foram obtidas de maneira idêntica ao procedimento anterior, sendo que, no entanto, por questões de dificuldades de visualização, as medições ficaram restritas somente ao primeiro dos quatro fluxos simulados em cada ensaio. O mesmo ocorrendo com relação aos parâmetros geométricos de altura da cabeça e do

corpo das correntes. Isso ocorreu porque, uma vez liberado o primeiro fluxo, o fluido ambiente tornou-se turvo demais para permitir uma boa visualização das demais correntes.

O emprego do pipetador, do ultrassom, a aquisição de fotografias e a utilização do distanciômetro laser também respeitaram as mesmas condições descritas anteriormente. O pipetador e o ultrassom foram posicionados exatamente nas mesmas seções, sendo que o primeiro só coletou amostras do primeiro fluxo simulado. Já a aquisição de fotografias de perfil, bem como, a utilização do distanciômetro laser ficaram novamente restritas ao primeiro 1,5m de comprimento do canal.

As maiores modificações operadas na metodologia para avaliação dos resultados ficaram por conta da coleta de amostras dos depósitos sedimentares gerados. Essa alteração foi introduzida em função da maior espessura dos depósitos na região proximal do canal, em virtude da injeção de um volume de material quatro vezes maior em cada ensaio. Assim, baseando-se nos estudos de Ávila (2003), estabeleceu-se uma nova metodologia de amostragem, conforme descrito no próximo parágrafo, a qual permitiu uma maior discretização dos depósitos.

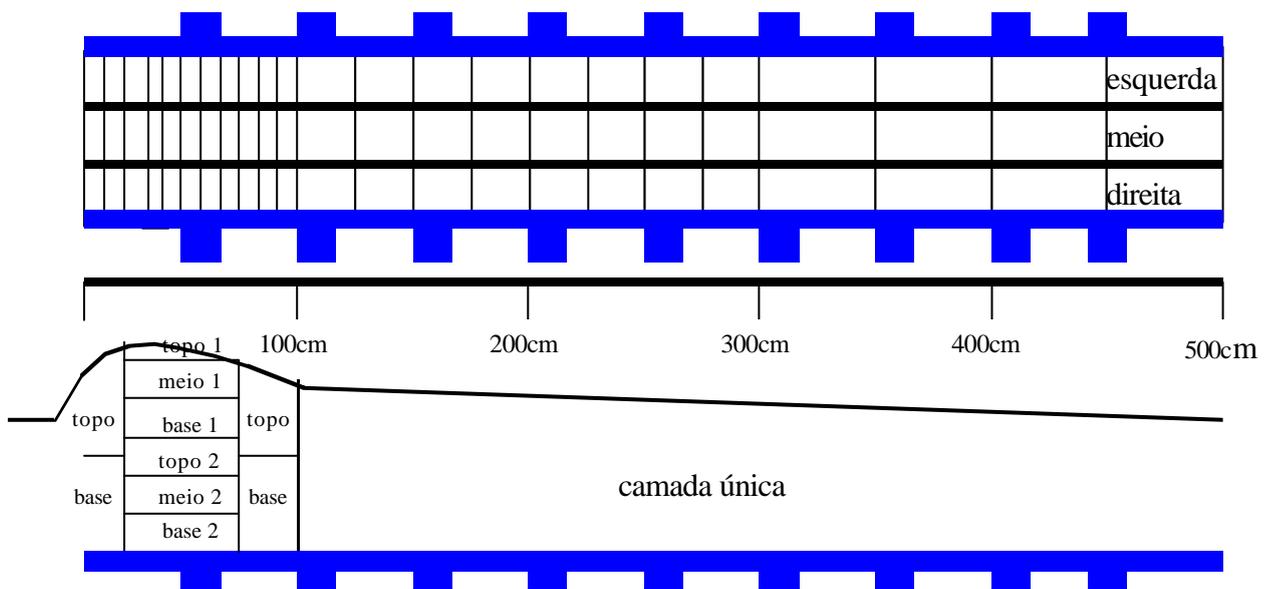


Figura 6.14: Esquema da metodologia de amostragem empregada na segunda fase em planta (acima) e perfil (abaixo).

A coleta foi novamente realizada respeitando o espaçamento longitudinal descrito no item 6.1.2.2. Da mesma forma, a seção transversal foi segmentada em três trechos denominados Esquerda, Centro e Direita. A modificação ocorreu na amostragem das seções

compreendidas entre 10 e 70cm de comprimento do canal. Nesses locais, ao invés dos dois horizontes de coleta utilizados anteriormente, foi realizada uma coleta que totalizou seis camadas distintas. As camadas denominadas Topo 1, Meio 1 e Base 1 foram amostradas na metade superior dos depósitos gerados. Já as camadas denominadas Topo 2, Meio 2 e Base 2 foram amostradas na metade inferior dos depósitos gerados. Essa modificação na metodologia de amostragem pode ser melhor visualizada na figura 6.14.

Feitas essas alterações na metodologia de amostragem, o número de amostras coletadas passou de 102, no caso de correntes simples, para cerca de 174 no caso de correntes consecutivas. Deve-se destacar que, para as seções localizadas antes dos 10 e a partir dos 70cm de comprimento do canal, não houve modificações quanto à coleta de amostras em relação aos ensaios da primeira fase.

6.2.3 Resultados

Nesta etapa dos experimentos, conforme o plano de ensaios apresentado, seriam realizados cinco ensaios de correntes consecutivas. Apesar disso, dado o interesse no estudo de seqüências deposicionais turbidíticas, por motivos já discutidos anteriormente, optou-se pela realização de seis ensaios, sendo cada um composto de quatro correntes. Suas características bem como, alguns dos resultados obtidos, estão descritos na tabela 6.7.

Tabela 6.7: Ensaios realizados na segunda fase.

| Número do Ensaio | Número de Correntes | Tipo de Material | ρ pretendido (kg/m^3) | ρ obtido (kg/m^3) | Volume de Mistura (l) | Granulometria (mm) | Declividade do Canal (graus) |
|------------------|---------------------|------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------------|
| 6 | 4 | Carvão 205 | 1023 | 1023,40 | 50 | Extensa (0,062-0,177) | 0° |
| 7 | | | | 1014,09 | | | |
| 8 | | | | 1029,25 | | | |
| 9 | | | | 1035,71 | | | |
| 10 | | | | 1024,72 | | | |
| 11 | | | | 1027,75 | | | |

De acordo com a metodologia de amostragem, descrita em detalhes no item anterior, cada ensaio com quatro correntes consecutivas gerou um total de cerca de 174 amostras. A exemplo do que aconteceu anteriormente, esse número foi considerado excessivo quando se levou em conta a hipótese de realização de uma análise granulométrica para cada uma das

Tabela 6.8: Resultados da segunda fase.

| Segunda Fase (0,0 graus) | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------------------|--------|-------------------|-------|--|--------------------|---------------------|---------------------|----------|---|--------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|
| Ensaio | Velocidade (cm/s) | | Altura Média (cm) | | Mistura Injetada | | Vazão Média (l/min) | Froude Densimétrico | Reynolds | ρ_{material} (kg/m ³) | Comp. zona deposição (%) | | D ₅₀ médio por zona (mm) | |
| | Média | Desvio | Cabeça | Corpo | $\rho_{\text{médio}}$ (kg/m ³) | Concentraçãc (g/l) | | | | | 1 ^a | 2 ^a | 1 ^a | 2 ^a |
| 06 | 4,19 | 1,50 | 7,28 | 9,09 | 1023,40 | 162,78 | 15,50 | 0,31 | 4634,16 | 1190 | 12 | 88 | 0,9425 | 0,3876 |
| 07 | 4,82 | 1,53 | 7,09 | 11,07 | 1014,09 | 105,37 | 18,00 | 0,44 | 5185,03 | | | | | |
| 08 | 6,63 | 2,19 | 6,57 | 10,08 | 1029,25 | 198,86 | 18,00 | 0,46 | 6603,82 | | | | | |
| 09 | 5,21 | 2,05 | 6,14 | 8,26 | 1035,71 | 238,68 | 17,50 | 0,34 | 4858,47 | | | | | |
| 10 | 5,02 | 1,67 | 6,58 | 9,79 | 1024,72 | 170,92 | 18,50 | 0,37 | 5007,31 | | | | | |
| 11 | 3,70 | 1,95 | 5,06 | 8,12 | 1027,75 | 189,60 | 9,50 | 0,30 | 2843,66 | | | | | |
| Média | 4,93 | 1,81 | 6,45 | 9,40 | 1025,82 | 177,70 | 16,17 | 0,37 | 4855,41 | 1190 | 12 | 88 | 0,9425 | 0,3876 |

amostras. Assim, além de adotar-se a medida, já empregada durante a primeira fase, de aumentar o espaçamento longitudinal entre as amostras analisadas, investigou-se novamente a viabilidade de analisar somente o segmento de amostras referente ao centro da seção transversal do canal. Para validar essa hipótese, empregou-se um procedimento semelhante ao utilizado durante a primeira fase. De posse dos dados granulométricos completos, referentes aos ensaios 6 e 10, foi calculada a média dos D_{50} dos depósitos gerados ao longo do canal para cada uma das seções transversais (esquerda, centro e direita). Esses dados foram então plotados, resultando na figura 6.15.

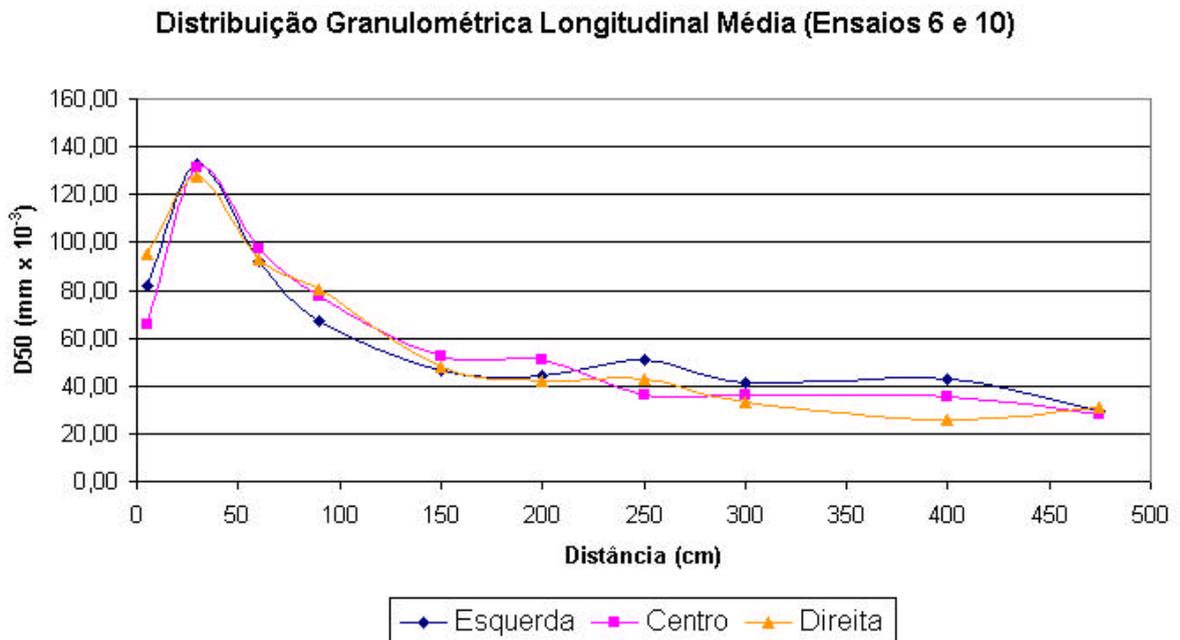


Figura 6.15: Gráfico da distribuição granulométrica longitudinal média considerando os resultados dos ensaios 6 e 10.

Da observação da figura 6.15, pode-se inferir que a variação dos valores de D_{50} , para cada uma das três seções transversais representadas, ao contrário do que ocorreu durante a primeira fase, não foi tão significativa ao longo do primeiro metro do canal. Esse fato poderia, a primeira vista, contrariar a hipótese de influência do jato na saída do difusor sobre o escoamento ao longo do primeiro metro do canal. Apesar disso deve-se levar em conta que o grande volume de material depositado nesse trecho do canal, em função da injeção de quatro fluxos consecutivos, poderia estar mascarando a ação do jato, mais pronunciada para os eventos de correntes simples. Essa hipótese se reflete nos depósitos avaliados ao longo de cada uma das seções transversais, os quais, conforme ilustrado pela figura 6.15, aparentam razoável semelhança granulométrica entre si.

Posto isso, considerou-se novamente as amostras obtidas ao longo da seção transversal central do canal como representativas para a avaliação dos registros deposicionais gerados pelos fluxos de turbidez ensaiados. Essa medida, aliada ao aumento do espaçamento longitudinal entre as amostras, reduziu o número de amostras analisadas de 174 para 22. Cabe salientar, no entanto, que, mais uma vez a quantidade de amostras coletadas permaneceu inalterada.

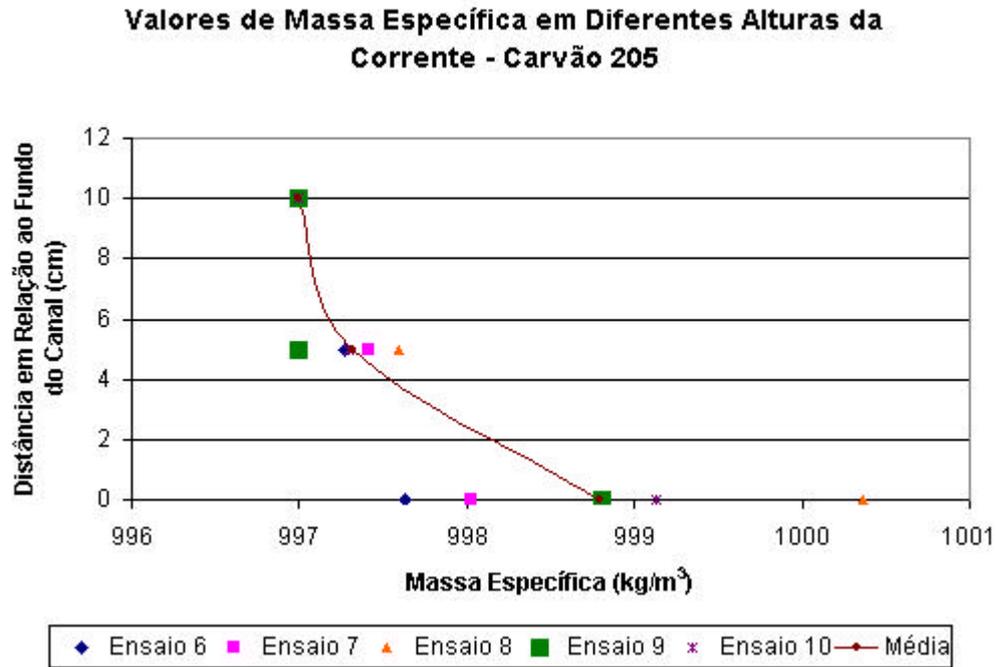


Figura 6.16: Valores da massa específica em diferentes alturas das correntes da segunda fase.

A tabela 6.8 sintetiza outros resultados obtidos na segunda fase. São apresentados dados hidrodinâmicos e geométricos do escoamento, bem como, características da mistura injetada e dos depósitos formados. De acordo com os dados da tabela conclui-se que, na presente fase de estudos, ocorreu uma diminuição do comprimento relativo das zonas deposicionais. Por outro lado, atingiu-se valores de massa específica injetada, $1025,82\text{kg/m}^3$ em média, mais próximos do valor desejado que era de 1023 kg/m^3 .

As características das correntes geradas e dos depósitos formados nesta fase de estudos indicam, numa primeira análise, que o processo de simulação de correntes consecutivas foi executado com êxito. As correntes foram novamente simuladas de maneira satisfatória, conforme indica a distribuição de valores de massa específica na figura 6.16, evidenciando um perfil de concentrações crescente em direção à base do escoamento. Cabe salientar que,

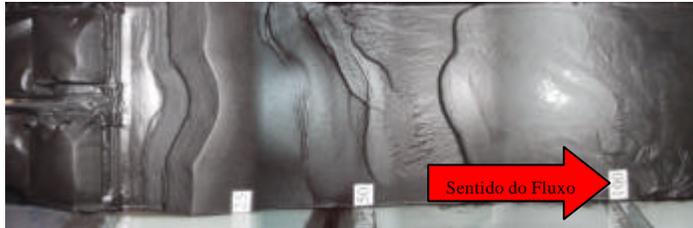


Figura 6.17: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 6.

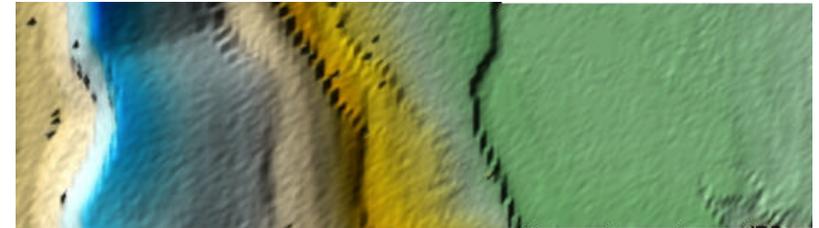


Figura 6.20: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 6 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser.



Figura 6.18: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 7.



Figura 6.21: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 7 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser.

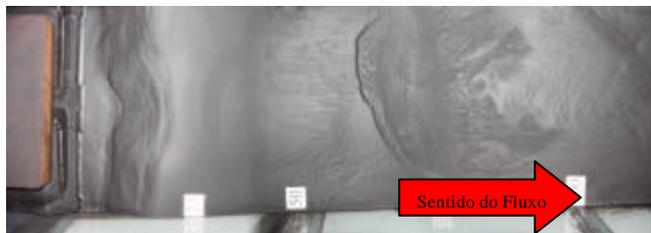


Figura 6.19: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 8.



Figura 6.22: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 8 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser.



Figura 6.23: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 9.

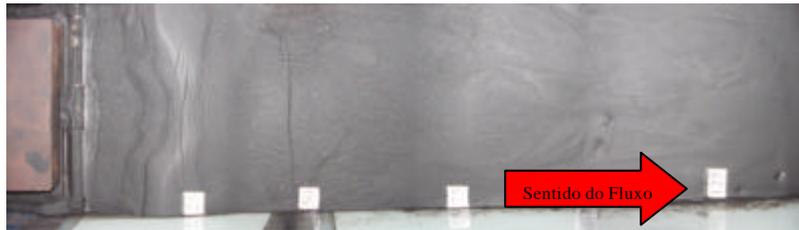


Figura 6.24: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 10.



Figura 6.25: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 11

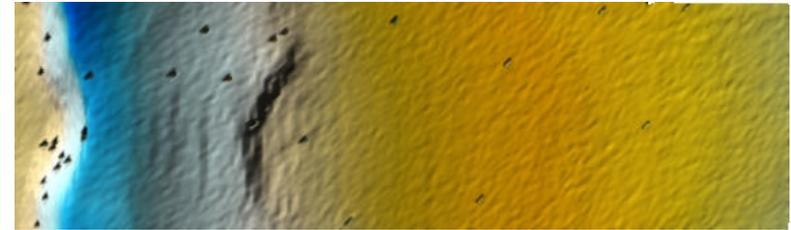


Figura 6.26: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 9 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser.



Figura 6.27: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 10 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser.

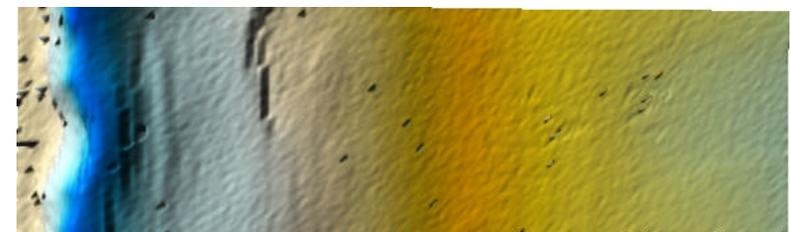


Figura 6.28: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 11 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser.

durante essa fase de estudos, foi empregado Carvão 205, o qual resultou numa altura de corrente menor do que as obtidas durante a primeira fase. Esse comportamento pode ser observado nos valores de massa específica tomados na altura de 10cm, conforme ilustra a figura 6.16, os quais apresentaram sempre o valor de 997kg/m^3 que equivale à massa específica da água pura.

Da mesma forma que as correntes, os depósitos sedimentares originados durante a segunda fase também foram adequados. Estes, a exemplo dos depósitos gerados na primeira fase, apresentaram maior espessura na região proximal, sendo que dessa vez tal espessura foi bem mais significativa que durante a primeira fase em virtude da simulação de quatro fluxos por ensaio. As figuras 6.17 a 6.28 representam as superfícies dos depósitos gerados nos ensaios de 6 a 11 na forma de fotografias e de imagens provenientes do tratamento dos dados adquiridos pelo distanciômetro laser. Novamente, o comprimento da região representada pelo distanciômetro restringe-se aos cerca de 1,1m iniciais do canal e varia em torno desse valor no caso das fotografias.

Nesta fase, novamente foram enfrentadas dificuldades nas simulações e na coleta de dados. Como antes, houve problemas na manutenção de uma massa específica constante para a mistura. Apesar disso, nesta oportunidade, como já foi comentado, o valor da massa específica obtida ficou mais próximo da desejada inicialmente para a mistura. A visualização do perfil transversal dos depósitos foi novamente prejudicada em função do volume de material depositado e da sua granulometria mais fina exigirem muito tempo para uma completa secagem.

6.3 ENSAIOS TERCEIRA FASE: CORRENTES SIMPLES SOBRE DECLIVIDADE NÃO NULA

Encerrados os experimentos com correntes de turbidez consecutivas, partiu-se para a realização da última etapa experimental do presente estudo: a simulação de correntes simples em canal com declividade não nula. Os objetivos principais dessa etapa foram a geração de dados referentes à hidrodinâmica e à geometria dos fluxos de turbidez, bem como, de depósitos sedimentares formados sob condições de declividade não nula.

A simulação de fluxos turbidíticos em canal com declividade variável só havia sido desenvolvida anteriormente no NECOD para correntes não-conservativas (Fabian, 2002). Assim os dados relativos à hidrodinâmica e à geometria de fluxos não-conservativos, gerados no presente estudo, puderam ser comparados com os dados de correntes conservativas pré-

existentes. Já as informações acerca dos depósitos sedimentares gerados foram utilizadas para avaliar as modificações introduzidas pelo ambiente deposicional com declividade não nula.

A metodologia que foi empregada para esta terceira etapa é muito semelhante àquela que foi utilizada para as correntes simples, simuladas durante a primeira fase. Neste caso, no entanto, a única diferença se relaciona à variação de declividade do canal. A introdução dessa variável no estudo de correntes de turbidez é muito interessante porque, é em ambientes como esse que tais fluxos se concentram e dão origem a depósitos turbidíticos, principalmente, após sua passagem através de regiões caracterizadas pela presença de cânions submarinos, os quais ligam a plataforma continental à planície abissal (Daly, 1936 apud Kuenen, 1937).

6.3.1 Plano de ensaios

Sendo o objetivo principal da terceira fase o de simular correntes de turbidez desenvolvendo-se sobre plano inclinado, procurou-se realizar experimentos baseados na experiência adquirida por Fabian (2002). Dessa forma, os dados hidrodinâmicos e geométricos gerados puderam ser comparados com os dados de correntes conservativas, avaliados pelo referido autor. Fabian (2002) trabalhou com declividades de $-0,5^\circ$, 0° , 1° , 2° , 3° e 4° e massas específicas de 1010 e 1022kg/m^3 .

A título de comparação, foram ensaiadas duas das declividades adotadas por Fabian, conforme apresentado na tabela 6.9. As características dos ensaios realizados por Fabian (2002) que tiveram seus parâmetros hidrodinâmicos e geométricos utilizados como base de comparação, podem ser conferidas na tabela 6.10.

Comparando entre si as características dos ensaios descritos em cada uma das tabelas apresentadas, observam-se diferenças com relação à massa específica empregada, quanto ao volume de mistura, ao mecanismo de injeção e quanto ao material empregado para as correntes ensaiadas. A pequena diferença de massa específica é resultado de ajustes que visaram facilitar o controle da quantidade de carvão a ser empregada na composição da mistura. A variação no volume de mistura injetado é fruto do tipo de mecanismo de iniciação utilizado por cada autor, enquanto Fabian (2002) utilizou a metodologia de pulso, o presente estudo empregou o fluxo contínuo, o qual mostrou-se mais adequado para correntes não-conservativas. Finalmente, a diferença relativa ao tipo de material empregado, é justificada pela natureza conservativa ou não-conservativa da corrente que se pretendeu gerar em cada um dos estudos.

Tabela 6.9: Plano de ensaios da terceira fase.

| Número de Ensaios | Tipo de Material | $\rho_{\text{material}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$ | $\rho_{\text{corrente}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$ | Volume de Mistura (l) | Granulometria (mm) | Declividade do Canal (graus) |
|-------------------|------------------|--|--|-----------------------|--------------------------|------------------------------|
| 5 | Carvão 205 | 1190 | 1023 | 50 | Extensa (0,062-0,177) | 2,0° |
| 5 | | | | | | -0,5° |

Tabela 6.10: Ensaios de correntes conservativas de Fabian (2002).

| Ensaio | Repetição | Tipo de Material | $\rho_{\text{corrente}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$ | Volume de Mistura (l) | Declividade do Canal (graus) |
|--------|-----------|------------------|--|-----------------------|------------------------------|
| 7 | 1 | Sal | 1022 | 80 | -0,5° |
| | 2 | | | | |
| | 3 | | | | |
| 10 | 1 | | | | 2,0° |
| | 2 | | | | |
| | 3 | | | | |

6.3.2 Metodologia

6.3.2.1 Ensaios

A metodologia experimental empregada nessa fase de estudos foi praticamente idêntica à utilizada durante a primeira fase, a qual foi descrita no item 6.1.2. A única diferença foi o procedimento de alterar previamente a declividade do canal, de acordo com os valores desejados, o que era feito através do ajuste de um parafuso localizado na extremidade inferior do mesmo. A estrutura de suporte do parafuso permite levantar ou baixar o canal, variando a declividade. Os valores de declividade foram medidos com auxílio de um nível digital.

6.3.2.2 Obtenção e registro de dados

A metodologia para aquisição e tratamento de dados foi semelhante à empregada durante os ensaios da primeira fase, conforme descrito no item 6.1.2.2.

6.3.3 Resultados

De acordo com o plano de ensaio apresentado, seriam realizadas cinco repetições dos experimentos para cada uma das duas declividades ensaiadas. A experiência acumulada nas etapas anteriores, no entanto, demonstrou que o número de três repetições seria suficiente, uma vez que os resultados obtidos seguiram um padrão de repetibilidade considerado adequado. As características dos experimentos realizados, além de alguns dos resultados obtidos, estão descritos na tabela 6.11.

Tabela 6.11: Ensaios realizados na terceira fase.

| Número do Ensaio | Tipo de Material | ρ pretendido (kg/m ³) | ρ obtido (kg/m ³) | Volume de Mistura (l) | Granulometria (mm) | Declividade do Canal (graus) |
|------------------|------------------|--|------------------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------------|
| 12 | Carvão 205 | 1023 | 1038,57 | 50 | Extensa (0,062-0,177) | 2,0° |
| 13 | | | 1032,53 | | | |
| 15 | | | 1043,41 | | | |
| 16 | | | 1041,21 | | | -0,5° |
| 17 | | | 1041,26 | | | |
| 18 | | | 1037,15 | | | |

Como já havia sido comentado no item 6.1.2, referente à metodologia experimental da primeira fase de ensaios, a manutenção da massa específica da mistura utilizada para as simulações não foi uma tarefa muito simples. A levar em conta os dados da tabela 6.11, no item de massa específica obtida para as correntes de cada um dos ensaios, observa-se que o intervalo de variações teve sua amplitude ampliada.

A hipótese mais provável para explicar esse comportamento, não tão evidente nas duas fases anteriores, encontra-se nas temperaturas médias mais elevadas. Os ensaios descritos na tabela foram realizados durante o mês de outubro e, considerando-se ainda, que os reservatórios de armazenamento da mistura encontram-se em posição elevada do solo de cerca de 4 metros, a temperatura mais elevada pode ter provocado a evaporação de parte da água empregada na mistura, apesar da existência de tampas nos reservatórios. Esse fato provocaria um aumento de concentração, o que viria a justificar os dados de massa específica obtidos.

Quanto aos resultados deposicionais obtidos durante a presente etapa, os mesmos apresentaram feições muito semelhantes às obtidas durante os ensaios da primeira fase. Tal

fato pode ser observado a partir da comparação das figuras 6.29 e 6.30, que ilustram as formas de fundo obtidas, na região próxima ao difusor, para ensaios da primeira e da terceira fase respectivamente. Levando-se isso em conta, além do fato de que tanto durante a primeira quanto a terceira etapas foram simuladas correntes simples, optou-se por adotar as mesmas simplificações na análise granulométrica descritas no item 6.1.2.2. Assim novamente, a exemplo do que aconteceu durante a primeira fase, o número de amostras analisadas por ensaio foi reduzido de cerca de 102 para 14.

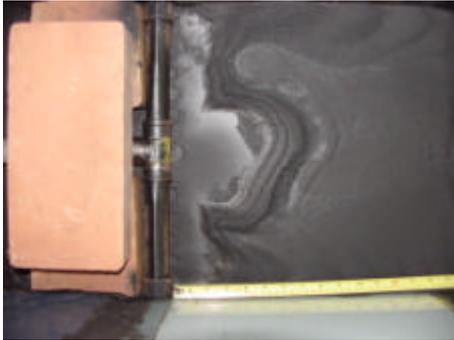


Figura 6.29: Imagem em planta de depósito gerado pelo ensaio 3 (1ª fase).



Figura 6.30: Imagem em planta de depósito gerado pelo ensaio 18 (3ª fase)

As tabelas 6.12 e 6.13 apresentam outros resultados obtidos durante a terceira fase. Com relação às fases de estudo anteriores, verificam-se diferenças mais significativas nos dados de massa específica da mistura injetada. Por outro lado, os comprimentos das zonas deposicionais, para ambas as declividades ensaiadas, voltaram a apresentar valores semelhantes aos obtidos durante a primeira fase.

Já os dados de massa específica no interior da corrente, registrados na figura 6.31, indicaram novamente a formação de um perfil clássico de concentrações para o caso de correntes de densidade. Os valores apresentados, mais elevados do que nas fases de estudo anteriores, evidenciam o aumento da massa específica da mistura, o qual já havia sido indicado pelas tabelas 6.11, 6.12 e 6.13.

Os depósitos sedimentares originados durante a terceira fase também foram adequados. Como já havia sido comentado anteriormente, os mesmos apresentaram comportamento muito semelhante ao dos depósitos gerados na primeira fase, com maiores espessura na região proximal, mesmo que tal espessura não fosse tão significativa quanto às obtidas durante a segunda fase. As figuras de 6.32 a 6.43 representam as superfícies dos depósitos gerados nos ensaios 12, 13, 15, 16, 17 e 18 na forma de fotografias e de imagens provenientes do tratamento dos dados adquiridos pelo distanciômetro laser. Como

anteriormente, o comprimento da região representada pelo distanciômetro restringe-se aos cerca de 1,1m iniciais do canal e varia em torno desse valor no caso das fotografias.

Finalmente, considerando que a metodologia aplicada durante a terceira fase foi idêntica à empregada durante a primeira fase, com exceção da variação na declividade do canal, constatou-se, como era esperado, que as correntes e os depósitos gerados foram satisfatórios para os objetivos do estudo. Assim puderam ser coletados dados hidrodinâmicos, geométricos e deposicionais adequados para uma avaliação dos efeitos da declividade sobre as correntes de turbidez geradas, conforme será apresentado nas seções seguintes.

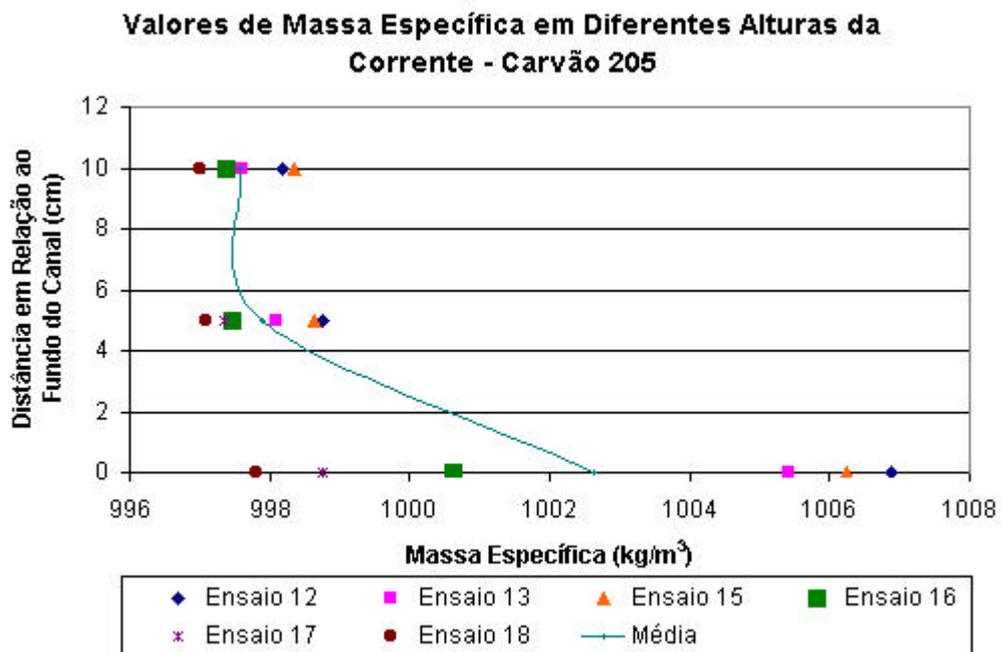


Figura 6.31: Valores da massa específica em diferentes alturas das correntes da terceira fase.

Tabela 6.12: Resultados da terceira fase (2,0 graus).

| Terceira Fase (2,0 graus) | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-------------------|--------|-------------------|-------|--|--------------------|---------------------|---------------------|----------|---|--------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|
| Ensaio | Velocidade (cm/s) | | Altura Média (cm) | | Mistura Injetada | | Vazão Média (l/min) | Froude Densimétrico | Reynolds | ρ_{material} (kg/m ³) | Comp. zona deposição (%) | | D ₅₀ médio por zona (mm) | |
| | Média | Desvio | Cabeça | Corpo | $\rho_{\text{médio}}$ (kg/m ³) | Concentraçãc (g/l) | | | | | 1 ^a | 2 ^a | 1 ^a | 2 ^a |
| 12 | 9,05 | 2,45 | 6,74 | 10,70 | 1038,57 | 256,31 | 20,00 | 0,55 | 9254,00 | 1190 | 18 | 82 | 0,1260 | 0,6610 |
| 13 | 7,51 | 2,01 | 6,04 | 9,54 | 1032,53 | 219,10 | 14,00 | 0,52 | 6879,27 | | | | | |
| 15 | 7,50 | 2,36 | 6,83 | 10,80 | 1043,41 | 286,18 | 22,50 | 0,42 | 7778,08 | | | | | |
| Média | 8,02 | 2,27 | 6,54 | 10,35 | 1038,17 | 253,86 | 18,83 | 0,50 | 7970,45 | 1190 | 18 | 82 | 0,1260 | 0,6610 |

Tabela 6.13: Resultados da terceira fase (-0,5 graus).

| Terceira Fase (-0,5 graus) | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------------------|--------|-------------------|-------|--|--------------------|---------------------|---------------------|----------|---|--------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|
| Ensaio | Velocidade (cm/s) | | Altura Média (cm) | | Mistura Injetada | | Vazão Média (l/min) | Froude Densimétrico | Reynolds | ρ_{material} (kg/m ³) | Comp. zona deposição (%) | | D ₅₀ médio por zona (mm) | |
| | Média | Desvio | Cabeça | Corpo | $\rho_{\text{médio}}$ (kg/m ³) | Concentraçãc (g/l) | | | | | 1 ^a | 2 ^a | 1 ^a | 2 ^a |
| 16 | 6,14 | 3,38 | 6,56 | 9,25 | 1041,21 | 272,60 | 21,00 | 0,36 | 6106,05 | 1190 | 18 | 82 | 0,1081 | 0,4088 |
| 17 | 4,74 | 2,19 | 5,77 | 8,61 | 1041,26 | 272,92 | 22,50 | 0,30 | 4150,74 | | | | | |
| 18 | 3,65 | 1,86 | 5,45 | 7,30 | 1037,15 | 247,57 | 13,00 | 0,25 | 3019,38 | | | | | |
| Média | 4,84 | 2,48 | 5,93 | 8,38 | 1039,88 | 264,36 | 18,83 | 0,30 | 4425,39 | 1190 | 18 | 82 | 0,1081 | 0,4088 |

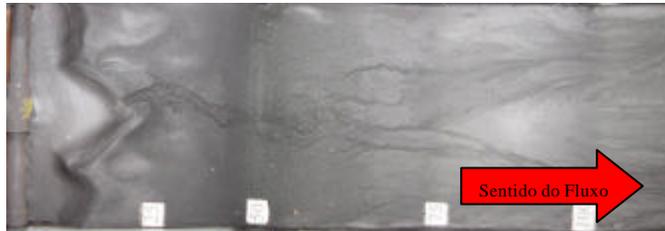


Figura 6.32: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 12

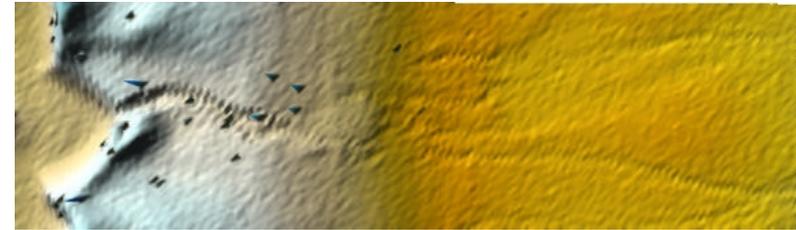


Figura 6.35: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 12 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser.

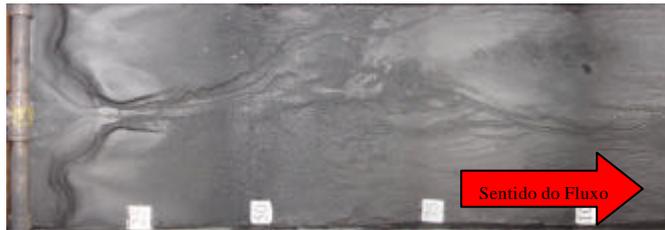


Figura 6.33: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 13



Figura 6.36: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 13 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser.

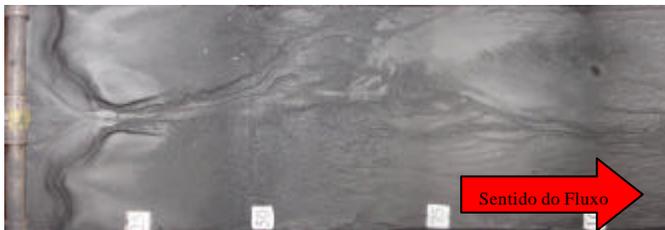


Figura 6.34: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 15

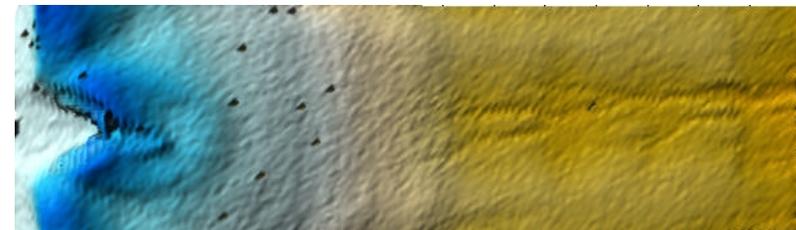


Figura 6.37: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 15 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser.



Figura 6.38: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 16

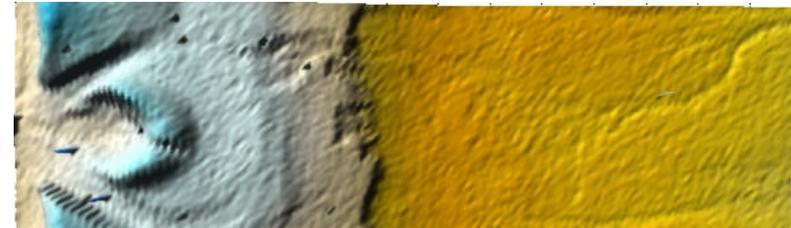


Figura 6.41: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 16 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser.

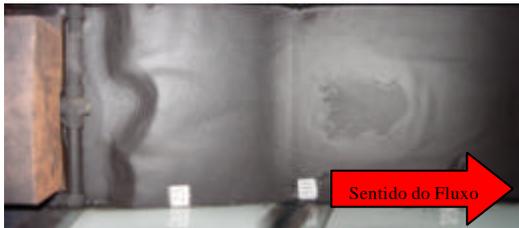


Figura 6.39: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 17

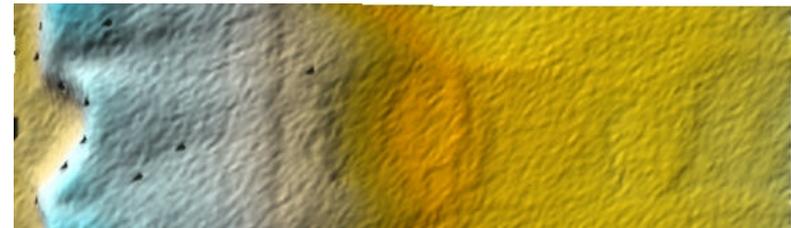


Figura 6.42: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 17 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser.

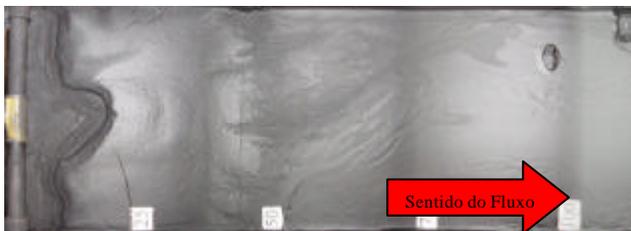


Figura 6.40: Imagem em planta do depósito formado pelo ensaio 18



Figura 6.43: Imagem em planta do depósito formado no ensaio 18 gerada a partir dos dados do distanciômetro laser.

7 ANÁLISE DE RESULTADOS

7.1 AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS E GEOMÉTRICOS DAS CORRENTES ENSAIADAS

De acordo com os objetivos iniciais do presente estudo, procedeu-se, a partir do tratamento de imagens adquiridas durante os ensaios realizados, conforme metodologia descrita anteriormente, à análise de alguns parâmetros hidrodinâmicos e geométricos das correntes de turbidez geradas. No tocante à hidrodinâmica, foram determinadas as velocidades e acelerações das correntes. Já quanto aos aspectos geométricos, o enfoque foi dado na determinação das alturas da cabeça e do corpo dos fluxos.

No que se refere às velocidades desenvolvidas pelos fluxos ensaiados, foram descritas tanto as velocidades e as acelerações médias, quanto a variação espacial da velocidade de avanço da cabeça da corrente. As velocidades e acelerações médias foram calculadas com base na média dos valores de cada um dos grupos de ensaios realizados nas mesmas condições de declividade do canal. Já no caso da variação espacial da velocidade de avanço da cabeça da corrente, foram apresentados valores instantâneos, ao longo do comprimento do canal, da média dos valores de cada um dos grupos de ensaios realizados nas mesmas condições de declividade.

Quanto à geometria, foram determinados as alturas médias da cabeça e do corpo das correntes ensaiadas. Nesse procedimento foram enfrentadas algumas dificuldades inerentes ao trabalho com correntes não-conservativas, pois a presença de sedimento em suspensão dificulta e muito a nítida visualização das estruturas de que é composta a corrente de turbidez, o que acaba por complicar o processo de medição de alturas. As estruturas da cabeça e do corpo, facilmente identificáveis em fluxos conservativos, ficam delineadas de maneira pouco clara nos fluxos não-conservativos. Assim, na maioria dos casos, fica difícil distinguir a interface entre cabeça e corpo e a camada de mistura, o que, de certa forma, acarreta imprecisão e subjetividade aos valores obtidos

Como também foi previamente proposta uma comparação entre os parâmetros hidrodinâmicos e geométricos de correntes não-conservativas e conservativas, os dados descritos acima foram confrontados com as informações disponíveis no trabalho de Fabian (2002). No entanto, uma vez que foram utilizados dois tipos distintos de carvão mineral (205 e 207) nas simulações, optou-se por comparar os dados de fluxos conservativos apenas com os resultados provenientes de correntes geradas com carvão 205 (Ensaio de 6 a 18). Essa

medida foi adotada com o intuito de restringir o número de variáveis existentes em cada modalidade de experimento e permitir uma comparação com conclusões mais confiáveis.

7.1.1 Correntes simples

Uma vez que tais correntes foram ensaiadas a partir de mistura elaborada com Carvão 207, optou-se por não analisar seus parâmetros hidrodinâmicos e geométricos por motivos expostos no item anterior.

7.1.2 Correntes sucessivas

Para fins de comparação, os dados referentes à hidrodinâmica e à geometria das correntes consecutivas ensaiadas são apresentados no item 7.1.3 juntamente com os parâmetros das correntes simples sobre declividade não nula. Cabe ressaltar que, na discussão feita no item 7.1.3, os dados relativos à declividade de zero graus é que representam os resultados obtidos com as correntes consecutivas. Além disso, deve-se salientar que os dados de correntes consecutivas apresentados se restringem ao primeiro fluxo de cada ensaio. Essa restrição é fruto de limitações na visualização dos três fluxos subsequentes em virtude do sedimento em suspensão deixado pelo primeiro deles.

7.1.3 Correntes simples sobre declividade não nula

7.1.3.1 Variação espacial da velocidade de avanço da cabeça da corrente

Visando analisar a evolução espacial da velocidade de avanço da cabeça da corrente, foi realizado, ao longo do canal e em intervalos de tempo pré-determinados, o levantamento da velocidade instantânea da mesma. Tais dados são apresentados na figura 7.1 sob a forma de linhas de tendência dos valores médios das velocidades avaliadas para os ensaios realizados, ao longo do comprimento do canal, para cada uma das declividades ensaiadas.

A partir da análise da figura 7.1, observa-se que as médias da velocidade de avanço da cabeça da corrente para a declividade de 2° são superiores às demais. Já as tendências para as declividades de $-0,5^\circ$ e 0° apresentam comportamento semelhante, com exceção do fato de que a corrente simulada com declividade de $-0,5^\circ$ desenvolve velocidade média inicial

ligeiramente superior, sendo que, na medida em que a corrente progride, seus valores de velocidade tendem a se igualar aos valores apresentados pela corrente simulada com declividade de 0° . Essa similaridade pode ser interpretada através da hipótese de que pequenas variações na declividade do canal não chegam a interferir de maneira significativa nos valores da velocidade. Dessa forma, a variação inicial observada na velocidade poderia ser explicada por diferenças nas condições de admissão da mistura, como por exemplo, variações nos valores de vazão. Por fim, conclui-se que, independentemente da declividade adotada para o canal, todos os fluxos apresentaram tendências de velocidades decrescentes em direção à jusante do canal.

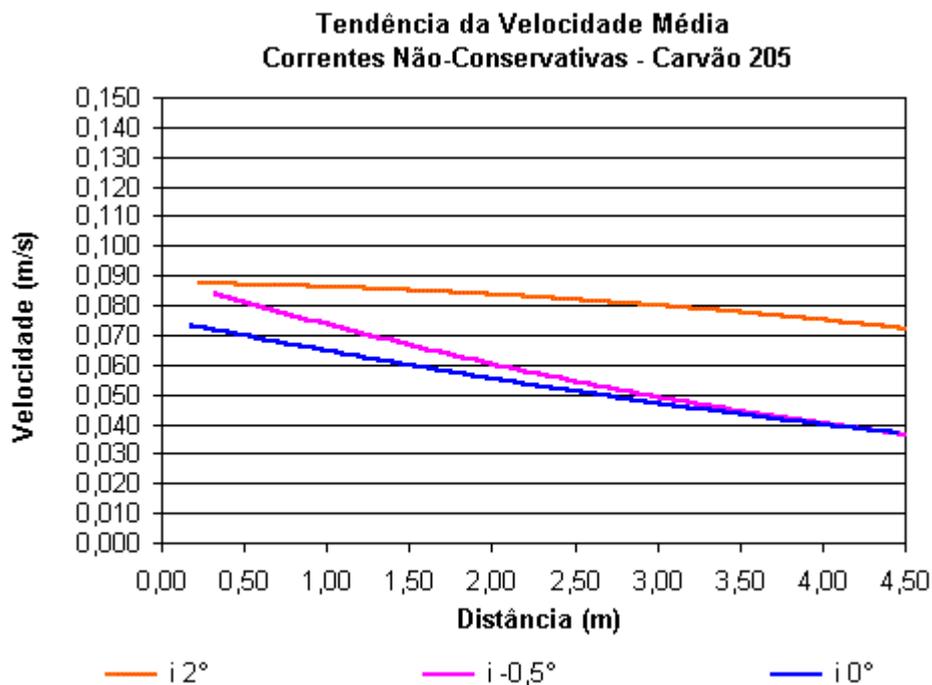


Figura 7.1: Tendências da variação espacial da velocidade de avanço das correntes ao longo do canal.

Nas figuras 7.2 a 7.4, foram plotadas, para fins de comparação, as velocidades médias das correntes não-conservativas ensaiadas, juntamente com os valores médios de velocidade de correntes conservativas, para as mesmas condições de declividade, disponíveis no trabalho de Fabian (2002). Da interpretação de tais figuras pode-se observar que, em sua quase totalidade, os valores de velocidades médias das correntes conservativas foram superiores aos das velocidades das correntes não-conservativas. Tal fato pode ser novamente atribuído à capacidade que as correntes conservativas possuem de manter uma concentração maior durante todo o trajeto ao longo do canal. As correntes não-conservativas, por sua vez, ao depositarem grande parte do sedimento que transportam logo no primeiro metro do canal,

perdem grande parte de sua velocidade. Isso pode ser observado nas figuras 7.2 a 7.4, onde as correntes não-conservativas apresentam valores iniciais de velocidade mais próximos dos valores das correntes conservativas, sendo que, no entanto, esses valores logo decrescem. É

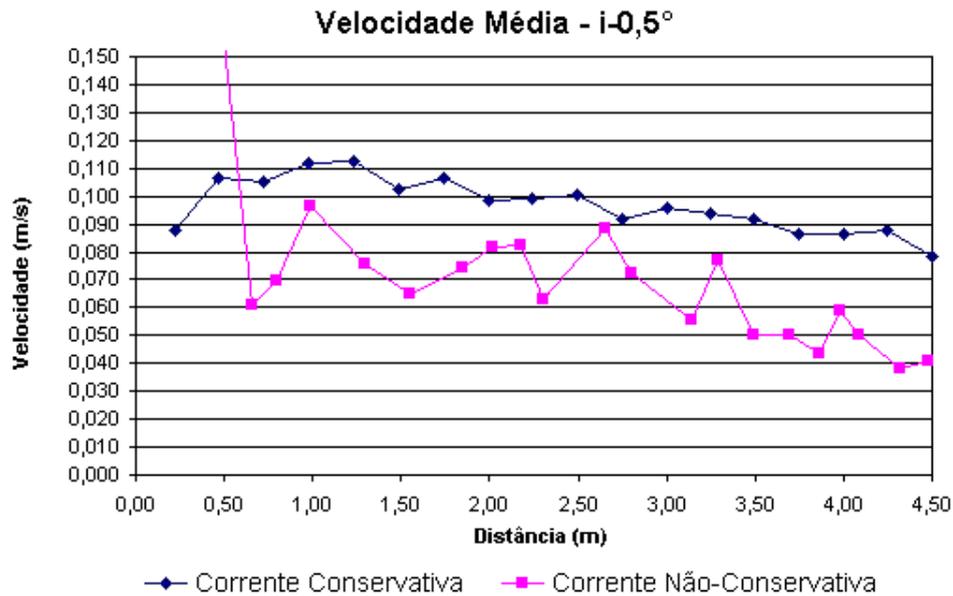


Figura 7.2: Velocidade média de correntes não-conservativas e conservativas (Fabian, 2002) simuladas em canal com declividade de $-0,5^\circ$.

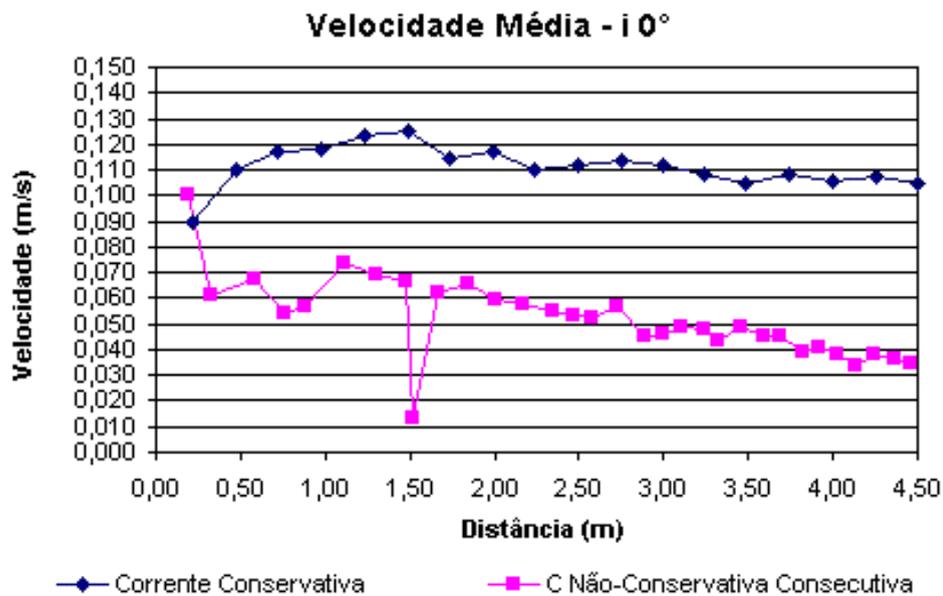


Figura 7.3: Velocidade média de correntes não-conservativas e conservativas (Fabian, 2002) simuladas em canal com declividade de 0° .

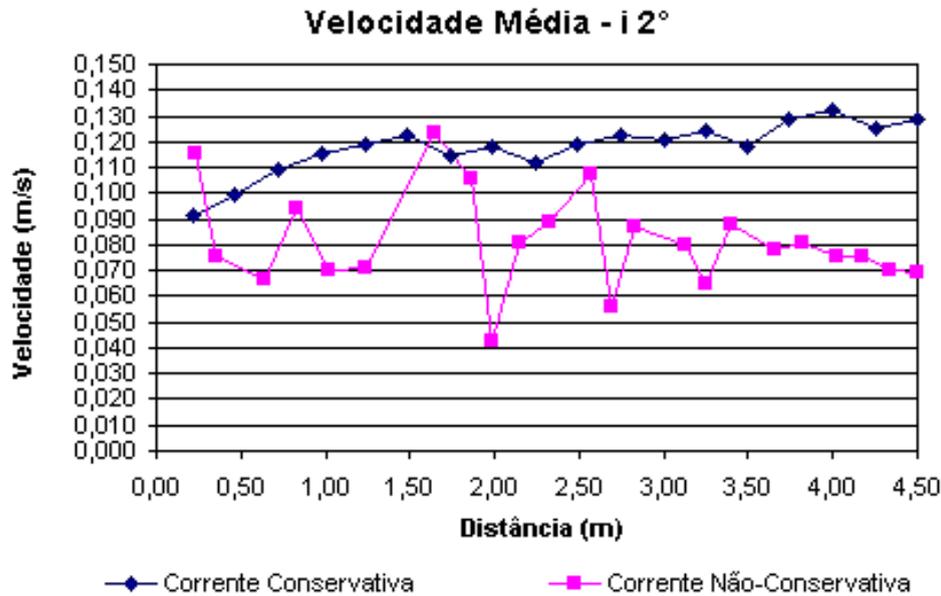


Figura 7.4: Velocidade média de correntes não-conservativas e conservativas (Fabian, 2002) simuladas em canal com declividade de 2°.

importante salientar ainda, que a diferença no mecanismo de ignição utilizado, por pulso para as correntes conservativas e por fluxo contínuo para as não-conservativas, também pode ter influenciado as velocidades apresentadas pelas correntes.

Pode-se concluir a partir das figuras 7.2 a 7.4, também que os valores de velocidade de correntes conservativas e não-conservativas oscilam em torno de uma média. Essa ocorrência já tinha sido descrita para correntes conservativas no trabalho de Fabian 2002. No caso das correntes não-conservativas ensaiadas, entretanto, essa oscilação apresentou uma amplitude ainda maior. Essa afirmação pode ser feita com base nos valores de desvio padrão das velocidades das correntes, conforme apresentado na tabela 7.1. Outra vez esse comportamento pode estar vinculado à perda de concentração mais intensa de que sofrem as correntes não-conservativas ao depositarem o material sedimentar.

Tabela 7.1: Velocidade média de correntes conservativas (Fabian, 2002) e não-conservativas.

| Velocidade Correntes (cm/s) | | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|--------|-------------------|--------|
| Declividade | Conservativas (Fabian 2002) | | Não-Conservativas | |
| | Média | Desvio | Média | Desvio |
| -0,5° | 0,0968 | 0,0096 | 0,0487 | 0,0206 |
| 0,0° | 0,1112 | 0,0079 | 0,0518 | 0,0154 |
| 2,0° | 0,1177 | 0,0101 | 0,0810 | 0,0184 |

7.1.3.2 Variação espacial das alturas da cabeça e do corpo da corrente

Visando analisar a evolução espacial das alturas da cabeça e do corpo da corrente, tal levantamento foi realizado ao longo do canal em seções pré-determinadas. Os dados apresentados nas figuras 7.5 e 7.6 correspondem respectivamente aos valores médios das alturas da cabeça e do corpo das correntes avaliadas em diferentes seções ao longo do canal, para cada uma das declividades ensaiadas.

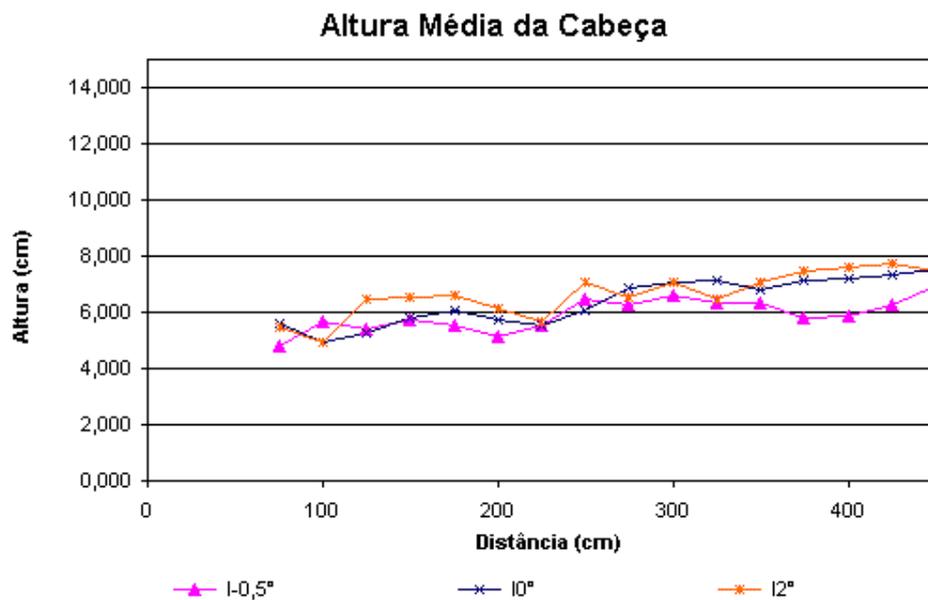


Figura 7.5: Alturas médias da cabeça das correntes ao longo do canal.

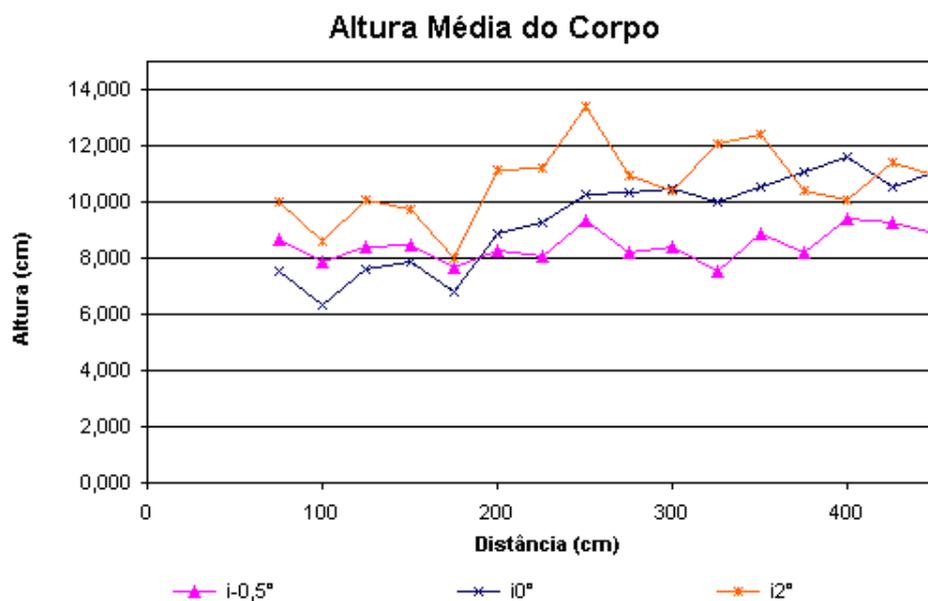


Figura 7.6: Alturas médias do corpo das correntes ao longo do canal.

Os resultados expressos pelas figuras 7.5 e 7.6 demonstram que, para correntes não-conservativas, não são observadas variações significativas nas alturas da cabeça e do corpo das correntes para as declividades ensaiadas. Apesar disso, são observados valores ligeiramente maiores de altura, tanto da cabeça quanto do corpo, em função de declividades maiores, isto é, a corrente ensaiada com declividade de 2° apresenta alturas maiores que as demais. O mesmo sendo verdade quando se comparam os valores das correntes com declividades de 0° e $-0,5^\circ$.

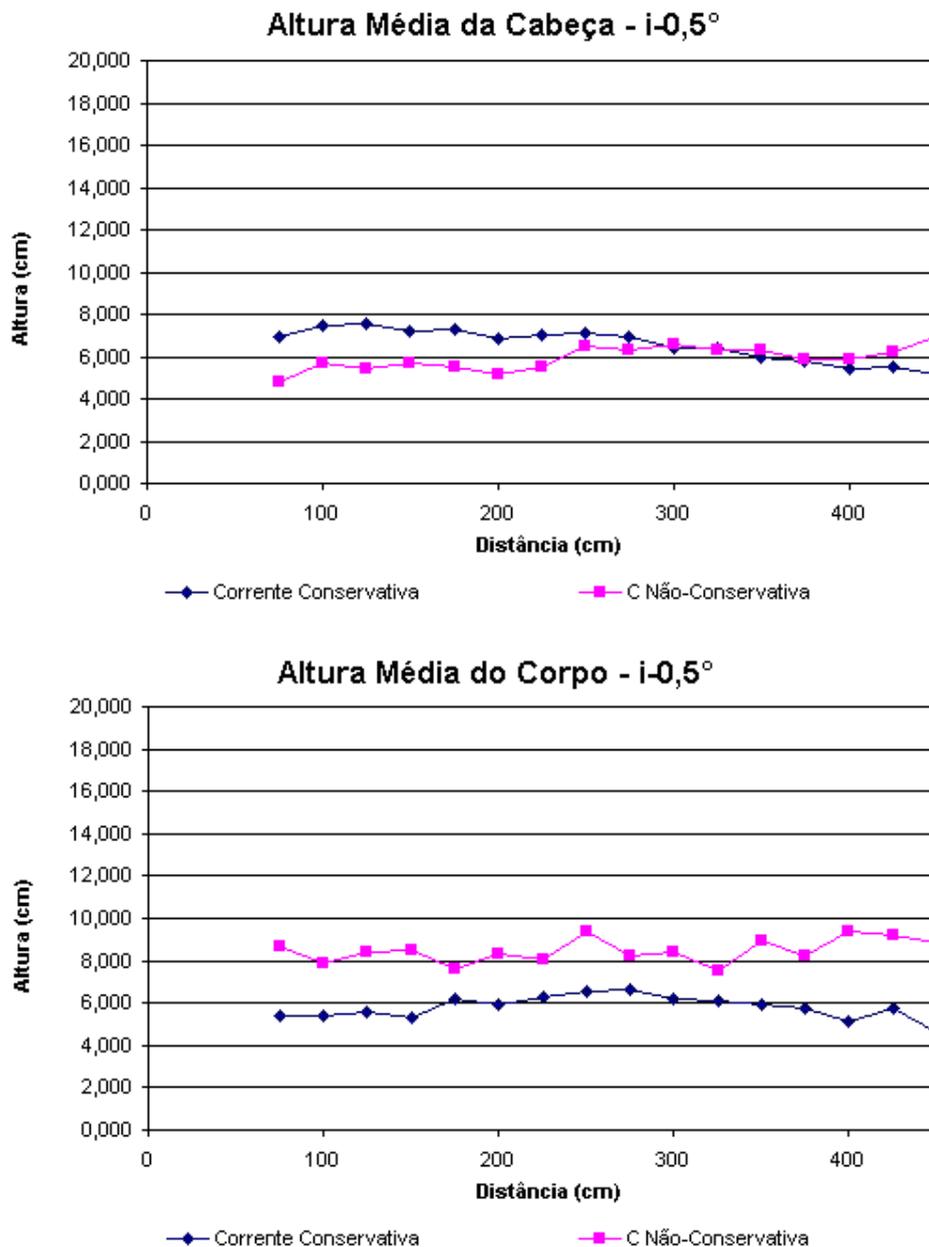


Figura 7.7: Alturas médias da cabeça e do corpo de correntes não-conservativas e conservativas (Fabian, 2002) simuladas em canal com declividade de $-0,5^\circ$.

Nas figuras 7.7, 7.8 e 7.9, foram plotadas, para fins de comparação, as alturas médias da cabeça e do corpo das correntes não-conservativas ensaiadas, juntamente com os valores médios das alturas de correntes conservativas (Fabian, 2002).

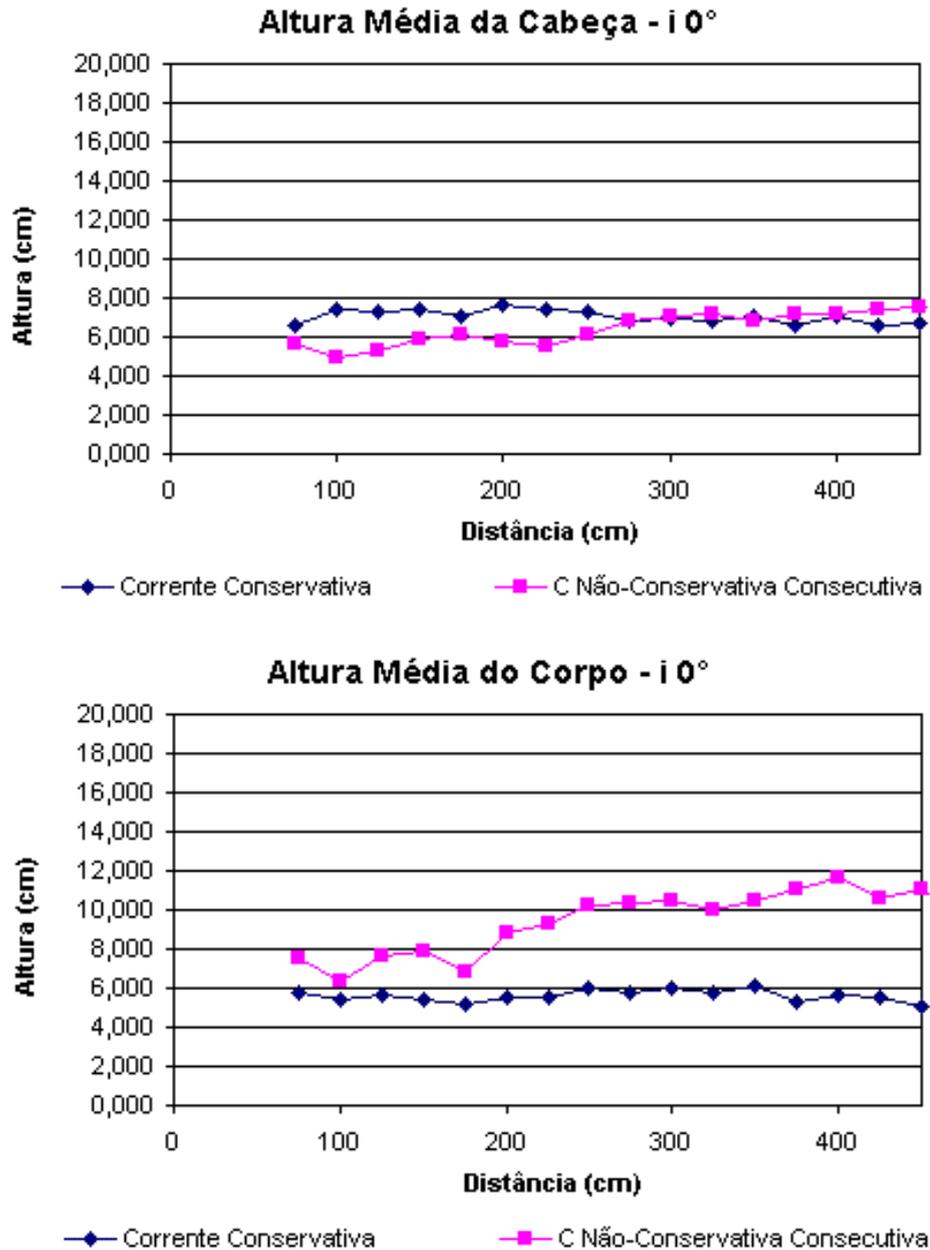


Figura 7.8: Alturas médias da cabeça e do corpo de correntes não-conservativas e conservativas (Fabian, 2002) simuladas em canal com declividade de $0,0^\circ$.

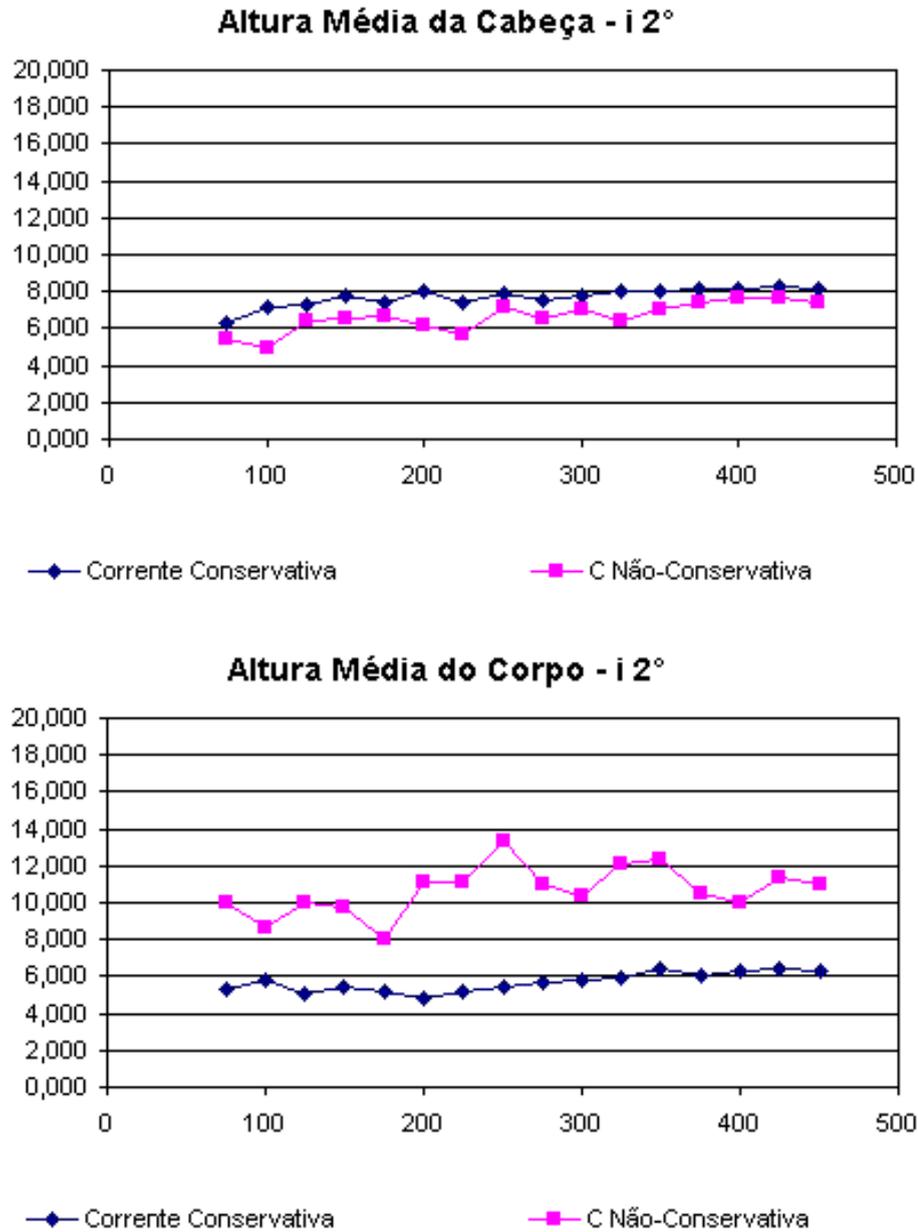


Figura 7.9: Alturas médias da cabeça e do corpo de correntes não-conservativas e conservativas (Fabian, 2002) simuladas em canal com declividade de 2,0°.

Da análise dos gráficos de altura média da cabeça das correntes não-conservativas e conservativas, observa-se que em ambos os casos a altura da cabeça oscilou de maneira semelhante. Aparentemente o caráter não-conservativo ou conservativo da corrente não desempenha papel decisivo sobre o comportamento de tal parâmetro geométrico. Da mesma forma, o mecanismo de injeção da mistura, por pulso para as correntes conservativas e por fluxo contínuo para as correntes não-conservativas, também parece não ter influenciado as alturas de cabeça apresentadas. O mesmo já não pode ser dito em relação às alturas do corpo

das correntes. Nesse aspecto, notou-se que as correntes não-conservativas apresentaram alturas maiores que as correntes conservativas. Essa ocorrência, no entanto, pode provavelmente ter sido influenciada pela dificuldade na delimitação clara da geometria de corpo e cabeça da corrente não-conservativa, o que provavelmente conduziu a valores que podem não expressar a realidade.

Essa dificuldade pode ser visualizada quando se compara as figuras 7.10 e 7.11, que registram a passagem da corrente não-conservativa simulada no ensaio dez pela seção localizada a 3,75m de comprimento do canal e foram obtidas respectivamente com a utilização de câmera de vídeo e do ultrassom. Fica claro que os detalhes da geometria da corrente, mais nítidos na imagem de ultrassom, não são representados com tanta qualidade na imagem registrada pela câmera de vídeo.



Figura 7.10: Imagem da corrente simulada no ensaio 10 obtida por câmera de vídeo.

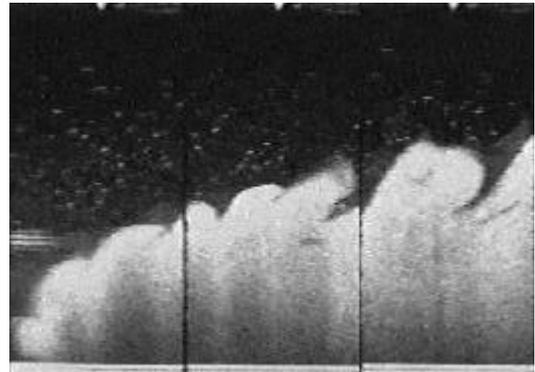


Figura 7.11: Imagem da corrente simulada no ensaio 10 obtida por ultrassom.

7.1.3.3 Velocidade média da cabeça da corrente

A variação da velocidade média das correntes de turbidez não-conservativas, simuladas com Carvão 205, para as diferentes declividades do canal, é apresentada na figura 7.12. A velocidade das correntes de turbidez ensaiadas também pode ser comparada com os dados de velocidade de correntes conservativas disponíveis no trabalho de Fabian (2002).

Analisando os dados relativos às correntes não-conservativas, conclui-se que a velocidade média de avanço da cabeça variou entre 0,0487m/s e 0,0810m/s. Já para as correntes conservativas, essa variação ficou entre 0,0942m/s e 0,1178m/s. Constatou-se, também, que as médias das velocidades das correntes não-conservativas foram sempre

inferiores às médias das velocidades das correntes conservativas. O fato das correntes não-conservativas terem tido maiores variações de velocidade, bem como, de terem atingido velocidades médias menores pode ser creditado à diminuição precoce de sua concentração em virtude da deposição do sedimento transportado junto ao leito do canal. Finalmente, tanto para as correntes conservativas quanto para as não-conservativas, observa-se uma tendência de crescimento da velocidade média à medida que a declividade do canal aumenta.

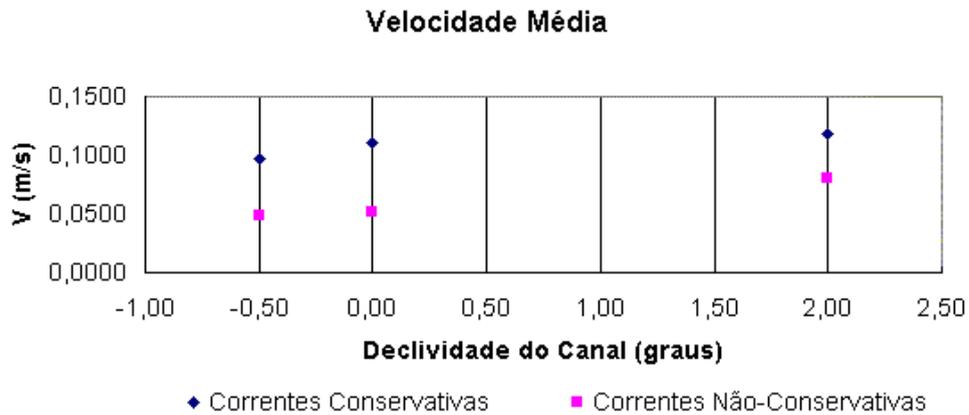


Figura 7.12: Variação da velocidade média de correntes conservativas (Fabian, 2002) e não-conservativas em função da declividade do canal.

7.1.3.4 Aceleração média da cabeça da corrente

A partir dos dados de velocidade, provenientes do tratamento das imagens registradas dos ensaios, foram calculadas as acelerações médias das correntes não-conservativas que

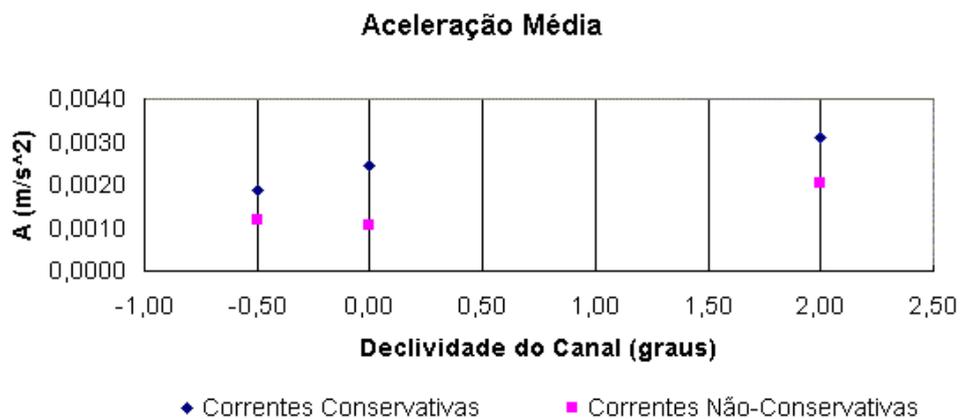


Figura 7.13: Variação da aceleração média de correntes conservativas (Fabian, 2002) e não-conservativas em função da declividade do canal.

foram simuladas. Os valores referentes às correntes simuladas com Carvão 205, para as diferentes declividades do canal, foram plotados na figura 7.13 juntamente com os dados de acelerações de correntes conservativas disponíveis no trabalho de Fabian (2002).

Analisando os dados relativos às correntes não-conservativas, conclui-se que a aceleração média da cabeça variou entre $0,0010\text{m/s}^2$ e $0,0020\text{m/s}^2$. Já para as correntes conservativas, essa variação ficou entre $0,0019\text{m/s}^2$ e $0,0031\text{m/s}^2$. Novamente as médias das acelerações das correntes não-conservativas foram sempre inferiores às médias das acelerações das correntes conservativas. Por outro lado, não se observou um crescimento contínuo das acelerações médias das correntes não-conservativas à medida em que a declividade do canal aumentou. Tal fato, no entanto, não pode ser tomado como verdade absoluta, uma vez que, as variações no módulo das acelerações são muito pequenos, o que pode ocasionar pequenas incorreções nas medidas realizadas.

7.2 AVALIAÇÃO DOS DEPÓSITOS SEDIMENTARES GERADOS PELAS CORRENTES ENSAIADAS

7.2.1 Correntes simples

De acordo com o plano de ensaios descrito anteriormente, a primeira fase de estudos foi constituída pela simulação de correntes simples, tendo o canal declividade nula. O material utilizado na preparação da mistura que deu origem às correntes foi o Carvão Mineral Cardiff 207 com granulometria compreendida entre 0,062 e 0,297mm.

7.2.1.1 Distribuição longitudinal

Os depósitos gerados pelas correntes da primeira fase apresentaram espessuras maiores na região proximal do canal. Apesar disso, como pode-se comprovar através da figura 7.14, nem mesmo nessa região do canal pode ser observada a presença de formas de fundo expressivas. Na realidade, as estruturas que se localizam logo após o difusor podem ser interpretadas como sendo resultado da ação do jato formado quando da injeção da mistura que dá origem à corrente.

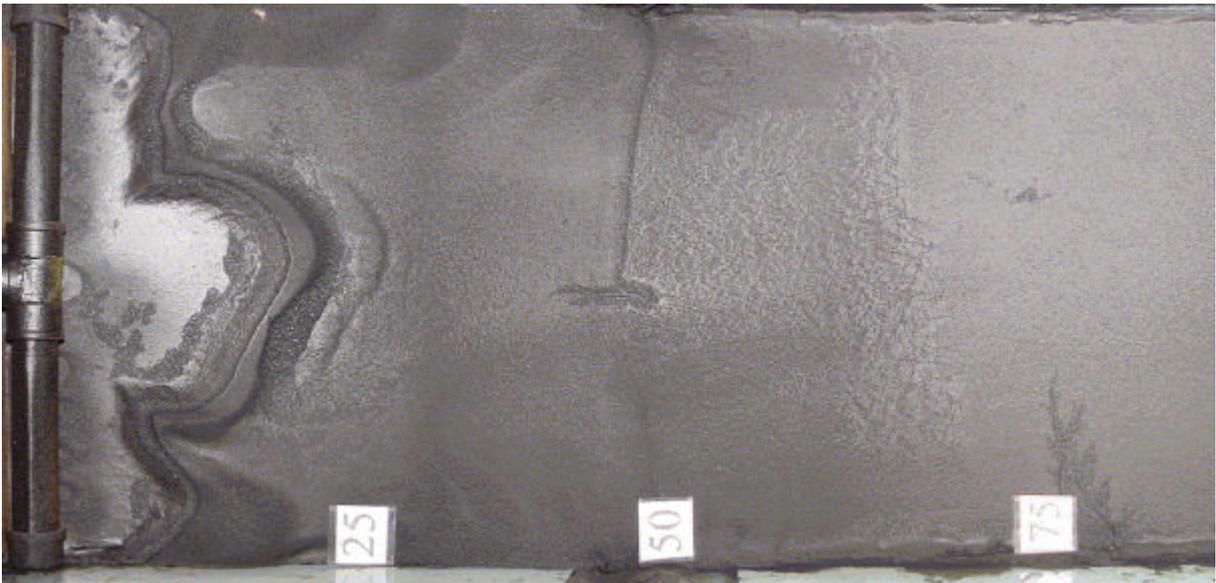


Figura 7.14: Imagem em planta do depósito gerado no primeiro metro do canal pela passagem da corrente de turbidez simulada no ensaio 5.

Na figura 7.15, é apresentada a média das distribuições granulométricas longitudinais dos experimentos 3, 4 e 5 correspondentes à primeira fase dos ensaios. Visando facilitar a interpretação das informações, os dados granulométricos resultantes foram agrupados em quatro classes distintas de acordo com a escala de Wentworth. Tal escala classifica como areia média a fração de sedimentos com diâmetro superior a 0,250mm, como areia fina a fração compreendida entre 0,250 e 0,125mm, como areia muito fina a fração compreendida entre 0,125 e 0,063mm e, finalmente, como silte grosso as frações inferiores a 0,063mm de diâmetro.

Analisando a figura 7.15, pode-se constatar que há um predomínio das frações mais grossas no registro sedimentar encontrado no primeiro metro do canal. Nesse mesmo trecho, a fração correspondente à areia fina representa a maior parte do material depositado, observando-se um crescimento regular da fração areia muito fina em direção à porção distal do canal. A partir do início do segundo metro do canal, a parcela areia muito fina passa então a responder pela maior parte do material depositado, observando-se um decréscimo acentuado das frações de areia média e fina. Dessa forma, conforme a predominância da classe granulométrica depositada, poderíamos individualizar duas zonas de deposição distintas ao longo do canal. No primeiro metro teríamos o trecho com predominância da areia fina e, a partir do início do segundo metro, o trecho com predominância da areia muito fina.

Para fins comparativos, a figura 7.16 apresenta a distribuição granulométrica longitudinal média dos ensaios correspondentes aos estudos de Ávila (2003), os quais foram

Distribuição Longitudinal dos Depósitos

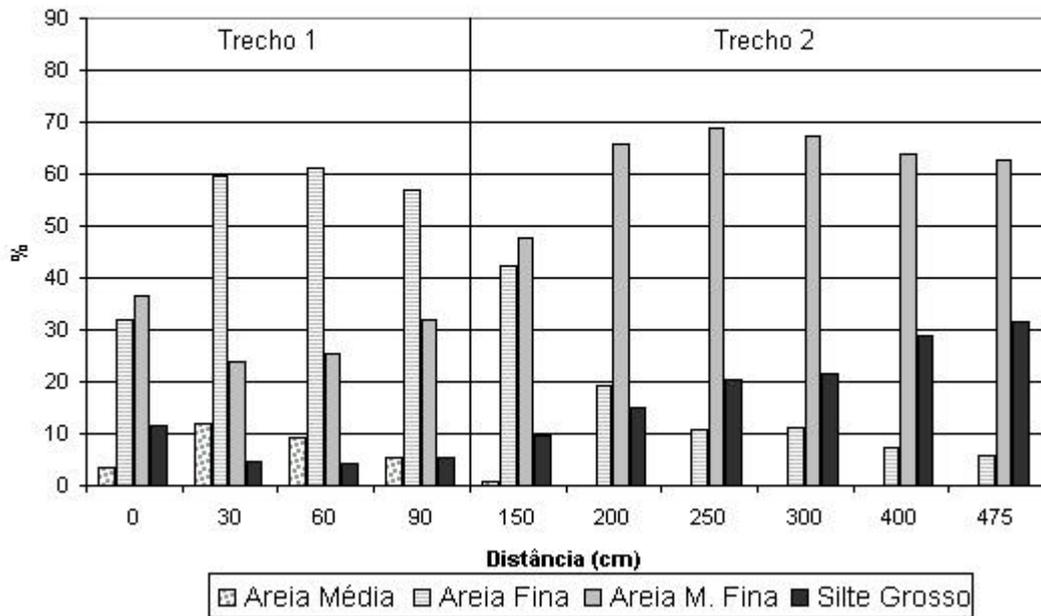


Figura 7.15: Média da distribuição granulométrica longitudinal dos ensaios da primeira fase.

Distribuição Longitudinal dos Depósitos (Ávila, 2003)

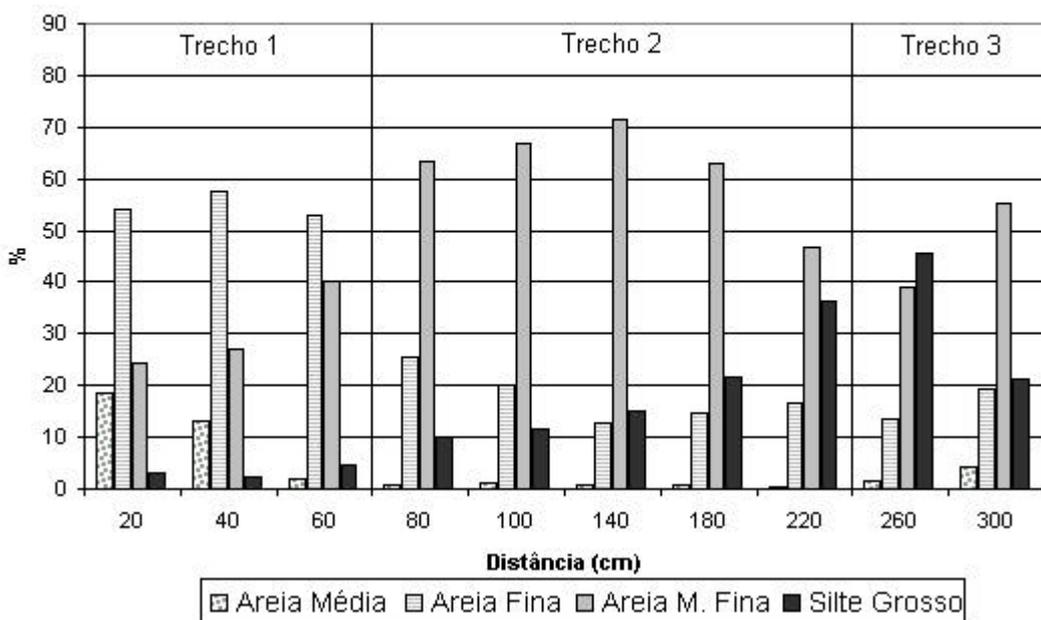


Figura 7.16: Distribuição granulométrica longitudinal média dos ensaios da primeira fase dos estudos de Ávila (2003).

realizados no canal de pequeno porte descrito anteriormente. Novamente os resultados foram agrupados de acordo com a escala granulométrica de Wentworth. A exemplo do ocorrido nos ensaios desenvolvidos no canal de grande porte, os resultados demonstram um predomínio das frações mais grossas no registro sedimentar encontrado no primeiro metro do canal. Apesar disso, três trechos de deposição distintos podem ser identificados. Nos dois primeiros, observa-se a repetição do comportamento identificado no canal de grande porte, no entanto, na região distal, pode ser visualizada a predominância das frações de areia muito fina e silte grosso, o que aparentemente não chega a ocorrer no experimento de maiores dimensões.

A partir da comparação dos dois gráficos de distribuição granulométrica longitudinal, apresentados nas figuras 7.15 e 7.16, verifica-se a conservação de uma tendência entre os dados representados: em ambos os casos há predomínio das frações mais grossas no registro deposicional formado no primeiro metro de canal. Da mesma forma, ocorre com os dois primeiros trechos de deposição. Apesar do canal de maior porte não chegar a apresentar claramente o terceiro trecho de deposição, onde predominariam as frações de areia muito fina e de silte grosso, o crescimento visível dessa última parcela em direção à região distal pode sugerir que o terceiro trecho de deposição poderia ser observado se o comprimento do canal fosse suficiente para tanto. Tomando como verdadeira essa hipótese, pode-se concluir que, apesar das diferentes dimensões dos experimentos, o comportamento característico das correntes de turbidez se repete. Há, no entanto, uma distorção dos registros deposicionais, que no caso do experimento de maior porte, tendem a apresentar um alongamento do comprimento das zonas deposicionais identificadas no experimento de menor porte.

7.2.1.2 Perfil vertical

Conforme consta da descrição da metodologia de amostragem feita anteriormente, os depósitos sedimentares resultantes das correntes simuladas durante a primeira fase de ensaios foram divididos em duas camadas distintas (topo e base) ao longo do primeiro metro do canal. Tais informações permitiram a composição de gráficos descrevendo o perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais gerados. Nas figuras de 7.17 a 7.20, são apresentados os gráficos referentes aos depósitos gerados na primeira fase de ensaios do presente estudo e também, para fins comparativos, dos depósitos gerados na primeira fase de ensaios dos estudos de Ávila (2003).

Distribuição Vertical dos Depósitos - Seção 20-30

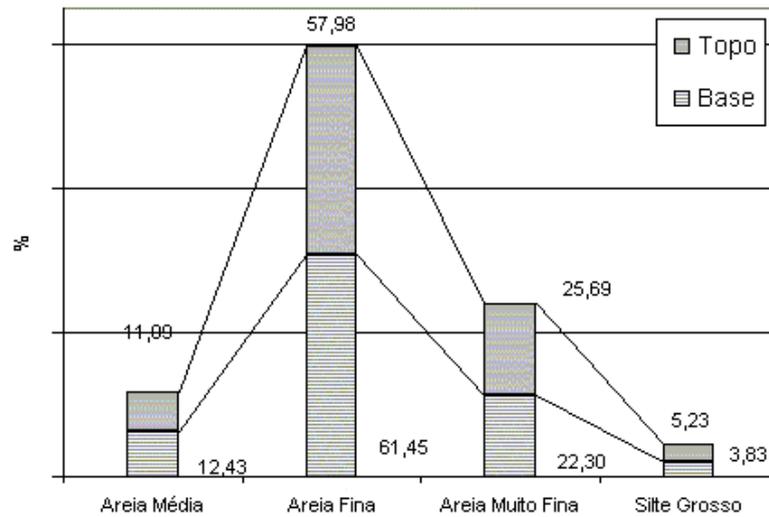


Figura 7.17: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 20-30 dos ensaios da primeira fase.

Distribuição Vertical dos Depósitos - Seção 0-20 (Ávila, 2003)

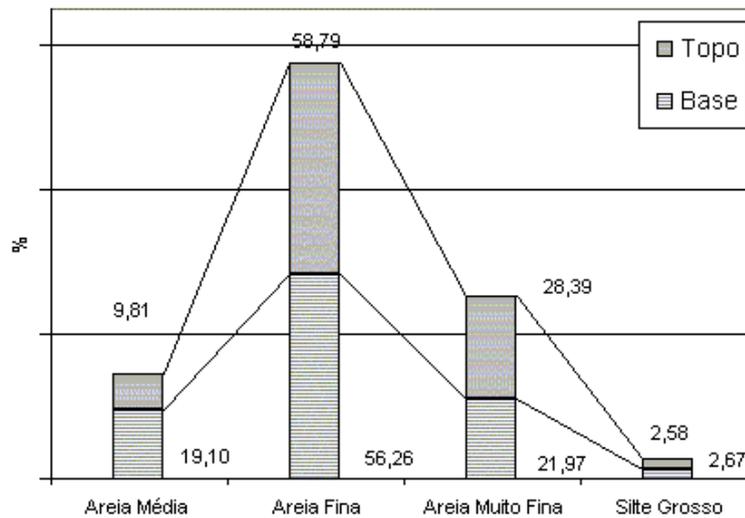


Figura 7.18: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 00-20 dos ensaios da primeira fase dos estudos de Ávila (2003).

Distribuição Vertical dos Depósitos - Seção 50-60

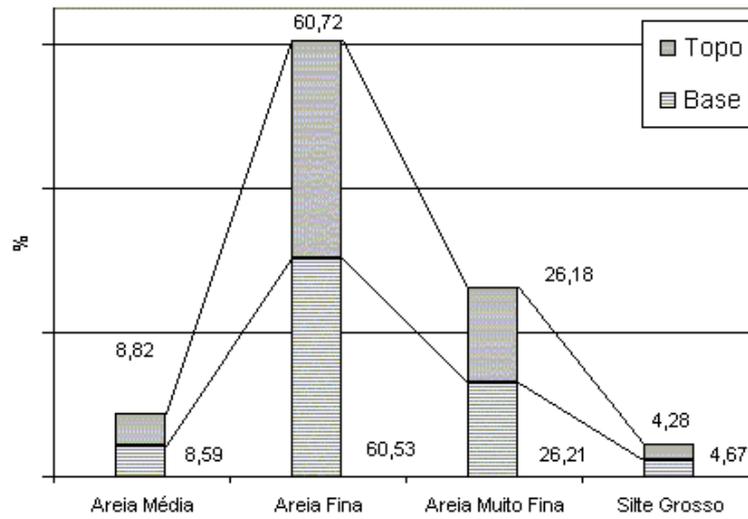


Figura 7.19: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 50-60 dos ensaios da primeira fase.

Distribuição Vertical dos Depósitos - Seção 20-40 (Ávila,2003)

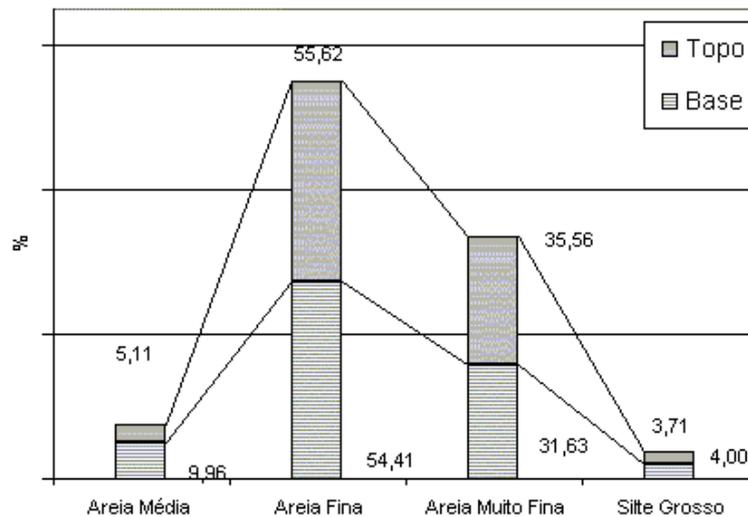


Figura 7.20: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 20-40 dos ensaios da primeira fase dos estudos de Ávila (2003).

A partir da análise da figura 7.17, referente aos registros deposicionais localizados na seção 20-30 dos ensaios da primeira fase, pode-se concluir que há certa predominância das frações mais grossas de sedimentos na porção basal do depósito. Já em direção ao topo do depósito, verifica-se a diminuição gradativa do percentual de material das parcelas mais grossas de sedimento, com igual incremento do percentual de material das parcelas mais finas de sedimento. Esse comportamento indica a ocorrência de uma granodrecrescência ascendente, o que caracteriza uma gradação normal das camadas nesse trecho do canal. Tal comportamento também pode ser encontrado na seção 00-20 dos ensaios da primeira fase dos estudos de Ávila (2003), conforme ilustrado pela figura 7.18.

Já a figura 7.19, referente aos registros deposicionais localizados na seção 50-60 dos ensaios da primeira fase, por sua vez, não indica tão claramente a existência da gradação normal das camadas do depósito. Esse comportamento é evidenciado pelo fato de que as porcentagens de cada uma das quatro classes de diâmetro de grão são praticamente idênticas para topo e base. O mesmo ocorre no caso da figura 7.20, relativa aos registros deposicionais localizados na seção 20-40 dos ensaios da primeira fase dos estudos de Ávila (2003). Apesar disso, nesse caso ainda se pode observar predomínio do material mais grosso na camada basal, ou seja da gradação normal, pelo menos na parcela referente à areia média

Como uma tentativa de explicar a difícil visualização da gradação normal nesses trechos, duas hipóteses básicas podem ser formuladas. Na primeira delas, poderíamos considerar que a diminuição da quantidade de material depositado, em direção à jusante do canal, pode fazer com que a diferença entre as porcentagens de sedimento de uma determinada classe de diâmetro existente em cada camada se torne muito sutil, o que dificultaria a visualização da gradação entre as camadas. A segunda, e mais provável hipótese, considera que a diminuição da espessura dos depósitos em direção à jusante do canal torna mais difícil a individualização de camadas distintas de amostragem em uma mesma seção. Assim a coleta de camadas muito delgadas poderia conduzir a resultados de granulometria muito semelhantes para dois estratos distintos de uma mesma seção, como pode ser constatado na figura 7.19.

7.2.2 Correntes consecutivas

De acordo com o plano de ensaios descrito anteriormente, a segunda fase de ensaios foi constituída pela simulação de correntes consecutivas, totalizando quatro fluxos por ensaio, tendo o canal declividade nula. O material utilizado na preparação da mistura que deu origem

às correntes foi o Carvão Mineral Cardiff 205 com granulometria predominante compreendida entre 0,062 e 0,177mm.

7.2.2.1 Distribuição longitudinal

Os depósitos gerados pelas correntes da segunda fase também apresentaram espessuras mais significativas na região proximal do canal. Novamente, como pode-se comprovar através da figura 7.21, nem mesmo nessa região do canal puderam ser observadas formas de fundo expressivas. A exemplo do ocorrido na primeira fase, as estruturas que se localizam logo após o difusor podem ser interpretadas como sendo resultado da ação do jato formado quando da injeção da mistura que gera a corrente.

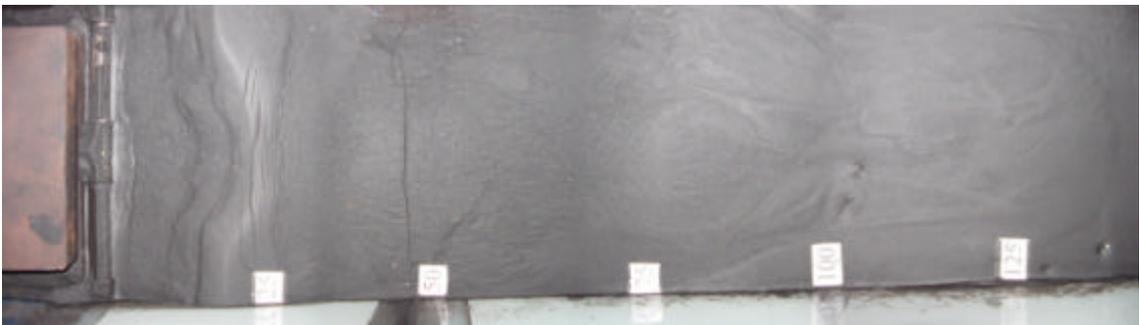


Figura 7.21: Imagem em planta do depósito gerado no primeiro metro e meio do canal pela passagem das correntes de turbidez simuladas no ensaio 10.

Na figura 7.22, é apresentada a média das distribuições granulométricas longitudinais dos experimentos 6, 7, 8, 9, 10 e 11 correspondentes à segunda fase dos ensaios, com os dados de granulometria agrupados em quatro classes distintas de acordo com a escala de Wentworth. Analisando a figura 7.22 pode-se observar que há um predomínio das frações areia fina e muito fina no registro sedimentar encontrado nos primeiros 60cm de comprimento do canal. Nesse mesmo trecho, a fração correspondente ao silte grosso apresenta um crescimento praticamente regular em direção à porção distal do canal, sendo esse comportamento iniciado a partir da seção localizada a 30cm do difusor. Da região que se inicia a partir dos 90cm de comprimento do canal em diante, as parcelas areia muito fina e silte grosso passam então a responder pela maior parte do material depositado, observando-se também um decréscimo contínuo da primeira parcela e um crescimento acentuado da segunda em direção à porção distal. Dessa forma, conforme a predominância da classe granulométrica depositada, poderíamos individualizar duas zonas de deposição distintas ao longo do canal.

Nos primeiros 60cm tínhamos o trecho com predominância da areia fina e muito fina e, a partir dos 90cm, o trecho com predominância da areia muito fina e silte grosso.

Para fins de comparação, a figura 7.23 apresenta a distribuição granulométrica longitudinal média dos ensaios correspondentes à terceira fase dos estudos de Ávila (2003). Uma vez mais, pode-se concluir, a partir do gráfico, que há um predomínio das frações mais grossas de material nos depósitos localizados no primeiro metro do canal, a exemplo do que já se observou no gráfico anterior do canal de grande porte. O trecho inicial do canal, que se estende até os 60cm de comprimento, apresenta o predomínio das frações areia fina e muito fina, com decréscimo da primeira e crescimento da segunda parcela em direção à região distal. Já o trecho subsequente, também apresenta o predomínio das frações areia fina e muito fina, no entanto, nesse caso a segunda parcela é predominante. À medida que o final do canal vai se aproximando, a parcela areia fina vai tendo sua significância superada pela parcela de silte grosso.

Assim, comparando as distribuições granulométricas longitudinais médias dos ensaios da segunda fase com os resultados obtidos por Ávila na terceira fase de seus estudos, algumas diferenças podem ser constatadas. Uma delas se refere ao número de classes granulométricas predominantes ao longo de cada um dos canais. Enquanto no canal de pequeno porte destacam-se as frações areia fina e muito fina, no canal de grande porte, por sua vez, a parcela areia fina é substituída pela parcela silte grosso já no início do segundo trecho do referido canal. Outra diferença marcante, observada no experimento de maiores dimensões, diz respeito a grande presença de silte grosso ao longo de praticamente todas as seções avaliadas. No canal pequeno, tal comportamento é equiparado pela parcela de areia muito fina.

A explicação mais plausível para as diferenças descritas anteriormente encontra-se na substituição do material utilizado para a simulação. O Carvão 205, além de possuir uma faixa granulométrica mais restrita do que contemplada pelo Carvão 207, também apresenta uma massa específica menor. Esse fator e, principalmente, a redução do diâmetro das partículas de sedimento, influem diretamente sobre a velocidade de queda das mesmas, o que implica em modificações nos padrões deposicionais. Apesar das modificações introduzidas, ainda foi possível identificar, em ambos os canais, dois trechos deposicionais característicos, mesmo que as classes granulométricas predominantes em cada um deles não fossem as mesmas.

Distribuição Longitudinal dos Depósitos

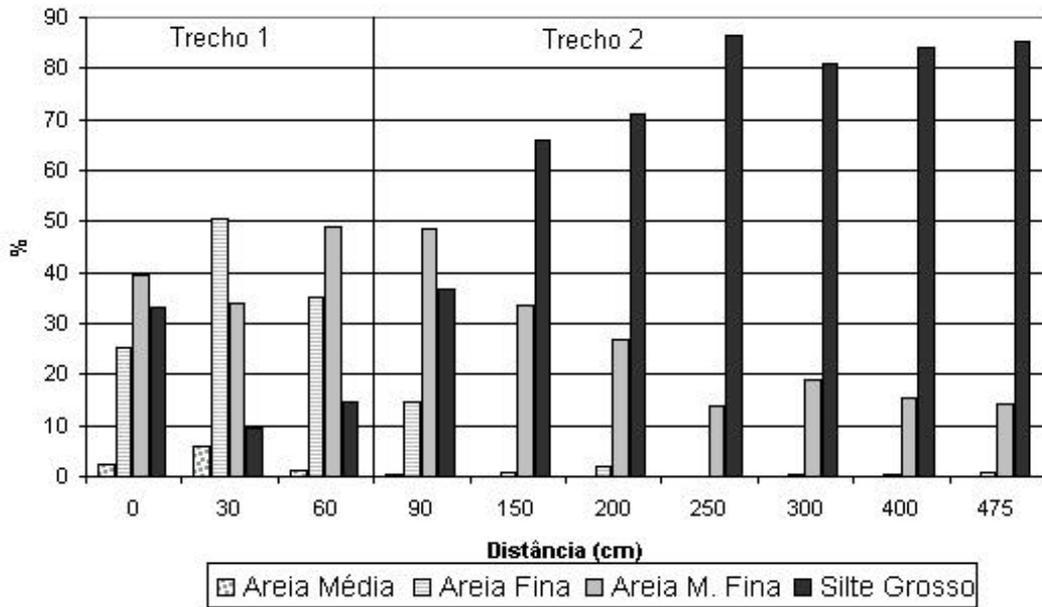


Figura 7.22: Média da distribuição granulométrica longitudinal dos ensaios da segunda fase.

Distribuição Longitudinal dos Depósitos (Ávila, 2003)

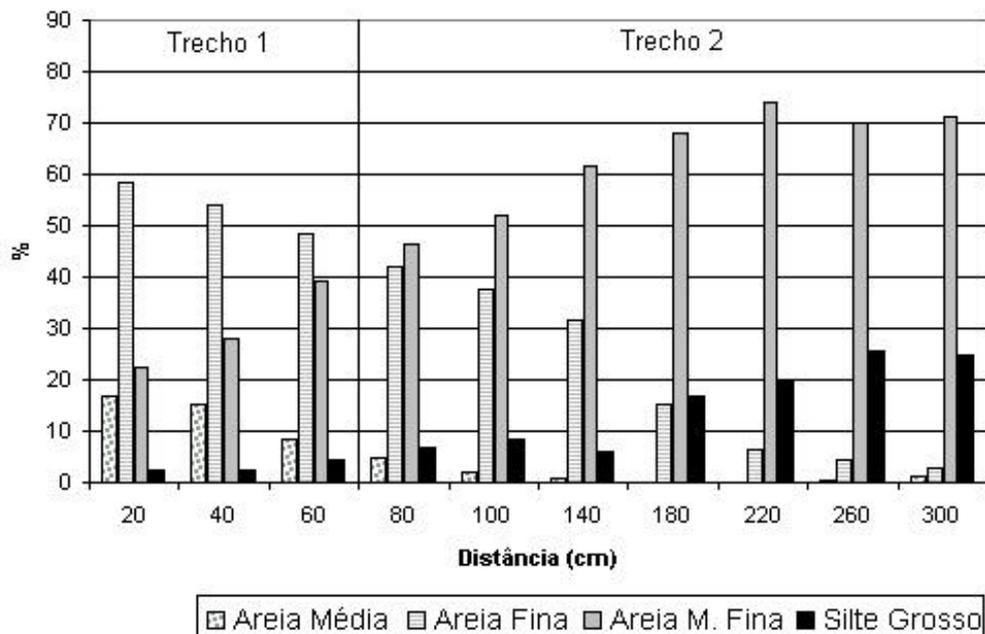


Figura 7.23: Distribuição granulométrica longitudinal média dos ensaios da terceira fase dos estudos de Ávila (2003).

Esse comportamento pode embasar a formulação da hipótese de que, independente do material transportado pelas correntes, as mesmas tendem a produzir padrões deposicionais característicos, definidos pela predominância de uma ou mais classes granulométricas em cada trecho. Assim, como se observa nos dados experimentais apresentadas aqui, as correntes simuladas com materiais distintos e em experimentos de escalas diferentes, produziram dois trechos deposicionais ao longo de cada um dos canais, os quais foram caracterizados pela predominância de duas classes granulométricas sobre as demais. Deve-se salientar que, embora as classes predominantes em cada trecho de cada canal não sejam exatamente as mesmas, a individualização dos trechos ainda pode ser visualizada.

7.2.2.2 Perfil vertical

De acordo com a descrição da metodologia de amostragem apresentada, os depósitos sedimentares gerados pelas correntes simuladas durante a segunda fase de ensaios foram coletados praticamente da mesma forma que os depósitos gerados durante a primeira fase. A exceção ficou por conta do trecho localizado entre 10 e 70cm de comprimento do canal, onde foram amostradas seis camadas distintas no total. Essa maior discretização permitiu a elaboração de gráficos mais detalhados acerca do perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais gerados. Da mesma forma que foi feito para descrever os resultados da primeira fase, a seguir são apresentados gráficos referentes aos depósitos gerados durante a segunda fase de ensaios do presente estudo e também, para fins comparativos, dos depósitos gerados na terceira fase de ensaios dos estudos de Ávila (2003).

Antes disso, no entanto, cabe salientar que os gráficos relativos aos perfis verticais sofreram algumas modificações quanto às classes granulométricas utilizadas para apresentar os resultados da primeira fase. Visando discretizar mais os dados granulométricos, os mesmos foram agrupados em seis classes distintas ao invés das quatro empregadas anteriormente. Os intervalos de classe adotados foram os seguintes: (1,000; 0,250mm]; (0,250-0,177mm]; (0,177-0,125mm]; (0,125-0,088mm]; (0,088-0,063mm] e (0,063mm; -0,005mm), sendo esse último intervalo descrito nos gráficos com o título de “fundo”.

A figura 7.24 apresenta dois gráficos relativos ao perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 20-30cm dos ensaios da segunda fase. O gráfico localizado na parte superior ilustra a ocorrência de uma granodecrescência ascendente, ou seja, as frações depositadas na porção basal desse estrato são mais grossas do que as encontradas na porção do topo. Esse tipo de comportamento caracteriza a ocorrência de uma gradação normal. Já o gráfico localizado na parte inferior da

figura, ilustra a ocorrência de uma granodecrescência descendente, ou seja, as frações depositadas na porção basal desse estrato são mais finas do que as encontradas na porção do topo. Esse tipo de comportamento caracteriza a ocorrência de uma gradação inversa.

A figura 7.25, por sua vez, apresenta dois gráficos relativos ao perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 50-60cm dos ensaios da segunda fase. Da mesma forma que ocorreu com a seção 20-30cm, na presente seção também se observa a ocorrência da gradação normal nas camadas superiores e da gradação inversa nas camadas inferiores. Aqui, no entanto, já não estão praticamente presentes frações de material com diâmetro superior a 0,250mm, conforme evidenciado pelos gráficos. Da seção 50-60cm em diante observa-se a ocorrência da gradação normal.

Os dados dos depósitos gerados na terceira fase de ensaios dos estudos de Ávila (2003), representados nas figuras 7.26 e 7.27, indicam, no entanto, um comportamento diferenciado. Em ambas as seções apresentadas, 20-40 e 40-60cm, pode-se observar indícios da ocorrência de gradações inversas. O fato peculiar foi de que a gradação inversa foi observada tanto nas camadas superiores quanto nas inferiores, comportamento não observado para as correntes ensaiadas no canal de grande porte.

Foram formuladas duas hipóteses para descrever essa diferença de comportamentos entre os experimentos de diferentes escalas. Na primeira delas, pode-se considerar que o significativo acúmulo de material junto ao difusor, após a injeção dos dois primeiros fluxos, acabe por comprometer o avanço das duas correntes subsequentes. Dessa forma, o obstáculo formado poderia estar interferindo de alguma forma na capacidade de transporte da corrente, o que explicaria a diferença nos padrões deposicionais. A segunda hipótese para explicar o comportamento anômalo é baseada na modificação introduzida quanto ao material empregado para as simulações, realizada nessa etapa do estudo. As alterações na faixa granulométrica e na massa específica do material utilizado também podem ter modificado os padrões deposicionais em relação ao que se observou no canal de pequeno porte.

7.2.3 Correntes simples sobre declividade não nula

Encerrando o plano de ensaios apresentado anteriormente, a terceira fase de ensaios foi constituída pela simulação de correntes simples sobre o canal com declividades positivas e negativas. O material empregado na mistura utilizada para a simulação das correntes foi novamente o Carvão Mineral Cardiff 205 com granulometria predominante compreendida entre 0,062 e 0,177mm.

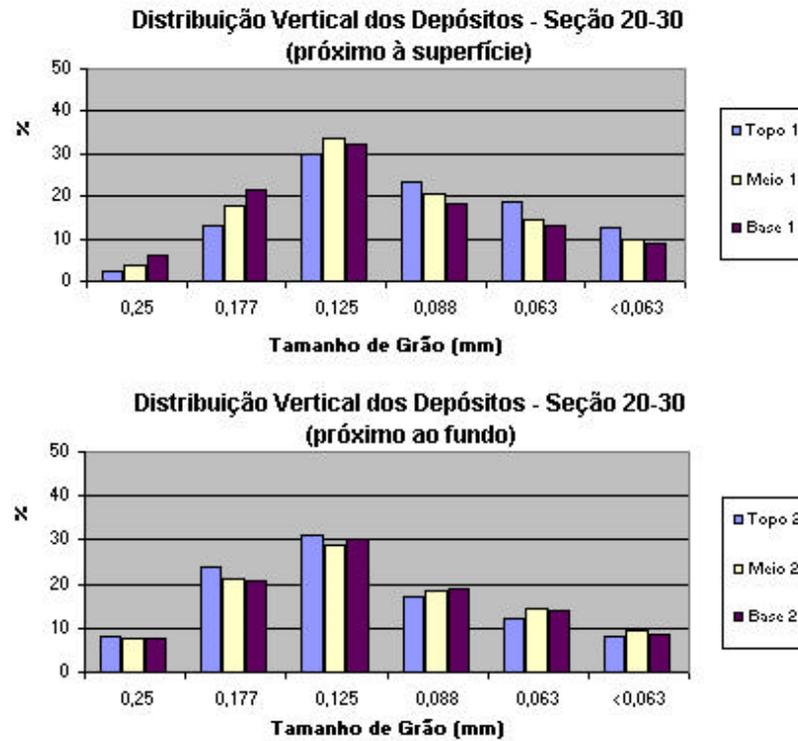


Figura 7.24: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 20-30 dos ensaios da segunda fase.

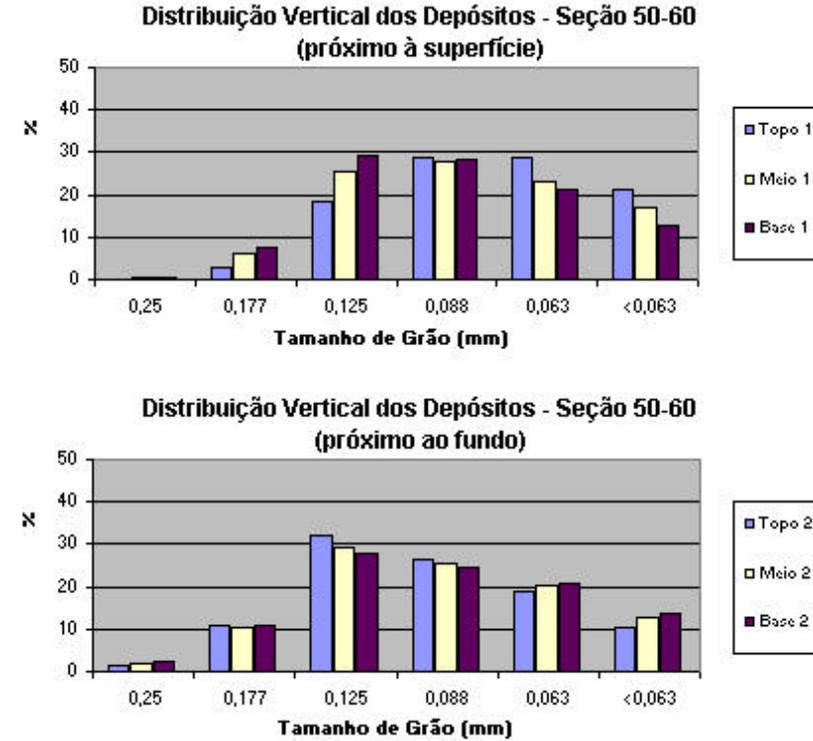


Figura 7.25: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 50-60 dos ensaios da segunda fase.

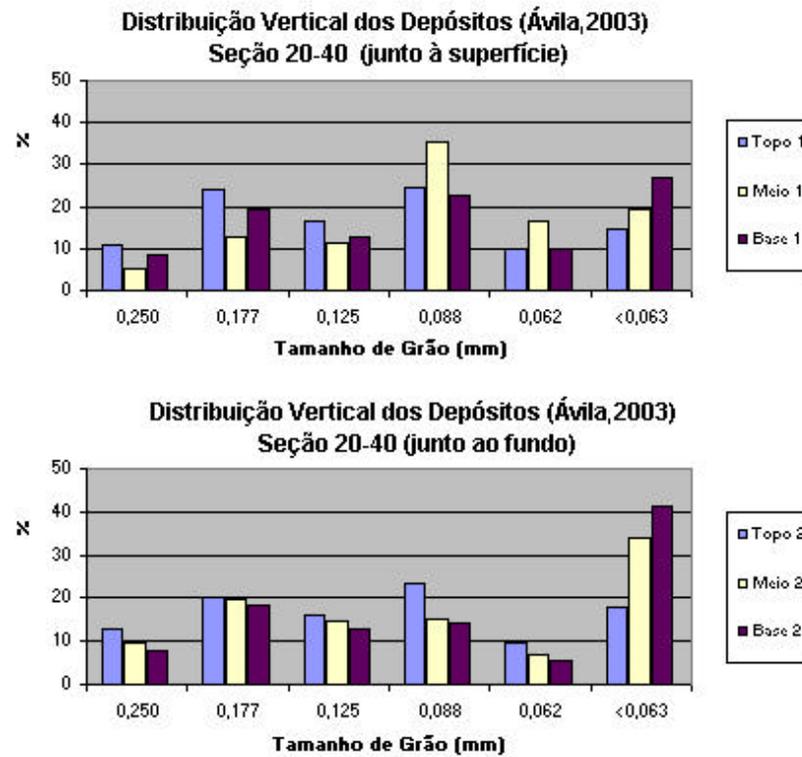


Figura 7.26: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 20-40 dos ensaios da terceira fase de Ávila (2003).

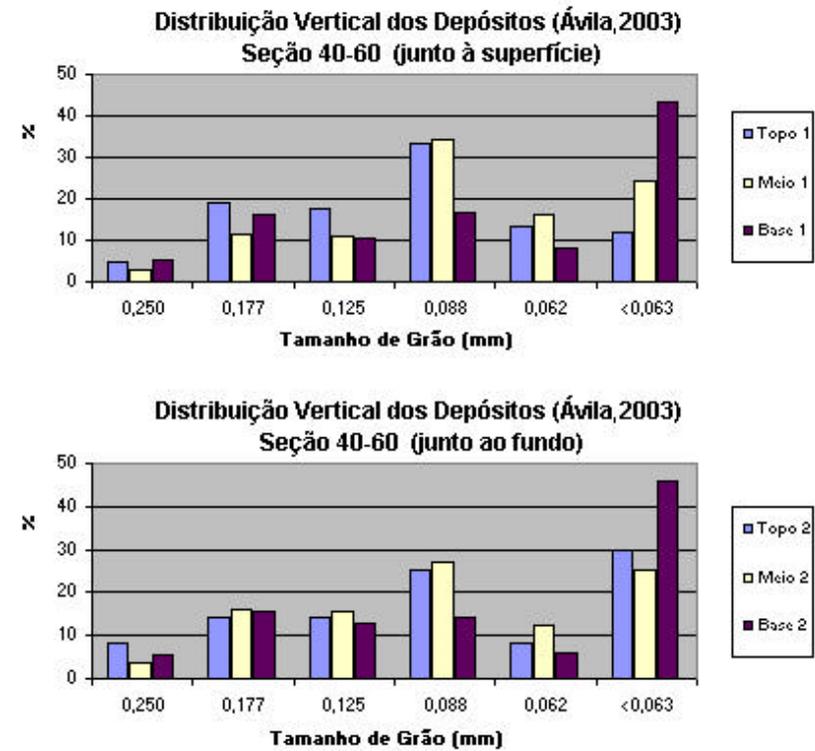


Figura 7.27: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 40-60 dos ensaios da terceira fase de Ávila (2003).

7.2.3.1 Distribuição longitudinal

Como durante as primeiras fases, os depósitos resultantes dos fluxos ensaiados voltaram a apresentar espessuras mais relevantes na região proximal do canal. Cabe salientar, entretanto, que as correntes que se desenvolveram sobre declividade negativa deram origem a depósitos mais espessos. Essa informação pode ser observada na figura 7.28, a qual apresenta a espessura do perfil longitudinal médio dos depósitos da terceira fase, e que foi construída com base nos dados fornecidos pelo distanciômetro laser. Da mesma maneira, a ausência de

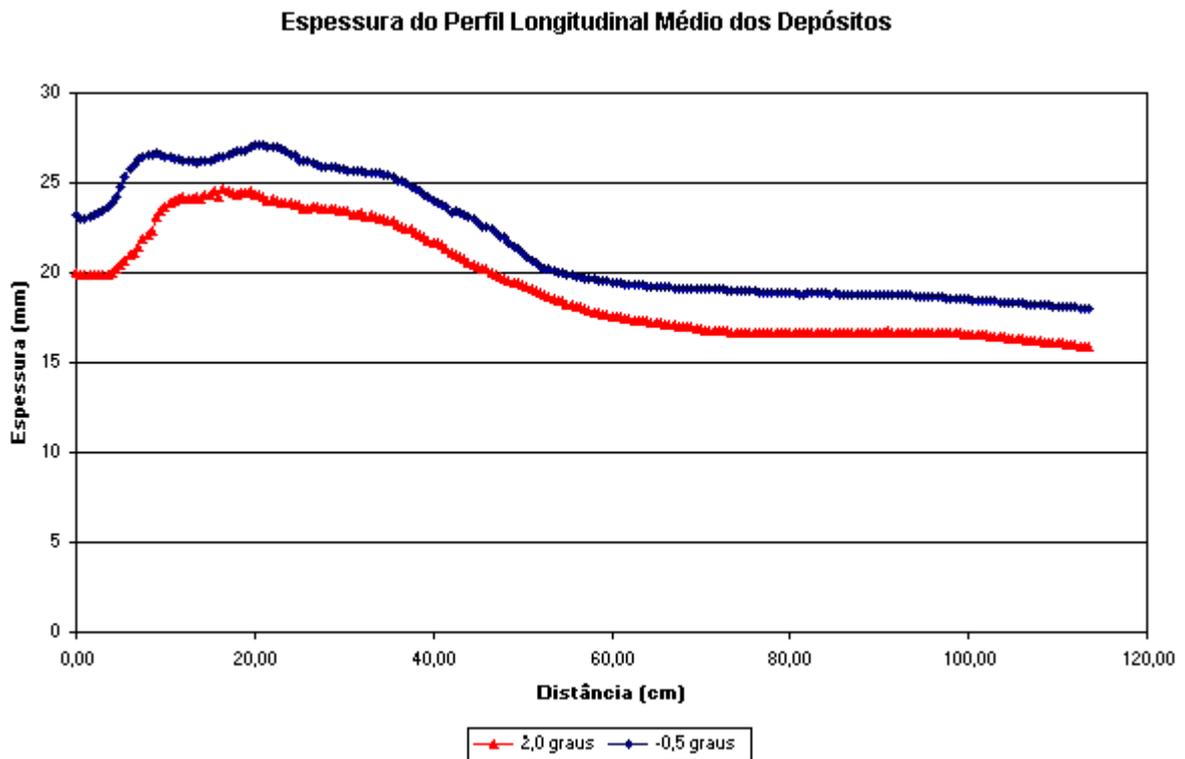


Figura 7.28: Espessura do perfil longitudinal médio dos depósitos da terceira fase.

formas de leito significativas, com exceção daquelas ocasionados junto ao difusor em virtude do jato produzido, puderam ser observadas. As figuras 7.29 e 7.30 ilustram esse comportamento tanto para as correntes simuladas com declividade positiva quanto para aquelas que enfrentaram declividade negativa. Vale ressaltar que as formas de leito que podem ser visualizadas na figura 7.29, referente ao ensaio 13, foram originadas pelo processo de esvaziamento do canal.

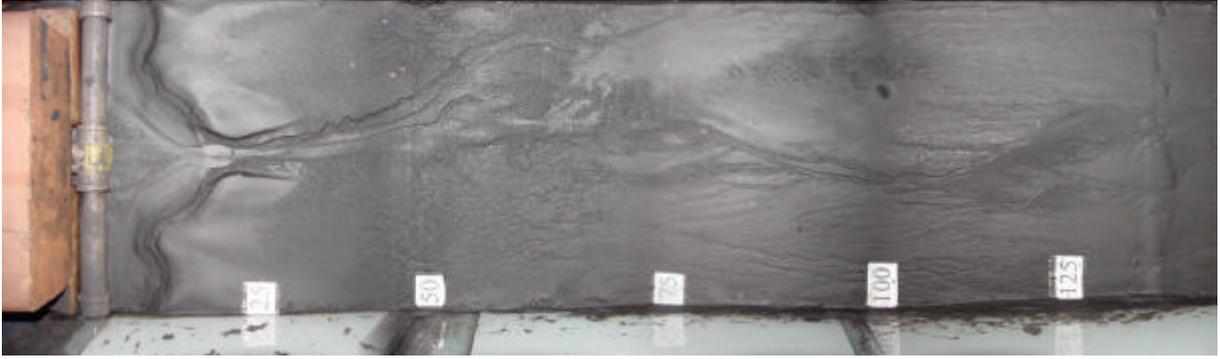


Figura 7.29: Imagem em planta do depósito gerado no primeiro metro e meio do canal pela passagem da corrente de turbidez simulada no ensaio 13 com declividade de 2° .



Figura 7.30: Imagem em planta do depósito gerado no primeiro metro e meio do canal pela passagem da corrente de turbidez simulada no ensaio 18 com declividade de $-0,5^\circ$.

Na figura 7.31, é apresentada a média das distribuições granulométricas longitudinais dos experimentos 12, 13 e 15, correspondentes aos ensaios realizados com o canal com declividade positiva de 2° . Os dados granulométricos resultantes foram novamente agrupados em quatro classes distintas de acordo com a escala de Wentworth. O gráfico novamente indica um predomínio das parcelas mais grossas na porção inicial do canal, destacando-se as parcelas areia fina e muito fina. A partir dos 60cm de comprimento do canal, observa-se um crescimento da parcela de silte grosso, que logo passa a destacar-se entre as demais, juntamente com a parcela areia muito fina. Feitas essas considerações, podemos individualizar dois trechos de deposição ao longo do canal. Nos primeiros 90cm há predominância de areia fina e muito fina, sendo que a partir dos 90cm a parcela de areia fina tem sua significância ultrapassada pela parcela de silte grosso.

Já na figura 7.32 é descrita a média das distribuições granulométricas longitudinais dos experimentos 16, 17 e 18, correspondentes aos ensaios realizados no canal com

Distribuição Longitudinal dos Depósitos

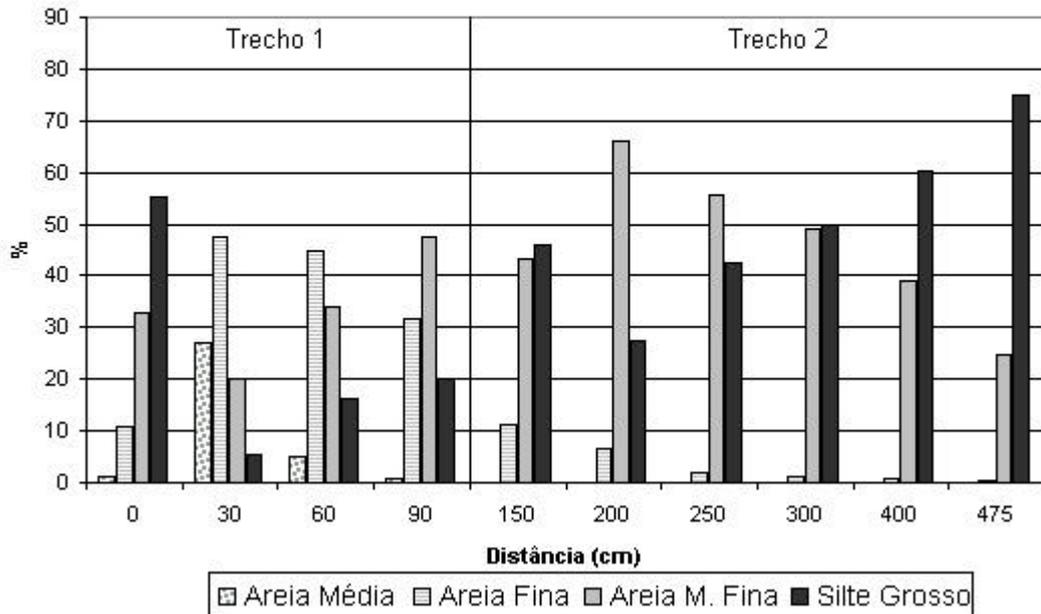


Figura 7.31: Média da distribuição granulométrica longitudinal dos ensaios 12, 13 e 15 realizados em canal com declividade de 2° .

Distribuição Longitudinal dos Depósitos

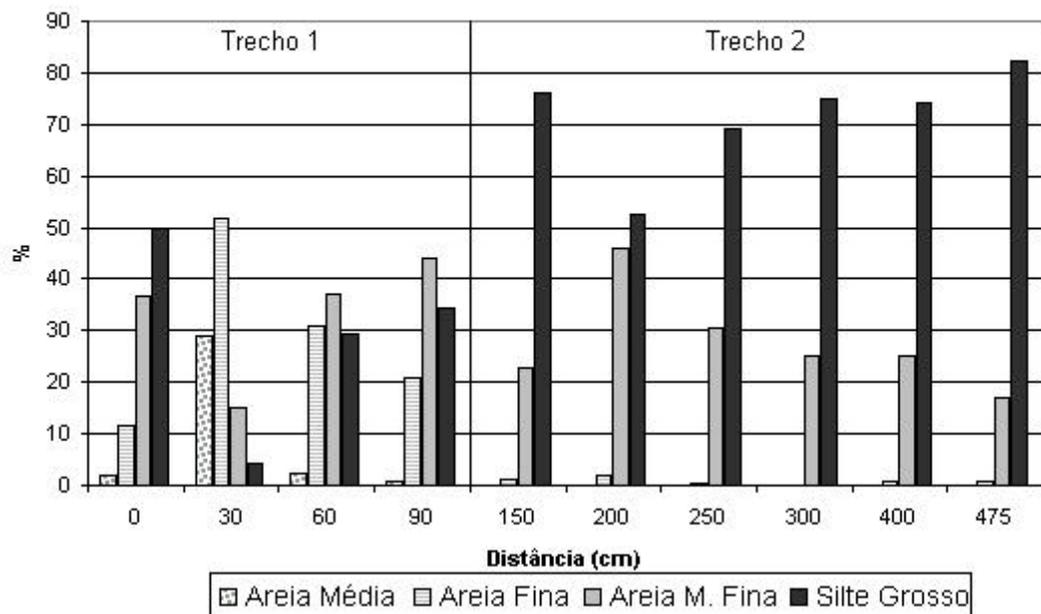


Figura 7.32: Média da distribuição granulométrica longitudinal dos ensaios 16, 17 e 18 realizados em canal com declividade de $-0,5^\circ$.

declividade negativa de $0,5^\circ$. A exemplo do gráfico anterior, novamente se observa um predomínio das parcelas mais grossas na porção inicial do canal, destacando-se, no entanto, além das parcelas areia fina e muito fina, também a parcela de silte grosso. A partir dos 90cm de comprimento do canal, as duas parcelas mais grossas, areias média e fina, praticamente desaparecem dos registros. Assim, podemos individualizar os mesmo dois trechos de deposição ao longo do canal. Agora, entretanto, nos primeiros 90cm, há predominância das areias fina e muito fina e do silte grosso, e dos 90cm em diante, as parcela de areia muito fina e silte grosso respondem por praticamente todo registro sedimentar.

Comparando os dados dos dois gráficos anteriores, pode-se concluir que os dois trechos deposicionais descritos, para cada grupo de experimentos, apresentaram algumas diferenças. Os depósitos produzidos pelas corrente que se desenvolveram sobre declividade positiva demonstraram que, nesse caso, as correntes foram capazes de transportar os sedimentos de diâmetros maiores por maiores distâncias. Esse comportamento fica mais evidente no trecho localizado a partir dos 90cm de comprimento do canal, onde, no caso dos ensaios 12, 13 e 15, observa-se um certo equilíbrio entre as parcelas areia muito fina e silte grosso, com algumas ocorrências da parcela areia fina. Já no caso dos ensaios 16, 17 e 18, o segundo trecho do canal apresenta predominância absoluta da parcela de silte grosso e praticamente ausência da parcela de areia fina.

Apesar dessa maior capacidade de transporte aparente das correntes que se desenvolveram sobre declividade positiva, também é possível observar semelhanças com relação aos padrões deposicionais gerados em ambas as condições. Se compararmos o trecho inicial de cada um dos gráficos anteriores, constataremos que eles apresentam características bastante semelhantes. Isso não é um comportamento estranho se considerarmos que as condições de geração das correntes em ambos os ensaios são as mesmas. Assim a capacidade de transporte que elas possuem só começa a ser influenciada pela declividade a partir de um determinado ponto, que no presente caso ocorre por volta do final do primeiro metro do canal, sendo que desse ponto em diante é que começamos a encontrar variações nos registros sedimentares.

Suspeita-se que algumas das variações observadas entre os gráficos, principalmente na região distal do canal, podem ser resultantes de efeitos de reflexão. Assim a corrente desenvolvendo-se sobre uma declividade positiva de 2 graus, a qual, conforme foi mostrado anteriormente, apresentou valores de velocidade mais expressivos, poderia ter sofrido reflexão no final do canal e ter continuado a depositar material ao longo do mesmo. Na possibilidade dessa hipótese ser verdadeira, poderia-se concluir que pequenas variações na declividade não influenciariam de maneira decisiva os padrões deposicionais gerados.

7.2.3.2 Perfil vertical

Da mesma forma que na primeira fase, os depósitos sedimentares resultantes das correntes simuladas foram divididos em duas camadas distintas (topo e base) ao longo do primeiro metro do canal. Os perfis verticais médios da distribuição granulométrica dos registros deposicionais gerados para as seções 20-30cm e 50-60cm, para cada uma das declividades, podem ser conferidos nas figuras de 7.33 a 7.36.

A partir da análise dos gráficos 7.33 e 7.34, referentes aos registros deposicionais localizados na seção 20-30 dos ensaios realizados para as diferentes declividades, pode-se observar comportamentos semelhantes. Em ambos os gráficos verifica-se uma predominância das frações mais grossas de sedimentos na porção basal do depósito, ou seja, uma gradação normal. No caso do canal com declividade negativa, no entanto, essa gradação é mais nítida, do que no caso do canal com declividade positiva, com exceção da parcela de areia média.

Os gráficos 7.35 e 7.36 relativos à seção 50-60 para ambas as declividades, por sua vez, indicam novamente a ocorrência de uma gradação normal. Se comparados com os gráficos anteriores, relativos à seção 20-30, no entanto, os mesmos apresentam quantidades menores da parcela areia média. Isso ocorre principalmente no caso do canal com declividade negativa. Esse fato indicaria uma menor capacidade de transporte da corrente se desenvolvendo sobre canal com declividade negativa.

Os resultados demonstrados pelos dados de distribuição granulométrica vertical dos depósitos, para ambas as declividades do canal, indicaram comportamento semelhante ao demonstrado pelos dados de distribuição granulométrica longitudinal. A exemplo do que já havia sido observado nas porções proximais dos canal, durante a análise da distribuição longitudinal dos depósitos, a variação da declividade em pequenas parcelas aparentemente não introduz grandes variações nos padrões deposicionais gerados. Apesar disso, a corrente desenvolvendo-se sobre declividade negativa aparenta ter levemente reduzida sua competência para o transporte das parcelas mais grossas de sedimento.

7.3 ANÁLISE DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS, GEOMÉTRICOS E DEPOSICIONAIS MÉDIOS

Para fins de comparação, os dados dos ensaios realizados nas diferentes fases deste estudo encontram-se sumarizados na tabela 7.2, na qual foram agregados os dados produzidos, respectivamente, na primeira e terceira fases de estudos de Ávila (2003).

Distribuição Vertical dos Depósitos - Seção 20-30 (2 graus)

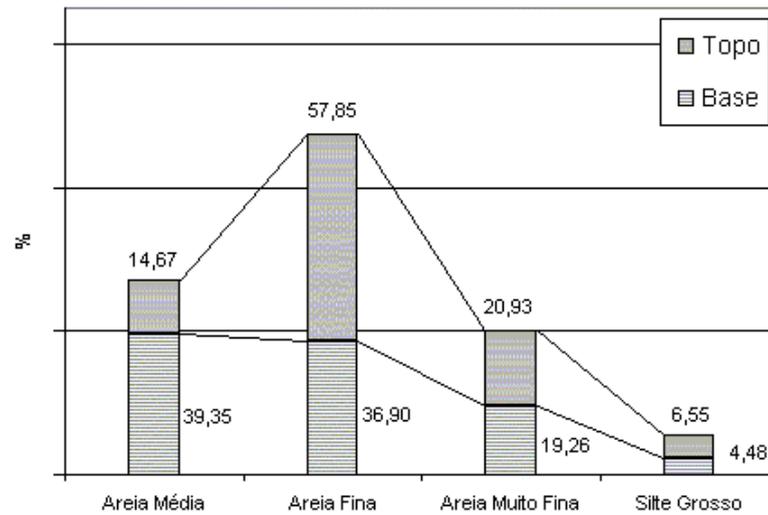


Figura 7.33: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 20-30 dos ensaios no canal com 2 graus.

Distribuição Vertical dos Depósitos - Seção 20-30 (-0,5 graus)

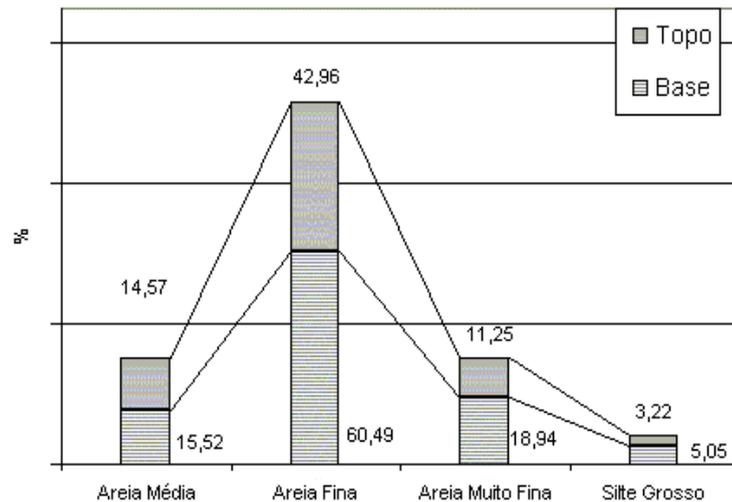


Figura 7.34: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 20-30 dos ensaios no canal com -0,5 graus.

Distribuição Vertical dos Depósitos - Seção 50-60 (2 graus)

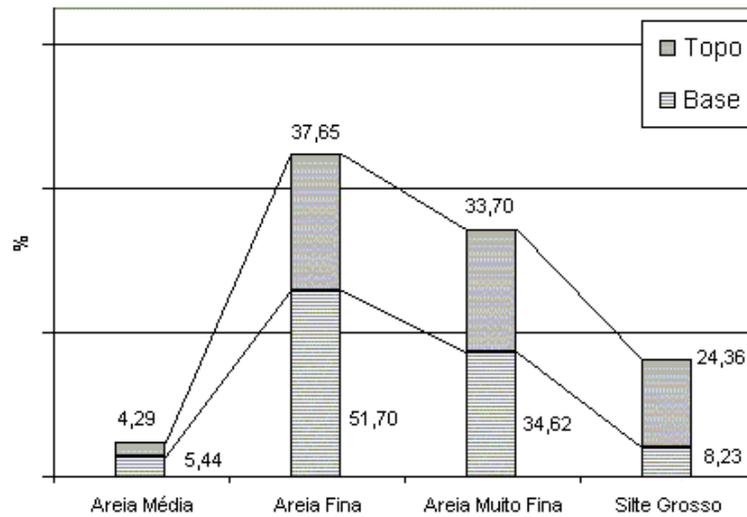


Figura 7.35 – Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 50-60 dos ensaios no canal com 2 graus.

Distribuição Vertical dos Depósitos - Seção 50-60 (-0,5 graus)

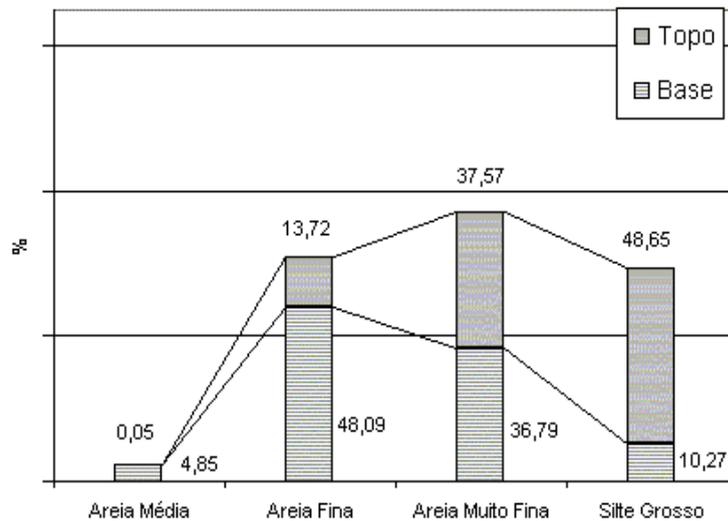


Figura 7.36: Perfil vertical médio da distribuição granulométrica dos registros deposicionais localizados na seção 50-60 dos ensaios no canal com -0,5 graus.

Tabela 7.2: Resultados médios das três fases de estudos e de Ávila (2003).

| Resultados Médios | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|-------------------|--------|-------------------|-------|--|--------------------|---------------------|---------------------|----------|---|--------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|
| Fase de Ensaio | Velocidade (cm/s) | | Altura Média (cm) | | Mistura Injetada | | Vazão Média (l/min) | Froude Densimétrico | Reynolds | ρ_{material} (kg/m ³) | Comp. zona deposição (%) | | D ₅₀ médio por zona (mm) | |
| | Média | Desvio | Cabeça | Corpo | $\rho_{\text{médio}}$ (kg/m ³) | Concentração (g/l) | | | | | 1 ^a | 2 ^a | 1 ^a | 2 ^a |
| 1 ^a | 3,36 | 1,15 | 11,11 | 16,06 | 1013,99 | 63,06 | 17,83 | 0,25 | 5667,84 | 1365 | 18 | 82 | 0,1532 | 0,7790 |
| 2 ^a | 4,93 | 1,81 | 6,45 | 9,40 | 1025,82 | 177,70 | 16,17 | 0,37 | 4855,41 | 1190 | 12 | 88 | 0,9425 | 0,3876 |
| 3 ^a (2,0°) | 8,02 | 2,27 | 6,54 | 10,35 | 1038,17 | 253,86 | 18,83 | 0,50 | 7970,45 | 1190 | 18 | 82 | 0,1260 | 0,6610 |
| 3 ^a (-0,5°) | 4,84 | 2,48 | 5,93 | 8,38 | 1039,88 | 264,36 | 18,83 | 0,30 | 4425,39 | 1190 | 18 | 82 | 0,1081 | 0,4088 |
| 1 ^a (Ávila) | 3,12 | 2,58 | 7,50 | N/D | 1022,67 | 181,55 | 5,00 | 0,28 | 3546,35 | 1365 | 20 | 80 | N/D | N/D |
| 3 ^a (Ávila) | 3,60 | 3,64 | 7,50 | N/D | 1022,00 | 176,77 | 10 | 0,28 | 4100,97 | 1365 | 20 | 80 | N/D | N/D |

7.3.1 Quanto às velocidades desenvolvidas pelas correntes

A observação dos dados relativos às velocidades desenvolvidas pelas correntes simuladas sugere que as mesmas parecem ser pouco sensíveis a variações de declividade da ordem de 0,5 graus. Essa afirmação pode ser feita com base na figura 7.1, a qual ilustra as tendências da variação espacial da velocidade de avanço das correntes ao longo do canal. De acordo com a referida figura, observa-se que as velocidades das correntes ensaiadas em canal com declividades de -0,5 e 0 graus têm comportamento distinto no trecho inicial e que, no entanto, esse comportamento tende a se igualar a partir de certo ponto.

A explicação mais provável para essa diferença de comportamento no trecho inicial é a existência de um período de estabilização do escoamento após o início da simulação. Nessa região, a corrente estaria mais sujeita à influência do jato formado na saída do difusor e principalmente à ocorrência de variações nas condições de admissão da mistura, especialmente no que se refere aos valores de vazão de injeção. Após esse trecho inicial, no entanto, o comportamento do escoamento passa a ser governado basicamente pela diferença de massa específica entre a corrente e o fluido ambiente. A partir desse momento, variações de declividade da ordem de 0,5 graus parecem tornar-se pouco relevantes no tocante à velocidade do fluxo, como observa-se na figura 7.1.

O mesmo aparentemente não pode ser dito para variações de declividade da ordem de 2 graus. A linha de tendência laranja, na figura 7.1, indica que as correntes que se desenvolveram sobre canal com declividade positiva de dois graus, apresentaram velocidades superiores às demais. Apesar de o comportamento da velocidade, para as três declividades ensaiadas, ter valores iniciais muito próximos, observa-se que essa tendência logo desaparece na medida em que a corrente se desloca em direção à região distal do canal.

Outro parâmetro que curiosamente parece não ser o único a exercer influência significativa sobre os valores de velocidade das correntes é a massa específica da mistura injetada. Esse fato parece contraditório, uma vez que a diferença de densidade entre a corrente e o meio é a principal força motriz do escoamento, no entanto, a análise da figura 7.37 sugere que a velocidade não cresce diretamente com o aumento da massa específica da mistura. Esse comportamento é exemplificado fixando-se uma velocidade média e observando que diferentes correntes, com massas específicas crescentes, ocorrem com uma mesma velocidade.

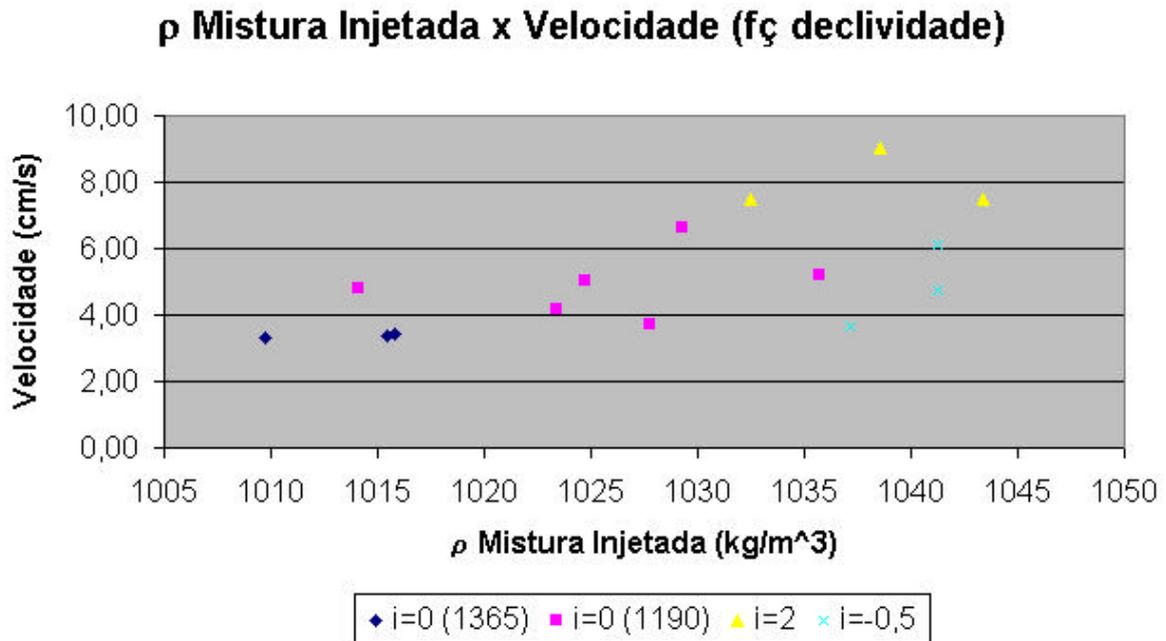


Figura 7.37: Velocidade média das correntes não-conservativas ensaiadas em função da massa específica da mistura injetada e da declividade do canal.

7.3.2 Quanto às alturas apresentadas pelas cabeças das correntes

A análise das alturas das cabeças apresentadas pelas correntes ensaiadas sugeriu algumas conclusões inusitadas, as quais serão comentadas a seguir. A primeira delas, ilustrada pela figura 7.38, demonstra que a altura e a velocidade das correntes não estão diretamente relacionadas. Como se observa no gráfico, um aumento de velocidade não implica necessariamente em uma diminuição da altura, a exemplo do que ocorreria em um escoamento sub-aéreo. Ao invés disso, o que se observa é a manutenção de uma altura praticamente padrão para todas as correntes simuladas com o mesmo tipo de carvão.

Da mesma forma, a figura 7.39, que relaciona a altura da corrente e a massa específica da mistura injetada, sugere que a altura também não se relaciona diretamente com a massa específica. Novamente o que se observa é que o comportamento das alturas parece ser influenciado apenas pela massa específica do sedimento que está sendo empregado para a simulação. Isso explicaria porque os pontos em azul escuro, que correspondem a correntes simuladas com Carvão 207, apresentam alturas maiores que os demais.

Apesar disso, os dois gráficos sugerem que a altura também parece sofrer influência das condições de admissão da mistura. Isso pode ser observado pelo comportamento dos pontos em azul escuro destacados pelas elipses em vermelho. Esses pontos foram destacados por corresponderem a correntes simuladas com emprego de difusor com 6 orifícios, enquanto

que para todas as demais correntes utilizou-se um difusor com 10 orifícios. Essa modificação implicou num aumento da altura da corrente, mesmo que a massa específica e as velocidades tenham se mantido praticamente as mesmas, conforme se pode constatar comparando os cinco pontos em azul escuro, relativos a primeira fase de estudos.

Para tentar explicar a invariância da altura da corrente em face do aumento da velocidade, foi elaborada a seguinte hipótese. A invariância da altura poderia, de alguma forma, estar relacionada ao confinamento sofrido pela corrente em função da presença de fluido ambiente. A pressão exercida sobre a corrente pela coluna de fluido ambiente existente sobre a mesma, poderia fazer com que as variações no volume da corrente, em função de modificações na velocidade, se tornassem muito pequenas.

Já a variação da altura em função da massa específica do sedimento empregado na simulação, poderia estar relacionada à quantidade de material necessário para que a mistura utilizada apresentasse a massa específica desejada. Um sedimento com massa específica maior implica em uma menor quantidade total de sedimento por litro de mistura utilizada,

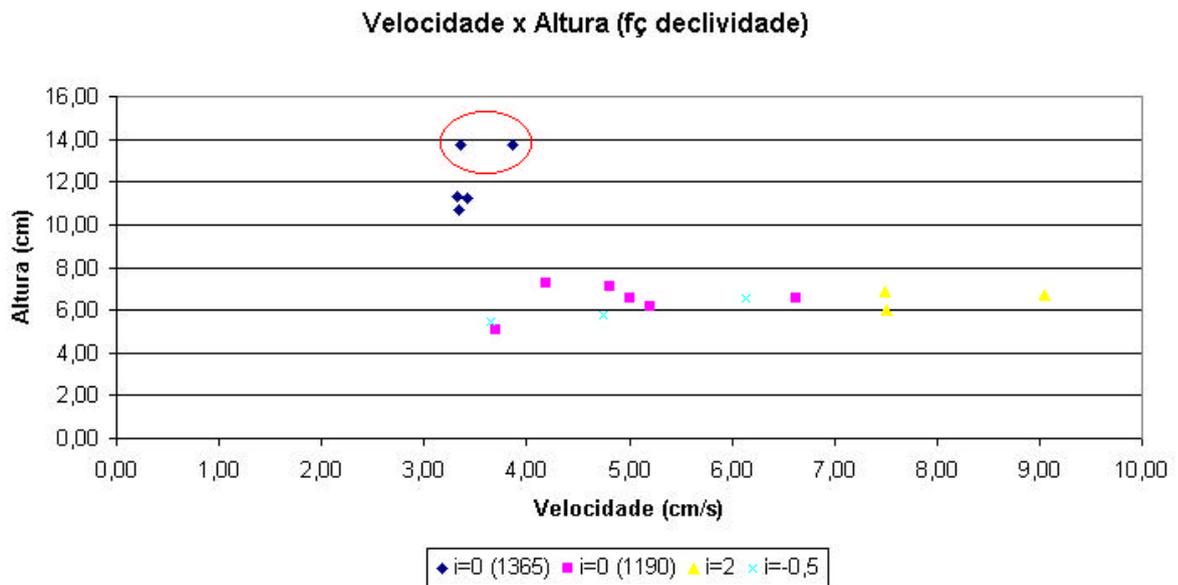


Figura 7.38: Altura das cabeças das correntes simuladas em função da velocidade e da declividade.

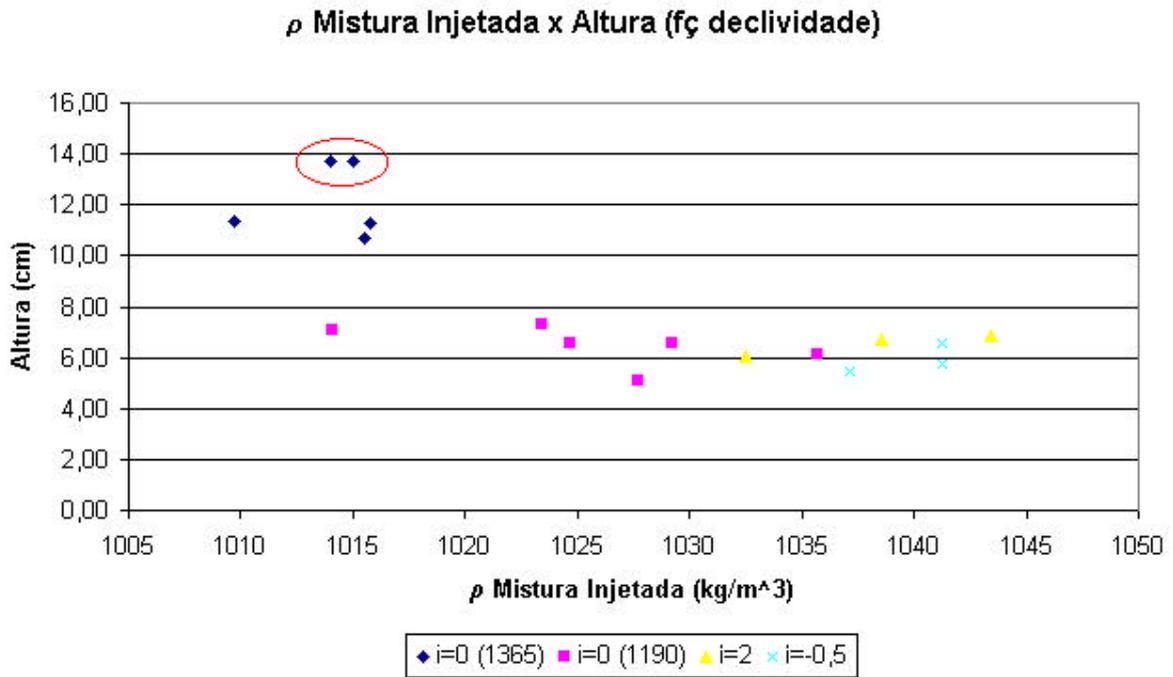


Figura 7.39: Altura das cabeças das correntes não-conservativas simuladas em função da massa específica da mistura injetada e da declividade.

para uma mesma massa específica de mistura desejada. Assim, uma menor quantidade de sedimento significa um maior espaçamento entre as partículas, as quais por se chocarem menos vezes, acabariam atingindo maiores distâncias em relação ao fundo do canal. Isso acarretaria num aumento da altura da corrente quando da utilização de um sedimento de maior massa específica na composição da mistura empregada para a simulação.

7.3.3 Quanto aos padrões deposicionais gerados em diferentes escalas de simulação

Comparando entre si os padrões deposicionais gerados no canal de grande porte com os gerados no canal de pequeno porte, durante os estudos de Ávila (2003), pode-se verificar que o grau de semelhança entre os mesmos variou entre uma etapa e outra dos experimentos. As simulações de correntes simples, realizadas durante a primeira fase, apresentaram padrões deposicionais bastante similares aos gerados por Ávila durante a primeira fase dos seus estudos. Já as simulações de correntes consecutivas deram origem a padrões deposicionais que guardaram alguma semelhança com os padrões gerados por correntes consecutivas durante a terceira fase de estudos de Ávila, no entanto, o grau de semelhança apresentado não foi tão grande quanto o verificado no caso das correntes simples.

Para os depósitos gerados por correntes simples, como já foi discutido na seção relativa à distribuição longitudinal dos depósitos, observou-se a formação de duas zonas de deposição características. Na primeira há predomínio da fração areia fina e na segunda da fração areia muito fina. Os depósitos gerados por Ávila, por sua vez, também reproduziram esses dois primeiros trechos sendo que, no entanto, também apresentariam um terceiro trecho, com predominância da fração silte grosso. Se considerarmos que o canal de pequeno porte possui uma zona de dispersão de dimensões reduzidas, poderíamos supor que a presença do silte grosso na porção distal do canal é devida a efeitos de reflexão da corrente.

Assim, apesar das pequenas heterogeneidades existentes nos depósitos da região distal do canal de pequeno porte, poderíamos considerar que os padrões deposicionais gerados em ambos os canais, guardadas as devidas proporções de escala, foram bastante semelhantes. Isso pode ser verificado comparando a semelhança existente entre as figuras 7.15 e 7.16 na seção relativa à distribuição longitudinal dos depósitos da primeira fase de estudos. Da mesma forma, a partir dos dados relativos ao comprimento percentual das zonas de deposição, presentes na tabela 7.2, verifica-se que a primeira zona de deposição teve um comprimento relativo de 18% para o canal de grande porte e de 20% para o canal de pequeno porte. Já a segunda zona de deposição apresentou um comprimento relativo de 82% para o canal de grande porte e de 80% para o canal de pequeno porte. Cabe salientar que neste caso, estaríamos desconsiderando a existência da terceira zona de deposição apresentada pelo canal de pequeno porte e admitindo a hipótese de que a mesma teria sido formada em virtude da reflexão das correntes na extremidade da zona de dispersão.

Já os depósitos gerados por correntes consecutivas – segunda fase do presente estudo e terceira fase dos estudos de Ávila (2003) – apesar de também terem apresentado dois trechos de deposição característicos, indicaram predominância de frações granulométricas distintas ao longo desses trechos. Enquanto no canal de grande porte houve predomínio das frações areia fina e muito fina, no primeiro trecho, e das frações areia muito fina e silte grosso, no segundo trecho, no canal de pequeno porte, por sua vez, houve predomínio das frações areia fina e muito fina nos dois trechos, sendo a fração mais grossa predominante no primeiro trecho e a mais fina no segundo. Da mesma maneira, como pode ser observado na tabela 7.2, o comprimento das zonas de deposição também não foi tão semelhante quanto o apresentado pelas correntes simples, o que provavelmente está ligado à diferença no sedimento empregado nas simulações realizadas em cada fase de estudos.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

8.1 QUANTO AO SUCESSO DO PROCESSO DE TRANSPOSIÇÃO DA METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO FÍSICA

Pode-se considerar que o objetivo de transpor a metodologia de simulação física de correntes de turbidez, do canal de pequeno porte para o canal de grande porte, foi atingido. Essa afirmação pode ser feita com base no fato de que as correntes foram simuladas de maneira satisfatória e deram origem a depósitos sedimentares. Estes apresentaram uma configuração semelhante à observada no canal de pequeno porte, isto é, depósitos com perfis mais espessos na região proximal e mais delgados na região distal.

Mesmo que o processo de transposição tenha sido considerado satisfatório algumas dificuldades foram enfrentadas nas simulações e na coleta de dados. Durante o processo de simulação houve dificuldades na manutenção de uma massa específica constante para a mistura devido ao grande volume de material a ser empregado. Também houve dificuldade para atingir o valor da massa específica desejada para a mistura.

Já a visualização do perfil longitudinal dos depósitos foi prejudicada em função do volume de material depositado exigir muito tempo para uma completa secagem. Isso gerou problemas relativos à visualização dos depósitos, comprometendo, de certa forma, a idéia inicial de se realizar um estudo mais detalhado dos depósitos gerados. Esse fato também prejudicou a realização da tarefa, proposta nos objetivos, de se procurar semelhanças entre os depósitos gerados nas simulações físicas e os depósitos gerados por correntes ditas de alta densidade descritas na bibliografia.

Os resultados provenientes da análise dos depósitos sedimentares gerados sugerem que alguns parâmetros parecem ser relevantes para a eliminação de possíveis efeitos de escala nas simulações. São eles a massa específica do sedimento empregado na mistura, as condições de admissão da mesma e também o valor do número de Froude Densimétrico. Observou-se que durante a primeira etapa do estudo, com a conservação de tais parâmetros, a transposição da metodologia de simulação física de correntes de turbidez, do canal de pequeno porte para o canal de grande porte, forneceu resultados considerados satisfatórios tanto qualitativa quanto quantitativamente.

8.2 QUANTO À COMPARAÇÃO DOS PADRÕES DEPOSICIONAIS GERADOS COM OS DADOS PRÉ-EXISTENTES

Levando em consideração os depósitos sedimentares gerados durante a primeira e a segunda etapa de estudos, pode-se observar que os resultados obtidos durante a primeira etapa foram os que mais se assemelharam aos dados pré-existentes do canal de pequeno porte, provenientes do estudo de Ávila (2003). Os depósitos produzidos durante a primeira etapa se assemelharam aos do referido autor tanto com relação à distribuição longitudinal quanto aos perfis verticais apresentados pelo sedimento depositado. Os depósitos gerados durante a segunda etapa também guardaram certa semelhança com os resultados de Ávila (2003), sendo que pode ser observada a formação de trechos deposicionais similares. Apesar disso, as frações de material depositado predominantes em cada trecho não foram idênticas. Os resultados obtidos durante a primeira etapa sugerem que a manutenção da massa específica do sedimento utilizado na mistura que dá origem às correntes, das condições de admissão e do Número de Froude Densimétrico podem garantir a obtenção de depósitos que guardem maior semelhança entre si.

8.3 QUANTO ÀS MODIFICAÇÕES NOS DEPÓSITOS GERADOS INDUZIDAS PELA DECLIVIDADE NÃO NULA

Comparando os dados provenientes dos depósitos gerados pelas correntes que se desenvolveram sobre canal com declividade não nula conclui-se que ambos apresentaram dois trechos de deposição distintos. Apesar disso, as frações de material depositado predominantes em cada trecho não foram idênticas. Ao invés disso, constatou-se que o canal com declividade positiva permitiu que a corrente transportasse frações de material com diâmetro maior por distâncias mais longas. Essas diferenças, no entanto, são mais significativas nos trechos distais do canal, uma vez que, ao longo do primeiro metro de comprimento, os depósitos gerados nas duas condições de declividade apresentaram padrões bastante semelhantes. As espessuras dos perfis longitudinais dos depósitos foram maiores para as correntes que se desenvolveram sobre declividade negativa.

8.4 QUANTO À SEMELHANÇA DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E HIDRODINÂMICOS DE CORRENTES CONSERVATIVAS E NÃO-CONSERVATIVAS

Os dados de velocidade de correntes conservativas (Fabian, 2002) e não-conservativas demonstraram que as primeiras apresentam velocidades superiores. Por outro lado, as correntes não-conservativas demonstraram sofrer variações mais expressivas dos valores de velocidade ao longo do seu desenvolvimento. Quanto às alturas da cabeça e do corpo das correntes não-conservativas, não foram observadas variações significativas de seus valores para as declividades ensaiadas. No caso das correntes conservativas, Fabian (2002) havia observado um crescimento da altura da cabeça da corrente na presença de declividades com valores positivos.

8.5 QUANTO À SEMELHANÇA ENTRE OS DEPÓSITOS GERADOS NAS SIMULAÇÕES E OS DEPÓSITOS NATURAIS

A observação de aspectos texturais e do arranjo interno do sedimento nos depósitos foi dificultada sobremaneira pelo grande volume de material exigir um intervalo de tempo muito grande para a eliminação, apenas parcial, da umidade conforme já relatado. A experiência adquirida pelos estudos anteriores, realizados no canal de pequeno porte, demonstrou a necessidade da completa secagem dos depósitos para permitir a observação das estruturas internas. Além disso, a substituição do Carvão 207 pelo 205, de menor granulometria, complicou ainda mais o processo de secagem.

Apesar dessas limitações foi identificada, através de análise granulométrica, a existência de gradações normais e inversas no interior dos depósitos quando da avaliação dos perfis verticais. A gradação normal foi observada durante todas as etapas do presente estudo. Já a gradação inversa foi observada apenas para os ensaios com correntes consecutivas. Esse comportamento sugere que a ocorrência de tal tipo de padrão deposicional está de alguma forma associada ao retrabalhamento do substrato móvel e por isso não se manifesta em ensaios com correntes simples.

8.6 QUANTO À REALIZAÇÃO DE NOVOS ESTUDOS

Levando-se em conta o fato de que os experimentos realizados durante a primeira fase foram os que apresentaram os registros deposicionais que mais se assemelharam aos dados pré-existentes do canal de pequeno porte, algumas considerações acerca dos efeitos de escala sobre as simulações podem ser feitas. Nesse sentido, os resultados das simulações da primeira fase sugerem que, para que se garanta a eliminação de efeitos de escala, sejam mantidos a massa específica do sedimento empregado na mistura, as condições de admissão da mesma e também o valor do número de Froude Densimétrico.

As simulações da primeira fase, além de terem sido realizadas com o mesmo material que os experimentos da primeira fase de Ávila (2003), também mantiveram um valor do número de Froude Densimétrico próximo do obtido pelo referido autor. De acordo com a tabela 7.2, as simulações da primeira fase registraram um valor de Froude Densimétrico médio de 0,79 enquanto os experimentos de Ávila registraram um valor médio de 0,72. A necessidade da manutenção do número de Froude Densimétrico está de acordo com as recomendações de Middleton (1966) já abordadas anteriormente no presente trabalho.

Além disso, a sugestão de que a massa específica do sedimento empregado na composição da mistura utilizada para as simulações desempenha papel importante nos resultados obtidos precisa ser melhor estudada. Experimentos com materiais de diferentes massas específicas deveriam ser considerados para que se pudesse realmente avaliar o grau de influência desse parâmetro nas simulações. Tais ensaios também serviriam para avaliar a interferência da variação da massa específica do material sobre os padrões geométricos da corrente, principalmente no que se refere às alturas do corpo e da cabeça.

Uma vez comprovado o fato de que a massa específica do sedimento desempenha papel decisivo sobre os resultados das simulações, também poderiam ser realizados ensaios de correntes consecutivas nos canais de pequeno e grande porte com a utilização do mesmo sedimento. Nesse sentido os resultados obtidos no presente estudo não foram tão satisfatórios quanto os alcançados durante a primeira fase, muito provavelmente devido ao sedimento empregado nas simulações ter sido, por motivos de força maior, substituído por outro de massa específica distinta.

Finalmente, em vista da influência do jato formado na saída do difusor sobre o comportamento da corrente e de seus padrões deposicionais no segmento inicial do canal, conforme foi observado nos experimentos realizados, algumas modificações poderiam ser introduzidas no difusor para tentar minimizar esse fato. Como sugestão se poderia estudar a adoção de um difusor com orifícios de diâmetros diferenciados, sendo os mesmos crescentes

do centro para as bordas, de maneira a uniformizar mais o fluxo ao longo da seção transversal do canal. Atenção especial também poderia ser dada ao sistema de drenagem do canal, visando contribuir para uma melhor secagem e posterior visualização das estruturas internas dos depósitos.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁVILA, M. D., 2003. Modelagem física de correntes de densidade no estudo de depósitos turbidíticos, 123p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BRITO, D. U.; MEDEIROS, D. S.; MANICA, R.; BORGES, A. L. O., MAESTRI, R. D., 2002. Emprego de equipamento de visualização (Ecógrafo Médico) para o estudo de correntes de densidade não conservativas. Revista Técnica de Energia, Petróleo e Gás. Rio de Janeiro, vol. 1, nº 2, p.54-58.
- BRUHN, C.H.L. & MORAES, M. A. S., 1988. Turbiditos Brasileiros: caracterização geométrica e faciológica. Belém: XXXVº Congr. Bras. Geol. (Anais, V.2, p. 824-831).
- BRUHN, C.H.L. & MORAES, M. A. S., 1989. Turbiditos da formação Urucutuca na bacia de Almada, Bahia: um laboratório de campo para estudo de reservatórios canalizados. B. Geoci. PETROBRÁS, Rio de Janeiro, 3(3), p.235-267.
- FABIAN, S., 2002. Modelagem física de correntes de turbidez em canal bidimensional de declividade variável, 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- KUENEN, P. H., 1937. Experiments in connection with Daly's hypothesis on the formation of submarine canyons. Leidse Geo. Meded., 8, 327-355.
- KUENEN, P. H. e MIGLIORINI, C. I., 1950. Turbidity currents as a cause of graded bedding. Journal of Geology, v. 58, p. 91-127.
- KUENEN, P. H., 1951. Properties of turbidity currents of high density. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, p. 1-14 (Special Publication. n. 2).
- LAVAL, A., CREMER, P., BEGHIN, P. e RAVENNE, C., 1988. Density surges: two dimensional experiments. Sedimentology, Oxford, v.35, p. 73-84.
- LOWE, D.R., 1982. Sediment gravity flows: II. Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. Journal of Sedimentary Petrology, Tulsa, v. 52, n. 1, p. 279-297.
- MANICA, R., 2002. Modelagem física de correntes de densidade não conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada, 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MIDDLETON, G. V., 1967. Experiments on density and turbidity currents III, deposition of sediment. Canadian Journal of Earth Sciences, v. 4, p. 475-505.
- MOTTA, V. F. 1972. Curso de Teoria da Semelhança. Porto Alegre, Ed. URGs. 154p.

- MUTTI, E., & RICCI, LUCCHI F., 1972. Turbidites of the northern Apennines: introduction to facies analysis. Internacional Geology Review, 20, p. 125-166.
- MUTTI, E. & RICCI, LUCCHI F., 1975. Turbidites facies and facies associations. In: Examples of Turbidite Facies and Facies Associations from Selected Formations of the Northern Apennines, Field Trip Guidebook A-11; Nice: International Sediment. Congr. IX, p. 21-36.
- MUTTI, E., & NORMARK, R., 1991. An integrated approach to the study of turbidite systems. Seismic Facies and Sedimentary Processes of Submarine Fans and Turbidite Systems, New York: Springer-Verlag, p. 75-106.
- MUTTI, E., TINTERRI, R., BENEVELLI, G., DI BIASE, D., CAVANNA, G., 2003. Deltaic, mixed and turbidite sedimentation of ancient foreland basins. Marine and Petroleum Geology, 20, p. 733-755.
- POSTMA, G., NEMEC, W., & KLEINSPEHN, K. L., 1988. Large floating clasts in turbidites: a mechanism for their emplacement. Sedimentary Geology, 58, p. 47-61.
- SARTOR, R., MANICA, R., ÁVILA, M. D., BORGES, A. L. O., MAESTRI, R D., 2002. Utilização de modelo físico simplificado para estudo de padrões deposicionais das correntes de densidade na interface base do talude e planície abissal. João Pessoa: Congresso Brasileiro de Geologia 279p (*Anais: a geologia e o homem*).
- STOW, D. A. V. e JOHANSSON, M., 2000. Deep-Water massive sands: nature, origin and hydrocarbon implications. Marine and Petroleum Geology, 17, p. 145-174.