

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**MODELAGEM FÍSICA DE CORRENTES DE DENSIDADE NÃO
CONSERVATIVAS EM CANAL TRIDIMENSIONAL DE GEOMETRIA
SIMPLIFICADA**

RAFAEL MANICA

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

Orientadora: Ana Luiza de Oliveira Borges

Banca Examinadora:

| | |
|--|------------------|
| Prof. Dr. Luiz Emílio S. B. de Almeida | IPH/UFRGS |
| Prof. Dr. Elírio E. Toldo Junior | CECO/UFRGS |
| Geol. Dr. Jorge Ciro Appi | CENPES/PETROBRAS |

Porto Alegre, 22 de Maio de 2002.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

MODELAGEM FÍSICA DE CORRENTES DE DENSIDADE NÃO CONSERVATIVAS
EM CANAL TRIDIMENSIONAL DE GEOMETRIA SIMPLIFICADA

RAFAEL MANICA

Orientadora: Ana Luiza de Oliveira Borges

Colaborador: Rogério Dornelles Maestri

Porto Alegre, 22 de Maio de 2002.

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.

Durante o período de desenvolvimento deste trabalho várias pessoas contribuíram, de forma direta ou indireta, para que o mesmo se concretizasse seja pelo auxílio teórico, técnico ou didático oferecido, seja pelo estímulo moral e pessoal oferecido da mesma forma. Dentre essas pessoas gostaria de agradecer as seguintes:

A minha família e aos meus amigos(as) por tudo.

A minha orientadora, professora Ana Luiza de Oliveira Borges, que através de seus conhecimentos e de sua capacidade de assimilar minhas idéias, contribuiu para a realização e compreensão deste trabalho.

Ao professor Rogério Dornelles Maestri pela colaboração, esclarecimentos e críticas que permitiram a idealização e desenvolvimento deste trabalho.

A Ana e o Maestri pelas oportunidades dadas, convivência, conselhos e experiências repassadas, auxiliando-me tanto profissionalmente quanto pessoalmente.

Aos colegas da sala de estudos do Pavilhão Fluvial do IPH Sávio Freire Lima, Samuel Fabian, Paulo Augusto Ribeiro, Fábio Arnez, José Fontoura e Ricardo Eifler pelo companheirismo e pelas experiências de vida.

Aos bolsistas de Engenharia Civil Diogo S. Medeiros, Daniel U. de Brito, Rodrigo Sartor e Richard E. Ducker, por todo o período de convivência que tivemos durante a pesquisa, além das caminhadas até o RU e pelos sensacionais jogos de Ping-Pong, no horário do meio-dia.

Aos hidrotécnicos que trabalharam no projeto, destacando Sérgio Nicolau Flores, Vivian Celestino, Valter Nativo dos Santos, Eduardo Maso Viegas, Anderson Santos e Pedro Moraes que com seus trabalhos qualificados permitiram auxiliar e acelerar o andamento das atividades da pesquisa.

Aos colegas geólogos Adriano Viana, Antônio Cosme Del Rey e Marcelo Devenutti Ávila pelo aprendizado na área de geologia e pelas discussões, esclarecimentos e idéias relacionadas à geologia que contribuíram para o desenvolvimento do estudo.

A empresa PETRÓLEO BRASILEIRO S/A, através do financiamento da FINEP/CTPETRO, permitiu o desenvolvimento de um projeto de pesquisa inovador, desafiante e de alto nível, sob o ponto de vista científico e tecnológico.

Ao pessoal do setor de instrumentação do Pavilhão Fluvial, Professor Paulo Kroeff de Souza e Eng. Elétrico Alexandre Mahler.

Aos funcionários do IPH que construíram o canal tridimensional de geometria simplificada, destacando os pedreiros Ênio e Juarez com o auxílio do servente Everaldo Alves de Moura.

A todo grupo de apoio composto pelos funcionários do Projeto e do IPH 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 a CAPES, que com seu suporte, permitiram a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta simulações físicas de correntes de densidade não conservativas em canal bidimensional e tridimensional. Primeiramente, foram desenvolvidas a seleção e caracterização de materiais granulares, bem como a classificação de tamanhos de grãos adequados capazes de simular tais correntes. Foram desenvolvidas também, metodologias de ensaios, abordando os detalhes como a preparação de materiais, equipamentos e instalações. Como resultados foram selecionados cinco materiais para as simulações, a areia (0,125mm a 0,063mm); os calcários B e C (0,125mm a 0,063mm) e os carvões 205 e carvão 207 (0,354mm a 0,063mm).

Através de ensaios por fluxo contínuo de material, caracterizado por uma injeção de mistura durante um período de tempo, foram estudados as características geométricas, dinâmicas e os padrões de deposição destas correntes. Nestes ensaios foram variados o material granular e seu tamanho de grão utilizado na mistura e a concentração da mistura. Observou-se que: a velocidade da corrente aumenta à medida que a massa específica/concentração da mistura aumenta; que à medida que o tamanho do grão diminui, para um mesmo material com a mesma massa específica na mistura, a velocidade aumenta; a altura da cabeça da corrente aumenta à medida que a massa específica/concentração da mistura diminui; a distribuição dos volumes de depósitos apresentou uma tendência geral, com acúmulo de material, da ordem de 90%, nas regiões mais proximais do canal (0-75cm) e acúmulo de material, da ordem de 5%, canal nas regiões mais distais do canal (150-250cm). A distribuição dos grãos indica que o tamanho dos grãos vai diminuindo com a distância, estando as frações maiores (correspondentes a areia fina) presentes nas zonas mais proximais do canal (até 50cm) e com os grãos mais finos chegando até as regiões mais distais do canal (250cm).

Foi avaliada, também, a influência da vazão inicial e do volume total de material sobre o desenvolvimento e depósitos das correntes de densidade não conservativas. As características medidas foram a evolução e as velocidades da corrente, além da espessura, granulometria e formas de fundo dos depósitos gerados. Como resultados foi verificado que a velocidade de avanço, espessuras, formas de fundo e distribuição granulométricas do material estão intimamente mais ligada à vazão de entrada do que ao volume total. Nota-se que, a vazão condiciona a tendência geral da evolução da corrente (padrão de variação da velocidade e da deposição) e as formas de fundo, enquanto que o volume de material injetado é responsável apenas pela magnitude dessas variações.

ABSTRACT

The current study presents physical simulation of non-conservative density currents. Granular materials are tested and grain size ranges for simulation are evaluated. The selected materials and its grain size ranges are as follows: sand (0,125 - 0,063mm), calcium carbonate (0,125 - 0,063mm) and coal (0,354 - 0,063mm). Experimental procedures and facilities are developed.

Density currents with different densities were generated. Geometric features, flow dynamics and depositional patterns are evaluated. The results show that velocity increases for larger current densities or smaller grain sizes and that the height of the current head increases when the current density decreases. The observation of depositional patterns indicates that 90% of the material settles on the upstream portion of the channel and around 5% on the downstream portion. It is also noted a decreasing grain size rate on the settled material towards the downstream portion of the channel.

Fluid injection rate and material total volume influence on depositional patterns were also evaluated. Therefore density current evolution, current velocity and depositional patterns were registered. The results show that advancing velocity and depositional patterns depend basically on fluid injection rate.

SUMÁRIO

| | |
|--|------------|
| <i>APRESENTAÇÃO</i> | <i>III</i> |
| <i>RESUMO</i> | <i>V</i> |
| <i>ABSTRACT</i> | <i>VI</i> |
| <i>SUMÁRIO</i> | <i>VII</i> |
| <i>LISTA DE TABELAS</i> | <i>X</i> |
| <i>LISTA DE FIGURAS</i> | <i>XII</i> |
| <i>LISTA DE SÍMBOLOS</i> | <i>XV</i> |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 OBJETIVOS | 3 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - CORRENTES DE DENSIDADE NÃO CONSERVATIVAS | 5 |
| 3.1 GENERALIDADES | 5 |
| 3.2 TIPOS DE FLUXOS | 6 |
| 3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS ESCOAMENTOS | 7 |
| 3.4 MODELOS DEPOSICIONAIS | 11 |
| 3.5 IGNIÇÃO DAS CORRENTES DE TURBIDEZ | 14 |
| 3.6 DESCRIÇÃO DO FENÔMENO – ANATOMIA DA CORRENTE NÃO CONSERVATIVA | 15 |
| 3.7 DINÂMICA DO ESCOAMENTO NÃO CONSERVATIVO | 18 |
| 3.7.1 Definições e classificação..... | 18 |
| 3.7.2 Transformações de fluxo..... | 20 |
| 3.7.3 Efeitos da topografia..... | 22 |
| 3.7.4 Perfis de velocidade e concentração..... | 23 |
| 3.7.5 Mecanismos de deposição..... | 23 |
| 3.8 SIMULAÇÃO FÍSICA DAS CORRENTES DE DENSIDADE | 25 |
| 3.8.1 Análise Dimensional e Semelhança..... | 27 |
| 3.8.1.1 Efeitos de escala..... | 27 |
| 3.8.1.2 Parâmetros adimensionais que descrevem o fenômeno..... | 28 |
| 3.8.2 Representação dos mecanismos de iniciação da corrente - volume inicial fixo ou fluxo contínuo de material..... | 30 |
| 3.8.3 Correntes de densidade confinadas ou não confinadas..... | 32 |

| | |
|--|-----------|
| 3.8.4 Materiais utilizados para simular as correntes de densidade | 33 |
| 4 METODOLOGIAS EMPREGADAS | 36 |
| 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA (COMO FOI REALIZADO O ESTUDO)..... | 36 |
| 4.2 APARATO EXPERIMENTAL | 37 |
| 4.2.1 Canal de pequeno porte..... | 38 |
| 4.2.2 Canal tridimensional de geometria simplificada..... | 38 |
| 4.3 EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTAÇÃO | 40 |
| 4.3.1 Filmadoras digitais | 40 |
| 4.3.2 Microcomputador iMAC..... | 41 |
| 4.3.3 Peneirador Tyson de intensidade variável..... | 42 |
| 4.3.4 Agitador eletromecânico e medidor de vazão eletromagnético | 43 |
| 4.3.5 Medidor de distância a laser Opto MD250 ADV | 43 |
| 4.3.6 Mesa de coordenadas automatizada..... | 44 |
| 4.4 PRÉ - SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS GRANULARES..... | 45 |
| 4.4.1 Pré-qualificação dos materiais..... | 45 |
| 4.4.2 Determinação das características do material..... | 47 |
| 4.4.3 Materiais pré-selecionados | 50 |
| 4.5 ENSAIOS REALIZADOS | 51 |
| 4.5.1 Ensaio da primeira fase: implantação da metodologia e escolha de materiais | 51 |
| 4.5.1.1 Plano de ensaios..... | 51 |
| 4.5.1.2 Metodologia aplicada | 53 |
| 4.5.1.3 Metodologia para a avaliação dos resultados..... | 57 |
| 4.5.1.4 Características dos ensaios realizados | 58 |
| 4.5.2 Ensaio da segunda fase: Padrão de deposição das correntes..... | 59 |
| 4.5.2.1 Plano de ensaios..... | 59 |
| 4.5.2.2 Metodologia aplicada | 62 |
| 4.5.2.3 Metodologia empregada para avaliação dos resultados..... | 63 |
| 4.5.2.4 Características dos ensaios realizados | 64 |
| 4.5.3 Ensaio da terceira fase: influência das condições iniciais..... | 65 |
| 4.5.3.1 Plano de ensaios..... | 65 |
| 4.5.3.2 Metodologia aplicada | 66 |
| 4.5.3.3 Metodologia para avaliação de resultados | 68 |
| 4.5.3.4 Características dos ensaios realizados | 70 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 72 |
| 5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DA PRIMEIRA FASE | 72 |
| 5.1.1 Aspectos experimentais | 72 |
| 5.1.1 Análise qualitativa | 72 |
| 5.1.2 Análise Quantitativa | 73 |

| | |
|---|------------|
| 5.1.4 Conclusões parciais | 77 |
| 5.2 RESULTADOS SEGUNDA FASE | 77 |
| 5.2.1 Conclusões parciais | 86 |
| 5.3 RESULTADOS DA TERCEIRA FASE | 87 |
| 5.3.1 Caracterização da corrente de densidade..... | 88 |
| 5.3.1.1 Material injetado | 88 |
| 5.3.1.2 Evolução da corrente | 89 |
| 5.3.1.3 Velocidade de avanço..... | 92 |
| 5.3.2 Caracterização dos Depósitos..... | 94 |
| 5.3.2.1 Espessuras..... | 95 |
| 5.3.2.2 Análise granulométrica dos depósitos | 99 |
| 5.3.2.3 Formas de fundo..... | 103 |
| 5.3.3 Conclusões Parciais | 111 |
| 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 113 |
| 6.1 QUANTO A SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS | 113 |
| 6.2 QUANTO À IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA | 113 |
| 6.2.1 Canal de pequeno porte..... | 113 |
| 6.2.2 Canal tridimensional de geometria simplificada..... | 114 |
| 6.3 QUANTO À METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS | 114 |
| 6.4 QUANTO AOS RESULTADOS OBTIDOS..... | 115 |
| 6.4.1 Tamanho de grão adequado a simulação de correntes de densidade não conservativas..... | 115 |
| 6.4.5 Quanto às características da corrente e a análise dos padrões de deposição..... | 115 |
| 6.4.5.1 Canal pequeno porte..... | 115 |
| 6.4.5.2 Canal tridimensional de geometria simplificada | 116 |
| 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 118 |
| ANEXOS..... | 122 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1: Tipo de fluxos gravitacionais subaquáticos | 6 |
| Tabela 3.2: Principais trabalhos sobre correntes de turbidez (Fonte: Kneller e Buckee, 2000) | 26 |
| Tabela 3.3: Materiais utilizados para simulação de correntes de densidades. | 34 |
| Tabela 4.1: Especificações das câmeras digitais | 41 |
| Tabela 4.2: Massa específica de cada material..... | 47 |
| Tabela 4.3: Série de peneiras utilizadas na determinação..... | 48 |
| da curva granulométrica..... | 48 |
| Tabela 4.4: Escala de classificação de material | 49 |
| Tabela 4.5: Forma dos materiais selecionados..... | 49 |
| Tabela 4.6: Resumo das principais características dos materiais ensaiados. | 51 |
| Tabela 4.7: Materiais e distribuição granulométrica utilizados nos ensaios por fluxo contínuo. | 52 |
| Tabela 4.8: Características dos ensaios por fluxo contínuo | 59 |
| Tabela 4.9: Granulometria utilizadas nos ensaios por fluxo contínuo de material..... | 60 |
| Tabela 4.10: Características dos ensaios da segunda fase | 60 |
| Tabela 4.11: Séries de peneiras utilizadas na análise granulométrica e no peneirador mecânico | 61 |
| Tabela 4.12: Classificação adotada do tipo de sedimento baseado no tamanho dos grãos | 64 |
| Tabela 4.13: Características dos ensaios de fluxo contínuo..... | 65 |
| Tabela 4.14: Características dos ensaios da terceira fase | 70 |
| Tabela 5.1: Resultados qualitativos dos ensaios a fluxo contínuo. | 73 |
| Tabela 5.2: Resultado da análise granulométrica do ensaio 13..... | 74 |
| Tabela 5.3: Resultado da análise granulométrica do ensaio 14..... | 75 |
| Tabela 5.4: Resultado da análise granulométrica do ensaio 15..... | 75 |
| Tabela 5.5: Resultado da análise granulométrica do ensaio 17..... | 76 |
| Tabela 5.6: Resultado da análise granulométrica do ensaio 18..... | 76 |
| Tabela 5.7: Velocidade de avanço da cabeça da corrente - Fluxo Contínuo | 78 |
| Tabela 5.8: Alturas da cabeça da corrente | 80 |
| Tabela 5.9: Altura do corpo da corrente | 80 |
| Tabela 5.10: Distribuição do volume de depósitos - Fluxo Contínuo | 83 |
| Tabela 5.11: Características do material injetado..... | 88 |
| Tabela 5.12: Velocidade de avanço da corrente (m/s)..... | 92 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 5.13: Espessuras dos depósitos (cm) – Ensaio 3 ^o fase..... | 95 |
| Tabela 5.14: Comparação de resultados da leitura da espessura dos depósitos feitas com a ponta linimétrica e o distanciômetro laser..... | 96 |
| Tabela 5.15: Relação entre as espessuras dos depósitos. Valores mínimos, máximos e médios | 98 |
| Tabela 5.16: Formas de fundo dos depósitos | 105 |
| Tabela 6.1: Faixas granulométricas adequadas de cada material, para a simulação de correntes de densidade não conservativas. | 115 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3.1: Tipos de fluxos subaquáticos (Fonte: Mulder e Alexander, 2001)..... | 6 |
| Figura 3.2: Classificação proposta por Middleton e Hampton (1976) | 7 |
| Figura 3.3: Classificação proposta por Shanmugam (2000). | 9 |
| Figura 3.4: Classificação proposta por Mulder e Alexander (2001). | 10 |
| Figura 3.5: a) Sequência clássica de Bouma; b) Cone deposicional (Fonte: Bouma, 1962) ... | 12 |
| Figura 3.6: Complementações a seqüência de Bouma. (Fonte: Shanmugam, 2000) | 12 |
| Figura 3.7: Modelo deposicional de leques submarinos propostos por..... | 14 |
| Mutti e Richi Lucchi (1972)..... | 14 |
| Figura 3.8: Esquema da corrente de densidade não conservativa | 16 |
| (Fonte: Altinakar et al., 1996). | 16 |
| Figura 3.9: Quatro estágios da evolução das correntes de turbidez..... | 19 |
| (Fonte: Zeng e Lowe, 1997)..... | 20 |
| Figura 3.10 – Transformações de fluxo | 21 |
| (Fonte: Fischer, 1983)..... | 21 |
| Figura 3.11: Perfis de concentração (modificado de Kneller e Buckee, 2000)..... | 23 |
| Figura 3.12: Matriz de acelerações (Fonte: Kneller, 1995) | 24 |
| Figura 3.13: Mecanismo de iniciação da corrente. (a) O fluido denso na mesma altura do fluido ambiente; (b) A altura do fluido denso muito menor que a do fluido ambiente ... | 31 |
| (Fonte: Simpson, 1997)..... | 31 |
| Figura 4.1: Canal de pequeno porte..... | 39 |
| Figura 4.2: Canal tridimensional de geometria simplificada | 40 |
| Figura 4.3: a) Filmadora modelo DCR-TRV110 e; b) Filmadora modelo DCR-TRV120..... | 41 |
| Figura 4.4: Computador iMAC | 42 |
| Figura 4.5: Peneirador Tyson de intensidade variável..... | 43 |
| Figura 4.6: a) Agitador eletromecânico e; b) Medidor eletromagnético de vazão..... | 43 |
| Figura 4.7: a) Distanciômetro a laser opto e; b) Cabeça medidora md250..... | 44 |
| Figura 4.8: a) Mesa de Coordenadas Automatizada e; b) Display de operação da mesa. | 45 |
| Figura 4.9: Distribuição granulométrica dos materiais selecionados. | 48 |
| Figura 4.10: Velocidade de queda das partículas | 50 |
| Figura 4.11: Fluxograma do procedimento de ensaios em fluxo contínuo-Primeira fase | 54 |
| Figura 4.12: Alternativas para injeção do material do reservatório de alimentação: a) dimensões do reservatório; b) primeira alternativa; c) segunda alternativa e; d) terceira alternativa. | 56 |

| | |
|--|------------|
| Figura 4.13: Distribuição granulométrica dos materiais utilizados nesta fase de ensaios..... | 62 |
| Figura 4.14: Fluxograma do procedimento de ensaios em fluxo contínuo-Terceira fase..... | 67 |
| Figura 4.15: Detalhe da ponta linimétrica mecânica. | 69 |
| Figura 5.1: Evolução da correntes de densidade - Ensaio 14..... | 73 |
| Figura 5.2: Velocidade de avanço da frente..... | 78 |
| Figura 5.3: Correlação entre a massa específica da mistura e a velocidade média da cabeça | 79 79 |
| Figura 5.4: Altura da cabeça | 81 |
| Figura 5.5: Alturas médias da cabeça da corrente..... | 82 |
| Figura 5.6: Altura do corpo da corrente..... | 82 |
| Figura 5.7: Altura do corpo..... | 83 |
| Figura 5.8: Distribuição do depósito ao longo do comprimento..... | 84 |
| Figura 5.9: Distribuição percentual ao longo do comprimento do canal dos grãos correspondentes a areia fina. | 85 85 |
| Figura 5.10: Distribuição percentual ao longo do comprimento do canal dos grãos correspondentes a areia muito fina. | 85 85 |
| Figura 5.11: Distribuição percentual ao longo do comprimento do canal dos grãos correspondentes ao silte. | 86 86 |
| Figura 5.12: Distribuição granulométrica da mistura injetada no canal..... | 89 |
| Figura 5.13: Evolução do ensaio: a) ensaio 1; b) ensaio 2 e; c) ensaio 3..... | 91 |
| Figura 5.14: Velocidade de avanço da corrente..... | 93 |
| Figura 5.15: Espessuras dos depósitos medidos com a ponta linimétrica (Nesta figura, a ordem dos ensaios foram trocadas para facilitar a visualização espacial dos depósitos.)..... | 97 97 |
| Figura 5.16: Análise granulométrica do ensaio 1..... | 100 |
| Figura 5.17: Análise granulométrica do ensaio 2..... | 100 |
| Figura 5.18: Análise granulométrica do ensaio 3..... | 100 |
| Figura 5.19: Tendência da fração areia fina..... | 102 |
| Figura 5.20: Tendência da fração areia muito fina..... | 102 |
| Figura 5.21: Tendência da fração silte..... | 103 |
| Figura 5.22: Vista dos depósitos ao longo do canal gerados pela passagem..... da corrente de densidade – Ensaio 1..... | 106 106 |
| Figura 5.23: Interpretação dos depósitos ao longo do canal gerados pela passagem da corrente de densidade – Ensaio 1..... | 107 107 |
| Figura 5.24: Vista dos depósitos ao longo do canal gerados pela passagem da corrente de densidade – Ensaio 2..... | 108 108 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.25: Interpretação dos depósitos ao longo do canal gerados pela passagem da corrente de densidade – Ensaio 2 | 109 |
| Figura 5.26: Vista dos depósitos ao longo do canal gerados pela passagem da corrente de densidade – Ensaio 3 | 110 |
| Figura 5.27: Interpretação dos depósitos ao longo do canal gerados pela passagem da corrente de densidade – Ensaio 3 | 111 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------------------|--|
| s | coeficiente de uniformidade |
| C | concentração |
| C _v | concentração volumétrica |
| S | declividade |
| den | densidade do material |
| d | diâmetro do grão |
| h | espessura do fluxo |
| f _o | fator de perda de carga junto ao fundo |
| f _i | fator de perda de carga na interface |
| g | gravidade |
| g` | gravidade reduzida |
| r_w | massa específica da água |
| r_f | massa específica da mistura |
| r_m | massa específica do material |
| Frd | número de Froude densimétrico |
| Re | número de Reynolds |
| V | velocidade da frente |
| u* | velocidade de cisalhamento |
| ω | velocidade de queda da partícula |
| Uc | velocidade do corpo |
| U e u | velocidade média |
| v | viscosidade cinemática |

1 INTRODUÇÃO

As correntes de densidade vêm despertando o interesse em diferentes campos da ciência ao longo das quatro últimas décadas; tais como: a engenharia civil, geologia, meteorologia, oceanografia e termodinâmica. Esse interesse se deve não só pelo seu potencial de impacto ambiental, exemplificado nos fenômenos de dispersão de poluentes, na causa de rompimento de cabos submarino, acidentes industriais, erupções vulcânicas e outros fenômenos, como também pela formação de sistemas turbidíticos.

Além disso, outro motivo do estudo de correntes gravitacionais é a sua ocorrência nos diversos campos de atuações da ciência citados acima. Exemplos de correntes de densidade são: plumas de rios, tempestades de poeira, avalanches e brisas marinhas entre outros fenômenos.

Uma corrente de densidade pode ser definida como o movimento relativo que ocorre entre camadas de fluido que possuem uma diferença de massa específica. Esse movimento, governado principalmente pelas forças de empuxo, pode ocorrer junto às superfícies superior e inferior do fluido ambiente, bem como no seu interior. A diferença de massa específica pode ser causada pela presença de fluidos com diferentes temperaturas, com diferentes concentrações de sólidos dissolvidos ou de partículas em suspensão, com diferentes salinidades ou com fluidos distintos.

Dentre as causas da diferença de massa específica acima, destacam-se as correntes de densidade formadas por partículas sólidas em suspensão. Nelas, quando ocorre troca deste material com a superfície inferior através do processo de deposição e erosão do material em suspensão, chamamos as correntes de densidade de não conservativas; pois há uma modificação gradual da densidade da corrente ao longo do percurso devido à condição de continuidade (quantidade de massa conservada) não ser respeitada. Quando não há variação na quantidade de material dissolvido (p. ex. sal), as correntes de densidade são chamadas de conservativas.

Neste trabalho estudaremos, especificamente, as correntes de densidade não conservativas, sendo a diferença de densidade causada pela presença de partículas sólidas em suspensão.

Em escala natural, os sistemas deposicionais turbidíticos são depósitos sedimentares em águas oceânicas profundas formados, principalmente, pelo sedimento que constitui as correntes de densidade não conservativas, os quais são transportados e depositados ao longo dos anos. Devido a porosidade e a outras características geológicas, estes sistemas contêm os

principais reservatórios de hidrocarbonetos do mundo, sendo o principal alvo de interesse da indústria de petróleo.

Apesar do grande avanço do desenvolvimento teórico/analítico dos fenômenos envolvidos no processo de formação, desenvolvimento e depósito dos fluxos de densidades, muito pouco tem sido estudado, a nível nacional, com relação à simulação física de escoamentos tridimensionais não conservativos.

Grande parte dos estudos referentes aos fluxos de densidade utilizando modelagem física não são dedicados ao esclarecimento e compreensão da componente referente ao transporte e acumulação de sedimentos e seus padrões de deposição, principalmente quando sedimentos mais grossos se encontram envolvidos nestes processos.

Assim, esse trabalho visa dar continuidade ao projeto de pesquisa desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH); o Instituto de Geociências da UFRGS e a Petrobrás, iniciado em 1999, com financiamento FINEP/CTPETRO, propondo uma metodologia para a modelagem física, em escala reduzida, de correntes de densidade não conservativas num canal tridimensional de geometria simplificada. Pretende-se assim, contribuir para um melhor entendimento sobre os processos de transporte e padrões de deposição sedimentares destas correntes que são a principal fonte de formação dos sistemas deposicionais turbidíticos.

Para tanto, foram desenvolvidas metodologias de ensaios em modelos físicos, foram selecionados e classificados diversos materiais granulares capazes de reproduzir a carga de sedimentos das correntes de densidade não conservativas e realizados experimentos em canais bidimensional e tridimensional.

Desta maneira, espera-se colaborar para o estudo em modelos reduzidos deste fenômeno, auxiliando no processo de modelagem física e contribuindo para um melhor entendimento do processo natural.

2 OBJETIVOS

O estudo de correntes de densidade não conservativas, ainda hoje não é bem fundamentado, tanto na sua teoria, quanto na prática. A dificuldade encontrada pelos pesquisadores reside no monitoramento desses fenômenos em escala natural, uma vez que, esses processos ocorrem, normalmente, em eventos catastróficos ou em condições de difícil acompanhamento.

Uma maneira de transpor essa dificuldade é a simulação deste fenômeno em modelo reduzido, o que permite o total controle nas condições de contorno dos ensaios e de seus resultados, mas que exige o conhecimento de leis de semelhança que permitam transferir os resultados do modelo para o protótipo (sistema real).

Esse trabalho, que faz parte da segunda fase de um projeto de pesquisa, se propõe a descrever o fluxo de corrente de densidade não conservativa gerada em canal tridimensional de geometria simplificada, tendo como objetivo geral:

- implantação de uma metodologia para estudo, em escala reduzida, dos padrões de depósitos para as correntes de densidade não conservativas.

O objetivo geral deste trabalho exige a discussão de diferentes aspectos do fluxo de densidade que conduzem a objetivos específicos, os quais fazem parte do processo evolutivo da modelagem em laboratório. Estes objetivos específicos são:

- seleção e caracterização física de diferentes materiais, visando sua capacidade em simular as correntes de densidade não conservativas;
- avaliação das características geométricas e dinâmicas das correntes de densidade não conservativas em canal bidimensional e tridimensional;
- estudo dos padrões de deposição das correntes de densidade não conservativas em diferentes condições de geometria (confinadas e não confinadas) e de declividades;

Para o cumprimento de tais objetivos, foram utilizadas as instalações físicas do Pavilhão Fluvial do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, onde foi readaptado um canal de pequeno porte e foi projetado e construído um canal tridimensional de geometria simplificada. O estudo foi, então, dividido em três etapas:

- seleção e classificação de diversos materiais granulares com potencial de simulação de correntes de densidade não conservativas e implementação de metodologias de ensaio;
- avaliação dos padrões de deposição gerados pelas correntes de densidade não conservativas, em canal de declividade variável de pequeno porte e determinar

suas características dinâmicas (como velocidades), e características geométricas (como a altura da cabeça e do corpo);

- avaliação da influência das condições iniciais (no caso a vazão e o volume de mistura), sobre as características dinâmicas, geométricas e deposicionais das correntes, em canal tridimensional de geometria simplificada.

A primeira etapa, por ser pioneira nestas instalações, tem um papel muito importante no desenvolvimento e andamento das etapas posteriores do estudo de correntes de densidade não conservativas. Ela permitirá uma primeira familiarização com o método experimental de simulação das correntes. e seus resultados servirão de base para as etapas seguintes do trabalho e de outros estudos que venham a ser realizados futuramente.

Na segunda etapa do trabalho espera-se avaliar, num primeiro momento, a distribuição dos volumes/espessuras de depósitos ao longo do comprimento do canal, o comportamento dos grãos, por faixas granulométricas ao longo deste comprimento correlacionando os depósitos gerados, além de verificar a influência da massa específica da mistura, do tipo de material e o do diâmetro dos grãos nas características da corrente. A partir dessas primeiras avaliações, serão realizadas analogias com os depósitos turbidíticos naturais. Esta fase serve, também, para ajustar a metodologia implementada na etapa anterior e verificar se as faixas granulométricas determinadas, realmente são as mais adequadas para tais simulações.

Na última etapa do trabalho se propõe a proceder à avaliação das velocidades, forma da frente, quantidade e qualidade do material depositado e relação entre eles.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - CORRENTES DE DENSIDADE NÃO CONSERVATIVAS

3.1 GENERALIDADES

Um dos principais mecanismos de formação do leito oceânico e, conseqüentemente, de algumas rochas sedimentares em ambiente marinho profundo são as correntes de turbidez não conservativas (Simpson, 1997). Estes depósitos sedimentares são normalmente chamados de turbiditos.

As correntes de turbidez vêm sendo estudadas desde o momento em que foram utilizadas pela primeira vez para explicar esses depósitos turbidíticos, nos meados da década de 50 (Middleton, 1993). Estes depósitos são importantes economicamente, pois constituem-se em reservatórios de hidrocarbonetos em diversos locais no mundo, despertando o interesse dos pesquisadores e da indústria de petróleo. Estes fluxos também movimentam ou desencadeiam diversos fenômenos que podem causar desastres industriais, ambientais e humanos tais como: rompimento de tubulações e de cabos submarinos e alterações da topografia do fundo do mar (Mulder e Alexander, 2001). No Brasil, os turbiditos representam 88.6% do total das reservas de petróleo brasileiro (Bruhn, 1998).

Middleton (1993) destaca dois problemas básicos que ocorrem no estudo destes depósitos: o primeiro é saber se os turbiditos presentes no fundo do oceano foram realmente gerados por correntes de turbidez ou por um outro tipo de fluxo gravitacional; o segundo, e mais intrigante, é que as estruturas e as texturas geradas no depósito dizem muito pouco sobre a natureza e a dinâmica do fluxo que transportou os sedimentos.

É conhecido que as correntes de turbidez podem erodir canais profundos no fundo do oceano, da mesma forma como o rio forma o seu canal (Simpson, 1997). O escoamento flui mar afora, através destes canais, causando erosão na parte superior do talude da plataforma continental e depósitos junto a sua base. Estes canais formados, à medida que são erodidos, fixam-se junto ao talude dando origem aos cânions submarinos, que são encontrados em muitas seções do talude continental.

Além da base do talude na bacia continental, diversas situações podem ocorrer com o canal principal, como por exemplo: o canal desaparecer e a corrente de turbidez espalhar-se caracterizando um fluxo não confinado; o canal permanecer confinado devido a um efeito da topografia local; surgirem canais secundários de deposição que podem se desconectar do sistema principal, migrando lateralmente ou formarem configurações entrelaçadas (leques

submarinos). Aliado a isso, ocorre o processo de sedimentação deste material, que resultará em novos turbiditos na bacia continental no oceano profundo.

3.2 TIPOS DE FLUXOS

Os fluxos de densidade não conservativos, quando ocorrem em ambientes aquáticos, podem ser subdivididos de acordo com a diferença de densidade entre a mistura (ρ_f) e o líquido ambiente (ρ_w). Segundo Mulder e Alexander (2001) ocorrem quatro tipos de fluxo: hiperpical, hipopical, mesopical e homopical, cujas características são apresentadas na tabela 3.1 e visualizadas na figura 3.1.

Tabela 3.1: Tipo de fluxos gravitacionais subaquáticos

| Tipo de fluxo | Diferença de Densidade | Característica |
|---------------|----------------------------------|---|
| Hiperpical | $\rho_f > \rho_w$ | Gerados pelos efluentes de rios |
| Hipopical | $\rho_f < \rho_w$ | Bocas de rios onde o sedimento é disperso em plumas de flutuação |
| Mesopical | $\rho_{w1} < \rho_f < \rho_{w2}$ | Importante em bacias fortemente estratificadas onde o contraste de densidade é grande |
| Homopical | $\rho_a = \rho_f$ | Fluxos comuns em lagos e reservatórios |

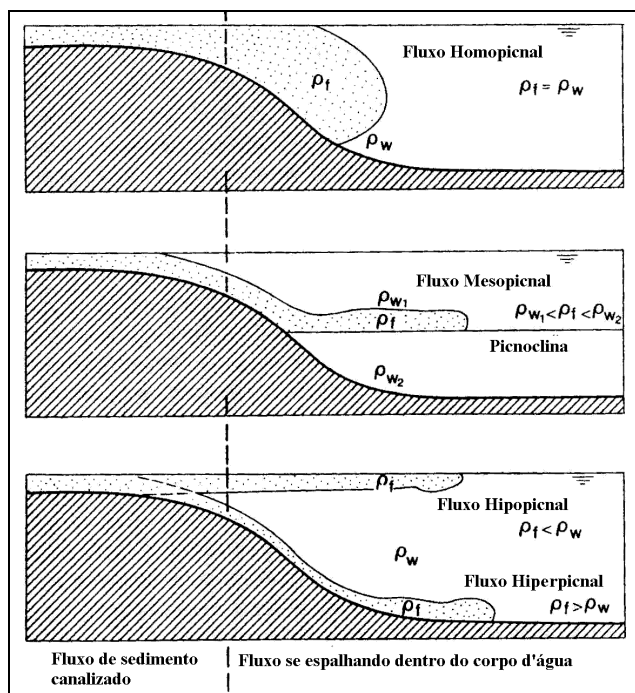


Figura 3.1: Tipos de fluxos subaquáticos (Fonte: Mulder e Alexander, 2001)

3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS ESCOAMENTOS

A classificação das correntes de densidades é confusa. Várias classificações, esquemas de fluxos de densidade e seus depósitos têm sido propostos, tanto para a descrição de reservatórios de hidrocarbonetos quanto para o entendimento da dinâmica do fluido no oceano recente. (Mulder e Alexander, 2001)

A primeira classificação dos fluxos gravitacionais de sedimentos foi introduzida, em 1963, por Dott apud Shanmugam (2000) e se baseava na reologia do fluido. Nesta classificação, há dois tipos de fluxos de sedimentos subaquáticos: os newtonianos (correntes de turbidez) e os plásticos (fluxos de massa, tais como fluxo de detritos, fluxo de grãos e outros).

A classificação dos fluxos gravitacionais de sedimentos baseada no mecanismo de suporte dos grãos foi proposta por Middleton e Hampton (1976). Nessa classificação há teoricamente quatro categorias de fluxos (Figura 3.2):

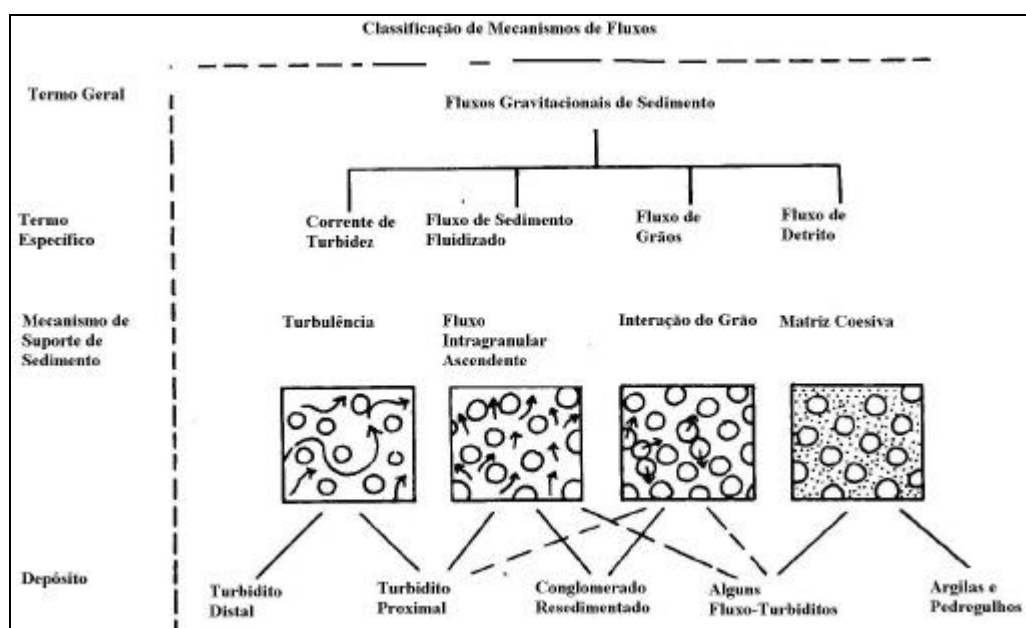


Figura 3.2: Classificação proposta por Middleton e Hampton (1976)

- Corrente de turbidez: onde os grãos são mantidos em suspensão pela turbulência do fluido;
- Fluxo de grãos: onde os grãos são mantidos em suspensão pelas forças de interação entre eles, também pela colisão entre grãos (regime inercial) ou pela ação das forças viscosas produzidas sobre o grão (regime viscoso);

- Fluxos de sedimentos liquefeitos: os grãos são mantidos em suspensão pelo movimento ascendente do fluido intragranular e;
- Fluxo de detritos: os grãos são mantidos em suspensão pela matriz coesiva .

Estes quatro tipos de mecanismos de suporte de sedimento no fluxo não são mutuamente excludentes, embora sempre um dos processos seja o mais importante (Middleton e Southard, 1984).

Lowe (1982) apresenta uma classificação das correntes de densidade não conservativas baseada tanto na reologia dos fluidos, quanto no mecanismo de suporte dos grãos. Pela reologia, os fluxos são divididos em dois grupos: os plásticos e os fluidos. Estes dois grupos reológicos foram, então, divididos em cinco categorias de fluxos, baseadas no seu mecanismo de suporte dos grãos. São eles:

- correntes de turbidez: onde as partículas são suportadas pela turbulência do fluxo;
- fluxos fluidizados: onde as partículas são totalmente suportadas pelo movimento ascendente, entre os grãos, dos fluidos intersticiais;
- fluxos liquefeitos: onde as partículas são mantidas em suspensão pelo fluxo de fluido entre os poros;
- fluxo de grãos: onde as partículas são suportadas pela “pressão dispersiva” derivada da colisão entre as partículas;
- fluxos de detritos coesos: onde os grãos são suportados pela matriz coesiva.

Shanmugam (2000) discute os problemas da classificação baseada apenas no mecanismo de suporte de grãos, enfatizando que esta classificação é própria para o estágio final do fluxo, enquanto que, durante o seu desenvolvimento mais de um mecanismo de suporte pode estar envolvido. Complementa afirmando que esta classificação traduz o mecanismo de suporte de grãos somente durante o tempo de transporte, enquanto que o depósito (turbidito) reflete o mecanismo de suporte dos grãos durante o tempo de transporte e, também, de deposição. Além disso, até o momento, não há um critério capaz de reconhecer o mecanismo de transporte através da análise das rochas depositadas.

Diante dos argumentos acima ele propôs a classificação dos escoamentos baseada na reologia do fluido, modo de transporte e mecanismo de suporte do sedimento, numa analogia à classificação adotada por Dott apud Shanmugam (2000). Esta classificação pode ser visualizada na figura 3.3.

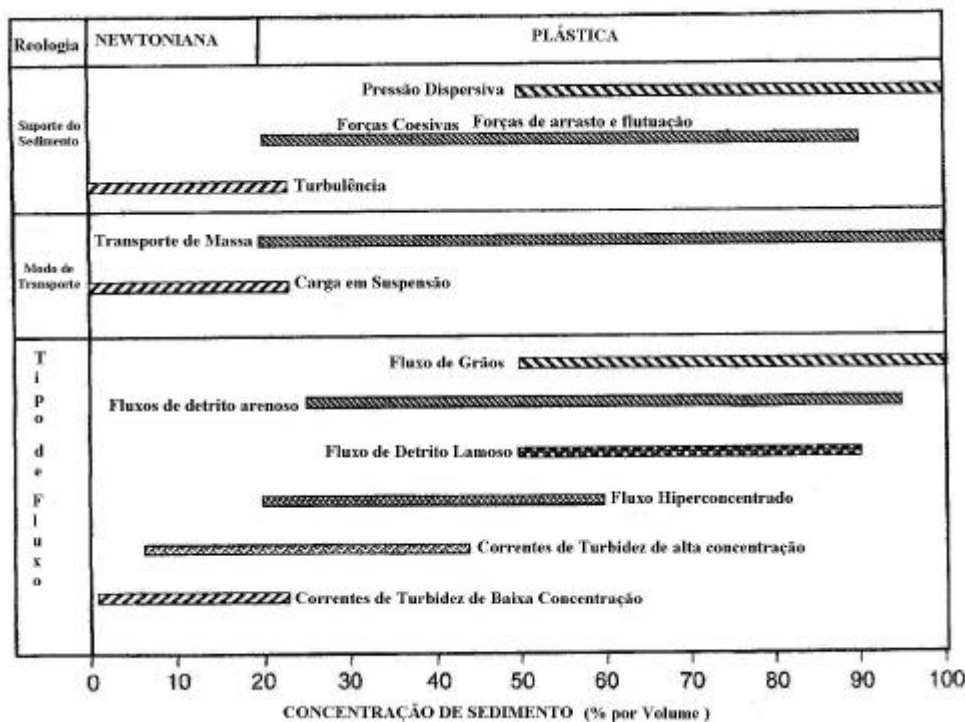


Figura 3.3: Classificação proposta por Shanmugam (2000).

Já Kneller e Buckee (2000) adotam uma classificação mais abrangente, definindo a corrente de densidade não conservativa como sendo um fluxo induzido pela ação da gravidade sobre a mistura (fluido e sedimento) devido à diferença de densidade entre a mistura e o fluido ambiente. Dentro desta definição, aceita-se que a suspensão pode ocorrer por ação de outro mecanismo de suporte dos grãos além da turbulência. Utilizam o termo correntes de densidade ou correntes gravitacionais, para descrever qualquer corrente gerada por flutuação, independente se a diferença de densidade é devido às partículas ou não.

Mulder e Alexander (2001) revisam as inconsistências das classificações e terminologias empregadas até o momento e propõem uma nova classificação para os fluxos subaquáticos, baseada na coesividade das partículas (reologia), duração do fluxo, concentração de sedimentos e mecanismo de suporte dos grãos (Figura 3.4). Com esta classificação, os autores pretenderam formalizar a terminologia, estabelecer as bases para a definição de fluxo de detritos e fluxos de lama, bem como, definir os critérios para distinguir fluxos hiperconcentrados, concentrados e correntes de turbidez.

Assim, o primeiro critério de classificação baseia-se na reologia dos fluidos, onde são divididos os fluxos em coesivos (fluxos de detritos e fluxo de lama) e fluxos não coesivos (hiperconcentrados, concentrados e correntes de turbidez).

Dentro do grupo dos coesivos, os fluxos de detritos e os fluxos de lama são diferenciados pelo tamanho do sedimento presente. Os fluxos de lama são subclassificados,

com base na porcentagem de cada material encontrado no escoamento, em ricos em argilas e fluxo de lama siltosa. Já os fluxos não coesivos são separados em função da concentração e do mecanismo de suporte em três grupos: os hiperconcentrados, os concentrados e as correntes de turbidez, sendo esse último subdividido em fluxo de onda solitária, onda solitária tipo corrente de turbidez e corrente de turbidez quasi-permanente pela duração do fluxo. (Mulder e Alexander, 2001).

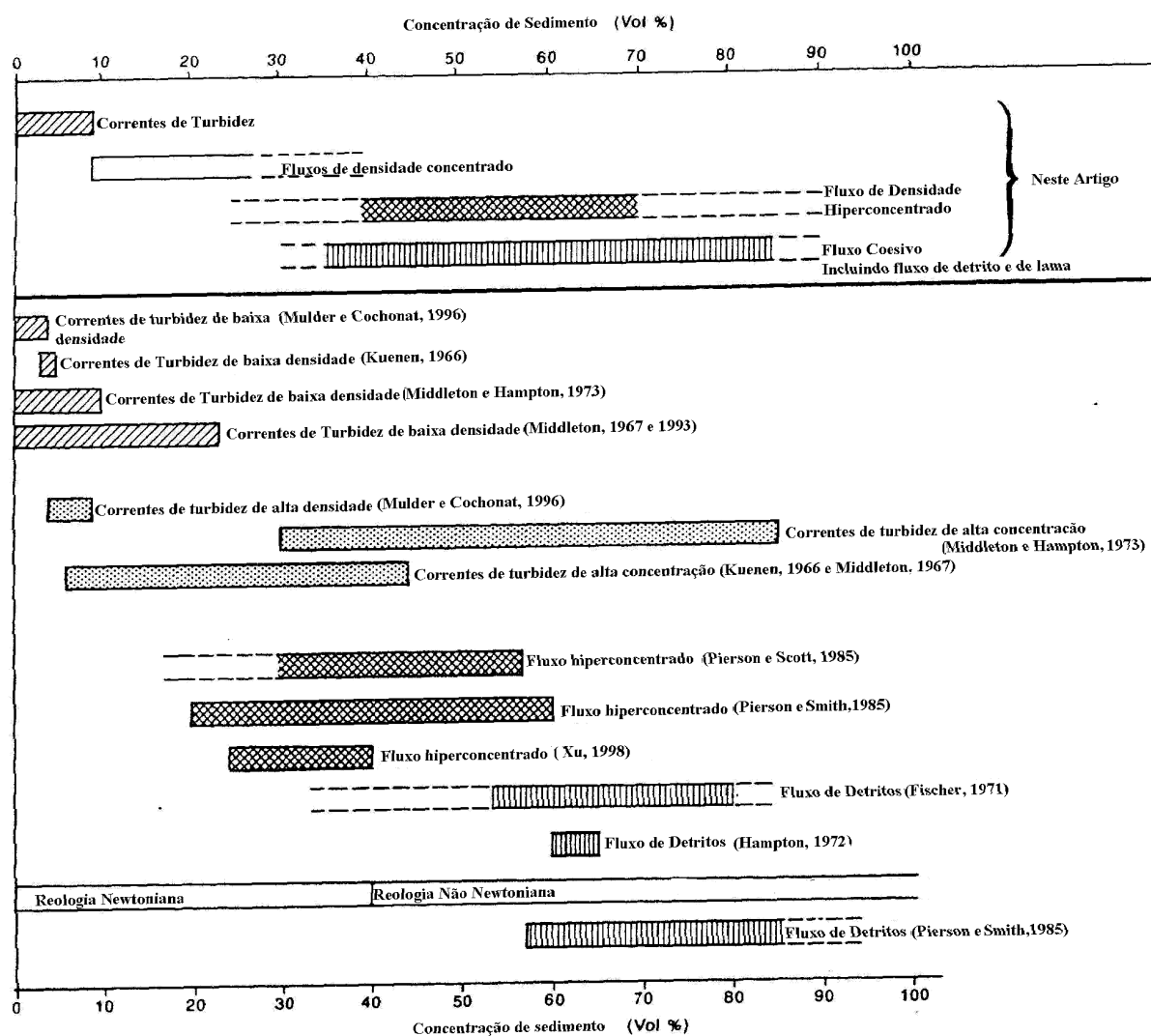


Figura 3.4: Classificação proposta por Mulder e Alexander (2001).

Nas classificações de correntes adotadas pelos autores acima, nota-se que à medida que o tempo avança a quantidade de informações adicionadas nas classificações aumentam. Porém, este caminho muitas vezes pode não ser o adequado, uma vez que, a física do processo, em alguns casos, não é explicada.

3.4 MODELOS DEPOSICIONAIS

Os depósitos causados por correntes de turbidez são chamados de turbiditos (Bouma, 1962). Mutti et al. (1999) definem turbidito como sendo um leito composto de arenitos e argilas, normalmente coberto por uma camada de argila hemipelágica contendo amostras de fóssil do mar profundo, que foram depositados pelas correntes de turbidez. Esses sistemas deposicionais mostram uma diversidade de feições, as quais variam de acordo com as características da corrente que as geraram, à distância da área fonte e a morfologia da bacia, entre outros fatores. Assim são encontrados na natureza, em afloramentos e/ou em testemunhos de sondagens, diversas configurações destes depósitos, que inspiram os pesquisadores a desenvolver modelos deposicionais para explicá-los. Kneller (1995) afirma que os pesquisadores estão conscientes dos vários tipos de padrões deposicionais que são encontrados na natureza, entretanto poucos são explicados fisicamente.

Bouma (1962) propôs o primeiro modelo deposicional baseado na variação vertical das características dos depósitos, identificando uma padrão na organização interna das estruturas dos sedimentos. Este modelo é conhecido como a clássica seqüência de Bouma e contém cinco divisões (Figura 3.5a):

- Ta. Intervalo gradacional;
- Tb. Intervalo inferior de laminação paralela;
- Tc. Intervalo de laminação com marcas de correntes;
- Td. Intervalo superior de laminação paralela e;
- Te. Intervalo pelítico

Embora, restrito à seqüência interna de divisões deposicionais observadas dentro de um depósito turbidítico, de fato, o modelo de Bouma introduz o conceito fundamental de cone deposicional (Figura 3.5b), caracterizado pela ação depletiva das correntes de turbidez, isto é, sua desaceleração no espaço à medida que se distancia da fonte.

Middleton e Hampton (1976) sugerem que a seqüência de Bouma completa corresponde a um depósito de corrente de turbidez com a turbulência completamente desenvolvida e a divisão “Ta” é o resultado da deposição muito rápida do material antes da formação de estruturas no fundo.

Trabalhos posteriores indicaram que a divisão “Tc” da seqüência de Bouma não representa satisfatoriamente todas as divisões dos turbiditos lamosos. Isso guiou Stow e Shanmugam apud Shanmugam (2000) a proporem um novo modelo vertical de fácies para os turbiditos de grãos finos, dividindo esta região em nove intervalos.

Similarmente Lowe (1982) introduziu um novo modelo de fácies verticais para turbiditos grossos (depósitos de correntes de turbidez de alta densidade) com seis novas divisões para o intervalo “Ta” da seqüência de Bouma (Figura 3.6).

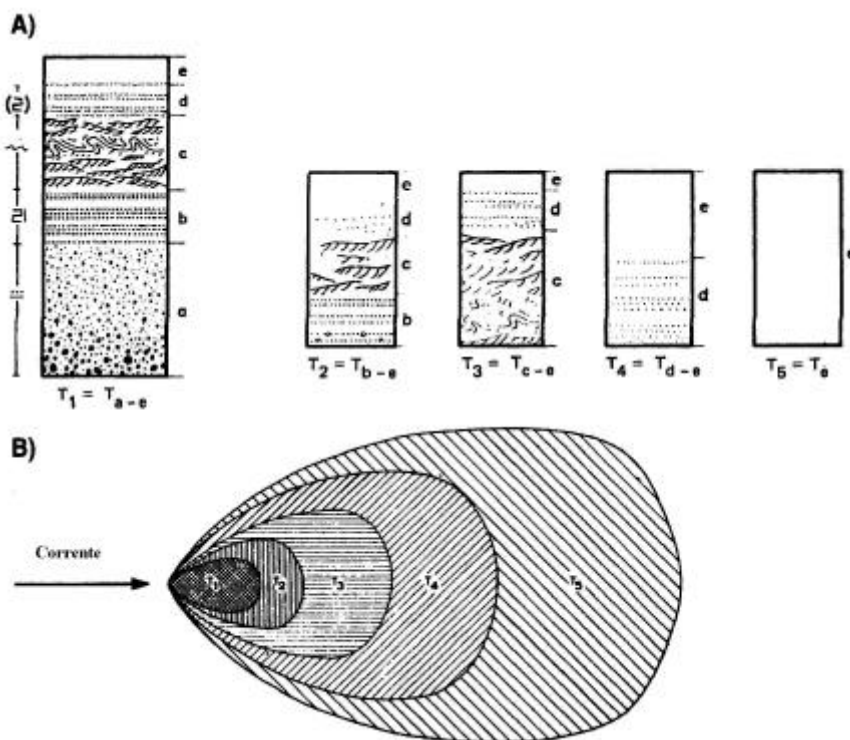


Figura 3.5: a) Sequência clássica de Bouma; b) Cone deposicional (Fonte: Bouma, 1962)

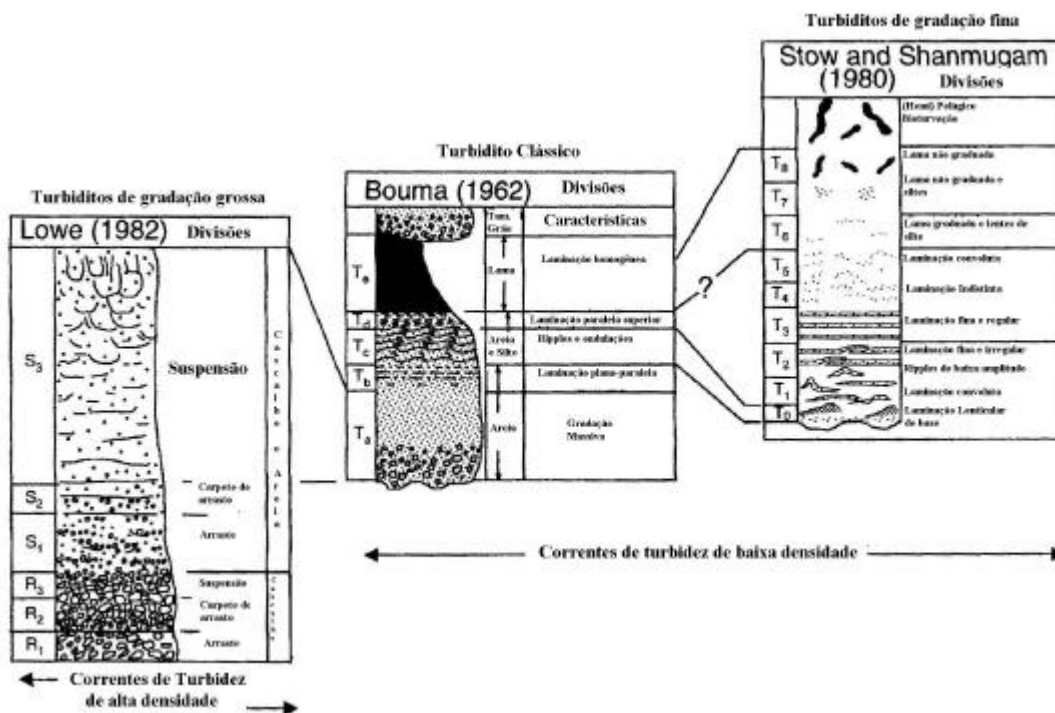


Figura 3.6: Complementações a seqüência de Bouma. (Fonte: Shanmugam, 2000)

Uma outra abordagem foi dada por Mutti et al. (1999), que apresentou um modelo de deposição baseado no princípio de que as correntes de turbidez se caracterizam por possuir um fluxo com duas características distintas: na base, onde há um fluxo granular de alta densidade e, acima desta, um fluxo de baixa densidade totalmente turbulento. Os processos que controlam o transporte e a deposição neste caso são essencialmente relacionados à capacidade do fluxo basal granular de manter seu excesso de densidade, bem como da turbulência desenvolvida na camada superior. O primeiro fator controla a distância e a extensão lateral que conseguem atingir os sedimentos grossos. Já o segundo, define o volume de sedimentos finos que são suspensos pela camada inferior. Estes dois fatores combinados determinam o grau de eficiência de uma corrente de turbidez, isto é, a sua capacidade de carregar e segregar os sedimentos na direção do centro da bacia. Fluxos de alta eficiência geram uma grande diversidade de depósitos, com alto grau de seleção granulométrica enquanto que os de baixa eficiência segregam apenas parcialmente as diferentes faixas granulométricas do sedimento em suspensão originando um menor número de texturas no depósito.

Outros modelos deposicionais buscam explicar os depósitos junto a leques submarinos. Os mais conhecidos são apresentados por Noward (1970), Mutti e Guibaldo (1972) e Mutti e Richi Lutti apud Mutti et al. (1999), sendo que o primeiro destacou a importância dos volumes deposicionais desenvolvido nas regiões terminais dos leques subaquáticos; o segundo enfatiza a forte similaridade entre deltas fluviais e os leques do fundo do mar, sugerindo a comparação direta entre canais deltaicos, canais turbidíticos e lobos respectivamente e o terceiro (Figura 3.7) apresenta um modelo mais compreensível onde a associação de fácies turbidíticas são interpretadas em termos da declividade, leques e ambientes da zona de espraiamento da corrente e associação de fácies específicas, para os quais interpretaram e diagnosticaram a existência de regiões denominadas leques superiores, inferiores e médio (Mutti et al., 1999).

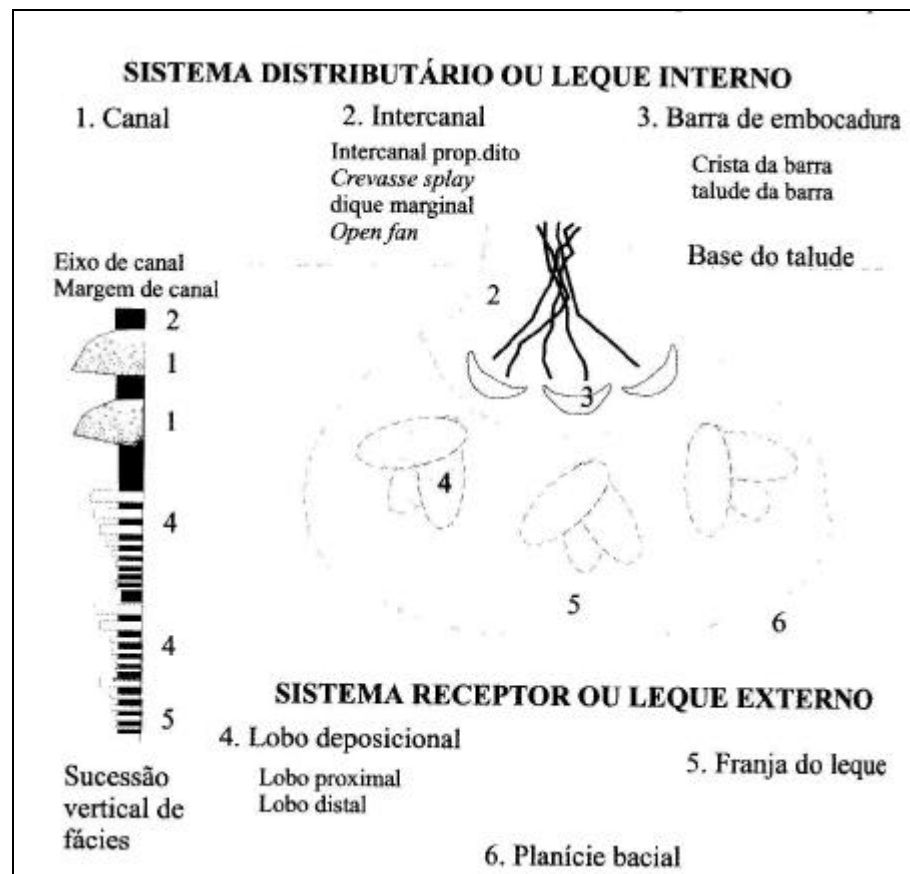


Figura 3.7: Modelo deposicional de leques submarinos propostos por Mutti e Richi Lucchi (1972).

3.5 IGNIÇÃO DAS CORRENTES DE TURBIDEZ

O processo de transporte e deposição de sedimento que caracteriza as correntes de turbidez não conservativas tem como seu mecanismo de iniciação a remobilização do sedimento depositado na plataforma continental ou na cabeça do talude continental. Essa remobilização pode ser originada: por uma alta instabilização de sedimento na plataforma; pela ocorrência de eventos catastróficos, como terremotos, falhas sedimentares, tempestades, erupções vulcânicas etc. (Noward e Piper apud Mutti et al., 1999); ou pela descarga fluvial em oceanos, onde a carga de sedimentos está ligada à fonte fluvial (leques submarinos). Kneller e Buckee (2000) destacam que o crescimento desses sistemas ocorre quando o sistema fluvial pode descarregar diretamente na transição entre a plataforma e o cânion submarino.

Mais recentemente, crescem as evidências de que os fluxos hiperpicnais gerados por cheias de rios são a principal fonte destas correntes, implicando numa íntima relação entre os deltas de rios e os turbiditos (Mutti et al., 1999). Porém a associação de correntes de turbidez e cheias de rios não gera, necessariamente, fluxos hiperpicnais (Zeng et al., 1991). Outros mecanismos de iniciação de correntes de densidade não conservativas são os fluxos ignitivos

ou auto-suspensivos. Este tipo de fluxo ocorre quando um fluxo de pequeno porte desencadeia grandes fluxos gravitacionais de sedimentos, devido ao carreamento de sedimentos previamente depositados em cânions e/ou bacias, para o seu interior, ou seja, se auto-alimentando. Entretanto fluxos ignitivos não se formam necessariamente só com fluxos de areia. Garcia e Parker (1993) mostram que o carreamento de sedimentos formados pelas correntes de silte e argilas também podem desencadear tal processo de transporte de sedimentos.

Outro fator considerado, juntamente com o processo de ignição, é a qualidade e quantidade do material que formou as correntes de densidade e seus depósitos.

Stow e Mayall (2000) destacam que o aporte de sedimentos (volume, fonte, natureza e tamanho do grão) é o mais importante na determinação da natureza do depósito final. Porém, na prática, essa estimativa da quantidade e qualidade de sedimento, é difícil devido a magnitude das correntes de turbidez e a falta de previsibilidade de sua ocorrência.

Middleton e Neal (1989) destacam que, basicamente, dois parâmetros podem ser medidos nos depósitos naturais, a espessura e o tamanho do grão. O primeiro serve para uma primeira aproximação do volume da corrente e o segundo das propriedades do fluxo. Outros métodos também são utilizados para se obter esses parâmetros do escoamentos, por exemplo, a corrente de turbidez gerada no terremoto em “Grand Banks” (Nova Inglaterra, 1929), teve sua velocidade inicial de 23m/s e o alcance aproximado de 800km estimados através do rompimento dos cabos telefônicos submarinos. Outro evento, como o ocorrido próximo ao Aeroporto Internacional de Nice (França) em 1979, na região do Var, permitiu que os pesquisadores estimassem o volume de material ($15 \times 10^8 \text{ m}^3$), o tamanho do grão e outros parâmetros da corrente logo após o evento (Mulder et al., 1997). Em seu trabalho Zeng et al. (1991) apresenta um evento ocorrido no fiorde de “Bute Inlet”, no Canadá, onde a corrente de turbidez foi monitorada através da morfologia do fundo do oceano e da distribuição do sedimento nos depósitos.

3.6 DESCRIÇÃO DO FENÔMENO – ANATOMIA DA CORRENTE NÃO CONSERVATIVA

Na água, as correntes de densidade não conservativas ou correntes de turbidez podem ser divididas em três partes distintas: a cabeça, o corpo e, algumas vezes, a cauda. Na figura 3.8 pode-se visualizar melhor estas partes.

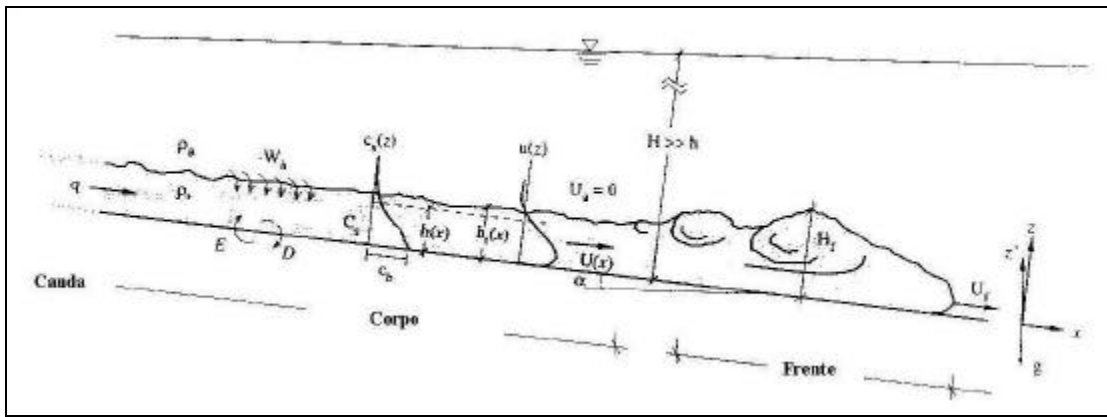


Figura 3.8: Esquema da corrente de densidade não conservativa

(Fonte: Altinakar et al., 1996).

A cabeça da corrente de densidade não conservativa possui um papel importante na dinâmica do escoamento, pois é uma zona instável e de intensa mistura condicionando a definição do comportamento geral da corrente (Simpson, 1997). Middleton (1966a) investigou o movimento do fluido e de partículas dentro e na frente da cabeça mostrando que as linhas de fluxo divergem dentro da cabeça, deslocando o fluido ambiente. Middleton (1993) destaca que o balanço de massa e de quantidade de movimento da cabeça difere significativamente daquele do corpo e da cauda.

Não existe um perfil universal para descrever a forma da cabeça de uma corrente de gravidade (Simpson, 1997). Porém, essa zona quase sempre é maior que a do corpo e da cauda, devido à resistência imposta pelo fluido ambiente ao avanço da corrente. Isso ocorre, pois, à medida que a cabeça vai avançando, ela desloca e acelera o fluido no seu entorno (ambiente). Esse fluido, por sua vez, sofre uma resistência à corrente que é maior do que a resistência junto ao fundo e junto à interface. Logo, a cabeça da corrente, deve ser maior para compensar esta força, enquanto que a parte atrás da cabeça, possui somente a resistência de fundo e interface agindo contra o escoamento (Middleton, 1993).

Middleton (1966a), investigando a influência da declividade na cabeça, na velocidade e na forma da corrente, encontrou que, para ângulos menores que ($<2.3^\circ$), a velocidade da cabeça independe da declividade. Outros experimentos sugerem que a velocidade da cabeça adimensionalizada é somente dependente da declividade ($5-90^\circ$) devido ao incremento da força gravitacional contra o incremento da resistência na interface da camada superior, aumentando as taxas de carreamento de água ambiente (Britter e Linden, 1980).

O ponto mais avançado da corrente é chamado algumas vezes, de nariz da corrente. Sua posição é um pouco acima da superfície inferior, resultado da condição de não deslizamento do fundo e da resistência na interface superior.

Na cabeça, dois tipos de instabilidades são responsáveis pela mistura do fluido ambiente com o fluido da corrente. O primeiro é uma série de vórtices presentes atrás da cabeça os quais são formados pelo cisalhamento viscoso na interface superior da corrente com o fluido ambiente, criando uma zona para a mistura turbulenta, de grande escala, atrás da cabeça (Middleton, 1993). Britter e Simpon (1978) utilizando um sistema de visualização de fluxo, onde figuras em câmera lenta eram extraídas e utilizadas para traçar a forma dos vórtices na camada superior, mostram que a razão de amplitudes com o comprimento de onda é a mesma que os de vórtices de Kelvin-Helmoltz. Estes vórtices podem crescer em comprimento de onda e amplitude no tamanho da cabeça, colapsando o fluido mais denso e carreando água para a região de mistura, em aproximadamente, a espessura da amplitude do vórtice. Fabian (2002) utilizando, também um sistema de aquisição e tratamento do imagens, verificou a influência do despreendimento de vórtices atrás da cabeça na dinâmica da corrente na tentativa de explicar a sua variação de velocidades.

O segundo tipo de instabilidades é um complexo padrão de lobos e rachas que são causados pela instabilidades gravitacionais de segunda ordem do fluido menos denso na interface inferior da corrente (Simpson, 1997). Essas estruturas são formadas através de instabilidades convectivas produzidas pelo fluido menos denso (ambiente), quando a corrente passa por cima de uma pequena camada desse fluido. Esse líquido é carregado para cima e misturado pelos movimentos que ocorrem dentro da cabeça formando essas instabilidades. Simpson (1972) visualizando as estruturas de lobos e rachas, demonstra que elas se prolongam por uma distância significativa atrás da cabeça.

Simpson e Britter (1979) utilizando traçadores para visualizar o fluido ambiente sendo carregado para dentro da cabeça através da superfície inferior, notaram que um fluxo pouco espesso move-se sobre a cabeça, sendo responsável por apenas 1% da mistura, com o restante sendo causado na interface superior da corrente.

O corpo da corrente é caracterizado por possuir uma velocidade maior do que a velocidade da cabeça da corrente de densidade, podendo chegar a 30% ou 40% (Kneller e Buckee, 2000). Isto ocorre devido à formação de vórtices atrás da cabeça da corrente, que provocam uma diluição maior nesta região. Então, para manter a taxa constante de avanço, a corrente tem que compensar esta região diluída, o que é feito através do aumento de velocidade do corpo. Elisson e Turner (1959) descrevem o corpo como uma região de velocidade estável que possui uma camada fina e densa de fluido próximo à base da corrente.

Simpon e Britter (1979) dividiram o corpo em duas regiões distintas: uma junto ao fundo, onde a densidade é maior e outra acima desta, onde ocorre o processo de mistura com o fluido ambiente. Esse processo de mistura, além de acontecer atrás da cabeça da corrente, se

desenvolve por todo o seu corpo à medida que a corrente avança através do carreamento de fluido ambiente.

Quanto à erosão e deposição, Middleton (1993) sugere que a cabeça da corrente é o principal local de erosão de material e o corpo da corrente é o principal local de deposição. Isto se deve ao fato de que na cabeça temos uma condição de instabilidade do fluxo, enquanto no corpo esta condição é de quase estabilidade. Cabe salientar, que isto não é uma regra geral.

Devido à velocidade do corpo ser superior à da cabeça, esta última recebe um impulso do corpo. Para dissipar esta energia, a cabeça tende a aumentar sua geometria ou utiliza esse excesso de energia para carrear material para o seu interior. Assim, esta zona se caracteriza por ser predominantemente de erosão. Já no corpo principal do fluxo o sedimento é carregado em suspensão mantendo a espessura de fluxo quase uniforme. A cauda do fluxo afina-se repetidamente e torna-se mais diluída, depositando os sedimentos finos assim que o fluxo vai desaparecendo.

3.7 DINÂMICA DO ESCOAMENTO NÃO CONSERVATIVO

3.7.1 Definições e classificação

A dinâmica de uma corrente de densidade não conservativa envolve muitas variáveis tornando o estudo deste fenômeno bastante elaborado. Middleton (1993) as define como o tipo de fluxo de sedimento gravitacional em que o mesmo é mantido em suspensão pela turbulência do fluido. A estrutura da turbulência afeta a maneira como o sedimento é suspenso e transportado, alterando, assim, o comportamento das correntes de turbidez e o seu padrão de deposição.

Uma tentativa simplificada de entender o mecanismo de movimento das correntes de turbidez, é dividindo-a em partes. A força que conduz a cabeça ocorre devido à diferença de massas específicas entre o fluido da corrente e o fluido ambiente. Esta diferença é causada pelas partículas em suspensão na corrente, sendo, nesta região o fluxo considerado como instável. Já a força que conduz o corpo e a cauda é a força gravitacional do fluido mais denso, sendo, freqüentemente, considerada como estável.

A dinâmica de uma corrente de densidade não conservativa assemelha-se a um sistema fluvial, originando-se (zona fonte), fluindo (zona de transferência) e desacelerando, eventualmente, no ponto em que toda a sua carga de sedimento irá se depositar (zona deposicional) (Mutti et al., 1999). A predição da erosão causada pela corrente de turbidez e a distribuição dos depósitos turbidíticos, tais como sua extensão, espessura e distribuição

granulométrica requer o entendimento do mecanismo de transporte/deposição de sedimentos, que são dependentes da dinâmica do fluido que forma a corrente (Kneller e Buckee, 2000).

No ambiente marinho, Zeng e Lowe (1997) descrevem, de maneira simplificada, essa dinâmica (Figura 3.9) em quatro estágios. No início do processo, nota-se um estágio erosivo instável que ocorre devido à aceleração do fluxo e à erosão de material do fundo. O segundo estágio, relativamente estável e uniforme, ocorre em zona de pouca erosão e deposição, mas com grande carreamento de fluido ambiente. A existência de uma troca de declividade, na junção do talude continental com a bacia continental caracteriza o terceiro estágio. Por fim, o quarto estágio, com desaceleração da corrente e deposição, sendo caracterizado pela sedimentação da carga em suspensão, a qual é responsável pela formação das propriedades físicas dos turbiditos.

Processo semelhante é detectado por Huppert e Simpson (1980) em experimentos de laboratório. Ao liberar o fluido, forma-se uma corrente que pode passar por três estágios. Um primeiro estágio, onde ocorre a entrada inicial do fluido, sendo a corrente retardada pelo contrafluxo formado pelo fluido presente no canal. Esta fase também é chamada de ajustamento ou transição da corrente (estágio I). Em seguida ocorre um estágio puramente inercial, onde as forças de empuxo são balanceadas pelas forças de inércia (estágio II). O estágio III ocorre também durante o desenvolvimento da corrente ao longo do canal quando as forças de empuxo são equilibradas pelas forças viscosas (estágio IV). O estágio inercial pode estar ausente, caso os efeitos viscosos tornem-se importantes, antes que o estágio de entrada inicial seja completado.

Esta descrição da dinâmica da corrente, por zonas, é importante para uma primeira aproximação da localização dos depósitos turbidíticos no oceano e seu correto entendimento pode indicar os locais com potencial para a deposição, como por exemplo as regiões com troca do gradiente de declividade, bem como as principais características desses depósitos.

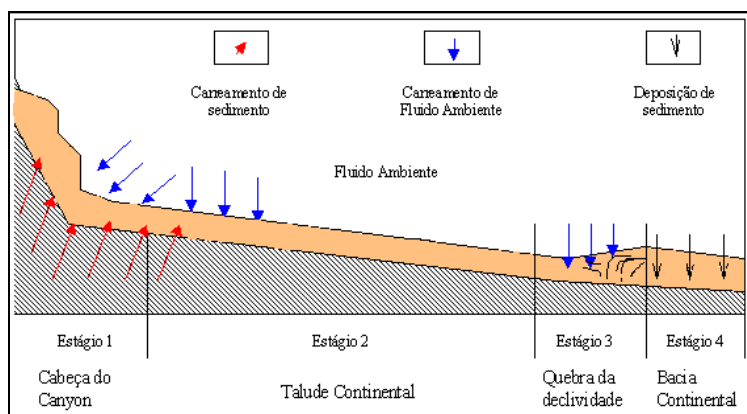


Figura 3.9: Quatro estágios da evolução das correntes de turbidez.

(Fonte: Zeng e Lowe, 1997)

Kneller (1995) classifica as correntes de densidade não conservativas separando os fluxos através de suas condições hidrodinâmicas, baseando-se nos conceitos de regimes permanente e uniforme. O regime permanente se caracteriza pela sucessão de partículas de fluido com vetores de velocidade idênticos se deslocando através de um ponto fixo no espaço.

O Fluxo Desacelerado se refere a um tipo de regime não permanente e descreve uma mudança temporal na velocidade atual em um ponto pelo qual sucessivas partículas de fluido têm velocidades menores. O Fluxo Acelerado se refere a um tipo de regime não permanente e descreve uma mudança temporal na velocidade atual em um ponto pelo qual sucessivas partículas de fluido têm velocidades maiores. A mudança da velocidade em regimes não permanentes pode ser descrita pelo termo $\frac{\partial u}{\partial t}$, onde t é o tempo e u é a velocidade média no ponto de interesse.

Um fluido caracterizado por uma aceleração espacial não nula é chamado de variado. Caso contrário, ele é dito uniforme. O escoamento que se torna mais rápido à jusante é chamado acumulativo e que se torna mais lento é chamado depletivo. A mudança na velocidade em regimes não uniformes é descrita pelo termo $u \cdot \frac{\partial u}{\partial x}$, onde x é a distância.

A aceleração resultante experimentada por uma partícula de fluido depende da soma dos termos:

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.1)$$

3.7.2 Transformações de fluxo

Durante o desenvolvimento de uma corrente de densidade, muitos processos podem ocorrer no seu interior, sendo esses chamados de transformações de fluxo ou mudança de regime. Shanmugam (2000) destaca que a transformação do fluxo durante o transporte é, talvez, o mais importante e menos compreendido fenômeno no processo sedimentológico. O entendimento de como a corrente está transportando o material é importante, pois altera as condições de depósito. Já Middleton e Hampton (1976) reconhecem que não há nenhum critério para identificar o mecanismo de transporte, nos depósitos, devido às transformações de fluxo.

Em seu trabalho Fischer (1983) apresenta quatro tipos de transformações de fluxos que podem ocorrer durante o desenvolvimento da corrente. São elas (Figura 3.10):

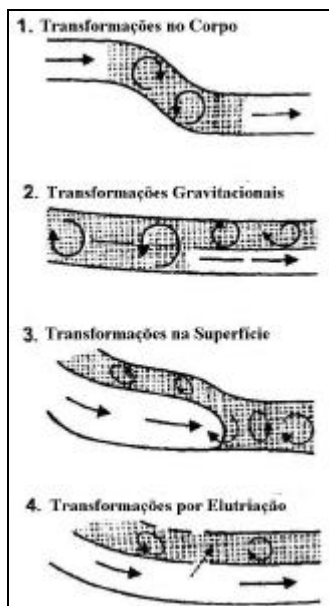


Figura 3.10 – Transformações de fluxo
(Fonte: Fischer, 1983)

- 1- Transformações no corpo: quando o fluxo muda de laminar para turbulento dentro do corpo sem adição ou perda de fluido;
- 2- Transformações gravitacionais: ocorre quando a turbulência inicial, onde o fluxo de partículas carregadas é gravitacionalmente segregado, desenvolve uma região altamente concentrada e com movimento essencialmente laminar, enquanto que o fluxo diluído acima desta região, se mantém turbulento;
- 3- Transformação de superfície: ocorre quando o ar ambiente ou água misturam-se na camada superior pelo arraste provocado pelo escoamento do fluido ambiente, ou quando o líquido ambiente entra pela superfície frontal inferior da corrente formando o seu nariz;
- 4- Transformação por elutriação: desenvolvida pelo movimento ascendente das partículas que saem da região mais densa, junto ao fundo, para produzir uma fase mais diluída e turbulenta acima desta camada.

Fischer (1983) reconhece ainda que a maneira como as partículas são suportadas dentro do fluxo no seu estágio final do movimento determina a textura e as estruturas dos depósitos.

Já Middleton (1993) destaca três aspectos que são importantes na dinâmica das correntes de turbidez e seus padrões de depósitos: (a) o critério da auto-suspensão; (b) a troca de sedimento com o fundo e (c) a mistura na interface superior da corrente.

O critério da auto suspensão de Bagnold (1962) pode ser explicado pelo seguinte ciclo:

- 1- A corrente recebe uma entrada de energia gravitacional suficiente para manter a turbulência e para sustentar as partículas em suspensão gerada pelo fluido;
- 2- Essa suspensão gera uma diferença de densidade entre o fluido ambiente e a corrente;
- 3- Essa diferença de densidade mantém a carga em suspensão na corrente e;
- 4- A suspensão mantém a turbulência.

Outro processo que influencia a dinâmica do processo é a troca de sedimentos com a superfície inferior. Isso pode acontecer pelo processo de erosão na corrente de turbidez, onde o material da superfície inferior é erodido e carregado para dentro da corrente. Este carregamento de material causa o aumento da capacidade de transporte da corrente, provocando o seu movimento a distâncias maiores. A situação inversa também é possível devido ao processo de deposição de material da corrente na superfície inferior. Neste caso, a diferença de massa específica entre a corrente e o fluido ambiente é reduzida e a tendência do fluxo é desacelerar e parar.

Este mecanismo de troca ainda não é totalmente explicado pela ciência. Middleton (1993) apresenta um exemplo com o seguinte questionamento: "Quando uma quantidade de sedimento suspenso começa a se mover rampa abaixo algumas partículas irão se depositar no fundo. A questão crítica é então saber se este sedimento ficará no fundo ou será erodido, voltando à suspensão".

Um outro aspecto abordado por Middleton (1993) é a mistura na interface superior, provocada pelo carregamento de fluido ambiente à corrente de densidade mistura, sendo este uma função do Número de Froude densimétrico.

3.7.3 Efeitos da topografia

Outro fator importante na dinâmica do escoamento é o efeito da topografia sobre o fluxo de turbidez. Kneller e Buckee (2000) fazem uma revisão em seu trabalho sobre este efeito. Alexander e Morris (1994) destacam os fatores que controlam o padrão de sedimentação e que devem ser observados na interação das correntes de turbidez com a topografia de fundo do mar: migração e a geração de ressalto hidráulico, a reflexão de ondas solitárias e geração de vórtices intensos nas correntes não confinadas tanto nas margens quanto ao redor de obstáculos.

3.7.4 Perfis de velocidade e concentração

Outro aspecto da dinâmica do escoamento está relacionada aos perfis de velocidade e concentração. Kneller e Buckee (2000) apresenta quatro perfis para correntes de densidade não conservativas (Figura 3.11).

No primeiro caso (a) um modelo bidimensional típico, dividindo o fluxo em uma região inferior, zona mais densa de espessura constante e numa região superior, zona mais diluída por causa do carreamento de água ambiente. No segundo (b), o perfil é típico de correntes de densidade não conservativas com baixa concentração. Estas correntes são fortemente estratificadas, com o gradiente de densidade que é maior perto da base da corrente e decresce rapidamente perto dos níveis de velocidade máxima. Em (c), a distribuição de densidade tem um perfil de concentração inclinado sendo freqüentemente observada em correntes erosionais ou em correntes com a alta taxa de carreamento na camada superior. O último perfil (d) foi baseado em experimentos em que a distribuição granulométrica foi medida mostrando que o material fino é mais uniformemente distribuído na vertical do que o material mais grosseiro, que tende se tornar concentrado na camada de baixo do fluxo.

Quanto ao perfil de velocidades, sua forma é similar ao perfil de velocidades de um jato junto a uma parede. A altura onde ocorre a velocidade máxima é controlada pela razão das forças de arraste nas interfaces superior e inferior e, em muitos experimentos, ocorre em 0,2 a 0,3 vezes a altura da corrente.

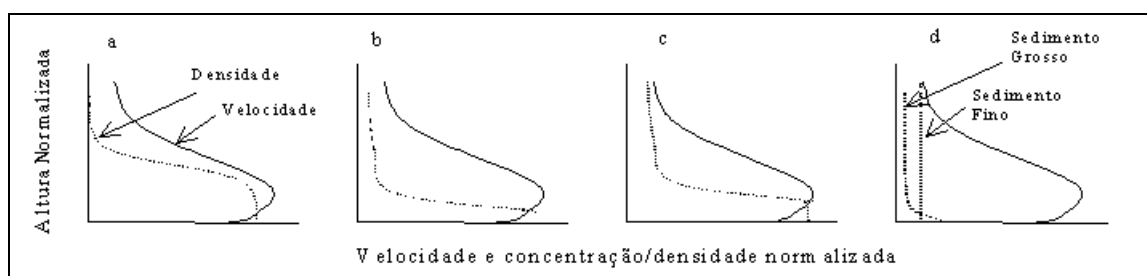


Figura 3.11: Perfis de concentração (modificado de Kneller e Buckee, 2000).

3.7.5 Mecanismos de deposição

Para Lowe (1982), o mecanismo de deposição de correntes de turbidez baseia-se na tendências das partículas sedimentares acumularem individualmente, seja provenientes da carga de fundo (de tração) ou, diretamente, da carga em suspensão, desenvolvendo-se uma gradação no seu tamanho da base para o topo nos depósitos. Shanmugam (1997) destaca que este tipo de deposição é característico de fluidos turbulentos onde as partículas grossas e finas

tendem a cair separadamente durante a deposição sendo função da velocidade de queda, gerando uma gradação normal dos sedimentos.

Este mecanismo é resultado de uma desaceleração temporal e espacial do fluxo. Segundo Stow et al. (1996), a desaceleração no tempo ocorre através da desaceleração de eventos catastróficos (por exemplo, fluxo de ondas solitárias), enquanto que a desaceleração no espaço ocorre através da expansão lateral (como nos deltas de rios) ou pela troca de gradiente de declividade (ressalto hidráulico)

Já para Kneller (1995), a deposição ou não de uma partícula depende de uma aceleração resultante negativa, não importando se há aceleração ou desaceleração, ou se o regime é uniforme ou não uniforme. Apesar disso, a relação entre deposição e diminuição da velocidade não é tão simples. Problemas podem surgir quando o regime está mudando. Além disso, o intervalo de tempo entre a desaceleração e a deposição também depende de outros fatores como altura da corrente, massa específica da mesma, velocidade de queda das partículas e principalmente fatores relacionados à distribuição granulométrica.

Combinando os termos temporal e espacial da aceleração, concluiu que existem nove situações diferentes de deposição (Figura 3.12). Em quatro dessas situações não ocorre deposição, pois não há aceleração resultante negativa, enquanto nas outras cinco situações a deposição é verificada.

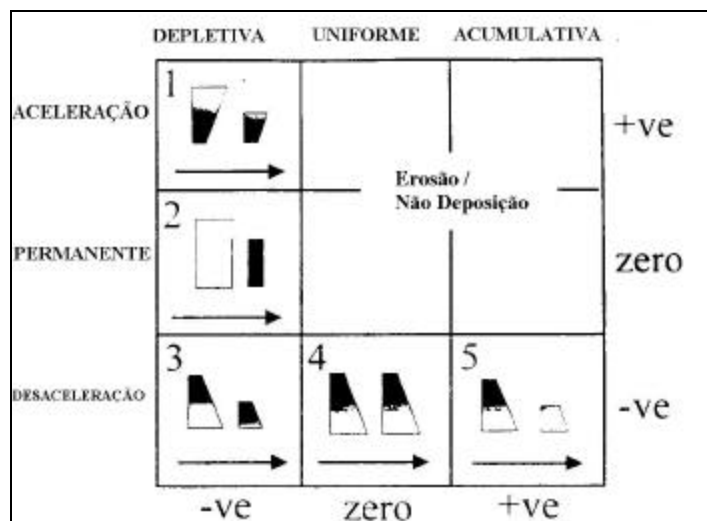


Figura 3.12: Matriz de acelerações (Fonte: Kneller, 1995)

- Fluxos depletivos desacelerados: caracterizado pela gradação normal, tipo seqüência de Bouma, com a presença de texturas mais fina nas regiões mais distal;
- Fluxos uniformes desacelerados: similar ao anterior porém não se afina para jusante. Característica de fluxos de onda solitária;

- Fluxos depletivos permanente: não há variação no tamanho do grão, mas afinamento da textura à jusante, podendo ser iniciado por descargas de longo período, como erupções vulcânicas, remobilização de sedimento não consolidado na plataforma, cheia de rios fluviais ou conexão com grandes rios;
- Fluxos depletivos acelerados: produz gradação inversa, com sedimentos mais grosso na parte superior, afinando-se a jusante. Corresponde a fluxos de densidade de grandes dimensões e volume e;
- Fluxos acumulativos desacelerados: gradação normal com espessura menor e sem a presença de partículas finas a jusante.

3.8 SIMULAÇÃO FÍSICA DAS CORRENTES DE DENSIDADE

O estudo do comportamento das correntes de densidade não conservativas ainda não é totalmente explicado pelos pesquisadores, principalmente pela dificuldade de obtenção de dados reais na natureza. As correntes de turbidez no oceano podem alcançar velocidades da ordem de 25m/s e alturas na ordem de centenas de metros, isto implica que mesmo as menores correntes têm poder para danificar ou destruir os equipamentos colocados para o estudo em escala natural deste fenômeno (Kneller e Buckee, 2000). Assim, os dados obtidos destas correntes são inferidos de forma indireta, principalmente através da quebra de cabos submarinos e da análise das alturas e larguras de depósitos recentes sobre a bacia.

No estudo deste processo, três caminhos foram seguidos pelos pesquisadores: o estudo de sistemas turbidíticos em afloramentos e testemunhos de sondagens, os modelos teóricos e os experimentos de laboratório (Kneller e Buckee, 2000). Kneller (1995) acredita que modelos numéricos e experimentais melhorados se mostrarão mais úteis do que as analogias com afloramentos de sistemas turbidíticos. Já os modelos matemáticos podem também auxiliar o entendimento da dinâmica da corrente, porém, sendo as correntes de turbidez um fenômeno ainda não equacionado totalmente de forma física, seu estudo exige o uso de simplificações para criar um modelo. Diante disso, a modelagem física, através do uso de experimentos em escala reduzida em laboratório é fundamental para o entendimento deste processo.

Middleton (1970) destaca que as vantagens da investigação experimental são que o processo pode ser diretamente observado e que as condições do experimento podem ser controladas diretamente pelo investigador. Assim, um simples fator pode ser estudado, enquanto que os outros podem ser mantidos constantes. As desvantagens do método experimental é a preocupação com os efeitos da redução de escalas física e temporal e a

dificuldade de reproduzir no laboratório todos os fatores complexos que ocorrem na natureza. Além do mais, os modelos físicos servem também, para auxiliar os modelos matemáticos, testando as simplificações adotadas por estes processos (Kneller e Buckee, 2000).

Kneller e Buckee (2000) destacam que os primeiros trabalhos experimentais de correntes de densidade não conservativas tinham como foco de estudo a anatomia da corrente, especialmente sua cabeça. Posteriormente, à medida que a tecnologia foi evoluindo e as instalações foram se desenvolvendo, os demais componentes da corrente puderam ser observados. Entretanto, Middleton (1993) constata que, apesar do grande número de estudos sobre o comportamento hidrodinâmico dos fluxos gravitacionais, bem como, os estudos teóricos, de deposição de sedimentos, há relativamente poucos estudos experimentais da deposição dos sedimentos em correntes de turbidez. A tabela 3.2 apresenta os principais trabalhos experimentais realizados.

Tabela 3.2: Principais trabalhos sobre correntes de turbidez (Fonte: Kneller e Buckee, 2000)

| Autor(es) | Ano | Tipo da Corrente | Foco do estudo | Alimentação da Corrente | Fenômeno estudado |
|--------------------|------|---------------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------------------|
| P.H. Kuenen | 1937 | Não Conservativa | Depósito | Pulso | Depósitos |
| Elisson e Turner | 1959 | Conservativa | Corpo | Fluxo Contínuo | Carreamento e estratificação |
| G.V. Middleton | 1966 | Conservativa - Não Conservativa | Cabeça e Corpo | Pulso e Fluxo Contínuo | Anatomia e movimento, leis simples |
| S. Luthi | 1981 | Não Conservativa | Depósito | Fluxo Contínuo | Depósitos |
| Garcia e Parker | 1993 | Conservativa - Não Conservativa | Corpo | Fluxo Contínuo | Carreamento e propriedades do fluxo |
| Morris e Alexander | 1994 | Não Conservativa | Depósito | Fluxo Contínuo | Depósito e Topografia |
| Woods e Bursik | 2000 | Não Conservativa | Depósito | Fluxo Contínuo | Depósito e Topografia |

3.8.1 Análise Dimensional e Semelhança

3.8.1.1 Efeitos de escala

A semelhança pode ser conceituada como o conjunto de princípios a serem obedecidos a fim de projetar, construir, operar e interpretar os sistemas (modelos) a partir dos quais se deseja prever o comportamento de outros sistemas (protótipos). Em outras palavras, é uma ferramenta para reproduzir em laboratório um fenômeno que acontece na natureza, garantindo que sua geometria, cinemática e dinâmica apresente alguma relação de escala com o fenômeno natural (Motta, 1972).

Nos modelos físicos, esta relação de escalas é fundamental para a representação do fenômeno natural. Kneller e Buckee (2000) dizem que a vantagem de utilizar modelos físicos é contrabalançada pela dificuldade apresentada pelas simplificações de escala. Peakall et al. apud Kneller e Buckee (2000) esboçou quatro abordagens para a concepção dos modelos físicos:

- réplicas fiéis dos protótipos (escala 1:1);
- modelos reduzidos com a utilização de escalas distorcidas;
- analogias com experimentos sem escalas e;
- similaridades do número de Froude.

Quanto ao modelo na escala 1:1, fica praticamente impossível, fisicamente, a reprodução em escala real dos fenômenos, uma vez que, devido a sua magnitude, implicaria em instalações muito grandes com um custo elevado. Já para os estudos em modelos com escalas distorcidas, os resultados podem se mostrar confiáveis, porém a extrapolação para o fenômeno natural deverá ser realizada com cuidado. Já os modelos sem escala apresentam resultados meramente qualitativos.

Middleton (1967) destaca que experimentos com escala reduzida permitem a reprodução de uma gradação nos depósitos. Nos seus ensaios com a utilização de esferas de plástico ($\text{den} = 1,52$), em laboratório, a deposição de sedimentos procedeu-se rapidamente, sendo que os sedimentos mais grossos se depositaram primeiro, nas zonas mais proximais e os demais tamanhos de grãos depositaram-se ao longo do comprimento. É provável que o tamanho dos grãos presentes nesses depósitos reproduzam muito intimamente as características e os tamanhos de grãos de um turbidito natural.

Várias são as estruturas internas do depósito causado por correntes de densidade na natureza: ondulações, laminação, plano paralela etc. Em laboratório problemas podem aparecer para simular estas estruturas internas. O tempo do experimento normalmente é

pequeno, da ordem do minuto ou menos, então não é esperado que elas apareçam (Middleton, 1966a).

3.8.1.2 Parâmetros adimensionais que descrevem o fenômeno

As variáveis, segundo Middleton (1966b), que intervêm nas correntes de densidade não conservativas são: a diferença de densidade, expressa pelo termo da gravidade reduzida ($g' = g \Delta \rho / \rho$), 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). Devemos considerar, ainda, as variáveis que controlam o comportamento dos sedimentos no fenômeno. Estas variáveis são: o diâmetro do sedimento (d), o coeficiente de uniformidade (S) e concentração em volume (C). Assim:

$$f_1(g', U, h, S, f_i, f_o, \nu, d, S, C) = 0 \quad (3.2)$$

ou agrupando em termos adimensionais

$$f_2\left(\frac{U}{\sqrt{g'h}}, \frac{Uh}{\nu}, S, f_i, f_o, \frac{u_*d}{\nu}, S, C\right) = 0 \quad (3.3)$$

onde:

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

$$\frac{Uh}{\nu} = \text{Número de Reynolds}$$

$$\frac{u_*d}{\nu} = \text{Número de Reynolds do grão}$$

Cabe salientar que a análise dos fenômenos de erosão/deposição junto ao fundo e o carreamento na superfície superior foram analisados parcialmente. Também, não foi considerada a tensão superficial existente na interface dos fluidos. Essa variável pode ser representada adimensionalmente pelo número de Weber, que expressa a relação entre as forças viscosas e de tensão superficiais.

A partir de um dado valor (~ 2000), o número de Reynolds torna-se irrelevante para o estudo, nesse caso, admitimos, por invariância assintótica, que o fluxo é totalmente turbulento. Devido a esta aproximação, o número de Weber e o número de Reynolds do grão podem ser desconsiderados. Admitindo, também, que o comportamento hidrodinâmico da partícula pode ser adequadamente expresso pela sua velocidade de queda (w), os dois

principais números adimensionais são o Froude densimétrico e a razão entre a velocidade de queda (w) e alguma velocidade característica do fluxo (U ou U_c) (Middleton, 1966b). Assim, a equação 3.3 fica:

$$f_2\left(\frac{U}{\sqrt{g'h}}, S, f_i, f_o, \frac{w}{U}, \mathbf{s}\right) = 0 \quad (3.4)$$

O número de Froude Densimétrico não determina apenas o fator de perda de carga da interface, mas o regime e o grau de mistura na interface. É importante guardar esta relação no modelo e protótipo.

Já para fluxos não permanentes, Keulegan apud Middleton (1966b) propôs uma relação na escala do tempo introduzindo um termo adimensional (ut/d), o qual é definido pela equação da continuidade do escoamento.

As seguintes observações sobre modelos reduzidos de correntes de turbidez devem ser verificadas:

1. O número de Froude densimétrico (número de Richardson) deve ser similar no modelo e protótipo garantindo assim a semelhança no regime do escoamento
2. Se a semelhança do Froude densimétrico for assegurada, o fator da perda de carga e a mistura na interface superior das correntes devem ser similares. No caso de correntes de turbidez com sedimentos grossos, o efeito do número de Reynolds será maior do que em correntes com sedimentos mais finos;
3. Devido à similaridade ocasionada pelo Froude densimétrico, a velocidade do modelo será menor do que no protótipo;
4. A velocidade de queda deve ter escala proporcional a da velocidade média.
5. A distribuição e a concentração dos sedimentos tem efeito na velocidade de queda da partícula e;
6. A semelhança pelo número de Froude densimétrico requer que as declividades utilizadas no modelo não sejam muito maiores do que no protótipo.

Middleton e Neal (1989) sugeriram que a relação de proporcionalidade para a espessura do depósito de fundo dividida pela raiz quadrada do volume em suspensão (espessura adimensional) é proporcional à raiz quadrada da velocidade de queda da média das partículas dividida pela velocidade da corrente (velocidade de queda adimensional). A extrapolação para escalas naturais é possível, mas esta relação precisa de mais testes e de uma melhor conceituação teórica (Middleton, 1993).

Alguns cuidados devem ser tomados para garantir que a correta semelhança seja adotada nos ensaios. Conforme já discutido, os principais parâmetros adimensionais

utilizados para garantir que os ensaios sejam representativos são: o número de Froude densimétrico; o número de Reynolds e a velocidade de queda adimensionalizada.

A semelhança do número de Froude densimétrico deve ser assegurada para que os escoamentos sejam considerados semelhantes dinamicamente.

O número de Reynolds será avaliado para sabermos em que regime estamos trabalhando, isto é, se no regime laminar ou turbulento. Kneller (2000) argumenta que, em laboratório, em algumas situações, é difícil alcançar um valor para o número de Reynolds que garanta uma turbulência completamente desenvolvida ($Re > 2000$).

Deve-se adotar o princípio de que, por hipótese, o comportamento hidrodinâmico das partículas pode ser adequadamente expresso pela velocidade de queda das partículas (ω). Nesse caso, pode-se supor que não somente a viscosidade mas também a concentração são importantes, se e somente se, modificarem a velocidade de queda efetiva das partículas (e a massa específica efetiva do escoamento) (Middleton, 1966b). A velocidade de queda adimensionalizada é a razão entre a velocidade de queda terminal do grão de sedimento e alguma velocidade característica da corrente, normalmente a velocidade média do escoamento.

3.8.2 Representação dos mecanismos de iniciação da corrente - volume inicial fixo ou fluxo contínuo de material.

Conforme foi citado no item 3.5, o mecanismo de iniciação das correntes de densidade não conservativas (correntes de turbidez), ocorrem de duas maneiras: pela remobilização de um volume limitado de material que tem sua duração quase instantânea (onda solitária), ou ainda, por uma grande quantidade de material distribuído ao longo do tempo, caracterizado por uma alimentação contínua de material.

Nos modelos em escala reduzida de correntes de densidade, estes dois mecanismos são freqüentemente reproduzidos em experimentos utilizando um volume inicial fixo (pulso) ou uma alimentação contínua de material, durante um determinado tempo, chamado fluxo contínuo de material.

Na modelagem de correntes de densidade com volume inicial fixo, o canal é normalmente dividido em duas seções por uma comporta delgada. De um lado da comporta fica o fluido denso e do outro o fluido ambiente. Tão logo a comporta é retirada, o fluido denso começa a formar a corrente e uma contra corrente do fluido ambiente flui na direção oposta (Simpson, 1997).

Dois situações de comportamento da corrente podem acontecer com a liberação de um volume fixo (pulso) (Figura 3.13): uma ocorre quando o fluido mais denso possui a mesma altura do fluido ambiente (a) e a outra quando o fluido mais denso possui uma altura menor do que a do fluido ambiente (b). A diferença entre as duas situações, é a formação da contra corrente após a retirada da comporta: no primeiro caso, a contra corrente refletida na parede de montante forma uma depressão que empurra o fluido mais denso em direção à cabeça. No segundo caso, uma onda mais tênue forma-se de jusante para montante e, quando esta reflete, segue em direção à cabeça da corrente.

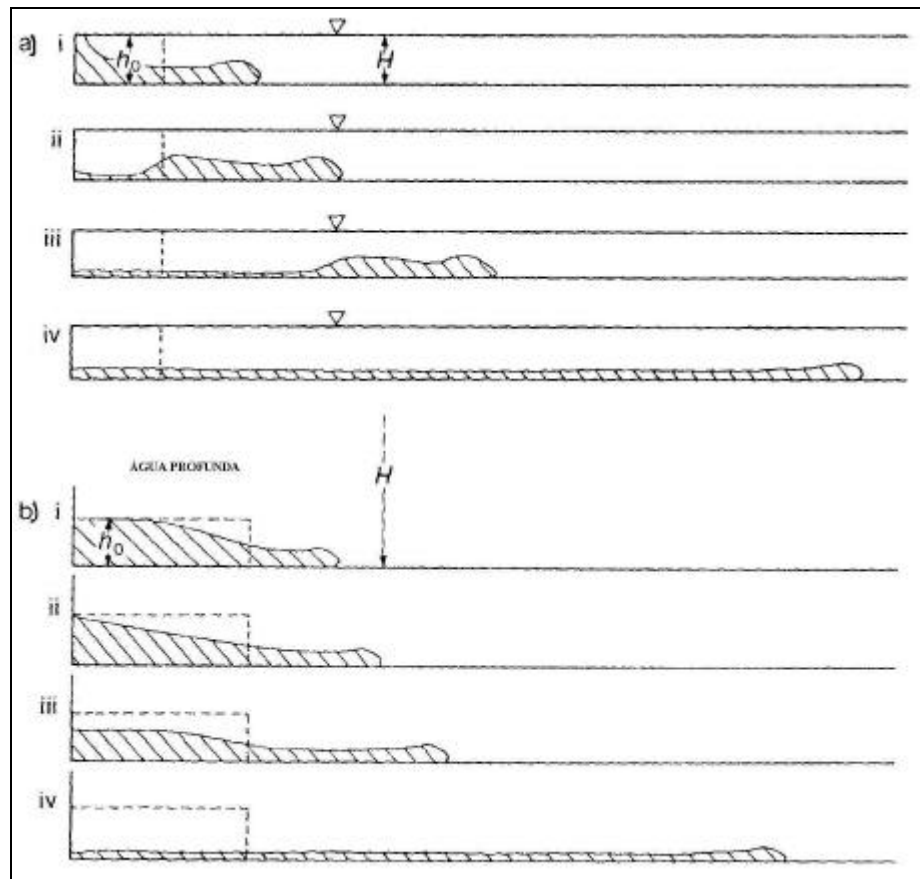


Figura 3.13: Mecanismo de iniciação da corrente. (a) O fluido denso na mesma altura do fluido ambiente; (b) A altura do fluido denso muito menor que a do fluido ambiente (Fonte: Simpson, 1997)

Huppert e Simpson (1980), Laval et al. (1988), Alexander e Morris (1994), Middleton e Neal (1989) e Fabian (2002) são exemplos de autores que adotaram o mecanismo de iniciação através de volume inicial fixo. A vantagem desse método é sua relativa simplicidade, permitindo a possibilidade de grande flexibilidade nos experimentos ilustrando uma grande faixa de correntes de densidade.

Já na modelagem de correntes de densidade com fluxo contínuo, o fluido mais denso é normalmente preparado num tanque auxiliar, o qual garantirá um suprimento constante de

material durante a execução do ensaio. Este mecanismo tem a vantagem da não ocorrência do contra fluxo causado pela entrada do fluido mais denso no fluido ambiente. Porém, se o número de Froude for superior à unidade, poderá ocorrer a formação de ressalto hidráulico na interface do fluido, causando o carreamento do fluido ambiente para dentro da corrente e, por conseqüência, alterando a dinâmica da corrente. Britter e Linden (1980), Luthi (1981), Barbosa (1998) e Bursik e Woods (2000) são exemplos de trabalhos que utilizaram esta técnica. Com relação ao último citado, há uma pequena diferença no procedimento do ensaio: o suprimento contínuo de material entrava indiretamente no canal de ensaios, passando por um compartimento onde o nível de material que entrava era controlado por uma comporta aberta a poucos centímetros do fundo, para depois entrar na zona de ensaios.

3.8.3 Correntes de densidade confinadas ou não confinadas

Conforme apresentado no item 3.5, na natureza, o escoamento das correntes de densidade não conservativas pode ocorrer em condições de confinamento, (por exemplo, o escoamento em cânions), ou em condições não confinadas, (por exemplo, transbordamento de canais, leques submarinos e outros). Em muitos casos, o mesmo escoamento pode trocar de uma condição para outra no mesmo processo. Com isso, a dinâmica do escoamento, a distribuição dos sedimentos e as características dos depósitos também mudam.

Muitos estudos retratando fluxos bi-dimensionais (confinados lateralmente) são encontrados na literatura. Laval et al. (1988), Bursik e Woods (2000), Britter e Linden (1980), Huppert e Simpson (1980), entre outros, analisaram o comportamento dinâmico e geométrico destas correntes. A característica mais notável nestes fluxos é a uniformidade da velocidade da frente (Simpson, 1997).

Porém, quando tratamos de fluxos tridimensionais (não confinados), poucos estudos são encontrados. Luthi (1981) avaliou o padrão de deposição de correntes de turbidez não canalizadas com declividade constante. Já Barbosa (1998) simulando correntes de densidade em reservatórios, montou um aparato tridimensional que permitia a variação da declividade.

Um dos poucos estudos que simulam as duas situações é o de Alexander et al. (1994) que analisou o padrão de depósitos em canais confinados lateralmente (4.87m x 0.17m x 0.32m) e em canais não confinados lateralmente (1.5m x 1.5m x 0.32m). Neste estudo eles avaliaram também, a presença de obstáculos.

Seus principais resultados quanto à dinâmica e o padrão de deposição foram: a espessura do depósito é máxima na frente da comporta em ambos os canais; em correntes não

confinadas a largura aumenta com a distância a jusante e o vórtice de mistura atrás da cabeça se intensifica; o carreamento turbulento atrás da cabeça pode ser mais importante nas correntes não confinadas do que nas confinadas; em correntes confinadas, a espessura do depósito gerado não é função da distância a origem da fonte, entretanto correntes não confinadas desaceleram mais rápido e são diluídas mais rapidamente que as correntes confinadas. Com isso a relação entre a espessura do fundo e a distância à origem é mais importante em correntes não confinadas.

Já Bursik e Woods (2000) realizaram um experimento em que o canal variava de largura ao longo do seu comprimento. Sua largura inicial era de 6.5cm, nos primeiros 40cm e alargava para 20cm nos 210cm finais. A deposição de material se alterou ao longo da distância do canal. Na região confinada, o gradiente de deposição foi de $-0,011$ e, após uma pequena descontinuidade no alargamento, o gradiente de deposição passou para $-0,033$. Este fator de alteração no gradiente de deposição ao longo do canal foi aproximadamente igual ao fator de alargamento, ou seja, próximo de três.

3.8.4 Materiais utilizados para simular as correntes de densidade

As correntes de densidades não conservativas são simuladas, em laboratório, com a utilização de materiais granulares que formam sua carga em suspensão e que respeitam condições de semelhança já discutidas anteriormente. Estes materiais são utilizados para representar os mecanismos de erosão, transporte e deposição de sedimentos durante o desenvolvimento da corrente. Os principais critérios para escolha dos materiais na simulação de correntes de densidade não conservativas são o tamanho do grão, velocidade de queda e, principalmente, a densidade do grão.

Devido a proporcionalidade com o diâmetro do grão, não podemos adotar um fator de redução de escala de comprimento muito grande do protótipo para o modelo. Isto poderia gerar a escolha de materiais com comportamento hidráulico diferente, um exemplo disso são os siltes e argilas, que possuem coesão, enquanto que as areias não têm esta característica e, por consequência, não possuem o mesmo comportamento quando sob ação do mesmo escoamento. Este problema pode ser contornado utilizando bolas de vidro ou pó de sílica (Kneller e Buckee, 2000)

Assim, uma maneira de evitar que a redução dos diâmetros dos sedimentos imponha a adoção de material mais fino é modificar a densidade do material a ensaiar, o que nos permite trabalhar com grãos maiores. Neste caso, porém, a concentração do sedimento aumenta afetando o comportamento das partículas

Muitos estudos utilizam sal (ensaios conservativos), para criar a diferença de densidade. Estas simulações podem representar a fração muito fina das correntes de turbidez, como os siltes e argilas, porém podem afetar significativamente o comportamento hidrodinâmico da corrente. A tabela 3.3 apresenta os materiais utilizados para simular as correntes de densidade não conservativas.

Tabela 3.3: Materiais utilizados para simulação de correntes de densidades.

| | Material | Diâmetro do grão (mm) | Densidade do material | Velocidade de queda (cm/s) |
|-------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Middleton (1967) | Bolas de plástico | 0,18 | 1,52 | 0,9 |
| Rimoldi et al. (1996) | Carbeto de silício | 0,063 e 0,090 | 3,22 | 0,48 e 0,88 |
| Bonnecaze et al. (1993) | Carbeto de Silício | 0,009; 0,023; 0,037 e 0,053 | 3,22 | Não Informa |
| Bursik et al. (2000) | Óxido de alumínio | 0,063 | 3,95 | Não Informa |
| Alexander et al. (1994) | Carbeto de silício | 0,063 e 0,090 | 3,22 | 0,48 e 0,88 |
| Laval et al. (1988) | Areia | 0,04; 0,05; 0,63; 0,80; 1,00 e 1,25 | 2,65 | Não Informa |
| Luthi (1981) | Pó de Giz | 0,003 | Não informa | Não Informa |
| | Areia | 0,037 | 2,65 | Não Informa |
| Kneller (1995) | Material Plástico | 0,600 | 1,18 | 0,15 |
| Middleton e Neal (1989) | Esferas de vidro | 0,085; 0,156; 0,258 | 2,40; 2,47; 2,45 | 0,65; 1,8; 3,75 |
| | Esferas de Plásticos | 0,18 | 1,52 | 0,55 |
| Altinakar et al. (1996) | Pó de quartzo artificial | 0,014 e 0,032 | 2,65 | 0,61 e 1,96 |
| Parker et al. (1987) | Pó de vidro | 0,030 e 0,060 | 2,65 | Não informa |
| Lee e Yu (1997) | Caulim | 0,068 | 2,65 | 0,010 |
| Garcia e Parker (1989) | Sílica | 0,005; 0,01; 0,025 | 2,65 | 0,002; 0,008; 0,060 |
| | Vidro | 0,03 e 0,07 | 2,5 | 0,085 e 0,370 |
| Garcia (1994) | Sílica | 0,027 | 2,65 | Não informa |

Com relação à utilização de critérios de semelhança, em nenhum dos trabalhos citados na tabela 3.3 são comentados se os materiais respeitam uma relação de escala ou se estão seguindo algum parâmetro de semelhança dinâmica entre escoamentos.

4 METODOLOGIAS EMPREGADAS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA (COMO FOI REALIZADO O ESTUDO)

Conforme já citado, o estudo de correntes de densidade não conservativas em modelos físicos, busca representar as condições existentes na natureza, com reproduções do fenômeno no laboratório sob condições controladas. Porém, para evitar problemas de efeito de escala, o processo experimental necessita uma série de testes e adaptações para estabelecer as condições ideais de ensaios. Seguindo o objetivo geral do trabalho, o estudo da modelagem física de correntes de densidade não conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada passou por duas etapas preliminares, que localizaram a implantação de metodologias para os ensaios e a definição dos tipos de materiais mais adequados à simulação. O desenvolvimento dos ensaios foi um constante processo de adaptação e aperfeiçoamento até a busca por um padrão experimental julgado adequado.

Ao contrário das correntes de densidades conservativas, que utilizam basicamente a simulação com água e sal, nas correntes não conservativas é necessário utilizar um material, normalmente granular, que deverá:

- reproduzir a carga em suspensão;
- gerar depósitos ao longo da sua evolução;
- respeitar as condições de semelhança dinâmica entre protótipo e modelo.

A primeira fase do estudo, então, consistiu na escolha do material e das faixas granulométricas mais adequadas para a simulação de correntes de densidade não conservativas.

Foram pré-selecionados e caracterizados os materiais que supostamente apresentavam estas características, avaliando-se quais os melhores deveriam ser utilizados para os ensaios. Após, foram determinadas suas características físicas, tais como: massa específica, forma, distribuição granulométrica, além da velocidade de queda das partículas.

Foi realizada então, uma primeira série de ensaios, num canal de pequeno porte, visando avaliar a capacidade de cada material em representar não só a carga em suspensão das correntes de densidade não conservativas, mas também os depósitos por elas gerados.

Ainda nesta primeira fase do estudo foi desenvolvida uma primeira aproximação para a metodologia de ensaios por fluxo contínuo de material. No item 3.8.3, foram relatados os procedimentos encontrados na literatura sobre o tema que serviram de base para o desenvolvimento de uma metodologia para as instalações existentes no laboratório.

Por ser pioneira para o laboratório, esta primeira etapa tem um papel muito importante no desenvolvimento e andamento das etapas posteriores do estudo, pois permitiu uma primeira familiarização com o método experimental para a simulação de tais correntes.

Numa segunda fase, foi realizada uma nova série de ensaios, no canal de pequeno porte, com o intuito de analisar qual a variação no padrão de deposição, na geometria e na velocidade destas correntes em função da variação de seus principais parâmetros: como a massa específica da mistura, a faixa granulométrica e o material utilizado. Esta série de ensaios serviu, também, para implementar as sugestões de correção dos problemas apresentados na metodologia de ensaios proposta na primeira fase de ensaios.

Uma das grandes dificuldades encontradas pelos pesquisadores no estudo de correntes gravitacionais, é estimar qual a quantidade de sedimentos que provocou o fluxo e como foi sua distribuição no tempo. A partir desta incerteza, foi proposta a terceira série de ensaios, visando o estudo das condições iniciais de aporte de sedimentos. Para isso, com um mesmo material e uma mesma concentração, foi variada a vazão e o volume de entrada de mistura, avaliando assim, qual a variação dos depósitos formados, bem como as características geométricas e dinâmicas da corrente. Assim, esta última fase do estudo foi caracterizada pela avaliação das correntes de densidades não conservativas numa topografia simplificada, no caso um cânion retilíneo estilizado implantado dentro do canal tridimensional de geometria simplificada.

Com estas três fases do estudo, buscou-se enriquecer o conhecimento sobre as correntes de densidade não conservativas, propondo uma metodologia de ensaio, sugerindo o tipo de material a ser utilizado, realizando uma primeira avaliação dos depósitos gerados em diversas situações que possam ocorrer, contribuindo para o entendimento do comportamento da dinâmica e dos depósitos sob diferentes cenários de início do fenômeno.

4.2 APARATO EXPERIMENTAL

As instalações utilizadas para o desenvolvimento do trabalho experimental foram dois canais com características distintas: um canal de pequeno porte e um canal tridimensional de geometria simplificada.

4.2.1 Canal de pequeno porte

O canal de pequeno porte foi construído em acrílico, sobre uma estrutura de aço (Figura 4.1). Ele possui dois tripés, com alturas reguláveis, situados perto de suas extremidades, que permitem a modificação da declividade do canal. Suas dimensões são: 300cm de comprimento; 12.5cm de largura e; 15cm de altura.

Para a realização dos ensaios, o canal sofreu adaptações para permitir implantar o método de início da corrente através de fluxo contínuo de material. Essas modificações foram as seguintes:

- retirada da comporta fixa que delimitava o canal;
- o antigo compartimento de alimentação do canal transformou-se na zona de dissipação da corrente de densidade não conservativa, servindo também para o esgotamento do canal, realizado através de uma mangueira conectada a este compartimento e dotada de um registro esfera no seu final para o controle do fluxo;
- colocação de uma comporta inicialmente a 2,0cm do fundo, junto ao sistema de alimentação contínua de material para direcionar o fluxo;
- instalação do sistema de alimentação contínua de material composta por dois funis circulares de vidro com capacidade de 7 litros cada. As dimensões de cada um dos reservatórios de alimentação de material são as seguintes: altura de 45cm sendo que desses, os primeiros 15cm têm um diâmetro de 2,5cm, 10cm são de transição para o alargamento de 2,5cm para 25cm e os 20cm finais têm 25cm de diâmetro.

Na saída do funil existe uma mangueira com um registro esfera que controla a vazão de entrada de material e um difusor no fim que distribui o fluxo transversalmente no canal. A altura do sistema de alimentação ao canal é 25cm.

4.2.2 Canal tridimensional de geometria simplificada

O canal tridimensional de geometria simplificada (Figura 4.2) foi construído em concreto e alvenaria e possui quatro janelas de vidro para a visualização do fluxo durante os ensaios. Considerando suas medidas internas, o canal tem altura de 1,20m e comprimento total de 13,85m, distribuídos da seguinte maneira: nos primeiros 6,85m a sua largura é de 0,96m e nos últimos 7,0m sofre um alargamento para 4,66m. Há ainda a possibilidade de se colocar uma comporta móvel de acionamento rápido que pode ser instalada na parte estreita do canal, formando um compartimento de mistura de material com 1,15m x 0,96m x 1,20m.

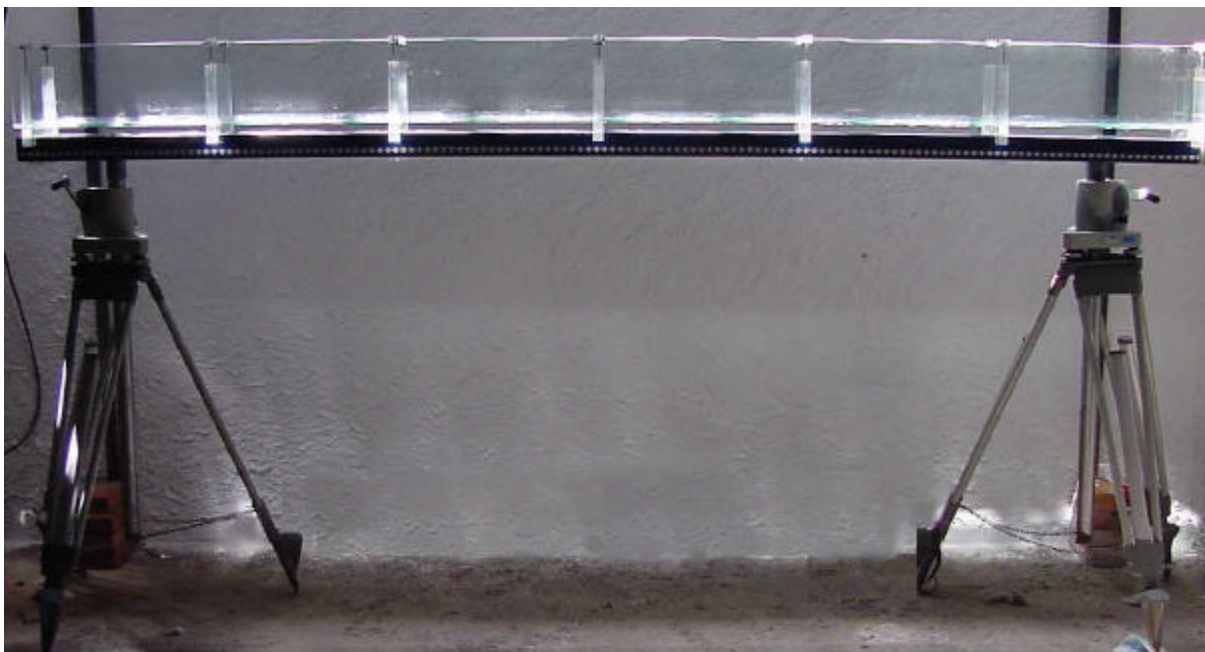


Figura 4.1: Canal de pequeno porte.

As quatro janelas de vidro servem para a visualização do fluxo. Três delas se encontram na parte estreita do canal com dimensões de aproximadamente de 50cm de largura por 100cm de altura e 1,0cm de espessura a outra na parede do alargamento direita com 60cm de largura por 100cm de altura e 1,0cm de espessura.

Foram instaladas sete esperas para instalações hidráulicas junto ao piso do canal, das quais, seis se destinam para o enchimento/esvaziamento de água e uma para a entrada de material de ensaio. Estas esperas de enchimento/esvaziamento foram ligadas em série até a canalização de alimentação de água do pavilhão fluvial.

Dentro do canal tridimensional de geometria simplificada, foi implementada uma configuração estilizada e simplificada de um cânion submarino com as seguintes características: a) seção transversal com forma parabólica com 20cm de largura e 8cm de profundidade na região confinada do canal, com 5,70m de comprimento e terminando exatamente no início da região não confinada do canal ; b) declividades da calha parabólica: nos primeiros 4,20m iniciais do canal com $7,60^\circ$, nos próximos 2,80m do canal com $2,45^\circ$ e na região não confinada no canal, uma declividade plana (0°).

Para a preparação da mistura dos materiais, foi utilizado um reservatório de alimentação, o qual está colocado a uma altura de 3,20m do chão, sendo sustentado por um pórtico de aço, com um volume total de 1750l. Dentro deste reservatório foi instalado um agitador eletromecânico, com hélice, para homogeneizar a mistura do fluido mais denso. A velocidade do motor do agitador pode ser controlada através de um conversor de frequência, instalado abaixo do reservatório.

Quanto à instalação hidráulica do reservatório de alimentação, ela se caracteriza por uma entrada de 50mm derivada da canalização de abastecimento do pavilhão fluvial e por uma saída de 50mm junto ao fundo do reservatório que leva o material até o medidor eletromagnético de vazão (20mm), responsável pelo controle de material injetado no canal. Uma tubulação flexível foi instalada do medidor de vazão até a entrada de material no canal tridimensional de geometria simplificada.



Figura 4.2: Canal tridimensional de geometria simplificada

4.3 EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTAÇÃO

4.3.1 Filmadoras digitais

O registro dos ensaios, tanto no canal de pequeno porte quanto no canal tridimensional, foi realizado com duas filmadoras digitais SONY, modelos DCR-TRV110

(Figura 4.3a) e DCR-TRV120 (Figura 4.3b), cujas principais características técnicas estão descritas na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Especificações das câmeras digitais

| Modelo | DCR-TRV110 | DCR-TRV120 |
|------------------------|--------------------------------|------------|
| Sistema da gravação | Digital 8 mm | |
| Resolução horizontal | 500 linhas (240 sistema VHS-C) | |
| Zoom Ótico | 25 x | |
| Taxa de Transferência | 29.97 quadros/segundo | |
| Zoom Digital | 360 x | 450 x |
| Conexão com Computador | Entrada "Fire Wire" | |

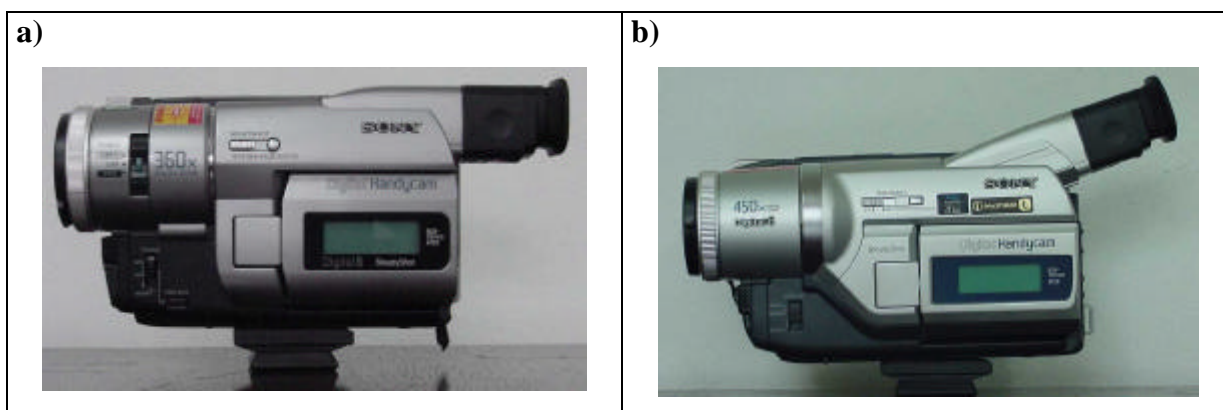


Figura 4.3: a) Filmadora modelo DCR-TRV110 e; b) Filmadora modelo DCR-TRV120

4.3.2 Microcomputador iMAC

Para a análise e tratamento de imagens e filmes adquiridas com a utilização das filmadoras digitais, foi utilizado um microcomputador com características especiais para esta função, o iMAC "Special Edition" (Figura 4.4). Esse computador possui portas "fire wire" para filmadoras digitais com taxa de transferência de 100 Mbps, que possibilita transferências de filmes em formato digital, em tempo real, sem perda de qualidade. As principais características deste micro são:

- Processador Power PC G3 de 400MHz;
- 128 Mbytes de RAM com 512 Kbytes backside cache;
- Disco rígido de 13 Gbytes ultra ATA;
- DVD-Rom drive 4X;
- Porta ethernet 10/100;

- 2 portas USB de 12 Mbps;
- 2 portas FireWire;
- Gravador de CD.



Figura 4.4: Computador iMAC

4.3.3 Peneirador Tyson de intensidade variável

Na preparação do material para ensaio, mais precisamente, no peneiramento de grandes quantidades de material, foi utilizado um peneirador automático de intensidade variável (Figura 4.5). Funcionando com um motor de 8 pólos/1CV, comandado por um conversor de frequência, permite ajustar a intensidade de vibração do equipamento, tornando-o mais adequado aos materiais utilizados e as granulometrias desejadas, aumentando a eficiência do peneiramento.

Neste peneirador, pode-se colocar três peneiras sobrepostas com as seguintes dimensões cada: 2,00m x 0,6m x 0,15m. Além disso, ele foi instalado a 90cm do chão permitindo que o material passante pela última peneira seja recolhido. Neste trabalho as peneiras utilizadas foram confeccionadas com as seguintes dimensões: 1,0m x 0,6m x 0,15m.



Figura 4.5: Peneirador Tyson de intensidade variável

4.3.4 Agitador eletromecânico e medidor de vazão eletromagnético

Para a homogeneização do material da corrente empregou-se um agitador eletromecânico (Figura 4.6a). Esse se caracteriza por possuir uma hélice com quatro pás, ligada a um motor elétrico. A velocidade do motor do agitador e, por conseguinte, a rotação da hélice, era controlada através de um conversor de frequência, que permite ajustar a velocidade conforme a necessidade.

Para medir a vazão e o volume de mistura introduzida utilizou-se um medidor de fluxo eletromagnético, que utiliza a Lei de Faraday para efetuar as leituras (Figura 4.6b).

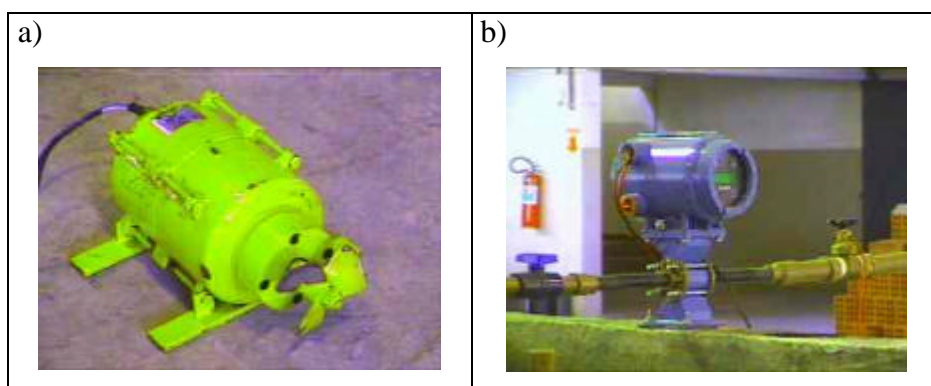


Figura 4.6: a) Agitador eletromecânico e; b) Medidor eletromagnético de vazão.

4.3.5 Medidor de distância a laser Opto MD250 ADV

Para fazer o levantamento da superfície resultante do depósito gerado pelo material durante os ensaios no canal de alvenaria foi utilizado um medidor de distância à laser, acoplado a um sistema de movimentação.

O equipamento MD250 ADV é um medidor de distância à laser de alta precisão (Figura 4.7a), destinado à avaliação de distâncias, dimensões, posicionamento relativo e comparação de cotas, realizando uma medida dinâmica, pontual ou contínua, sem contato físico entre o medidor e o objeto alvo, significando portanto maior precisão, durabilidade e rapidez.

O MD250 ADV é composto de uma cabeça medidora com seu respectivo cabo de ligação e do sistema eletrônico onde é realizado o processamento. A cabeça medidora MD250 (Figura 4.7b) é composta por um diodo laser com colimador, por uma lente captadora e um

sensor de imagem O princípio de funcionamento é o triangulação óptica por laser onde um feixe de laser gera um ponto luminoso sobre a superfície sendo medida. Este ponto é captado pela lente e esta projeta uma imagem sobre o sensor. O sensor de imagem fornece a posição aparente transmitindo-a para o Sistema Processador do Módulo Eletrônico. Este, a partir daí, calcula a posição real. As demais características do equipamento são as seguintes:

- campo de medição de 10cm a 35cm;
- medidas em milímetros (mm) ou em polegadas (in);
- precisão de 0,1mm ou 0,01 polegadas e;
- velocidade de leitura de 100 medidas/seg.

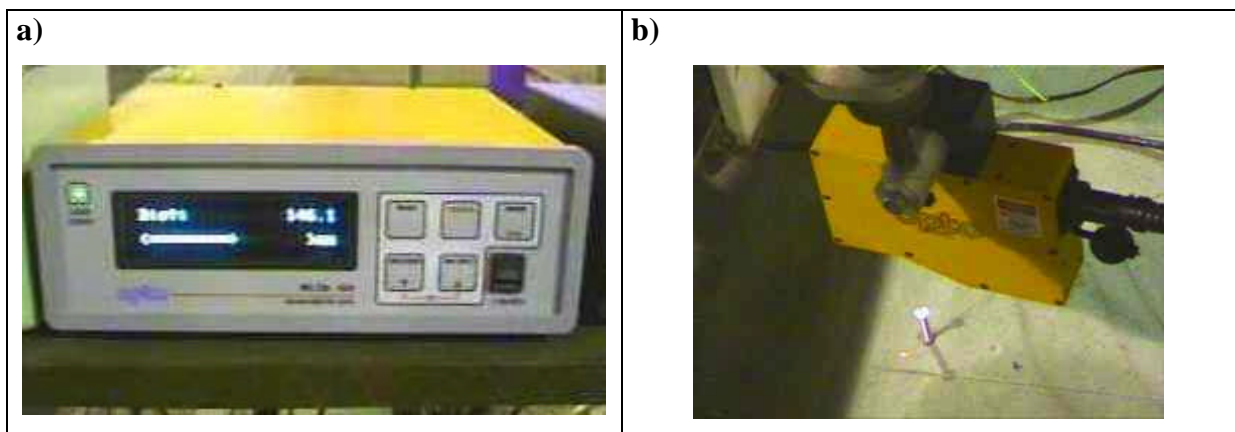


Figura 4.7: a) Distanciômetro a laser opto e; b) Cabeça medidora md250.

4.3.6 Mesa de coordenadas automatizada

Para permitir o deslocamento contínuo, preciso e de forma repetitiva da instrumentação, principalmente do Medidor de Distância a Laser, foi utilizada uma Mesa de Coordenadas Automatizada (Figura 4.8a) desenvolvida no laboratório.

Na construção da estrutura da mesa foram utilizados madeira e alumínio. A suavidade do movimento é garantida por dois suportes de ferro, com rolamentos, que deslizam sobre os trilhos de madeira. A tração é feita através de eixos sem-fim, diretamente conectados à motores de corrente contínua com redutores de velocidade.

Para controlar o sistema e fazer a aquisição das informações dos sensores e/ou equipamentos conectados a ela, foi utilizado uma placa digital microprocessada com entradas e saídas analógicas e digitais. Esta placa comanda o movimento, através dos motores, e monitora as posições finais e críticas do equipamento.

A operação pode ser programada para funcionar de forma contínua ou discreta, através do display e do teclado, que podem ser vistos na figura 4.8b. Deve-se programar, além do

modo de operação, o número de linhas e colunas da varredura (passo de tempo), além do tempo de estabilização dos sensores, se houver.

No modo contínuo, a varredura começa na posição inicial, indicada por um sensor e vai até a última coluna, sem interrupções. Já no modo discreto, entre uma coluna e outra há uma interrupção com a duração definida pelo tempo de estabilização programado.

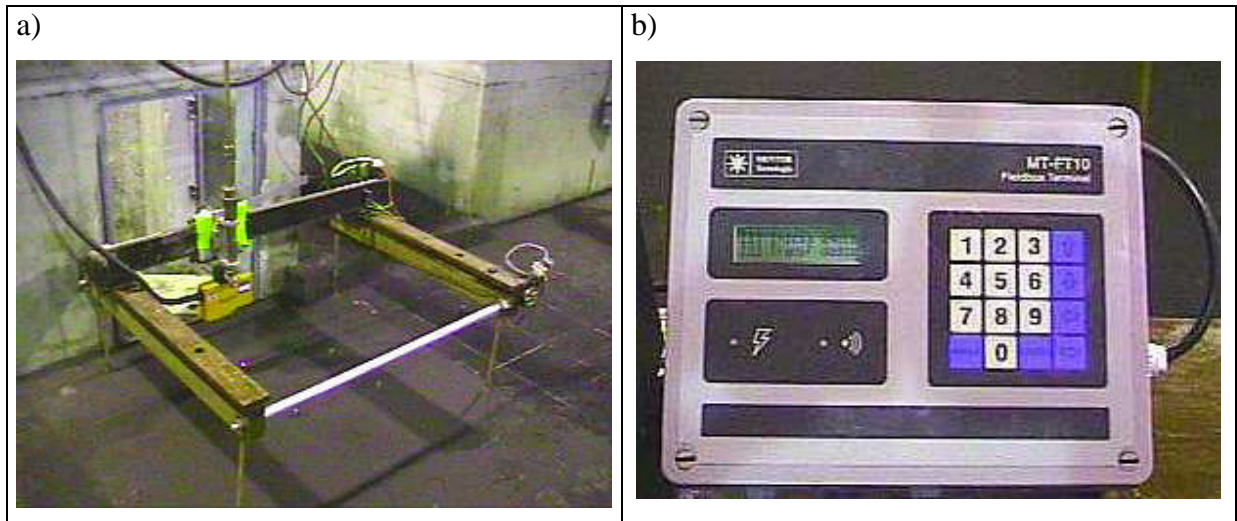


Figura 4.8: a) Mesa de Coordenadas Automatizada e; b) Display de operação da mesa.

4.4 PRÉ - SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS GRANULARES

Como um dos objetivos do estudo é a escolha de materiais granulares para uso em simulação de correntes de densidades não conservativas, a primeira atividade realizada foi separar os materiais possíveis de uso. Foram selecionados alguns dos materiais pré-qualificados e com estes estabelecida uma metodologia para uma seleção final e caracterização de diferentes materiais granulares.

4.4.1 Pré-qualificação dos materiais

Nesta primeira parte da implantação da metodologia para a escolha de materiais foram pré-selecionados diversos materiais granulares para serem testados na simulação de correntes de densidade não conservativas. Esta pré-qualificação foi baseada nos estudos encontrados na literatura, referidos na tabela 3.3, além da proposição da utilização de outros materiais, entre eles:

- Quatro tipos de Carvão Mineral:
Carvão Mineral Cardiff 205;

Carvão Mineral Cardiff 207;
Carvão Mineral Cardiff 210;
Carvão Mineral Antracitoso.

- Areia Quartzosa
- Dois tipos de Calcário Dolomítico:
 - Calcário Dolomítico tipo B;
 - Calcário Dolomítico tipo C;
- Material Sintético (Poliestireno);
- Pó de Brita de Granito.

Uma primeira seleção destes materiais se baseou nos seguintes critérios: características físicas de cada material (como a massa específica, forma e tamanho dos grãos), disponibilidade comercial do material e fator econômico.

Com base, na análise citada acima, ficou determinado que o material sintético (Poliestireno), o pó de brita de granito e o carvão mineral antracitoso não iriam ser utilizados. O primeiro devido ao seu alto custo em relação aos demais; o segundo, devido ao tamanho de seus grãos, que apesar de serem previamente triturado na pedreira, era da ordem do “cascalho”, o que inviabilizaria seu uso sem um processo complementar de trituração e o terceiro, devido à distribuição granulométrica uniforme, ou seja, predominando um tamanho de grão apenas (~0.7mm). Sendo assim foram testados o carvão mineral, o calcário dolomítico e a areia quartosa.

Três amostras de carvão mineral do tipo Cardiff foram obtidas junto a empresa Rio Deserto S.A, de Criciúma/SC. Esse tipo de carvão é utilizado comercialmente no processo de filtração da água usada para abastecimento. Os três tipos de carvão analisados serão assim denominados, deste ponto em diante, no texto:

- Carvão Mineral Cardiff 205 – Carvão 205;
- Carvão Mineral Cardiff 207 – Carvão 207;
- Carvão Mineral Cardiff 210 – Carvão 210.

Dois tipos de Calcário Dolomítico foram avaliados nos ensaios, os quais são provenientes da região de Caçapava do Sul, no Rio Grande do Sul. A diferença entre eles está na composição química e na distribuição granulométrica. Estes calcários são utilizados comercialmente na agricultura, para a correção do pH do solo. Estes calcários serão assim denominados:

- Calcário Dolomítico Tipo B – Calcário B;
- Calcário Dolomítico Tipo C – Calcário C.

A areia quartzosa utilizada pré-selecionada, se encontrava nas dependências do Pavilhão de Hidráulica Aplicada do IPH. Sua origem é fluvial e, comercialmente, é utilizada na indústria da construção civil. A areia testada foi única, não tendo subdivisões e sua denominação será simplesmente areia.

4.4.2 Determinação das características do material

Os materiais foram caracterizados através da: massa específica, tamanho dos grãos e sua distribuição granulométrica, forma e velocidade de queda. Os processos de determinação dessas características serão descritos a seguir.

4.4.2.1 Massa específica.

A massa específica dos materiais foi determinada no laboratório de sedimentometria do IPH, através dos ensaios de picnômetro. Para cada material, foram realizados, no mínimo duas repetições, sendo o seu valor final obtido pela média aritmética simples dos valores medidos, quando a variabilidade era pequena. Para o carvão 205 e 210, devido a problemas operacionais, foram utilizadas as informações do fabricante. A tabela 4.2 mostra os valores encontrados para cada material.

Tabela 4.2: Massa específica de cada material

| Material | Massa Específica (kg/m ³) |
|------------|---------------------------------------|
| Carvão 205 | 1190 |
| Carvão 207 | 1365 |
| Carvão 210 | 1220 |
| Calcário B | 2793 |
| Calcário C | 2832 |
| Areia | 2601 |

4.4.2.2 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica dos materiais foi determinada através de peneiramento a seco. Uma amostra do material era coletada aleatoriamente, e, após a secagem em estufa, era peneirada em série de peneiras apresentada na tabela 4.3.

Os resultados das amostragens podem ser visualizados através das curvas granulométricas dos materiais (Figura 4.9).

Tabela 4.3: Série de peneiras utilizadas na determinação da curva granulométrica

| Peneira N° | Abertura em mm |
|------------|----------------|
| 18 | 1,000 |
| 25 | 0,710 |
| 35 | 0,500 |
| 45 | 0,354 |
| 60 | 0,250 |
| 80 | 0,177 |
| 120 | 0,125 |
| 180 | 0,088 |
| 230 | 0,063 |
| Fundo | <0,063 |

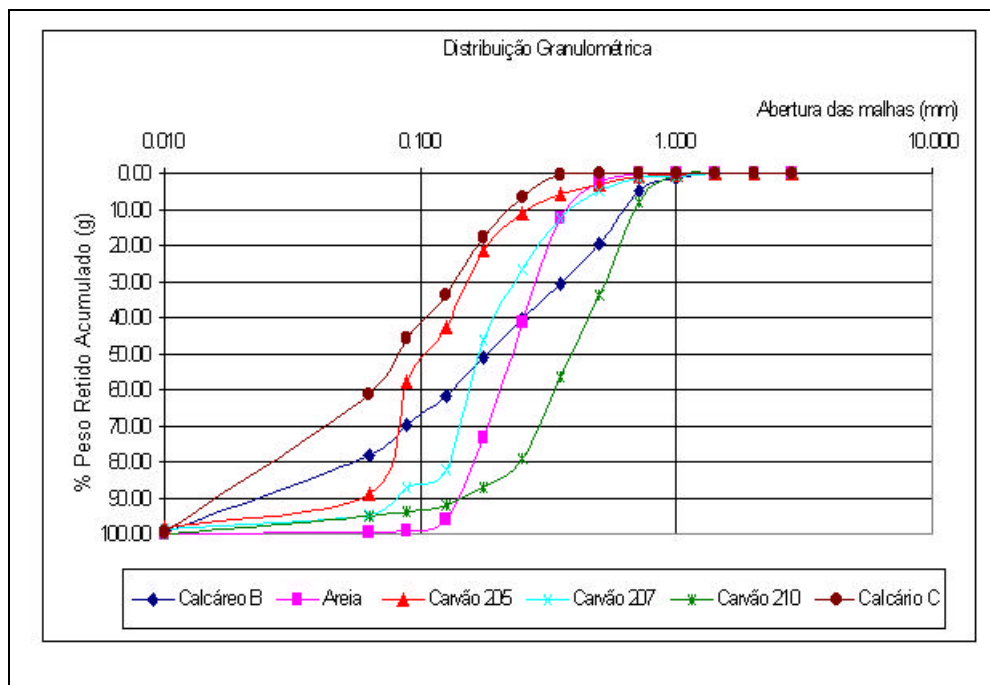


Figura 4.9: Distribuição granulométrica dos materiais selecionados.

A Tabela 4.4 mostra os diâmetros característicos D_{35} , D_{50} e D_{65} da distribuição dos grãos e a correspondente classificação do material, adotando a classificação da AGU - American Geologist Union. Na classificação realizada, procura-se associar aos diâmetros

característicos dos diferentes materiais uma classe granulométrica própria dos sedimentos naturais.

Tabela 4.4: Escala de classificação de material

| Material | D ₃₅ (mm) | D ₅₀ (mm) | D ₆₅ (mm) | Classificação AGU |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| Carvão 205 | 0,130 | 0,090 | 0,074 | Areia Muito Fina |
| Carvão 207 | 0,177 | 0,150 | 0,125 | Areia Fina |
| Carvão 210 | 0,500 | 0,350 | 0,300 | Areia Média |
| Calcário B | 0,300 | 0,177 | 0,125 | Areia Fina |
| Calcário C | 0,125 | 0,200 | 0,177 | Areia Muito Fina |
| Areia | 0,300 | 0,200 | 0,177 | Areia Fina |

4.4.2.3 Forma.

A determinação da forma dos materiais também foi realizada no Laboratório de Sedimentometria do IPH. Uma amostra de material era colocada em lupa (80x) e os formatos dos grãos comparados a uma tabela padrão, utilizada para tal classificação. Essa tabela classificava o sedimento da seguinte maneira: angular, semi-angular, semi-arredondado, arredondado e redondo (G. Muller, 1964). A tabela 4.5 resume os resultados encontrados.

Tabela 4.5: Forma dos materiais selecionados.

| Material | Forma dos materiais |
|------------|---------------------------------|
| Carvão 205 | Semi angular e semi arredondado |
| Carvão 207 | Angular e semi angular |
| Carvão 210 | Angular e semi angular |
| Calcário B | Arredondado a redondo |
| Calcário C | Angular e semi angular |
| Areia | Angular e semi angular |

4.4.2.4 Velocidade de queda

A velocidade de queda dos materiais foi determinada analiticamente através da equação de Rubey, empregada para sedimentos em transporte por escoamentos canalizados. A equação de Rubey é a seguinte:

$$\omega = f \sqrt{gd(\beta - 1)} \quad (4.1)$$

$$\text{Sendo: } f = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{gd^3(\beta - 1)}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{gd^3(\beta - 1)}} \quad \text{e} \quad b = \frac{r_m}{r_w} \quad (4.2)$$

onde: w = Velocidade de queda (m/s); g = Aceleração da gravidade (m/s²); d = Diâmetro do grão (m); ν = Viscosidade cinemática (m²/s); ρ_m = Massa específica do material (kg/m³); ρ_w = Massa específica da água (kg/m³).

A figura 4.10 apresenta o resultado da aplicação da equação de Rubey aos materiais selecionados, fazendo-se variar os diâmetros e fixando a massa específica e a viscosidade cinemática do fluido a 20°C.

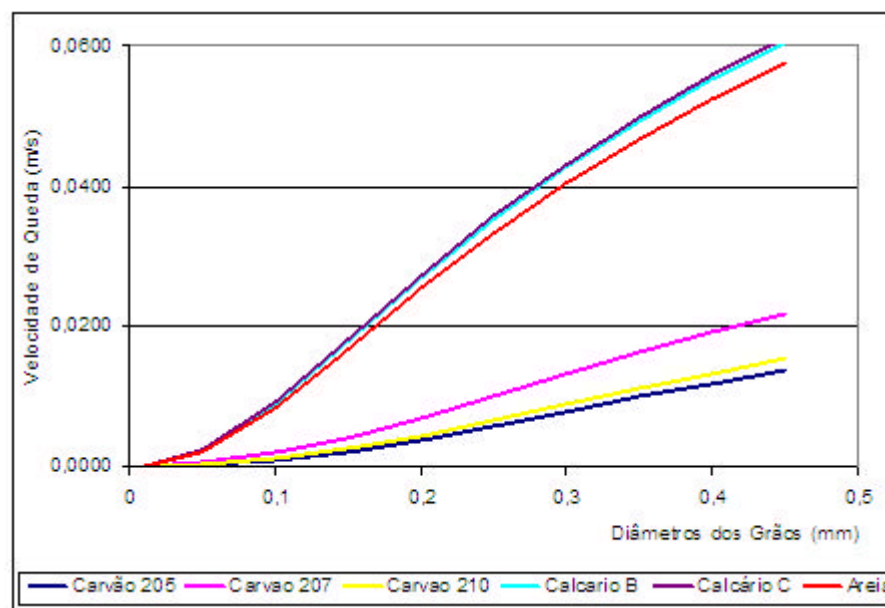


Figura 4.10: Velocidade de queda das partículas

4.4.3 Materiais pré-selecionados

A tabela 4.6 apresenta um resumo das características dos materiais estudados. Nos campos da distribuição granulométrica e da velocidade de queda foram inseridos valores médios, sendo que o primeiro corresponde a faixa dos grãos predominante na distribuição e o segundo a velocidade de queda calculada pela equação 4.1 aplicada ao “D₅₀” da distribuição granulométrica.

Tabela 4.6: Resumo das principais características dos materiais ensaiados.

| Material | Massa Específica (kg/m ³) | Faixa Granulométrica Predominante (mm) | Velocidade de Queda D ₅₀ (m/s) | Forma |
|------------|--|---|--|---------------------------------|
| Carvão 205 | 1190,00 | 0,177 a 0,063 | 0,0010 | semi angular e semi arredondada |
| Carvão 207 | 1365,00 | 0,250 a 0,125 | 0,0042 | Angular e semi angular |
| Calcário B | 2793,90 | 0,500 a <0,063 | 0,0179 | Arredondado a redonda |
| Calcário C | 2832,20 | 0,125 a <0,063 | 0,0093 | Angular e semi angular |
| Areia | 2600,00 | 0,250 a 0,125 | 0,0253 | Angular e semi angular |

A partir da implantação da metodologia espera-se definir, para cada material, quais as faixas granulométricas adequadas para simular as correntes de densidade não conservativas e seus depósitos.

4.5 ENSAIOS REALIZADOS

Conforme descrito no item 4.1, o trabalho foi dividido em três fases. Sendo assim, para cada fase foi desenvolvido um plano de ensaios, onde foram realizados as simulações de correntes de densidade não conservativas.

4.5.1 Ensaios da primeira fase: implantação da metodologia e escolha de materiais

4.5.1.1 Plano de ensaios

Na primeira fase do trabalho foram realizadas uma série de ensaios para implementar as metodologias de ensaios e outra para avaliar e escolher o material granular mais adequado (e suas respectivas faixas granulométricas) para uso na simulação de correntes de densidade não conservativas

Assim, num primeiro momento, procurou-se testar todas as singularidades apresentadas nas instalações (influência da comporta a jusante da entrada de material e a influência dos registros que controlam a entrada de material), bem como corrigir os erros

apresentados no decorrer deste processo. Foi tomado o trabalho de Bursik (2000) como referência para a metodologia a ser seguida devido à semelhança das instalações físicas. Neste trabalho, o suprimento contínuo de material era admitido indiretamente no canal de ensaios, passando por um compartimento onde o nível de material que entrava era controlado por uma comporta aberta a poucos centímetros do fundo.

Num segundo momento, foram avaliados os materiais granulares utilizados nos ensaios de correntes de densidade não conservativas. Esta avaliação deu seqüência à pré-seleção e caracterização dos materiais. Após esta pré-seleção foi estabelecido, para cada material, um plano de ensaios que visava tentar verificar quais deles eram capazes de formar as correntes, gerar seus depósitos e quais as faixas granulométricas que conseguiriam se desenvolver ao longo do comprimento do canal. Concomitantemente, estes ensaios serviriam para testar e aperfeiçoar a metodologia aplicada nos ensaios nas duas condições de admissão do material.

Na literatura, a maioria dos autores trabalha com granulometrias uniformes, onde um tamanho de grão predomina sobre os demais (Tabela 3.3). Nestes ensaios, optou-se por simulações com uma distribuição granulométrica mais extensa, ou seja, não tão uniforme, para determinar quais os limites de tamanho de grãos capazes de formar tais correntes, nas condições existentes. Desta forma, os materiais poderiam ser melhores aproveitados e os resultados seriam mais significativos.

Dos sete materiais pré-selecionados, foram ensaiados apenas três: o carvão 207, o calcário B e a areia. Os ensaios com carvão mineral foram realizados utilizando a distribuição granulométrica da amostra bruta. Já para o calcário B e a areia foram utilizadas curvas granulométricas artificiais ou controladas, isto é, um material composto por diâmetro escolhido, retirados da amostra bruta. Desta maneira pretendia-se estipular quais as faixas granulométricas que realmente conseguiriam atingir as regiões mais distais do canal. As características dos materiais empregados nos ensaios podem ser visualizadas na tabela 4.7.

Tabela 4.7: Materiais e distribuição granulométrica utilizados nos ensaios por fluxo contínuo.

| Material | Diâmetro do grão ensaiado (mm) | Distribuição granulométrica. |
|------------|--------------------------------|------------------------------|
| Carvão 207 | Extensa (1,00 a 0,053) | Amostra bruta |
| Areia | Extensa (0,500 a <0,063) | Artificial |
| Calcário B | Extensa (0,250 a <0,063) | Artificial |

Nesta etapa, não foram realizados ensaios com calcário tipo C devido a semelhança com o calcário tipo B e, como a granulometria foi controlada, o resultado pode ser garantido

para os dois tipos de material, apesar da pequena diferença de densidade entre eles. Optou-se pela utilização do carvão 207 para os ensaios de análise de material depositado, pois este tipo de carvão possui uma faixa granulométrica mais extensa, assim os resultados obtidos deste tipo, podem ser utilizados também com o carvão tipo 205. Não foram realizados ensaios com o carvão 210, pois no momento dos ensaios, não havia material suficiente para a sua realização.

Devido à falta de condições de separar o material mais fino da areia, não foi possível realizar mais ensaios com a areia. A obtenção da fração de material mais fino ($<0,088\text{mm}$) era muito difícil pois, analisando a curva granulométrica bruta da areia, nota-se que a fração correspondente a estes valores representa menos que 5% do total. Neste caso, para conseguirmos peneirar manualmente a quantidade de material necessária para o ensaio, despenderia muito tempo, explicando assim a não realização de mais ensaios.

4.5.1.2 Metodologia aplicada.

A metodologia dos ensaios por fluxo contínuo de material foi desenvolvida nesta primeira fase do estudo. Para tanto, foi adotado o plano de ensaios descrito anteriormente. Neste plano de ensaios estava previsto a realização de testes para verificar as instalações e suas peculiaridades, além de implementar a metodologia propriamente dita.

O procedimento adotado para cada simulação de correntes de densidade não conservativas por fluxo contínuo de material pode ser dividido em três partes: preparação de material, preparação das instalações e ensaios propriamente dito, as quais se encontram descritos no que segue.

O fluxograma simplificado das atividades necessárias para a execução dos ensaios com fluxo contínuo é apresentado na figura 4.11.

O procedimento completo de ensaios começava com a preparação do material. Nesta etapa uma amostra de água era colocada numa proveta onde a temperatura da água era medida com o auxílio de um termômetro graduado de 0°C a 50°C e a massa específica era medida com a utilização de um densímetro com uma graduação de 950kg/m^3 até 1050kg/m^3 . O material selecionado para o ensaio era pesado através de balança e a quantidade de água era medida com a utilização de proveta graduada de 1 litro.

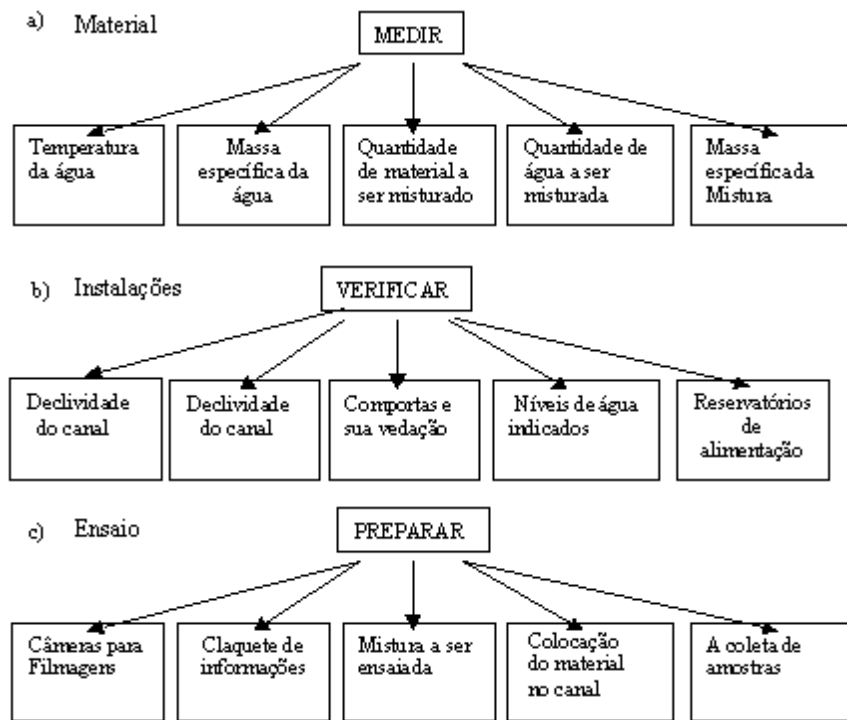


Figura 4.11: Fluxograma do procedimento de ensaios em fluxo contínuo-Primeira fase

Num primeiro momento, a massa específica da mistura era medida utilizando o densímetro com graduação de 950kg/m^3 até 1050kg/m^3 . O material misturado era agitado dentro de um copo de Beaker e uma amostra era colocada numa proveta graduada. Após a colocação da mistura na proveta, essa era novamente agitada e então era colocado o densímetro para ser realizada a leitura. Como, já nos primeiros ensaios, este procedimento não se mostrou satisfatório, utilizou-se o cálculo da massa específica da mistura através da seguinte fórmula:

$$\mathbf{r}_f = \mathbf{r}_w + (\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_w) \cdot C_v \quad (4.3)$$

Onde:

ρ_f = massa específica da mistura (kg/m^3)

ρ_w = massa específica da água (kg/m^3)

ρ_m = massa específica do material (kg/m^3)

C_v = concentração volumétrica

Na etapa de preparo das instalações eram verificadas a declividade do canal (no caso em estudo, 0°), com a utilização de um nível de bolha, colocado ao longo do comprimento do canal. A seguir, era verificada a localização e a abertura do septo direcionador que ficava logo a jusante da entrada de material, bem como os registros de entrada de material e de saída de água do canal. Com relação a esses, o primeiro era ajustado conforme a necessidade e o

segundo, ficava completamente fechado até o fim do ensaio. A próxima verificação era a do nível de água do canal, ou seja, se a água do canal estava com 12cm de altura.

A última verificação, com relação ao preparo das instalações físicas para o ensaio, era dos reservatórios de alimentação, os quais deveriam estar limpos para que não existissem resíduos de materiais anteriores ou qualquer outro tipo de impurezas que pudessem prejudicar os ensaios.

A evolução dos ensaios a partir do ganho de conhecimento da manipulação das instalação encontram-se relatada no que segue.

A primeira alternativa de mistura adotada para o ensaio de fluxo contínuo foi colocar a mistura diretamente no reservatório de alimentação (Figura 4.12b). O registro de saída do material ficava fechado até a hora do ensaio. A mistura, então, era agitada e o registro era aberto para que o material entrasse no canal e o ensaio se desenvolvesse. Este procedimento não apresentou bons resultados, pois o material mais pesado entrava para dentro da região mais afilada do funil (15cm de comprimento com $\phi = 2,5\text{cm}$), entupindo-a e impedindo a passagem de água. Nesta região, por ser muito estreita, não se conseguia colocar um instrumento para retirar o material acumulado e permitir a passagem de água.

A segunda alternativa proposta, imaginada como a solução para o problema verificado anteriormente, foi colocar um tampão na entrada do bocal do funil com diâmetro de $\phi = 2,5\text{cm}$ (Figura 4.12c). Assim, era evitado que o material se depositasse dentro da região mais estreita do canal. Imaginava-se também que, com uma agitação eficiente, no momento que retirávamos este tampão, os materiais sólidos, juntamente com água, entrariam na zona estreita evitando o entupimento.

Alguns ensaios foram realizados com esta configuração e verificou-se que para misturas que utilizaram grande quantidade de material ($>700\text{g}$) e com grãos com diâmetros maiores que 0,350mm, os resultados foram insatisfatórios após a retirada do tampão. Posteriormente, verificou-se que, para misturas com granulometrias com os grãos menores que 0.350mm e com pouco material ($<700\text{g}$) que esta alternativa era eficiente.

A terceira alternativa de mistura para o ensaio de fluxo contínuo de material surgiu como alternativa ao segundo método. Este método diferencia-se do anterior pela elevação da região mais estreita do funil (Figura 4.12d). Anteriormente o tampão ficava na entrada do bocal do reservatório de alimentação fixando-se na mangueira que fazia a ligação da zona estreita do funil com o registro. Nesta tentativa, a mangueira foi colocada a 5 cm acima da boca do funil, criando um pequeno volume morto entre a entrada de água e a boca do funil. Com uma agitação eficiente, o material que ficava abaixo da zona de entrada, poderia ser

suspensão e entrar na mangueira perfeitamente. Esta alternativa se mostrou adequada para a simulação por fluxo contínuo, porém uma agitação eficiente deveria ser realizada.

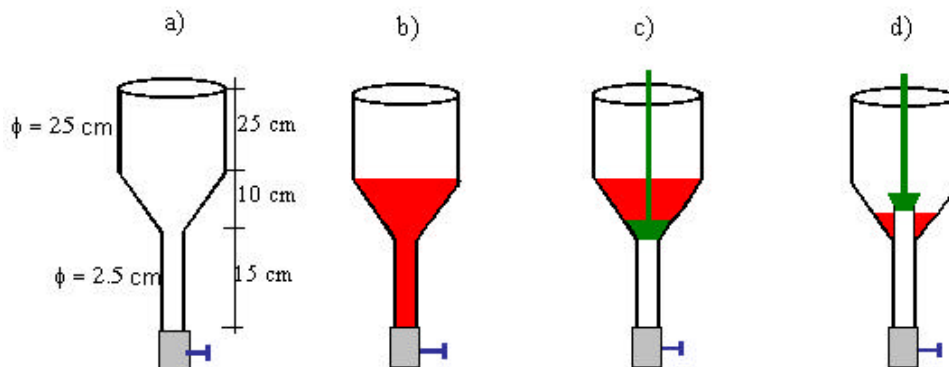


Figura 4.12: Alternativas para injeção do material do reservatório de alimentação: a) dimensões do reservatório; b) primeira alternativa; c) segunda alternativa e; d) terceira alternativa.

Verificou-se, também, outros detalhes operacionais da instalação experimental, que são: a influência do septo direcionador a jusante da entrada de material e a influência dos registros que controlam a entrada de material.

Com base no trabalho de Bursik e Woods, (2000) foram testadas quatro possibilidades de abertura deste septo direcionador:

- abertura do septo a 1 cm do fundo;
- abertura do septo de 2 cm;
- abertura do septo de 3 cm;
- sem a presença do septo.

Excetuando a primeira alternativa, os resultados obtidos foram muito parecidos. A presença do septo cria um pequeno ressalto hidráulico junto à saída de material, mas impede que o material fique acumulado nesta região. Sem sua presença, a corrente deposita os grãos maiores junto ao difusor, entretanto pouco prejudica sua evolução ao longo do canal. Como os ensaios não apresentaram diferenças significativas, foi adotada, para todos os ensaios desta fase, o posicionamento da comporta a 2cm do fundo do canal.

O último aspecto da instalação física verificado visando a padronização dos ensaios, foi a influência do registro que controlam a entrada de material no canal sobre o fluxo.

Para a carga disponibilizada pelo funil, testou-se diversas aberturas do registro de controle, resultando para a disposição geométrica do reservatório de alimentação, uma abertura ideal de 45°.

Para o ensaio colocava-se a vídeo câmera digital para a filmagem do ensaio sobre um apoio a dois metros do canal. Eram registradas as características dos ensaios na própria fita da câmera.

O material a ser colocado no reservatório de alimentação era preparado num copo de Beaker de 5 litros, juntamente com a água necessária. Este material era agitado e deixado parado para verificar a existência de alguma impureza ou material mais fino (sobrenadante) a ser retirada antes do ensaio. Após esta constatação o material estava pronto para ensaio. Quando necessário, algumas gotas de corante, a base PVA, eram utilizadas para dar contraste na mistura.

Após o desenvolvimento da corrente, o canal começava a ser esvaziado lentamente para não prejudicar ou influenciar o material que estava se depositando. O registro de saída era levemente aberto para deixar fluir apenas um pequeno filete de água saísse, permitindo, que o nível da água baixasse lentamente sem perturbar os resultados do ensaio.

No final, após a retirada da água às amostras eram coletadas e acondicionadas em recipientes para futura análise granulométrica. Estas amostras eram coletadas em intervalos, ao longo do comprimento do canal, buscando avaliar o comportamento das partículas depositadas.

4.5.1.3 Metodologia para a avaliação dos resultados.

Na primeira fase de estudos, foi desenvolvida uma metodologia para a avaliação dos materiais granulares, que objetivaram estabelecer, para cada material, quais as faixas granulométricas mais adequadas para a simulação de correntes de densidades não conservativas, em laboratório. Essa metodologia utilizada foi estabelecida após análise qualitativa e quantitativa de uma série de ensaios, totalizando seis, e dos seus respectivos depósitos gerados.

A análise qualitativa dos ensaios era realizada através das imagens geradas pela vídeo-câmera digital. O ensaio realizado era filmado e, da análise das imagens eram avaliadas as características da corrente. Foi avaliada também, a influência das diferentes configurações experimentais (influência do registro, da comporta e o admissão de material) no desenvolvimento da corrente, ou seja, se o procedimento utilizado induziu/alterou alguma característica da corrente.

A análise quantitativa dos ensaios foi realizada através dos depósitos formados após a passagem da corrente. Estes depósitos eram amostrados em diferentes trechos ao longo do comprimento do canal. Devido à falta de experiência quanto ao procedimento, a coleta de amostras nos intervalos não seguiu um padrão comum a todos os ensaios.

Nos ensaios, a coleta de amostras de material foi dividida em quatro regiões: na primeira, o material que ficou armazenado no volume morto do reservatório de alimentação era todo coletado; na segunda região, uma amostra do material depositado era coletada entre 0 e 50cm do canal; na terceira, era recolhida uma amostra de material entre 50 e 150cm; e na última região, uma amostra do material depositado entre 150 e 275cm. No ensaio para a areia, os intervalos de coleta foram 0-75cm; 75-175cm; e 175-275cm.

O material coletado no volume morto do reservatório de alimentação era pesado e sua granulometria analisada. Assim, seu peso era descontado, por faixas granulométricas, da mistura inicial, determinando-se, realmente, a quantidade de material que ingressou no canal. As outras amostras, com seus intervalos definidos, servem para determinar quais os tamanhos de grãos que percorrem as maiores distâncias, além da distribuição granulométrica dos sedimentos nestas regiões. Após os ensaios, as amostras de material eram coletadas, classificadas e encaminhadas para o laboratório de sedimentometria do IPH onde era realizada a análise granulométrica.

4.5.1.4 Características dos ensaios realizados

Para cumprir o plano de ensaios, foram realizados, no total, dezoito ensaios, sendo doze para a implementação da metodologia e seis para testar os materiais. Estes ensaios estão resumidos na tabela 4.8. A primeira apresenta as características iniciais dos ensaios, com as informações sobre os materiais utilizados e suas características. A segunda, apresenta os objetivos, métodos, amostragem e comentários sobre as condições de realização dos ensaios, visando mostrar o porquê de sua realização. A densidade da água foi medida com o densímetro e seu valor média foi de 0,997.

Tabela 4.8: Características dos ensaios por fluxo contínuo

| Ensaio | | Material | Granulometria | Densidade | | Mistura no reservatório | Concentração (%) |
|--------|--------------|------------|---------------|-----------|-------|-------------------------|------------------|
| | | | | Mat. | Mist. | | |
| 1 | Metodologias | Calcário B | Controlada | 2,79 | 1,016 | 2º Altern. | 9,18 |
| 2 | | Areia | Extensa | 2,60 | 1,016 | 2º Altern. | 1,28 |
| 3 | | Areia | Extensa | 2,60 | 1,016 | 2º Altern. | 1,28 |
| 4 | | Areia | Extensa | 2,60 | 1,024 | 2º Altern. | 1,76 |
| 5 | | Areia | Extensa | 2,60 | 1,024 | 3º Altern. | 1,76 |
| 6 | | Carvão 207 | Extensa | 1,36 | 1,019 | 3º Altern. | 6,41 |
| 7 | | Carvão 207 | Extensa | 1,36 | 1,019 | 3º Altern. | 6,41 |
| 8 | | Carvão 207 | Extensa | 1,36 | 1,019 | 3º Altern. | 6,41 |
| 9 | | Carvão 207 | Extensa | 1,36 | 1,019 | 3º Altern. | 6,41 |
| 10 | | Carvão 205 | Extensa | 1,19 | 1,010 | 3º Altern. | 7,35 |
| 11 | | Carvão 205 | Extensa | 1,19 | 1,010 | 3º Altern. | 7,35 |
| 12 | | Carvão 205 | Extensa | 1,19 | 1,010 | 3º Altern. | 7,35 |
| 13 | Materiais | Areia | Controlada | 2,60 | 1,060 | 3º Altern. | 4,01 |
| 14 | | Carvão 207 | Extensa | 1,36 | 1,018 | 3º Altern. | 6,04 |
| 15 | | Carvão 207 | Extensa | 1,36 | 1,018 | 3º Altern. | 6,04 |
| 16 | | Carvão 207 | Extensa | 1,36 | 1,018 | 3º Altern. | 6,04 |
| 17 | | Calcário B | Controlada | 2,79 | 1,038 | 3º Altern. | 2,38 |
| 18 | | Calcário B | Controlada | 2,79 | 1,038 | 3º Altern. | 2,38 |

Nos ensaios 1, 13, 17 e 18 foram utilizadas curvas granulométricas controladas, cujas distribuições podem ser vistas na tabela 4.9. Nos demais ensaios foram utilizadas as distribuições granulométricas extensas (Figura 4.9).

4.5.2 Ensaios da segunda fase: Padrão de deposição das correntes

4.5.2.1 Plano de ensaios

Para o estudo da segunda fase do trabalho, ou seja, do padrão de deposição das correntes de densidade não conservativas no canal de declividade variável de pequeno porte, foi definido um plano de ensaios para três tipos diferentes de material: o carvão 205, carvão 207 e o calcário C, efetuando-se sete grupos de ensaios. Para cada grupo de ensaios, foram realizadas três repetições, com exceção dos ensaios, 4 e 6 onde foram realizadas apenas duas

repetições. Assim, dezenove ensaios foram realizados no total. Este plano é apresentado na tabela 4.10

Tabela 4.9: Granulometria utilizadas nos ensaio por fluxo contínuo de material

| | Ensaio 1 | Ensaio 13 | Ensaio 17 | Ensaio 18 |
|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Malha (mm) | % de material | % de material | % de material | % de material |
| 0,707 | 10,30 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,500 | 9,78 | 9,66 | 0,00 | 0,00 |
| 0,354 | 10,02 | 9,76 | 0,00 | 0,00 |
| 0,250 | 10,28 | 9,76 | 12,50 | 12,50 |
| 0,177 | 9,81 | 9,72 | 12,50 | 12,50 |
| 0,125 | 19,68 | 20,62 | 25,00 | 25,00 |
| 0,088 | 10,29 | 15,07 | 25,00 | 25,00 |
| 0,063 | 19,84 | 13,09 | 25,00 | 25,00 |
| < 0,063 | 0,00 | 12,26 | 0,00 | 0,00 |

Nestes ensaios, buscou-se, além da determinação das características dinâmicas (velocidade, dimensões da corrente, etc.), avaliar o padrão de depósito formado pelas correntes.

Tabela 4.10: Características dos ensaios da segunda fase

| Grupo | Material | Granulometria do material (mm) | Massa Específica da mistura (kg/m ³) |
|-------|------------|--------------------------------|--|
| 1 | Carvão 207 | 0,297 - 0,125 | 1022 |
| 2 | Carvão 207 | 0,297 - 0,125 | 1010 |
| 3 | Carvão 205 | 0,125 - 0,053 | 1010 |
| 4 | Carvão 205 | 0,125 - 0,053 | 1022 |
| 5 | Carvão 205 | 0,297 - 0,125 | 1010 |
| 6 | Carvão 205 | 0,297 - 0,125 | 1022 |
| 7 | Calcário C | 0,125 - 0,053 | 1022 |

Como o processo de peneiramento mudou da primeira para a segunda fase, utilizando novas séries de peneiras, não foi possível reproduzir rigorosamente as granulometrias da

primeira fase. A tabela 4.11 mostra as alterações no diâmetro das peneiras utilizadas no estudo de correntes de densidade não conservativas.

Tabela 4.11: Séries de peneiras utilizadas na análise granulométrica e no peneirador mecânico

| Peneiras utilizadas na análise granulométrica (mm) | Peneiras utilizadas no Peneirador Tyson (mm) |
|--|--|
| 0,500 | - |
| 0,354 | 0,297 |
| 0,250 | 0,210 |
| 0,177 | 0,149 |
| 0,125 | 0,125 |
| 0,088 | 0,074 |
| 0,063 | 0,053 |
| Fundo | Fundo |

A granulometria dos materiais utilizados foi dividida em dois intervalos, um com grãos maiores (0,297mm – 0,125mm) e menores (0,125mm e 0,053mm) avaliando-se a influência desses diâmetros no comportamento (velocidade e aceleração) da corrente de densidade e nos depósitos por ela gerados.

Com relação à massa específica da mistura, foram escolhidas 1010kg/m³ e 1022kg/m³. Desse modo, pode-se realizar algumas comparações, entre os dois tipos de correntes de densidade. O volume de material injetado foi mantido constante.

Para o calcário C, foram realizados apenas ensaios com a massa específica de 1022kg/m³, pois, devido ao alto valor de sua massa específica (2832,3kg/m³), a quantidade de material necessária para a mistura é baixa. Caso fosse realizado algum ensaio com a massa específica da mistura, na ordem de 1010kg/m³ provavelmente não se formariam depósitos significativos ao longo do canal. A escolha do calcário C ao invés do calcário B, se deu pois sua distribuição granulométrica apresenta uma fração maior de grãos nas peneiras abaixo de 0,125 mm, facilitando a obtenção de finos do material.

Quanto ao peneiramento do material, para os grupos de ensaios 1, 2, 5 e 6 (Tabela 4.7), as peneiras utilizadas nos limites foram a 0,297mm e 0,125mm. Já para os grupos 3, 4 e 7 (Tabela 4.8), as peneiras que limitavam o tamanho dos grãos eram 0,125mm e 0,053mm.

As distribuições granulométricas realizadas destes materiais peneirados, carvão 205, carvão 205, carvão 207 e calcário C foram obtidas pela média aritméticas das três amostras

aleatórias coletadas após o peneiramento. Estas distribuições podem ser visualizadas na figura 4.13.

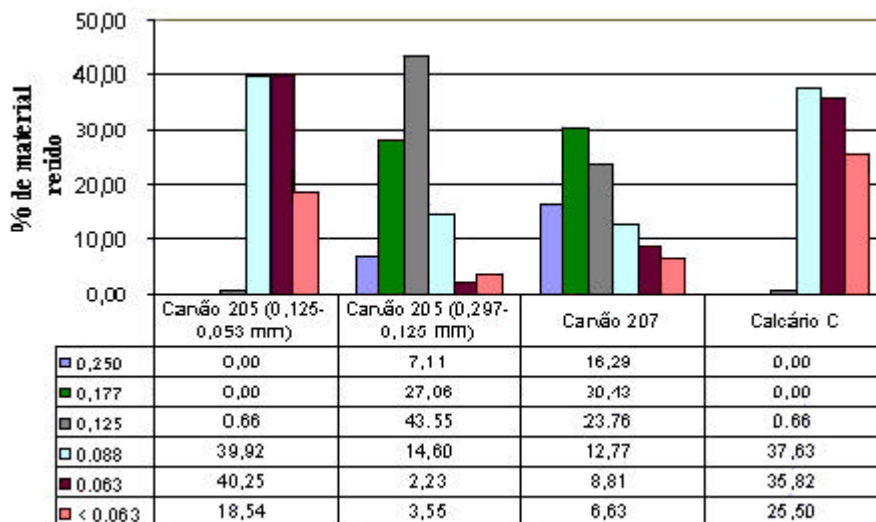


Figura 4.13: Distribuição granulométrica dos materiais utilizados nesta fase de ensaios.

4.5.2.2 Metodologia aplicada

Nesta etapa do trabalho, a metodologia implementada na primeira fase foi utilizada, exigindo, porém, as seguintes adaptações:

a) O material passou a ser peneirado com o peneirador Tyson de intensidade variável, conforme descrito no item 4.3.3. Para tanto, o material foi selecionado com duas peneiras entre dois limites de granulometria, um inferior e outro superior, variando-se este de caso a caso; a fração retida entre as peneiras era utilizada nos ensaios. Para a determinação da distribuição granulométrica do material resultante, procedia-se à análise granulométrica de três amostras do material.

b) os ensaios foram registrados com duas câmeras, uma acompanhando a cabeça da corrente e a outra acompanhando o corpo.

c) nos ensaios com o carvão, impurezas de granulometria muito fina não retiradas durante o peneiramento, acabam constituindo um sobrenadante na mistura água-carvão, devendo ser retiradas no processo de preparação de material. Este material era pesado e sua granulometria determinada para corrigir a curva granulométrica inicial.

d) os ensaios foram realizados utilizando a alternativa de mistura no reservatório de alimentação, com um tampão colocado no início da região mais afilada do canal. (Figura 4.12c)

e) o septo direcionador a jusante da entrada do material foi retirado.

4.5.2.3 Metodologia empregada para avaliação dos resultados

A metodologia para a avaliação dos resultados obtidos nas simulações de correntes de densidade não conservativas, nesta segunda fase, foi determinada a partir da análise quantitativa dos depósitos gerados e de técnicas de visualização e tratamento de imagens dos ensaios.

Na determinação das características dinâmicas do escoamento, como a velocidade, os ensaios foram registrados por duas video-câmeras digitais, uma acompanhava a frente da corrente e a outra acompanhava o seu corpo. Após os ensaios, os vídeos eram repassados para um microcomputador "iMAC" e, com o auxílio do aplicativo "Adobe Premiere 6.0", eram realizadas a aquisição de dados, para o cálculo da velocidade da corrente. Quando o ensaio iniciava, era anotado o tempo inicial do ensaio e, à medida que a corrente avançava e atingia as marcações preexistentes no canal (25 em 25cm), os valores (quadros por segundo) correspondentes eram medidos. No final, o tempo medido era convertido para segundos (fator de correção = 29,97 quadros por segundo) e a velocidade era calculada por intervalo de comprimento (25cm).

A coleta do material depositado foi realizada nos seguintes intervalos: 0-50cm; 50-100cm; 100-150cm; 150-200cm; e 200-250cm. Diferentemente da primeira fase, este procedimento foi padronizado para todos os ensaios, além disso, todo o volume depositado era coletado, ao invés de amostras, como feito anteriormente. A análise dos resultados foram feitas com base nos dados da pesagem de material, onde as quantidades depositadas em cada intervalo eram medidas e o resultado final extraído da média das duas repetições de cada grupo e da curva granulométrica, que para a distribuição dos grãos foi realizado um agrupamento nos resultados das análises granulométricas. Das seis faixas granulométricas analisadas, classificou-se o material segundo a metodologia da AGU - American Geologist Union, a qual pode ser visualizada na tabela 4.12.

Já a determinação das características geométricas da corrente de densidade não conservativas, representadas principalmente pela altura da cabeça e altura do corpo da corrente foi realizada utilizando as imagens geradas pelas câmeras digitais, as quais eram repassadas para um micro computador "iMAC" e com o auxílio do aplicativo "iMovie", eram extraídas imagens isoladas quadro-a-quadro.

Tabela 4.12: Classificação adotada do tipo de sedimento baseado no tamanho dos grãos

| Granulometria (mm) | Classificação AGU |
|--------------------|-------------------|
| 0.250 | Areia Fina |
| 0.177 | |
| 0.125 | |
| 0.088 | Areia Muito Fina |
| 0.062 | |
| <0,062 | Silte |

Desta maneira foram extraídas, em todos os ensaios, imagens dos ensaios discretizados a cada 25cm. Com estas imagens discretizadas foi utilizado um aplicativo de tratamento de imagens, encontrado gratuitamente na Internet, chamado "*Image Tool*". Este programa possui ferramentas capazes de realizar medidas nas imagens geradas, a partir de uma calibração prévia. A medida da altura da cabeça, considerando a altura no ponto onde havia a troca de gradiente de declividade, ou seja, no ponto mais alto da região frontal da corrente, também mediu-se a altura do corpo, porém discretizando-se as imagens cada 100cm, totalizando três imagens no total. Nestas três imagens, eram determinadas a altura do corpo a cada 25cm, indicando a evolução do corpo da corrente com o tempo. Os pontos medidos eram lançados numa planilha eletrônica, no próprio aplicativo, sendo posteriormente repassados a outros programas onde os valores eram graficados.

4.5.2.4 Características dos ensaios realizados

As características dos ensaios da segunda fase estão descritas na tabela 4.13. Em todos os ensaios densidade média da água foi de 0,997.

Tabela 4.13: Características dos ensaios de fluxo contínuo

| Grupo | Ensaio | Material | Características do material | | | Características da mistura | |
|-------|--------|------------|-----------------------------|-----------|------------|---------------------------------------|------------------|
| | | | Granulometria (mm) | Densidade | Volume (l) | Massa específica (kg/m ³) | Concentração (%) |
| 1 | 1FC1 | Carvão 207 | 0,297-0,125 | 1,36 | 4,19 | 1021,32 | 6,61 |
| | 1FC2 | | | | | 1021,35 | 6,62 |
| | 1FC3 | | | | | 1021,69 | 6,71 |
| 2 | 2FC1 | | | | 4,08 | 1009,72 | 3,46 |
| | 2FC2 | | | | | 1009,35 | 3,36 |
| | 2FC3 | | | | | 1009,61 | 3,43 |
| 3 | 3FC1 | Carvão 205 | 0,125-0,053 | 1,19 | 4,25 | 1012,12 | 7,83 |
| | 3FC2 | | | | 4,29 | 1012,50 | 8,03 |
| | 3FC3 | | | | 4,26 | 1012,16 | 7,86 |
| 4 | 4FC1 | | | | 4,50 | 1023,58 | 13,77 |
| | 4FC2 | | | | 4,49 | 1023,40 | 13,68 |
| 5 | 6FC1 | | | | Carvão 205 | 0,297-0,125 | 1,19 |
| | 6FC2 | 4,27 | 1012,13 | 7,84 | | | |
| | 6FC3 | 4,29 | 1012,64 | 8,10 | | | |
| 6 | 7FC1 | 4,50 | 1023,45 | 13,70 | | | |
| | 7FC2 | 4,48 | 1023,11 | 13,53 | | | |
| 7 | 5FC1 | Calcário C | 0,125-0,053 | 2,83 | | | |
| | 5FC2 | | | | | | |

Novamente, nota-se na tabela que os valores da massa específica da mistura oscilou em torno dos valores pretendidos (1010 kg/m³ e 1022kg/m³).

4.5.3 Ensaios da terceira fase: influência das condições iniciais.

4.5.3.1 Plano de ensaios

Para a terceira fase do trabalho propôs-se avaliar qual a influência das condições iniciais (vazão e volume de mistura), na evolução/formação dos depósitos. de ensaios tridimensionais de correntes de densidade não conservativas,

Conforme visto na literatura (item 3.5), tanto a vazão quanto o volume de mistura são variáveis cujo conhecimento é problemático, exigindo que os pesquisadores lancem mão da análise das características dos depósitos para estimá-las. Para discutir sua influência na evolução das correntes, estabeleceram-se três simulações: uma com uma vazão teoricamente baixa e um volume teoricamente baixo; a mesma vazão baixa com um volume 2,5 vezes superior ao primeiro e uma vazão alta (2,5 vezes superior a primeira) com um volume também alto (2,5 vezes superior ao primeiro). Desta maneira uma primeira aproximação de resultados pode ser estabelecida, mostrando qual o comportamento esperado, quando se altera tais variáveis. Para que possamos avaliar apenas a vazão e o volume da corrente, as outras variáveis envolvidas no processo foram mantidas constantes. Assim a concentração/massa específica da mistura e tamanho dos grãos foram mantidas constante, além da utilização de um mesmo material, que no caso foi o carvão 205.

Também nessa fase, o estudo buscou avaliar as características dinâmicas, geométricas e deposicionais destas correntes, com a avaliação das velocidades/acelerações e forma da frente, bem como da quantidade e qualidade do material depositado e relação entre eles.

4.5.3.2 Metodologia aplicada

A metodologia utilizada nos ensaios tridimensionais de geometria simplificada foi desenvolvida a partir da metodologia desenvolvida nas duas primeiras etapas do trabalho com algumas adaptações das instalações de grande porte.

O método experimental pode ser dividido em três fases distintas (Figura 4.14): a preparação do material; verificação das instalações e ensaios propriamente dito.

Para evitar impurezas e que o material mais fino ficasse junto com o material selecionado o processo de peneiramento dos materiais foi modificado. Foi realizado um duplo peneiramento do material, um primeiro visando isolar da amostra bruta as partículas mais grossas e as partículas muito finas que a faixa desejada utilizando duas peneiras (um limite superior e outro inferior) e após, o material previamente peneirado era separado em faixas granulométricas específicas.

Depois deste processo, o material selecionado era lavado, afim de eliminar as partículas mais finas, não retiradas pelo processo de peneiramento. Essas partículas normalmente ficavam presas nos grãos maiores e, sob a ação de um detergente, soltavam-se indo para a superfície. O sobrenadante era retirado melhorando a qualidade do material. Após essa lavagem, o material era colocado para secar ao ar livre.

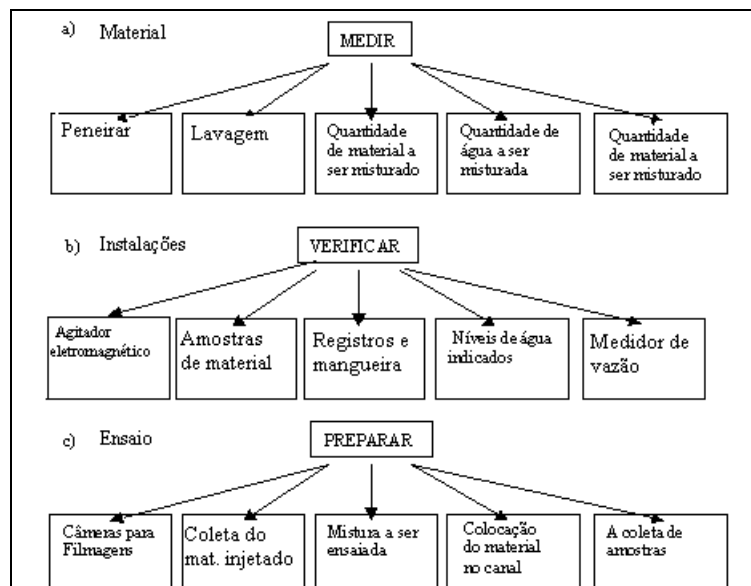


Figura 4.14: Fluxograma do procedimento de ensaios em fluxo contínuo-Terceira fase

Após esse processo complementar, o material utilizado era pesado e colocado no reservatório de alimentação do canal tridimensional de geometria simplificada.

Com relação à quantidade de água colocada no reservatório de alimentação foi estabelecida uma curva de calibração entre o nível e o volume. Para essa calibração, o reservatório era preenchido com água até um determinado nível, indicado por uma régua graduada. Procedia-se ao esvaziamento do reservatório através da canalização medindo-se a vazão através do medidor eletromagnético que indicava, também, o volume de água escoada. Aplicando este procedimento a três níveis distintos, pode-se estabelecer uma relação entre os níveis e o volume do reservatório. Sabendo que a quantidade necessária para atingir as concentrações de mistura a ensaiar era de 650l, através do uso da curva de calibração determinou-se que a altura de água dentro do reservatório deveria ser de 35cm.

O canal de ensaios era preenchido de água até o nível de 1.05m. Com o agitador eletromecânico ligado com rotação regulada pelo conversor de frequência, para em seguida, ser realizada a calibração da vazão desejada. Essa vazão era controlada por dois registros, um à montante (gaveta) e o outro à jusante (esfera) do medidor de vazão. O medidor de vazão, então, era ligado e os registros abertos. À medida que o fluxo ia passando, o registro de montante (gaveta) era regulado até que o marcador de vazão do aparelho indicasse o valor desejado. Quando isso ocorria, o registro de jusante (esfera) era fechado instantaneamente. Desta forma, quando ele fosse reaberto, a vazão estaria garantida. Por fim, o volume do medidor de vazão eletromagnético de vazão era zerado e os recipientes para a coleta de amostras do material do reservatório eram preparados para o ensaio.

O procedimento de ensaios era um pouco mais diferenciado do procedimento adotado nas outras fases do projeto. Duas câmeras eram instaladas para a filmagens dos ensaios, sendo que a primeira era fixada acima do canal e acompanhava a trajetória da corrente, através de uma filmagem superior. A outra câmera não tinha uma localização fixa; inicialmente ela era colocada junto às janelas de visualização, na região lateral do canal, porém, após a passagem da corrente, ela era deslocada para alguma região peculiar definida segundo a evolução do ensaio.

Antes do início do ensaios, três amostras da mistura a ser injetada para constituir a corrente de densidade eram coletadas para verificar a concentração da mistura e granulometria do material que formava a corrente. Após a coleta, o ensaio estava pronto para se iniciar com a abertura (instantânea) do registro esfera. Quando o medidor de vazão indicava o volume desejado, os registros eram fechados e a injeção de material interrompida.

Após isso, o canal começava a ser esvaziado lentamente, de maneira que os depósitos não fossem alterados. Seco o canal, os depósitos eram filmados, com a utilização das câmeras digitais, para análise e tratamento de imagens. Concomitantemente, era instalado em locais predeterminados no canal a mesa de coordenadas, no qual era instalado o distanciômetro laser que visava determinar a espessura dos depósitos através de um método não invasivo. Após as medições com o distanciômetro a laser era realizada uma medida de depósitos na calha, com o auxílio de uma ponta linimétrica mecânica. Esta medição servia para calibrar os resultados encontrados pelo distanciômetro. No final, as amostras eram coletadas, após a retirada da água para posterior análise granulométrica. Estas amostras eram coletadas em intervalos, ao longo do comprimento do canal (0-50cm), buscando avaliar a distribuição das partículas depositadas e em regiões específicas na parte não confinada do canal.

4.5.3.3 Metodologia para avaliação de resultados

Para a avaliação das condições dinâmicas da corrente, como a velocidade da frente foi utilizada a técnica de visualização e tratamento de imagens, descritos no item 4.6.2. Para a medição da espessura/volume do depósito foram utilizados dois novos processos. A primeira técnica foi a utilização de uma ponta linimétrica mecânica que era fixada num suporte específico (Figura 4.15). Esta ponta linimétrica media a espessura do depósito na região confinada do canal, mais precisamente, dentro da calha, em intervalos de 25 a 25cm. Assim, a ponta era colocada em dois pontos, um tangenciando a superfície do depósito e no fundo. A diferença entre as leituras determinava a espessura do depósito naquele ponto.



Figura 4.15: Detalhe da ponta linimétrica mecânica.

O outro processo aplicado nesta fase, foi a implantação e utilização da mesa de coordenadas com o distanciômetro laser. Este método não invasivo foi utilizado para medir a espessura/volume dos depósitos, permitindo que o depósito não fosse alterado, além de garantir que espessuras muito pequenas fossem aferidas (precisão = 0,1mm).

Para que este equipamento fosse utilizado, algumas modificações tiveram que ser realizadas no canal. Devido a região de varredura da mesa ser limitada, foram instalados no canal, suportes fixados no piso que possibilitavam que este equipamento fosse sempre colocado da mesma maneira. Para se obter os parâmetros de entrada utilizados na placa digital microprocessada responsável pela aquisição foi necessária realizar duas calibrações na mesa de coordenadas, as quais serviram para determinar quantos centímetros o distanciômetro iria percorrer, tanto na direção vertical quanto na região horizontal. O processo de calibração está descrito no Anexo A. Com a mesa instalada nos locais das leituras, a placa digital microprocessada era programada, determinando a área que o distanciômetro iria percorrer.

Conforme foi descrito no item 4.3.6, os dados adquiridos ficavam armazenado numa placa digital microprocessada. Quando o processo de medição se encerrava, os dados armazenados eram descarregados para um computador PC e foi desenvolvido um aplicativo em Visual Basic, para avaliar e tratar estes dados. Este aplicativo foi chamado de CC - Conversor de Coordenadas, pois transforma, as coordenadas x e y, inicialmente medidas, em passo de tempo, para centímetros (Anexo B). Assim, podemos localizar as leituras de cota do fundo após a passagem da corrente de densidade dentro da calha do cânion. Com o auxílio de aplicativos que trabalham com coordenadas (x, y, z) era possível visualizar a distribuição do depósito.

Para viabilizar o cálculo das espessuras/volumes dos depósitos foi realizada, nas mesmas posições dos ensaios, a varredura com o canal vazio e com o depósito. Assim, pela

diferença de leituras pode-se estimar as espessuras de cada depósito. O aplicativo realizava este cálculo através de suas ferramentas, em toda a malha de pontos, determinando o volume de uma área, no caso, a área da varredura.

Com relação à análise qualitativa dos depósitos, foram utilizados os mesmos métodos de amostragem de material utilizado nas etapas anteriores. Os intervalos de amostragem foram de 50cm em 50cm na região confinada do canal além de mais três amostras em zonas situadas na região não confinada do canal:

- 50cm após a saída
- 50-100cm após a saída
- 100-150cm após a saída

Estas três últimas amostras eram retiradas no prolongamento da calha, junto à região não confinada do canal. Não foram extraídas amostras na lateral da zona não confinada, pois as quantidades eram muito ínfimas. Quanto à caracterização do tipo de material que formava a corrente de densidade não conservativa ela foi realizada à partir de três amostras coletadas na saída do reservatório de alimentação, as quais eram pesadas logo após o ensaio e colocados na estufa. Após a secagem da água, este material era novamente pesado. Desta maneira, se obtinha a quantidade de água e de material, ou seja, a concentração da mistura. Também, nestas amostras foram realizados a análise granulométrica, afim de verificar qual a distribuição granulométrica do material que formou a corrente de densidade, bem como a eficiência do agitador utilizado.

4.5.3.4 Características dos ensaios realizados

As características dos ensaios, desta fase, podem ser melhor visualizadas na tabela 4.14.

Tabela 4.14: Características dos ensaio da terceira fase

| Ensaio | Vazão (l/s) | Volume (l) |
|--------|-------------|------------|
| 1 | 5 | 50 |
| 2 | 5 | 125 |
| 3 | 12.5 | 125 |

Com relação ao material utilizado, foi utilizado o carvão 205 com a seguinte distribuição granulométrica:

- 15% de material com tamanho 0,210mm
- 35% de material com tamanho 0,149mm

- 35% de material com tamanho 0,105mm
- 15% de material com tamanho 0,074mm

Esta distribuição foi idealizada com base nas características gerais dos depósitos turbidíticos naturais que apresentam, predominantemente a fração areia fina.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e suas análises serão apresentados divididos conforme as três fases do estudo.

5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DA PRIMEIRA FASE

Os resultados dos experimentos que compuseram esta fase serão apresentados, num primeiro momento, quanto aos aspectos experimentais testados, em seguida, numa abordagem qualitativa e, após, sob o ponto de vista quantitativo.

5.1.1 Aspectos experimentais

Quanto a metodologia aplicada nos ensaios por fluxo contínuo de material foram testadas a admissão de material, a abertura do registro no reservatório de alimentação e a influência do septo direcionador a jusante do difusor.

A agitação do material no reservatório de alimentação demonstrou resultados bastante irregulares, pois em alguns ensaios, muito material ficou armazenado no volume morto do reservatório (terceira alternativa), enquanto que em outros, não.

O processo de preparação de mistura para o carvão deve ser feito com mais cuidado, pois o material muito fino (sobrenadante), que era retirado antes do ensaio, trazia consigo, partículas de material mais grosso que não deveriam ser retiradas.

5.1.1 Análise qualitativa

As análises qualitativas, obtidas através da comparação de formas entre correntes de densidade conhecidas e as simuladas nos modelos foram feitas através do acompanhamento visual das experiências e pelos registros das câmeras de vídeo. A tabela 5.1 expressa os resultados. Nesta tabela estão somente os ensaios que tinham como objetivos testar o material.

Tabela 5.1: Resultados qualitativos dos ensaios a fluxo contínuo.

| Ensaio (Conf. Tab 4.8) | Material | Granulometria do material | Formação de corrente | Altura aproximada da corrente (cm) | Distância aproximada atingida pela corrente (cm) | Formou depósito |
|------------------------------|------------|------------------------------|-------------------------|---|---|--------------------|
| 13 | Areia | Controlada | SIM | 8,0 | 275 | SIM |
| 14 | Carvão 207 | Bruta | SIM | 7,0 | 275 | SIM |
| 15 | Carvão 207 | Bruta | SIM | 7,0 | 275 | SIM |
| 16 | Carvão 207 | Bruta | SIM | 7,0 | 275 | SIM |
| 17 | Calcário B | Controlada | SIM | 7,0 | 275 | SIM |
| 18 | Calcário B | Controlada | SIM | 8,0 | 275 | SIM |

Esse resultado pode ser melhor exemplificado na figura 5.1 que mostra a evolução da corrente de densidade ao longo do comprimento para o ensaio 14.

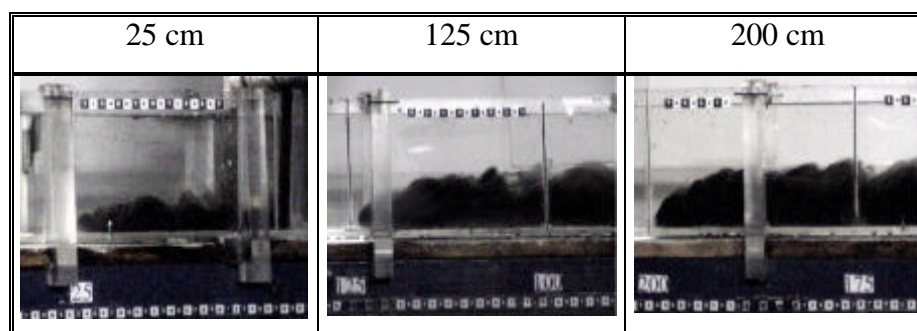


Figura 5.1: Evolução da correntes de densidade - Ensaio 14.

Da análise das filmagens e pela observação dos ensaios, nota-se que para todos houve a formação da corrente de densidade e de seus depósitos. A altura média da corrente foi estimada ficando em torno 8,0cm para todos os materiais. As correntes percorreram todo o canal, atingindo a distância de 275cm. Notou-se também que nas zonas mais proximais do canal há um acúmulo maior de sedimento depositado do que nas regiões mais distais. Pelas fotografias notamos a formação dos vórtices atrás da cabeça e ao longo do comprimento do corpo.

5.1.2 Análise Quantitativa

A análise quantitativa dos materiais foi baseada em análises granulométricas das amostras coletadas dos depósitos de determinado ensaios. Ao todo, foram coletadas amostras

em cinco ensaios e seus resultados foram separados por tipo de material, começando pela areia, passando pelo carvão e depois o calcário. Os resultados são apresentados no que segue.

Areia:

O resultado da análise granulométrica realizada no ensaio com areia está sintetizada na tabela 5.2. Nesta tabela, no material injetado, já está descontado o material que ficou armazenado no volume morto do reservatório de alimentação (aproximadamente 2%) em suas respectivas faixas granulométricas.

Tabela 5.2: Resultado da análise granulométrica do ensaio 13

| Malha (mm) | Material injetado | | Depósito 0-75 cm | | Depósito 75-175 cm | | Depósito 175-275 cm | |
|---------------|-------------------|-----------------|------------------|-----------------|--------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| | % Peso total | % Ret. Acum. | % Peso total | % Ret. Acum. | % Peso total | % Ret. Acum. | % Peso total | % Ret. Acum. |
| 0,500 | 9,66 | 9,66 | 3,56 | 3,56 | 0,00 | 0,00 | 0,49 | 0,49 |
| 0,354 | 9,76 | 19,41 | 9,42 | 12,98 | 0,12 | 0,12 | 0,49 | 0,99 |
| 0,250 | 9,76 | 29,17 | 12,52 | 25,49 | 0,49 | 0,61 | 0,99 | 1,97 |
| 0,177 | 9,72 | 38,90 | 6,41 | 31,90 | 0,85 | 1,46 | 1,48 | 3,45 |
| 0,125 | 20,62 | 59,51 | 36,62 | 68,52 | 0,97 | 2,43 | 1,97 | 5,42 |
| 0,088 | 15,07 | 74,58 | 17,21 | 85,73 | 2,18 | 4,61 | 3,94 | 9,36 |
| 0,063 | 13,09 | 87,68 | 12,10 | 97,83 | 9,71 | 14,32 | 1,97 | 11,33 |
| < 0,063 | 12,26 | 99,94 | 2,03 | 99,86 | 85,44 | 99,76 | 87,68 | 99,01 |

Pela análise dos resultados expressa na tabela 5.2, nota-se que a faixa granulométrica de tamanho 0,250mm aparece em todos os intervalos da amostragem, porém com quantidades abaixo de 1% em peso total da amostra, nas duas últimas regiões do canal. Nessas regiões, aproximadamente 90% do material é composto pelas frações mais finas da areia, isto é, diâmetros inferiores a 0,063mm. Nota-se, também, uma rápida queda da granulometria em função da distância.

Carvão 207:

Dos três ensaios realizados com o carvão tipo 207 em dois deles foram realizados a análise granulométrica ao longo da extensão do canal. Os resultados estão apresentados nas tabelas 5.3 e 5.4:

Tabela 5.3: Resultado da análise granulométrica do ensaio 14.

| | Depósito 0-50 cm | | Depósito 50-150 cm | | Depósito 150-275 cm | |
|------------|------------------|--------------|--------------------|--------------|---------------------|--------------|
| Malha (mm) | % Peso total | % Ret. Acum. | Peso (g) | % Ret. Acum. | Peso (g) | % Ret. Acum. |
| 0,500 | 2,57 | 2,57 | 0,31 | 0,31 | 0,66 | 0,66 |
| 0,354 | 4,81 | 7,38 | 0,31 | 0,62 | 0,25 | 0,91 |
| 0,250 | 11,22 | 18,60 | 0,38 | 1,00 | 0,25 | 1,16 |
| 0,177 | 19,06 | 37,66 | 0,65 | 1,65 | 0,41 | 1,57 |
| 0,125 | 23,59 | 61,25 | 7,00 | 8,65 | 1,00 | 2,57 |
| 0,088 | 12,38 | 73,63 | 19,19 | 27,84 | 2,40 | 4,97 |
| 0,063 | 10,36 | 83,99 | 24,87 | 52,71 | 12,99 | 17,96 |
| < 0,063 | 12,34 | 96,33 | 43,87 | 96,58 | 74,42 | 92,38 |

Tabela 5.4: Resultado da análise granulométrica do ensaio 15

| | Depósito 0-50 cm | | Depósito 50-150 cm | | Depósito 150-275 cm | |
|------------|------------------|--------------|--------------------|--------------|---------------------|--------------|
| Malha (mm) | % Peso total | % Ret. Acum. | Peso (g) | % Ret. Acum. | Peso (g) | % Ret. Acum. |
| 0,500 | 1,55 | 1,55 | 0,10 | 0,10 | 0,00 | 0,00 |
| 0,354 | 3,07 | 4,63 | 0,07 | 0,17 | 0,08 | 0,08 |
| 0,250 | 7,98 | 12,61 | 0,24 | 0,40 | 0,09 | 0,17 |
| 0,177 | 16,89 | 29,50 | 0,64 | 1,04 | 0,49 | 0,66 |
| 0,125 | 26,27 | 55,77 | 3,47 | 4,51 | 1,16 | 1,82 |
| 0,088 | 16,56 | 72,33 | 15,09 | 19,60 | 2,07 | 3,89 |
| 0,063 | 11,70 | 84,02 | 25,97 | 45,57 | 9,35 | 13,25 |
| < 0,063 | 13,89 | 97,91 | 51,53 | 97,10 | 81,79 | 95,03 |

Analisando as tabelas 5.3 e 5.4 de resultados para o carvão 207, verificamos que o material com granulometria acima de 0,354mm apresentou ao longo dos depósito uma quantidade inferior a 2% do peso da amostra, indicando que um material com esta granulometria não é adequada para a simulação de correntes de densidade.

Nas três regiões do depósito que foram analisadas, a montante (0-50cm), temos o predomínio de faixas granulométricas entre 0,250 e 0,125mm. Na região intermediária (50-150cm), o material entre 0,088 e <0,063mm foi o mais significativo, enquanto que na última região, o material passante na peneira mais fina <0,063mm representou mais de 70% da

amostra coletada. Isto indica que o tamanho do grão decresce com a distância, nestas condições.

Calcário B:

Os resultados das análises granulométricas dos ensaios estão descritos nas tabelas 5.5 e 5.6. Nestas tabelas, do material injetado, já está descontado a percentagem de material que ficou armazenado no volume morto do reservatório de alimentação nas respectivas faixas granulométricas.

Tabela 5.5: Resultado da análise granulométrica do ensaio 17.

| Malha (mm) | Material injetado | | Depósito 0-75 cm | | Depósito 75-175 cm | | Depósito 175-275 cm | |
|---------------|-------------------|-----------------|------------------|-----------------|--------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| | % Peso total | % Ret. Acum. | % Peso total | % Ret. Acum. | % Peso total | % Ret. Acum. | % Peso total | % Ret. Acum. |
| 0,250 | 6,38 | 6,38 | 3,54 | 3,54 | 0,57 | 0,57 | 1,17 | 1,17 |
| 0,177 | 8,67 | 15,05 | 6,08 | 9,62 | 0,57 | 1,14 | 1,56 | 2,73 |
| 0,125 | 21,40 | 36,45 | 19,92 | 29,54 | 2,62 | 3,75 | 8,20 | 10,94 |
| 0,088 | 22,85 | 59,30 | 28,19 | 57,73 | 4,44 | 8,19 | 6,84 | 17,77 |
| 0,063 | 23,53 | 82,82 | 25,36 | 83,09 | 17,18 | 25,37 | 19,92 | 37,70 |
| < 0,063 | 0,00 | 82,82 | 16,16 | 99,25 | 71,22 | 96,59 | 52,34 | 90,04 |

Tabela 5.6: Resultado da análise granulométrica do ensaio 18.

| Malha (mm) | Material injetado | | Depósito 0-75 cm | | Depósito 75-175cm | | Depósito 175-275cm | |
|---------------|-------------------|-----------------|------------------|-----------------|-------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | % Peso total | % Ret. Acum. | % Peso total | % Ret. Acum. | % Peso total | % Ret. Acum. | % Peso total | % Ret. Acum. |
| 0,250 | 7,89 | 7,89 | 5,25 | 5,25 | 11,20* | 11,20 | 2,42* | 2,42 |
| 0,177 | 10,48 | 18,38 | 8,10 | 13,35 | 1,69 | 12,89 | 0,56 | 2,97 |
| 0,125 | 25,70 | 44,08 | 22,32 | 35,67 | 2,94 | 15,83 | 2,70 | 5,67 |
| 0,088 | 27,55 | 71,62 | 24,97 | 60,64 | 5,07 | 20,90 | 3,44 | 9,11 |
| 0,063 | 28,38 | 100,00 | 24,16 | 84,80 | 27,03 | 47,93 | 15,89 | 25,00 |
| < 0,063 | 0,00 | 100,00 | 14,21 | 99,00 | 48,00 | 95,93 | 65,33 | 90,33 |

* Torrão de calcário formado após a secagem em estufa.

Pela análise das tabelas 5.5 e 5.6, nota-se um comportamento muito similar ao apresentado pela areia. Nos dois experimentos, novamente, os diâmetros maiores do que 0,177mm são encontrados somente no primeiro intervalo, enquanto que no segundo e terceiro

intervalos a quantidade de material fica reduzida a menos de 2% da amostra. Também nestes experimentos, a quantidade de material com diâmetro ($<0,063\text{mm}$) é predominantemente significativa sobre as demais faixas granulométricas nos trechos finais do canal.

Observando as tabelas 5.5 e 5.6 nota-se que foram encontrados materiais com a faixa granulométrica acima e abaixo dos diâmetros iniciais. As causas deste fenômeno devem ser determinadas para que nos ensaios futuros não tenhamos este problema. Uma possível causa deste fenômeno foi detectada no ensaio 18, onde torrões de calcário se formaram ($0,250\text{mm}$).

5.1.4 Conclusões parciais

As conclusões parciais desta primeira etapa foram:

- que os procedimentos que apresentaram melhores resultados, nesta etapa, foi a terceira alternativa de admissão de material (Figura 4.13d), com o registro regulado para a metade da abertura;
- que a faixa granulométrica utilizada para areia, nos ensaios por fluxo contínuo de material deve estar compreendida entre a passante na $0,177\text{mm}$ até $0,063\text{mm}$. Com estes valores, fica garantido uma distribuição granulométrica ao longo de todo o canal;
- que a faixa granulométrica utilizada para o carvão, nos ensaios por fluxo contínuo de material, deve estar compreendida entre a passante na $0,250\text{mm}$ até $0,063\text{mm}$;
- que a faixa granulométrica do calcário a ser utilizada, nos ensaios por fluxo contínuo de material deve estar compreendida entre a passante na $0,177\text{mm}$ até $0,063\text{mm}$.

5.2 RESULTADOS SEGUNDA FASE

Na tabela 5.7 estão apresentadas as velocidades médias de avanço da cabeça da corrente obtidas através do tratamento de imagens, registradas pela vídeo-câmera que acompanhava a frente da corrente de densidade.

Com relação às características dinâmicas da corrente, foi construído a partir da tabela 5.7, o gráfico da evolução das velocidades com a distância. A figura 5.2, mostra que em todos os ensaios, a tendência da velocidade é a mesma, isto é, um decréscimo, tendendo a uma exponencial.

Tabela 5.7: Velocidade de avanço da cabeça da corrente - Fluxo Contínuo

| Seção (cm) | Grupo 1 | Grupo 2 | Grupo 3 | Grupo 4 | Grupo 5 | Grupo 6 | Grupo 7 |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 25 | 0,0585 | 0,0717 | 0,0650 | 0,0641 | 0,0689 | 0,0793 | 0,0791 |
| 50 | 0,0418 | 0,0282 | 0,0365 | 0,0432 | 0,0305 | 0,0444 | 0,0351 |
| 75 | 0,0303 | 0,0181 | 0,0347 | 0,0403 | 0,0264 | 0,0316 | 0,0234 |
| 100 | 0,0271 | 0,0186 | 0,0349 | 0,0337 | 0,0266 | 0,0256 | 0,0177 |
| 125 | 0,0256 | 0,0182 | 0,0323 | 0,0304 | 0,0243 | 0,0226 | 0,0137 |
| 150 | 0,0251 | 0,0175 | 0,0282 | 0,0265 | 0,0240 | 0,0217 | 0,0105 |
| 175 | 0,0239 | 0,0143 | 0,0245 | 0,0227 | 0,0215 | 0,0214 | 0,0084 |
| 200 | 0,0207 | 0,0133 | 0,0241 | 0,0211 | 0,0197 | 0,0194 | 0,0071 |
| 225 | 0,0205 | 0,0124 | 0,0214 | 0,0194 | 0,0174 | 0,0154 | 0,0000 |
| 250 | 0,0202 | 0,0123 | 0,0189 | 0,0179 | 0,0173 | 0,0147 | 0,0000 |
| Média = | 0,0294 | 0,0225 | 0,0320 | 0,0319 | 0,0277 | 0,0296 | 0,0195 |
| Desvio = | 0,012 | 0,017 | 0,013 | 0,014 | 0,015 | 0,019 | 0,023 |

Cabe salientar que o primeiro intervalo, é caracterizado por uma zona de adaptação do fluxo, ou seja, de influência das condições de admissão da mistura e da quantidade de movimento do escoamento, as quais são controladas pelo registro que permite a entrada de material no canal.

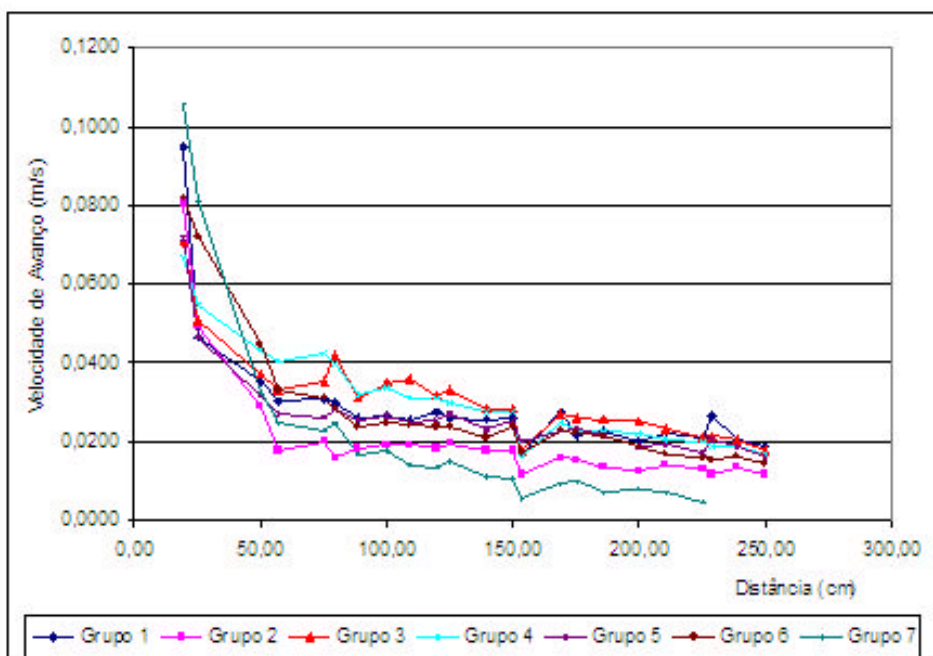


Figura 5.2: Velocidade de avanço da frente

Analisando a relação entre a velocidade de avanço da cabeça e a massa específica da mistura (Figura 5.3), verifica-se que, para um mesmo material com a mesma granulometria, quanto maior a massa específica, maior é a velocidade. No caso do carvão 205 (0,125 – 0,053mm) essa diferença foi pequena. Já para o mesmo material, porém com granulometria diferente (caso do carvão 205), o material com granulometria mais fina, desenvolveu velocidade maior do que com granulometrias mais grossas, independentemente da massa específica da mistura. Neste último caso, a velocidade de queda das partículas influencia nessa velocidade, pois os grão maiores tendem a se depositar primeiro, ocasionando perda da concentração durante a evolução da corrente e, com isso diminuição da velocidade da corrente.

Em geral, a relação entre a velocidade média e a massa específica da mistura pode ser sintetizada da seguinte maneira: aumentando a massa específica da mistura aumenta a velocidade. Aliado a isso, verifica-se também, quanto maior a densidade do material que constitui a mistura menor são as velocidades.

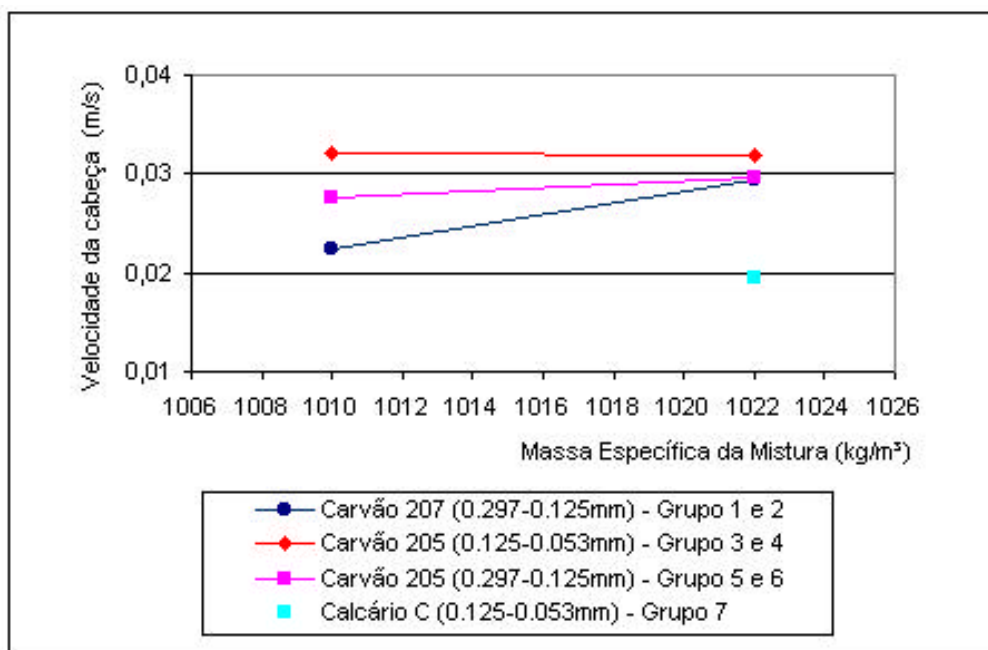


Figura 5.3: Correlação entre a massa específica da mistura e a velocidade média da cabeça .

Com relação às características geométricas das correntes de densidade não conservativas, as tabelas 5.8 e 5.9 resumem as alturas médias da cabeça e do corpo da corrente, respectivamente.

No valor médio, não foi considerado o valor dos primeiros 25cm, devido as incertezas na definição da região da cabeça da corrente devido as condições de entrada da mistura.

Tabela 5.8: Alturas da cabeça da corrente

| Seção (cm) | Grupo 1 | Grupo 2 | Grupo 3 | Grupo 4 | Grupo 5 | Grupo 6 | Grupo 7 |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 25,00 | 2,56 | 4,23 | 3,32 | 2,66 | 3,51 | 3,03 | 2,40 |
| 50,00 | 4,76 | 3,51 | 5,36 | 3,44 | 5,13 | 3,86 | 5,64 |
| 75,00 | 4,62 | 4,18 | 6,10 | 3,59 | 4,95 | 5,16 | 5,27 |
| 100,00 | 5,52 | 4,78 | 5,95 | 3,11 | 5,67 | 4,81 | 4,92 |
| 125,00 | 5,71 | 5,53 | 6,70 | 3,78 | 6,31 | 5,93 | 5,93 |
| 150,00 | 5,65 | 5,41 | 6,24 | 3,54 | 6,07 | 5,85 | 7,55 |
| 175,00 | 6,03 | 6,19 | 6,44 | 4,13 | 6,18 | 6,03 | 6,62 |
| 200,00 | 5,93 | 6,10 | 6,25 | 4,89 | 6,29 | 5,16 | 4,88 |
| 225,00 | 5,38 | 5,41 | 6,12 | 5,03 | 5,87 | 5,21 | - |
| 250,00 | 5,31 | 5,60 | 4,73 | 4,43 | 5,15 | 5,38 | - |
| Média = | 5,43 | 5,19 | 5,98 | 3,99 | 5,73 | 5,26 | 5,83 |
| Desvio = | 1,02 | 0,88 | 1,01 | 0,76 | 0,87 | 0,95 | 1,51 |

Tabela 5.9: Altura do corpo da corrente

| Seção (cm) | Grupo 1 | Grupo 2 | Grupo 3 | Grupo 4 | Grupo 5 | Grupo 6 | Grupo 7 |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 25,00 | 5,09 | 3,82 | 7,34 | 2,95 | 4,51 | 3,55 | 3,03 |
| 50,00 | 5,86 | 3,61 | 5,60 | 3,69 | 4,70 | 3,63 | 3,65 |
| 75,00 | 6,13 | 3,94 | 5,99 | 3,03 | 5,68 | 4,76 | 6,61 |
| 100,00 | 4,54 | 4,32 | 5,18 | 3,41 | 5,38 | 4,46 | 6,39 |
| 125,00 | 5,73 | 4,51 | 5,31 | 3,61 | 5,88 | 5,05 | 5,55 |
| 150,00 | 4,70 | 4,33 | 3,94 | 2,97 | 3,36 | 3,50 | 5,10 |
| 175,00 | 5,18 | 4,33 | 3,76 | 3,69 | 4,27 | 3,27 | 5,94 |
| 200,00 | 5,31 | 4,13 | 4,40 | 3,76 | 4,04 | 3,52 | 4,68 |
| 225,00 | 4,45 | 4,96 | 4,02 | 4,06 | 4,72 | 3,53 | - |
| Média = | 4,91 | 4,43 | 4,03 | 3,62 | 4,10 | 3,45 | 5,31 |
| Desvio = | 0,60 | 0,40 | 1,17 | 0,40 | 0,81 | 0,65 | 1,28 |

Para o cálculo do valor médio, foram consideradas apenas as quatro últimas medidas, pois nestas seções, a corrente apresentava uma melhor definição de sua forma, constatada

através das diferentes imagens extraídas para a medição das alturas, além de permitir, neste intervalo, o maior número de medidas concomitantes.

Com relação a altura da cabeça da corrente, pode-se notar na figura 5.4, que, excetuando o grupo 4, o comportamento das correntes foram muito similares, com crescimento nas altura da cabeça até, aproximadamente, 125cm, depois uma região com alturas constantes até os 200cm com um decrescimento nas duas regiões finais do canal. A exceção ficou com o grupo 4 ($\rho_m = 1022\text{kg/m}^3$), ou seja, com o carvão 205 de granulometria mais fina. Neste ensaio, o comportamento da altura da cabeça foi totalmente diferente dos demais. Considerando que ele tem a mesma velocidade média e distribuição do depósito do grupo 3 ($\rho_m = 1010\text{kg/m}^3$), não há uma explicação física para tal acontecimento.

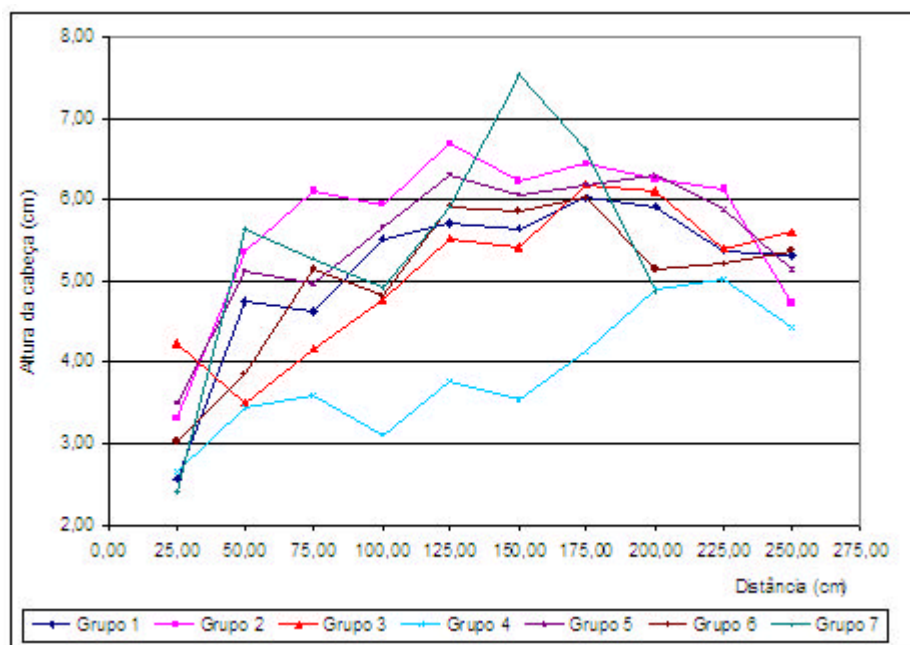


Figura 5.4: Altura da cabeça

Com relação aos valores médios da altura da cabeça da corrente (Figura 5.5), nota-se numa análise isolada de cada material, que quanto menor a massa específica da mistura, maior é a altura da cabeça. Já comparando o mesmo material, porém com tamanhos de grãos diferentes (caso do carvão 205), nota-se, que independente da massa específica da mistura utilizada, as correntes compostas por materiais com grãos mais grossos (grupos 5 e 6) possuem valores para a altura da cabeça maiores do que aqueles com grãos mais finos (grupos 3 e 4).

Já os valores da altura do corpo da corrente ao longo da distância (Figura 5.6), não apresenta um comportamento bem definido. Em alguns casos, essa altura diminui com a distância (grupos 1 e 2), enquanto que em outros ocorre um aumento até a metade do canal e

uma diminuição no fim (grupos 5, 6 e 7) e outros ainda, que se mantém quase constante com a distância (grupos 3 e 4).

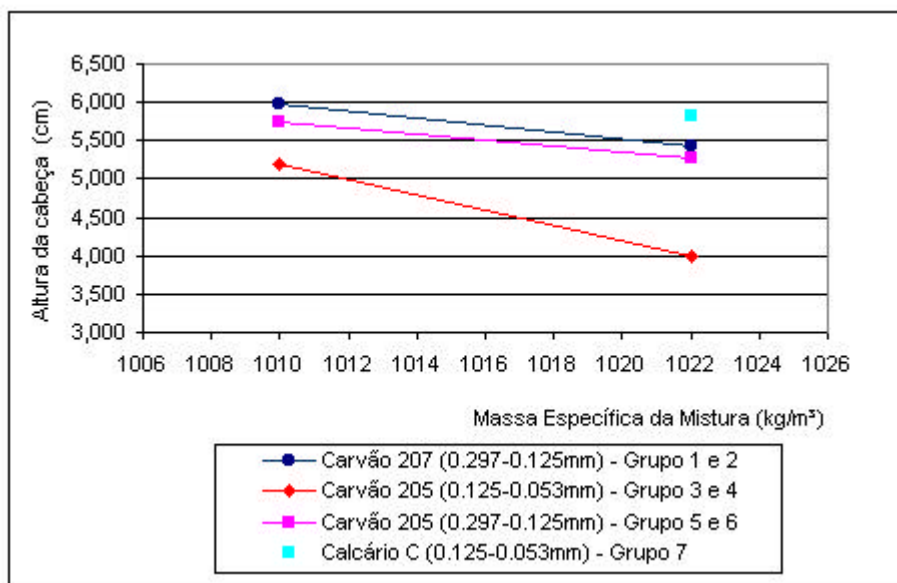


Figura 5.5: Alturas médias da cabeça da corrente

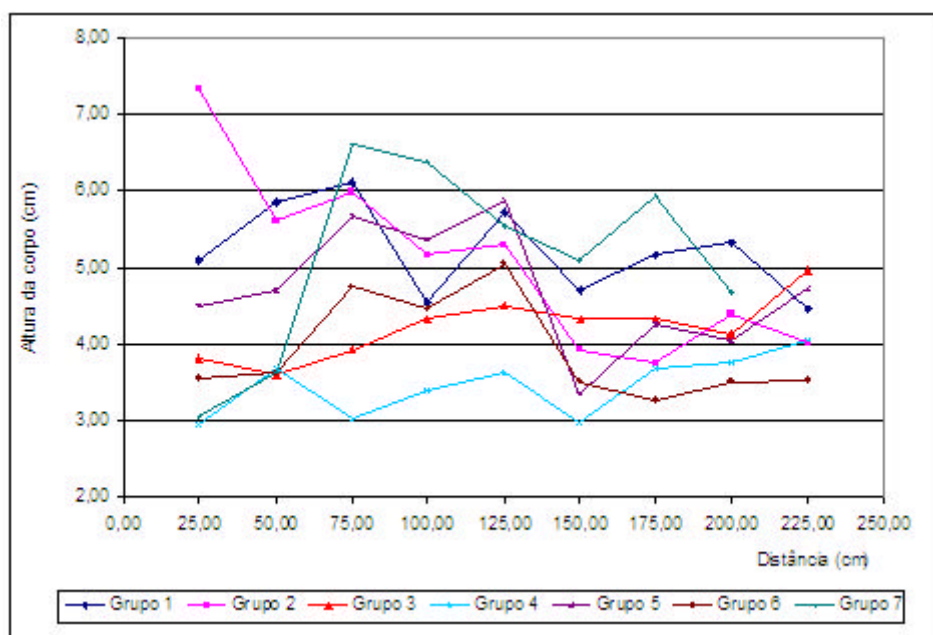


Figura 5.6: Altura do corpo da corrente

Com relação aos seus valores médios (Figura 5.7), a altura do corpo da corrente, apresenta um comportamento um pouco diferenciado daquele observado para a altura da cabeça. Numa análise de cada material, isoladamente, foram notados dois comportamentos: para o carvão 207, com uma massa específica da mistura maior, houve a formação de corpo com altura maior; enquanto que para o carvão 205, foi ao contrário. Considerando a comparação entre o tamanho do grão com o mesmo material (carvão 205), os resultados não apresentaram a mesma tendência dos resultados da altura da cabeça.

Com relação aos resultados dos volumes de depósitos, a tabela 5.10 e a figura 5.8 mostram esses resultados. Os valores apresentados foram obtidos através das análises granulométricas do material coletado e correspondem a relação entre o volume coletado na seção e o volume total de material depositado.

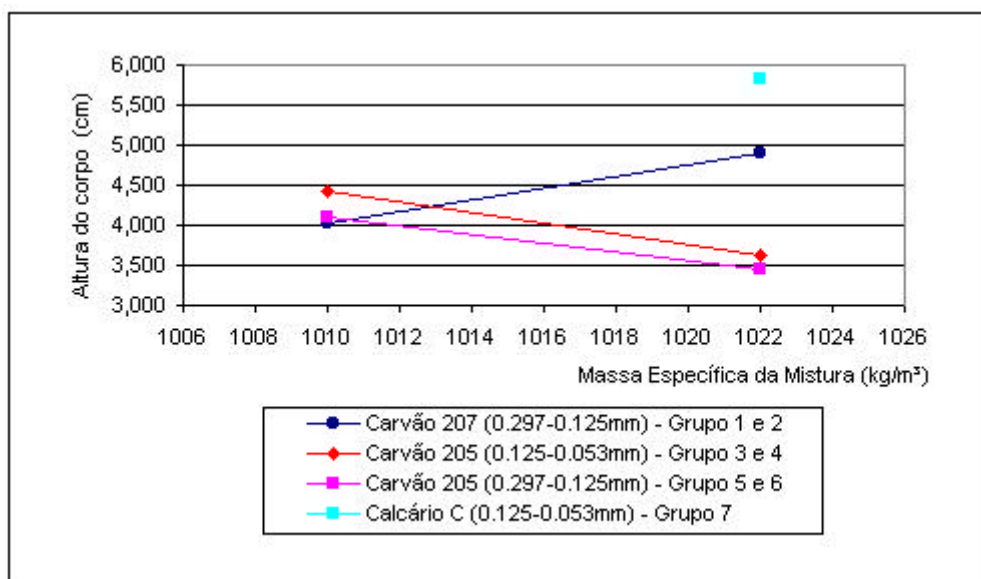


Figura 5.7: Altura do corpo

Tabela 5.10: Distribuição do volume de depósitos - Fluxo Contínuo

| Seção (cm) | Grupo 1 | Grupo 2 | Grupo 3 | Grupo 4 | Grupo 5 | Grupo 6 | Grupo 7 |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0-50 | 77,61% | 77,36% | 47,15% | 52,53% | 78,51% | 87,19% | 94,45% |
| 50-100 | 11,78% | 12,42% | 30,09% | 30,69% | 12,08% | 7,55% | 3,69% |
| 100-150 | 5,26% | 5,13% | 13,86% | 11,29% | 4,57% | 2,65% | 1,04% |
| 150-200 | 3,13% | 3,12% | 6,00% | 3,99% | 2,84% | 1,58% | 0,52% |
| 200-250 | 2,21% | 1,97% | 2,90% | 1,51% | 2,00% | 1,03% | 0,29% |

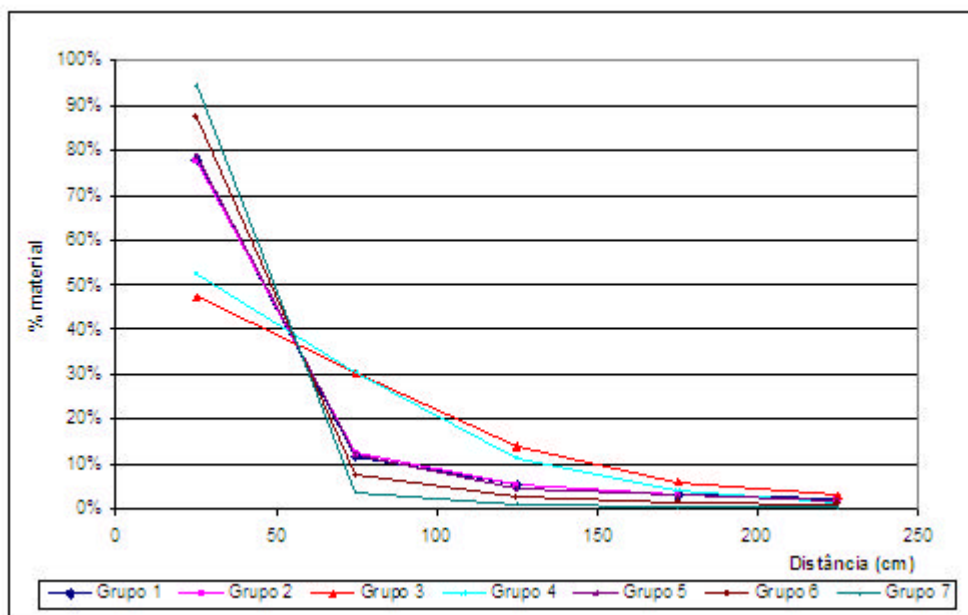


Figura 5.8: Distribuição do depósito ao longo do comprimento

A distribuição dos diâmetros dos grãos presentes nos depósitos ao longo do canal, por faixas granulométricas, é apresentada nas figuras 5.9, 5.10 e 5.11 para estes ensaios.

Com relação à distribuição dos volumes de depósitos gerados pelos ensaios, analisando a figura 5.8, nota-se que, para cinco dos sete grupos analisados, as curvas foram similares, independente das características dos ensaios. O padrão de deposição apresentou uma tendência: acúmulo de material, (da ordem de 90%), nas regiões mais proximais do canal (0-75cm) e acúmulo de material, (da ordem de 5%), nas regiões mais distais do canal (150-200cm). As únicas exceções foram os grupos 3 e 4 (carvão 205), que apresentaram um comportamento totalmente diferente.

Com relação à distribuição de grãos pertencentes à faixa da areia fina (Figura 5.8), os quatro grupos que possuem essas granulometrias, ou seja, (grupos 1, 2, 5 e 6), independente das condições de ensaio, apresentaram uma tendência única de depósito, ou seja, uma grande quantidade de material ficou acumulada nos primeiros 50cm do canal.

Já para a granulometria correspondente a areia muito fina (Figura 5.9), os grupos predominantes nesta faixa granulométricas são os 3, 4 e 7, correspondentes a dois materiais, o calcário C e carvão 205. O carvão com essa faixa granulométrica consegue formar depósitos até os 100cm, enquanto que a faixa de areia fina atinge apenas 50cm do canal. Exceto para o calcário C, que apresentou comportamento similar à faixa de areia fina.

Com relação à fração correspondente ao silte (Figura 5.10), essa apresentou comportamento similar à da faixa de areia muito fina, porém com volumes de depósitos menores.

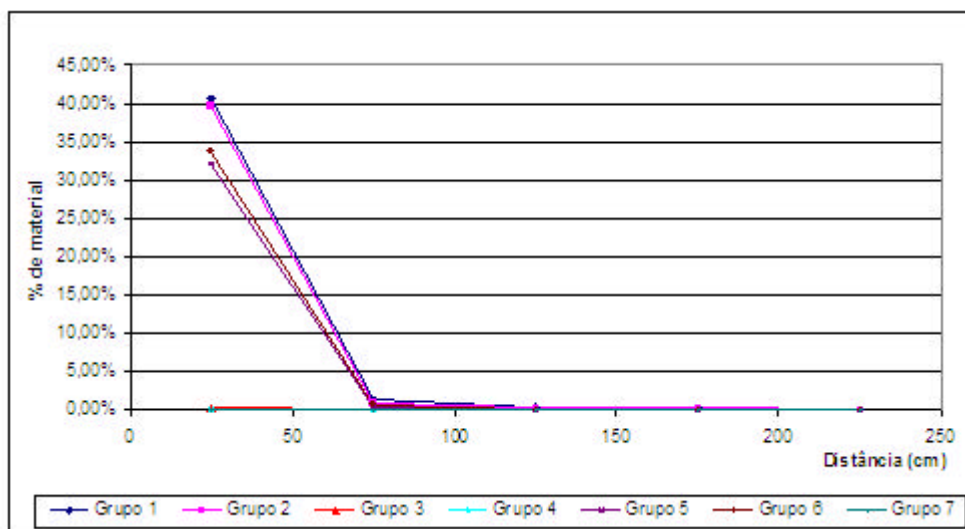


Figura 5.9: Distribuição percentual ao longo do comprimento do canal dos grãos correspondentes a areia fina.

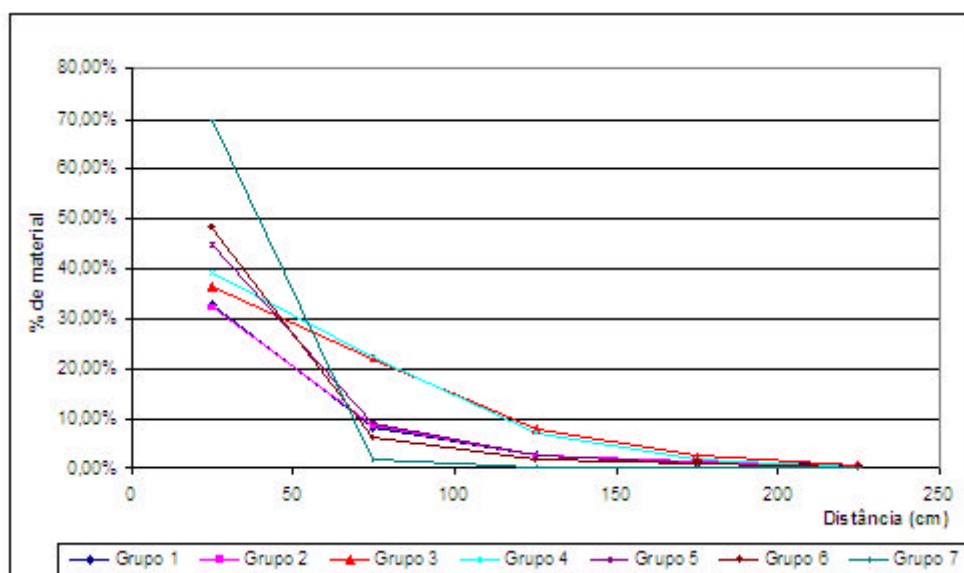


Figura 5.10: Distribuição percentual ao longo do comprimento do canal dos grãos correspondentes a areia muito fina.

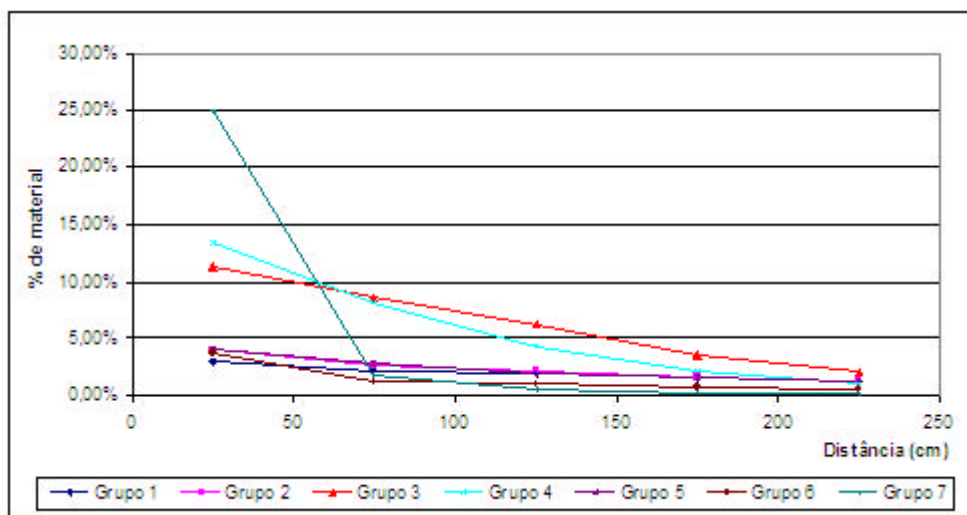


Figura 5.11: Distribuição percentual ao longo do comprimento do canal dos grãos correspondentes ao silte.

5.2.1 Conclusões parciais

Com relação à velocidade da corrente, o seu decréscimo é aceitável na medida que a corrente vai perdendo material com a distância, ou seja, o material vai se depositando e a diferença de densidade da mistura com o fluido ambiente, vai diminuindo, gerando velocidades mais baixas.

Para a altura da cabeça o comportamento apresentado pode ser explicado comparando esses resultados com as avaliações da velocidade (Figura 5.2): nas regiões em que a velocidade é maior, ou seja, nos primeiros 100cm, a altura da cabeça é menor. À medida que a cabeça vai aumentando, a velocidade vai diminuindo e a resistência do fluido ambiente aumenta. No final, quando a maioria do material já se depositou no canal, a velocidade decai bastante e altura da cabeça diminui.

Com estes resultados pode-se destacar uma correlação inversa com a velocidade do fluxo, indicando que as maiores alturas da cabeça estão nas correntes que apresentam as menores velocidades. Resumindo, a figura 5.5 destaca que quanto maior o grão, maior a massa específica do material e menor a massa específica da mistura maior será a altura da cabeça.

Pela tabela 5.7, notamos que as velocidades médias estão distribuídas, por grupos, na seguinte ordem decrescente: grupo 3,4,6,1,5,2 e 7. Já as alturas médias da cabeça (Tabela 5.8) estão distribuídas em ordem decrescente: grupo 4,3,6,1,5,7 e 2. Excluindo o grupo do calcário (grupo 7), podemos dizer, que há uma boa correlação entre as duas variáveis, ou seja, é

razoável esta correlação, uma vez que, nas correntes mais lentas, o fluido ambiente impõe uma maior resistência a frente da cabeça, pela dificuldade no avanço.

Para a altura do corpo, apenas na relação da massa específica da mistura, o comportamento do corpo foi igual ao da altura da cabeça, ou seja, diminuindo a massa específica da mistura aumenta a altura do corpo, porém com relação ao tamanho do grão o resultado foi inverso, isto é, nos ensaios com granulometrias mais finas deram uma altura de corpo maior.

Com relação a distribuição de volumes de depósitos, os ensaios que possuíam as granulometrias mais finas (0,125mm – 0,053mm), apresentaram uma melhor distribuição ao longo da distância, pois esses grãos têm uma maior capacidade de se manter em suspensão durante o desenvolvimento da corrente.

Analisando as frações de materiais, de uma maneira geral, podemos notar que as frações maiores (correspondentes a areia fina) ficam retidas nas zonas mais proximais do canal (até 50cm), as frações intermediárias (correspondentes a areia muito fina) conseguem atingir distâncias um pouco mais longas (150cm), e com os grãos mais finos chegam até as regiões mais distais do canal (150-250cm).

5.3 RESULTADOS DA TERCEIRA FASE

A partir do plano de ensaios estipulado e descrito no item 4.5.3.1 foram realizados três ensaios no canal tridimensional de geometria simplificada. Os resultados destes ensaios podem ser divididos em duas etapas: a primeira relacionada à caracterização da corrente e a segunda na caracterização dos depósitos formados por elas.

Nesta primeira etapa destacam-se a avaliação das características do material que realmente formou a corrente de densidade em contraponto com as características do material que formou a mistura colocada no reservatório de alimentação, além de suas características de evolução (geometria/velocidade). Na segunda etapa, destacam-se a quantidade e qualidade do depósito formado, além da avaliação das formas de fundo. Estes resultados foram obtidos com a utilização da metodologia descrita no capítulo 4.5.3.

5.3.1 Caracterização da corrente de densidade

5.3.1.1 Material injetado

Para cada simulação das correntes de densidade não conservativas foram recolhidas três amostras de mistura na saída do reservatório de alimentação. Com estas estabeleceu-se a concentração da mistura injetada e sua distribuição granulométrica. Indiretamente, através da comparação entre as granulometrias injetadas e a granulometria do material era possível verificar a eficiência da agitação da mistura no reservatório. Os resultados destas amostras estão descritos na tabela 5.11, onde apresenta-se para cada ensaio a densidade da mistura que ingressa no canal.

Tabela 5.11: Características do material injetado.

| | Concentração Volumétrica (%) | Densidade da Mistura |
|--------------|------------------------------|----------------------|
| Reservatório | 11,00 | 1,018 |
| Ensaio 1 | 4,22 | 1,005 |
| Ensaio 2 | 8,23 | 1,012 |
| Ensaio 3 | 8,86 | 1,014 |

Analisando as concentrações/massa específica da mistura injetadas no canal nos três ensaios, nota-se que em nenhum deles foi atingido o valor original de material colocado no reservatório de alimentação. Uma das causas deste acontecimento pode ser a ineficiência do sistema de agitação, incapaz de manter o material em suspensão, ou ainda, alguma influência da disposição do sistema de alimentação do canal que pode ter dificultado a introdução do sedimento à tubulação de alimentação.

Com relação aos valores encontrados no primeiro ensaio, que deram abaixo do valor dos outros dois ensaios, acredita-se ter havido uma falha no procedimento experimental. Por se tratarem de ensaios pioneiros e a conseqüente falta de experiência, o agitador eletromecânico, responsável pela mistura foi ligado poucos minutos antes do ensaio. Com isso não houve tempo suficiente para agitar completamente a mistura. Aliado a isso, essas amostras foram coletadas muito tempo antes do ensaio, logo após a entrada em funcionamento do agitador. Provavelmente estes valores não representam a real condição do material que efetivamente formou a corrente. Para os outros ensaios, o agitador era ligado, em

torno de trinta minutos antes do ensaio e as amostras eram coletadas momentos antes do ensaio.

Com relação às características dos grãos destas amostras, foi realizada a análise granulométrica da mistura no reservatório para os três ensaios. As distribuições apresentadas na figura 5.6 são o resultado da média das distribuições das três repetições.

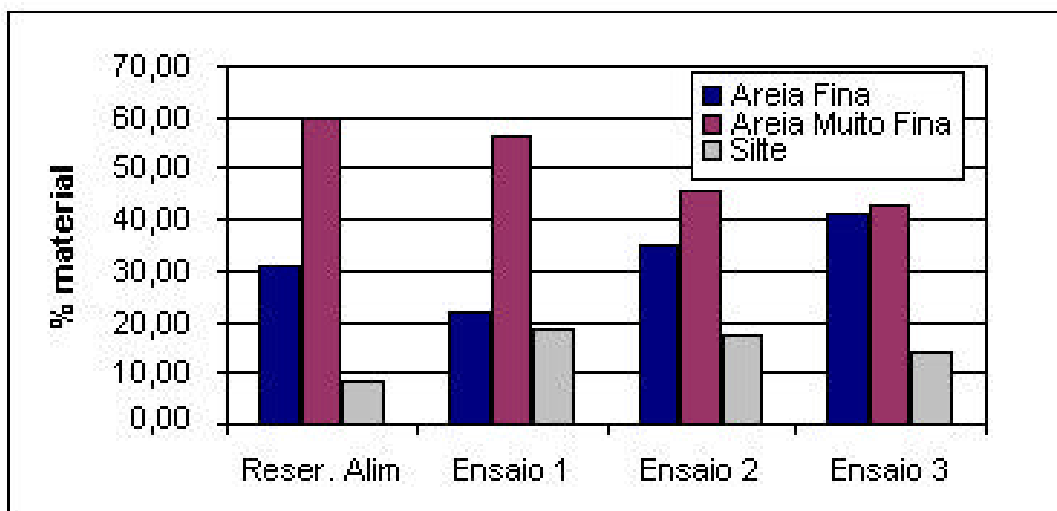


Figura 5.12: Distribuição granulométrica da mistura injetada no canal.

As distribuições em faixas de areia fina, areia muito fina e silte encontradas nos ensaios diferem dos valores originais, o que pode ser explicado pelo problema na agitação. A princípio a fração silte não deveria estar presente nas amostras dos ensaios, uma vez que se fixou um diâmetro mínimo de 0,074mm para o material proposto nestes ensaios. Uma das hipóteses levantadas para o seu aparecimento, seria a ineficiência do peneiramento, que permitia que os grãos menores ficassem fixos nos grãos maiores. Entretanto, como o material foi lavado após o peneiramento, crê-se não ser esta a causa principal. A hipótese mais provável seria a degradação/quebras dos grãos maiores nos processos de lavagem, secagem, transporte, colocação no reservatório, agitação e na própria análise granulométrica.

5.3.1.2 Evolução da corrente

O aspecto qualitativo do desenvolvimento da corrente foi obtido através da análise das filmagens. As figuras 5.13a, 5.13b e 5.13c mostram a evolução da corrente de densidade em alguns pontos singulares do canal, como a entrada (seção 75cm), quebra de declividade (seção 375cm), região de não confinamento (seção 675cm) e quando a corrente atinge o final do canal (seção 900cm).

Numa análise geral, notamos que o comportamento dos dois primeiros ensaios é muito parecido, pois eles se mantêm confinados na calha até aproximadamente os primeiros 375cm. Já na seção 550cm nota-se que o fluxo transbordou para fora da calha principal. Na saída o comportamento da corrente tende a manter um desenvolvimento maior na direção do fluxo do que na sua direção transversal. A frente da corrente ficou mais achatada, não tendo um ponto mais frontal bem definido. À medida que o fluxo percorre a zona de espraiamento, forma-se um leque quase circular, com a distância atingida no comprimento em torno de 2,4 vezes maior que a distância atingida lateralmente.

Já o terceiro ensaio, diferencia-se dos dois primeiros, pois logo nos primeiros intervalos de comprimento (225cm), o fluxo não está mais confinado, permanecendo assim até a saída da calha. Na zona de espraiamento, a frente da corrente apresenta uma região um pouco mais avançada, não sendo totalmente achatada. Ao expandir, a corrente não tende tanto a evoluir segundo uma forma circular, sendo a relação de comprimento/largura da ordem de 2.0.

Para os ensaios apresentados nas figuras 5.7 a 5.9, nota-se que na zona de espraiamento (seção 900cm) nos dois primeiros, a corrente evolui segundo uma forma de “língua”, se assemelhando aos resultados descritos por Luthi (1981), e no último ensaio, formando um bulbo mais arredondado que anguloso.

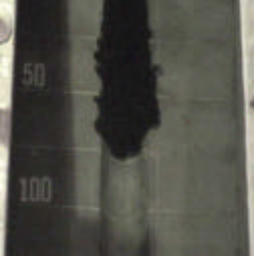
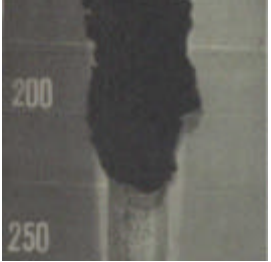
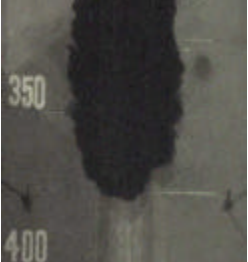
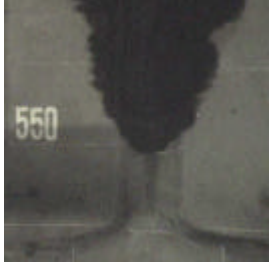
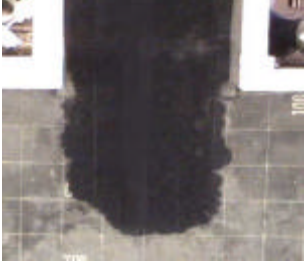













| | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|------------------|
| a) | 75 cm | 225 cm | 375 cm | 550 cm | 675 cm | 900 cm |
|  |  |  |  |  |  | |
| | Tempo = 14,77 s | Tempo = 41,87 s | Tempo = 62,97 s | Tempo = 111,23 s | Tempo = 161,33 s | Tempo = 341,26 s |
| b) | 75 cm | 225 cm | 375 cm | 550 cm | 675 cm | 900 cm |
|  |  |  |  |  |  | |
| | Tempo = 12,27 s | Tempo = 34,20 s | Tempo = 60,30 s | Tempo = 108,40 s | Tempo = 167,43 s | Tempo = 346,83 s |
| c) | 75 cm | 225 cm | 375 cm | 550 cm | 675 cm | 900 cm |
|  |  |  |  |  |  | |
| | Tempo = 7,33 s | Tempo = 23,70 s | Tempo = 43,33 s | Tempo = 67,17 s | Tempo = 96,47 s | Tempo = 240,47 s |

Figura 5.13: Evolução do ensaio: a) ensaio 1; b) ensaio 2 e; c) ensaio 3

5.3.1.3 Velocidade de avanço

As velocidades de avanço da cabeça da corrente de densidade foram discretizadas em intervalos de 25 em 25cm, conforme a marcação pré existente no canal. Os resultados extraídos da análise das imagens estão na tabela 5.12 e na figura 5.14.

Tabela 5.12: Velocidade de avanço da corrente (m/s)

| Seção (cm) | Ensaio 1 | Ensaio 2 | Ensaio 3 |
|------------|----------|----------|----------|
| 25 | 0.0824 | 0.1027 | 0.1402 |
| 50 | 0.0481 | 0.0460 | 0.1337 |
| 100 | 0.0405 | 0.0510 | 0.0799 |
| 150 | 0.0658 | 0.0904 | 0.0788 |
| 200 | 0.0682 | 0.0833 | 0.0991 |
| 250 | 0.0882 | 0.0658 | 0.0927 |
| 300 | 0.0833 | 0.0658 | 0.0747 |
| 350 | 0.0615 | 0.0497 | 0.0676 |
| 400 | 0.0460 | 0.0455 | 0.0975 |
| 450 | 0.0339 | 0.0364 | 0.0833 |
| 500 | 0.0357 | 0.0377 | 0.0728 |
| 550 | 0.0361 | 0.0292 | 0.0661 |
| 600 | 0.0354 | 0.0278 | 0.0541 |
| 650 | 0.0259 | 0.0194 | 0.0479 |
| 700 | 0.0144 | 0.0172 | 0.0325 |
| 750 | 0.0142 | 0.0128 | 0.0231 |
| 800 | 0.0115 | 0.0119 | 0.0214 |
| 825 | 0.0112 | 0.0109 | 0.0185 |
| 850 | 0.0115 | 0.0046 | 0.0098 |
| 875 | 0.0055 | 0.0065 | 0.0046 |
| Media = | 0.0417 | 0.0413 | 0.0666 |
| Desvio = | 0.024 | 0.026 | 0.034 |

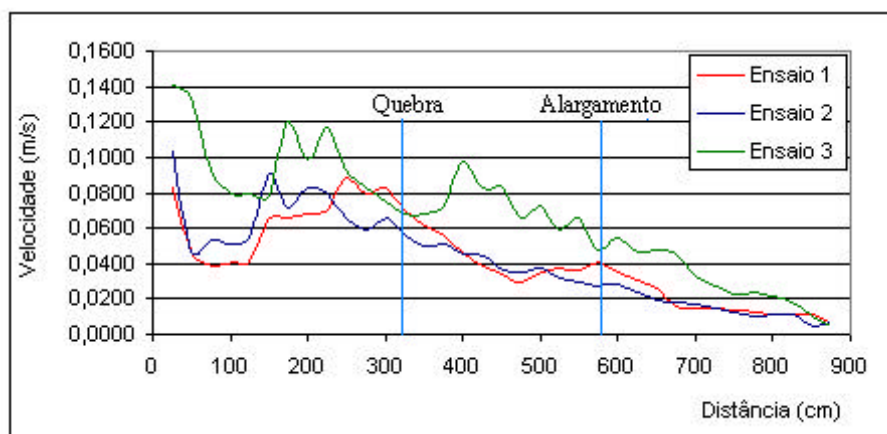


Figura 5.14: Velocidade de avanço da corrente

A velocidade da corrente de densidade, nos primeiros intervalos (0-100cm) está sob a influência do jato que injetava a mistura no canal, assim os resultados desta região não serão analisados, sendo apenas indicados nos resultados.

Com relação às características de cada ensaio, nota-se que o primeiro, de um modo geral, possui dois comportamentos, isto é, uma fase de aceleração dos 100cm até os 300cm e uma fase de desaceleração que segue até o fim do canal. Numa análise mais detalhada, pode-se dividir o comportamento da velocidade em quatro regiões, definidas pela sua mudança de comportamento, nos seguintes intervalos: entre 100-300cm, caracterizado por uma zona de aceleração; dos 300-450cm, por uma zona de desaceleração quase constante; dos 450-700cm, onde alternam-se aceleração e desaceleração, em forma de uma onda e; por fim uma região final que a velocidade diminui bastante mantendo-se quase constante. Neste ensaio, a terceira zona apresenta um comportamento singular pois nela o fluxo reacelera e logo em seguida diminui novamente.

Já o segundo ensaio apresentou uma característica muito similar ao primeiro ensaio, isto é, de uma maneira geral, apresenta uma região de aceleração no início (100cm a 225cm) e, após uma desaceleração quase constante até o final do canal. Dentro desta tendência, há uma variação nas velocidades, mas que oscilam em torno de um valor médio. A variação da velocidade, neste segundo ensaio pode ser dividida em quatro regiões: dos 100 aos 225cm, onde ocorre uma aceleração inicial; dos 255-500cm, onde o fluxo começa a desacelerar, com uma variação em torno de um valor médio; dos 500-725cm, onde ocorre o decrescimento da velocidade um pouco menos acentuado e; o último intervalo dos 725cm aos 875cm onde o fluxo atinge uma velocidade quase constante. Não se nota, neste ensaio, nenhuma alteração do fluxo com relação às

características físicas do canal, ou seja, induzida pela quebra de declividade e o alargamento da calha.

O terceiro ensaio apresenta um comportamento distinto dos demais, tanto nos valores da velocidade, quanto na tendência. Neste ensaio, as velocidades atingidas em quase todos os intervalos foram maiores que a máxima dos ensaios anteriores. O comportamento da velocidade, também é bastante diferente, podendo ser dividido em cinco regiões: na primeira, dos 100cm aos 225cm, ocorre uma aceleração inicial; dos 225cm aos 325cm, o fluxo apresenta uma região de desaceleração; da quebra de declividade até os 400cm, novamente o fluxo reacelera; a partir daí, o decrescimento da velocidade se dá até o final do canal, porém, até os 600cm a variação da velocidade é grande, enquanto que na última região, isto é, dos 600cm até os 875cm o decrescimento é quase linear.

Com relação à comparação dos resultados dos ensaios, ou seja, avaliando as variáveis de entrada, no caso a vazão, pois o volume total de material não influencia o avanço da frente da corrente, verifica-se que nos dois primeiros ensaios a velocidade média de avanço foi praticamente igual, ficando em torno de 0,041m/s. Isso era esperado, uma vez que, nesses ensaios as condições do fluxo eram iguais. Nota-se também, uma semelhança muito forte, com relação ao comportamento da variação das velocidades ao longo do canal. Por outro lado, a comparação entre os dois primeiros ensaios com o terceiro, o qual possuía uma vazão 2,5 vezes maior, indicou em relação aos valores médios, um aumento da ordem de 1,6 vezes. Assim, a velocidade média do fluxo não aumenta proporcionalmente ao aumento da vazão. Isso pode ser explicado pela geometria da frente da corrente, que não mantinha a forma constante durante sua evolução, devido a instabilidades internas na cabeça da corrente, provocadas pela turbulência, que geravam uma saliência longitudinal na frente da corrente, mascarando assim a velocidade real da corrente.

5.3.2 Caracterização dos Depósitos

A segunda etapa de resultado dos ensaios está relacionada às características do depósito gerado. Através da utilização das metodologias apresentadas no capítulo 4.5.3, foram coletadas a espessura dos depósitos, estabelecidas a granulometria dos mesmos e avaliadas as formas de leito.

5.3.2.1 Espessuras

A medição das espessuras dos depósitos estão descritas na tabela 5.13 e visualizadas na figura 5.15.

Tabela 5.13: Espessuras dos depósitos (cm) – Ensaio 3º fase.

| Seção (cm) | Ensaio 1 | Ensaio 2 | Ensaio 3 |
|---------------------------|----------|----------|----------|
| 25 | 5,9 | 8,8 | 0,2 |
| 50 | 5,3 | 11,4 | 2,4 |
| 75 | 3,8 | 10,8 | 5,2 |
| 100 | 2,1 | 7,1 | 4,7 |
| 125 | 2,1 | 5,5 | 3,8 |
| 150 | 1,7 | 3,1 | 3,3 |
| 175 | 1,3 | 2,4 | 2,3 |
| 200 | 0,6 | 1,6 | 2,7 |
| 225 | 0,3 | 0,8 | 2,4 |
| 250 | 0,9 | 1,0 | 2,1 |
| 275 | 0,4 | 0,8 | 1,8 |
| 300 | 0,3 | 0,6 | 1,3 |
| 325 | 0,4 | 0,4 | 1,0 |
| 350 | 0,4 | 0,2 | 0,9 |
| 375 | 0,2 | 0,4 | 0,5 |
| 400 | 0,1 | 0,3 | 1,0 |
| 425 | 0,1 | 0,3 | 1,0 |
| 450 | 0,1 | 0,3 | 0,9 |
| 475 | 0,1 | 0,2 | 0,6 |
| 500 | 0,2 | 0,1 | 0,7 |
| 525 | 0,13 | - | 0,64 |
| 550 | 0,12 | - | 0,44 |
| 575 | 0,06 | 0,02 | 0,33 |
| 600 | 0,15 | 0,01 | 0,24 |
| 625 | 0,12 | 0,04 | 0,24 |
| 650 | 0,04 | 0,02 | 0,10 |
| 675 | 0,02 | 0,01 | 0,08 |
| 700 | 0,09 | 0,00 | 0,07 |
| 725 | 0,06 | 0,01 | 0,10 |
| Média Geral = | 0,9 | 2,1 | 1,4 |
| Desvio = | 1,55 | 3,44 | 1,42 |
| Média (100cm até 725cm) = | 0,4 | 1,1 | 1,3 |
| Desvio = | 0,62 | 1,81 | 1,25 |
| Mínimo = | 0,02 | 0,00 | 0,07 |
| Máximo = | 5,9 | 11,4 | 5,2 |

Nestas medidas, foram utilizadas dois aparelhos: a ponta linimétrica mecânica e o distanciômetro a laser, sendo a primeira utilizada nos primeiros 500cm e o segundo dos 500cm até os 725cm do canal. Isso foi realizado por uma questão operacional, visto que a ponta

linimétrica não realizava leituras após os 500cm. As medições foram realizadas no eixo principal da calha. No segundo ensaio, nos intervalos 525cm e 550cm, os resultados apresentados pelo distanciômetro não foram coerentes com as observações visuais realizadas, sendo assim não considerados.

Com relação às médias calculadas, a primeira é a média geral do depósito, considerando todos os intervalos; a segunda, desconsidera os 100cm iniciais centímetros, pois esta zona está sob influência das condições do jato de entrada de mistura

Como maneira de calibrar, as leituras da espessura dos depósitos feitas com uso do distanciômetro a laser, foram comparados os resultados dos dois métodos de medição, nos intervalos em que coincidiram as leituras (Tabela 5.14). Os valores em negrito indicam os resultados incoerentes

Tabela 5.14: Comparação de resultados da leitura da espessura dos depósitos feitas com a ponta linimétrica e o distanciômetro laser.

| Distância (cm) | Ensaio 1 | | Ensaio 2 | | Ensaio 3 | |
|----------------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|
| | Laser | Ponta | Laser | Ponta | Laser | Ponta |
| 300 | 0,32 | 0,3 | 0,31 | 0,6 | 1,30 | 1,3 |
| 325 | 0,25 | 0,4 | 0,52 | 0,4 | 1,08 | 1,0 |
| 350 | 0,52 | 0,4 | 0,86 | 0,2 | 1,17 | 0,9 |
| 500 | 0,13 | 0,1 | 0,58 | 0,1 | 0,40 | 0,7 |

Da análise da tabela 5.14, excetuando o ensaio 2, os resultados entre os dois métodos de leitura de depósitos mostraram-se coerentes, uma vez que a variação entre um e outro método foi pequena. Para a variação encontrada no segundo ensaio não há alguma explicação, uma das hipóteses é que na hora da leitura o medidor do distanciômetro foi deslocado gerando algum ruído nas leituras do equipamento.

Pela análise da figura 5.15, pode-se notar que a tendência geral das espessura dos depósitos nos três ensaios, indica um decréscimo à medida que a distância à fonte vai aumentando e um maior acúmulo de material nos primeiros trechos do canal. Nos dois primeiros ensaios, nota-se que nos primeiros intervalos a espessura diminui bastante, a ponto que, em torno dos 275cm, a espessura é menor que um centímetro.

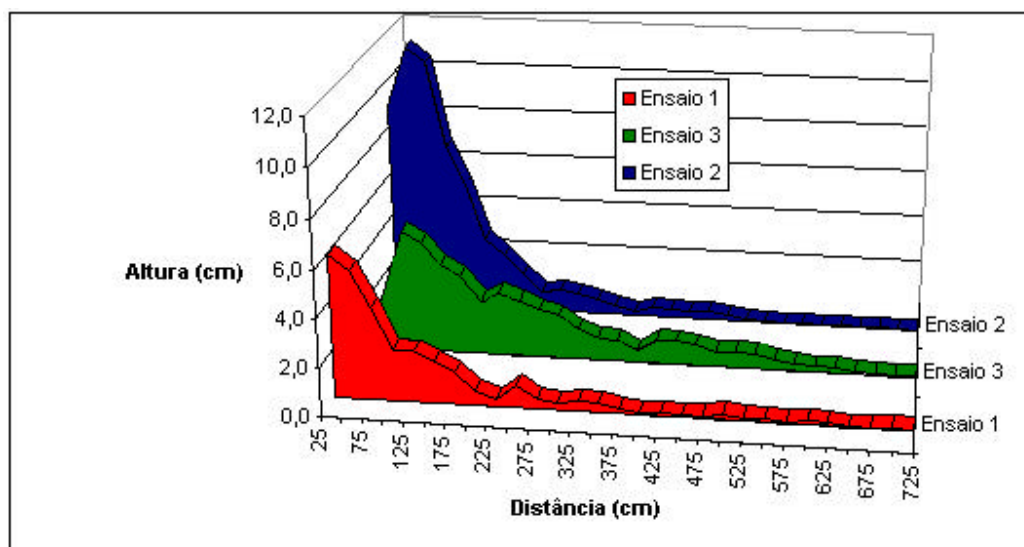


Figura 5.15: Espessuras dos depósitos medidos com a ponta linimétrica (Nesta figura, a ordem dos ensaios foram trocadas para facilitar a visualização espacial dos depósitos.)

Já no terceiro ensaio, este comportamento é um pouco diferenciado, pois apresenta um decréscimo menos acentuado e espessuras mais distribuídas com a distância, chegando até os 375cm. É interessante notar, no terceiro ensaio, o comportamento da espessura do depósito, na região após a quebra de declividade (350cm e 375cm), que atinge cerca de 0,5cm e posteriormente aumenta para 1,0cm. Nesta zona, nota-se pela figura 5.10, que a velocidade aumenta, indicando um local possível de erosão. À partir dos 375cm nota-se um decréscimo quase linear dos depósitos até o fim do canal.

O segundo ensaio apresentou uma situação peculiar durante sua realização. A quantidade de mistura injetada no canal foi duas vezes e meia maior do que a do primeiro ensaio. Transcorridos a metade do tempo de ensaio, o material depositado nas regiões iniciais do canal atingiu espessura equivalente a altura da calha, criando uma espécie de barreira e impedindo que o fluxo seguisse. Com isso, a mistura injetada começou a transbordar para a zona lateral do canal acumulando muito sedimento nesta região (0-50cm). No final, uma grande quantidade de material ficou depositada nesta região, o que justifica os valores encontrados na tabela 5.14, que indicam uma espessura de depósito inicial com valores muito acima dos outros ensaios (~12cm).

Analisando os resultados apresentados para a espessura do depósito nas simulações de correntes de densidade não conservativas sob o ponto de vista da influência das variáveis de entrada, ou seja, o volume inicial e a vazão, pode-se verificar algumas diferenças nos resultados apresentados. Com relação aos dois primeiros ensaios, que apresentavam a mesma vazão

(5l/min), porém com volumes diferentes, (50l e 125l), pode-se notar que a tendência de deposição é similar, apresentando três fases de decréscimo da espessura com a distância, entretanto com magnitudes distintas.

A tabela 5.15, exprime a relação entre as espessuras dos depósitos, dividindo os valores medidos (p. ex. espessura ensaio1/espessura ensaio 2), numa mesma seção, destacando os valores máximos, mínimos e médios desta relação. Verifica-se que nos dois primeiros ensaios, a diferença de magnitude dos valores, chegou a um máximo de 3,4 vezes, um mínimo de 0,4 vezes, ficando um valor médio de duas vezes. Em outras, palavras, o aumento em 2,5 vezes o volume inicial da corrente, gerou resultados da ordem de 2,1 vezes maior. Cabe salientar que neste resultado está implícito o fato de que no segundo ensaio, uma quantidade muito grande de material ficou armazenada nos primeiros intervalos do canal, criando uma barreira de sedimento que impediu o curso natural da mistura pelo canal. Se este depósito fosse mais distribuído ao longo da distância do canal, provavelmente este fator de aumento seria maior.

Tabela 5.15: Relação entre as espessuras dos depósitos. Valores mínimos, máximos e médios

| Valores | Ens 1/Ens 2 | Ens 1/Ens 3 | Ens 2/Ens 3 |
|----------|-------------|-------------|-------------|
| Mínimo = | 0,5 vezes | 0,5 vezes | 0,2 vezes |
| Máximo = | 3,4 vezes | 10,1 vezes | 7,1 vezes |
| Média = | 2,1 vezes | 3,9 vezes | 2,2 vezes |

Com relação ao segundo e ao terceiro ensaios, que corresponderam ao mesmo volume (125l), porém com diferenças nas vazões aplicadas, respectivamente (5l/min e 12,5l/min), tanto o comportamento apresentado como os valores mudaram significativamente. Pela tabela 5.15, nota-se que a relação entre os valores médios das espessuras, variam de 0,2 até 7,1, ficando o valor médio em 2,2 vezes, ou seja, a espessura média dos depósitos gerados pelo ensaio três, no que a vazão é 2,5 vezes maior, é 2,2 vezes maior do que as espessuras dos depósitos no ensaio dois. Neste caso, novamente, fica difícil extrair mais conclusões a respeito desta variação, devido ao acúmulo de sedimentos no segundo ensaio. De qualquer maneira, nota-se que com vazões maiores, a distribuição de depósitos foi um pouco mais homogênea, com a ocorrência de maiores espessuras nas regiões mais distantes da fonte.

Na comparação direta entre o primeiro e o terceiro ensaios, onde, tanto o volume quanto a vazão se diferenciam pelo fator 2,5, sendo maiores no terceiro ensaio, as relações entre as

espessuras dos depósitos variaram entre 0,5 e 10,1, ficando num valor médio de 3,9. Porém, não se sabe qual a variável que influenciou mais neste processo, ou seja, se foi o aumento de vazão ou o aumento de volume. Excluindo a singularidade criada pela formação da barreira de sedimentos na zona de entrada da calha, no segundo ensaio, nota-se que a comparação entre vazões (ens 2 e 3) gerou um depósito 2,2 vezes maior. Já na comparação de volumes (ens 1 e 2) o resultado foi um depósito 2,1 vezes maior. E na comparação entre vazão e volumes (ens 1 e 3), foi de 3,9, isto é, quase a soma das parcelas da vazão e volume ($2,1 + 2,2 = 4,3$ vezes). Desta maneira, tanto o volume, quanto a vazão influenciam no depósito e nas suas espessuras.

5.3.2.2 Análise granulométrica dos depósitos

Após as medidas da espessura dos depósitos do canal foram coletados amostras do material dos depósitos gerados para as análises qualitativas dos depósitos gerados. Esses estudos foram realizados através das análises granulométricas em cada seção do canal, podendo ser visualizados os seus resultados nas figuras 5.16 a 5.18. No eixo das abscissas estão as seções de coleta e no eixo das ordenadas a porcentagem de material depositado por faixas correspondentes.

No primeiro ensaio, a análise granulométrica dos depósitos mostra, de uma maneira geral, comportamentos diferenciados entre as três frações de grãos presentes. A fração de areia fina tem um comportamento decrescente ao longo do canal. A fração silte tem um comportamento crescente à medida que a distância à fonte de mistura aumenta, comprovando que os grãos finos conseguem se manter no fluxo por maior distâncias. Já a fração areia muito fina possui um comportamento peculiar apresentando três situações distintas, uma onde há um crescimento até os 275cm, a partir daí se mantém praticamente constante até os 625cm e nos dois últimos intervalos decresce novamente.

Em termos de magnitude, esta fração está presente em maior quantidade, entretanto cabe salientar que esta fração predominou no material injetado no canal

Realizando uma análise mais detalhada do resultado do ensaio 1, notamos que na região da quebra de declividade e em seus intervalos subsequentes, o comportamento das frações areia fina e silte se inverteram, sendo que a areia fina começou a aumentar e o silte a diminuir. Isto pode ter acontecido, pelo efeito do ressalto hidráulico formado na quebra de declividade.

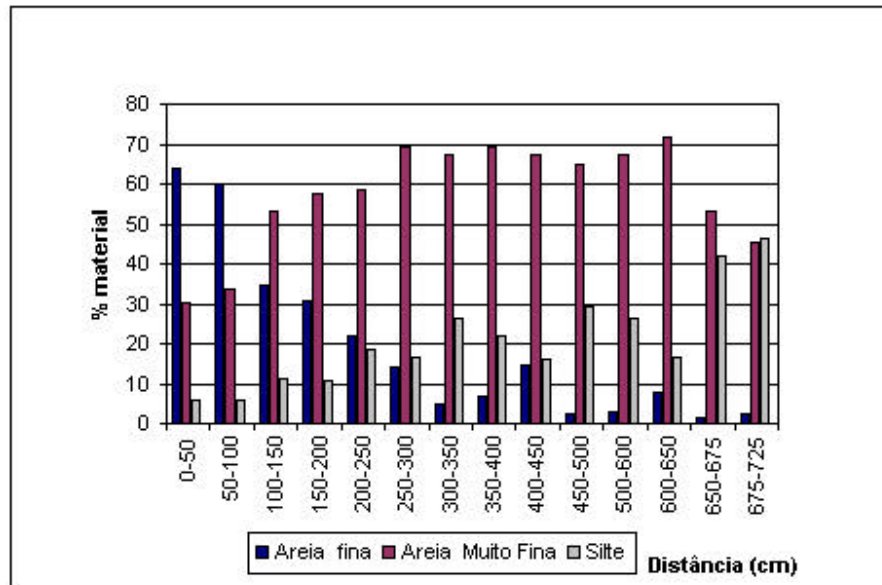


Figura 5.16: Análise granulométrica do ensaio 1

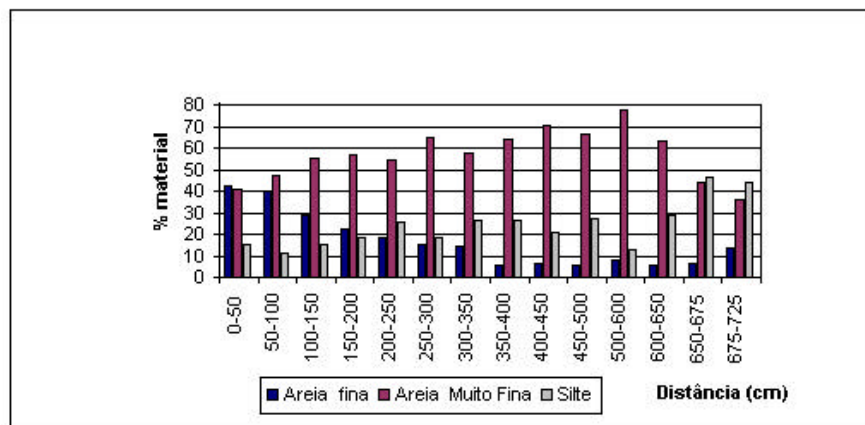


Figura 5.17: Análise granulométrica do ensaio 2

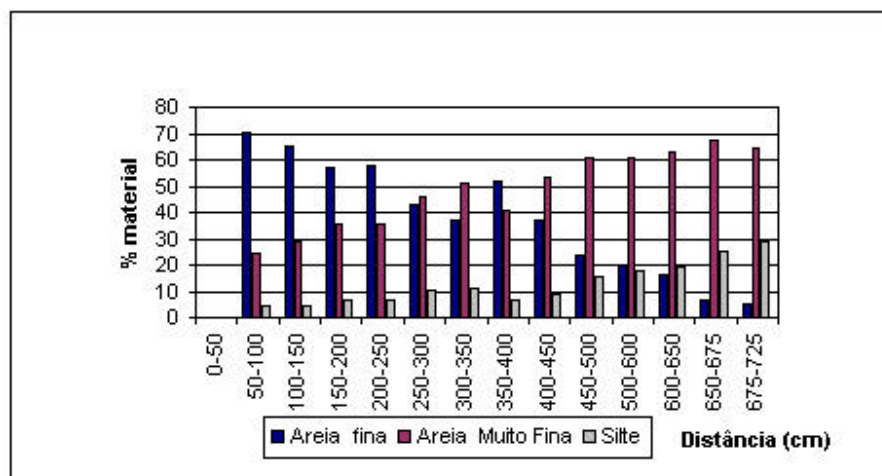


Figura 5.18: Análise granulométrica do ensaio 3

Logo à jusante da saída da calha (600-650cm) é notado um decrescimento na fração silte, quando a corrente começa o seu espraiamento, após este intervalo, os valores voltam a aumentar. Isso foi notado nos três ensaios, porém com mais evidência, no primeiro e segundo.

O segundo ensaio apresentou características muito similares ao primeiro sob o ponto de vista do comportamento das três frações avaliadas, ou seja, novamente a fração areia fina apresentou um comportamento decrescente com a distância, a fração silte um comportamento ao contrário e a fração areia muito fina, com uma tendência de crescimento nas regiões proximais, uma zona quase constante e um decrescimento no final. Nesta fração, porém, a região que apresentou uma distribuição de material quase constante foi menor que a do primeiro ensaio. Novamente, neste ensaio, na região da quebra de declividade, o comportamento geral do tamanho do grão foi alterado, com um acréscimo da fração silte neste local. Algumas singularidades interessantes, neste ensaio, foram o aumento, nos dois últimos intervalos, da fração areia fina, com valores acima de 10% e o resultado do intervalo 500-600cm, onde ocorreu o pico da areia muito fina. Neste intervalo, a fração silte não seguiu a tendência de apresentada nos intervalos anteriores e posteriores a esse.

No terceiro ensaio, o comportamento geral do depósito apresentou um comportamento diferenciado dos anteriores. Neste ensaio, o primeiro intervalo, não foi avaliado, uma vez que esta região se caracterizou por ser uma zona de adaptação e aproximação do jato de entrada, observando-se muito pouco depósito nesta área.

O comportamento da fração areia fina, como tendência geral, foi o mesmo dos anteriores, ou seja, apresentando um decaimento à medida que a distância aumentava, porém os valores foram significativamente maiores, e com esta fração predominando até os 250 cm. Já a areia muito fina, apresentou apenas um crescimento crescente ao longo da distância, o mesmo acontecendo para a fração silte, porém com magnitudes de valores menores. Uma singularidade apresentada foi no intervalo posterior a quebra (350-400cm) que inverteu a fração areia fina com a muito fina.

Neste ensaio, distribuição granulométrica inicial foi quase homogênea, indicando que, com o aumento de vazão deste ensaio (2,5 vezes maior), aumentou a capacidade de carreamento das partículas maiores até distâncias maiores.

Com relação às análises granulométricas dos depósitos encontrados no ensaio podem ser feitas algumas considerações. Para isso são apresentadas as curvas de percentagem de cada fração granulométrica ao longo do canal e a elas aplicada uma regressão polinomial de segunda ordem, no intuito de demonstrar que a tendência é parecida (Figura 5.19 a 5.21). Este gráfico não tem

como objetivo aplicar uma equação para o tamanho do grão, apenas demonstrar qualitativamente a influência da vazão e a pouca influência do volume sobre o tipo de grão encontrado na amostra.

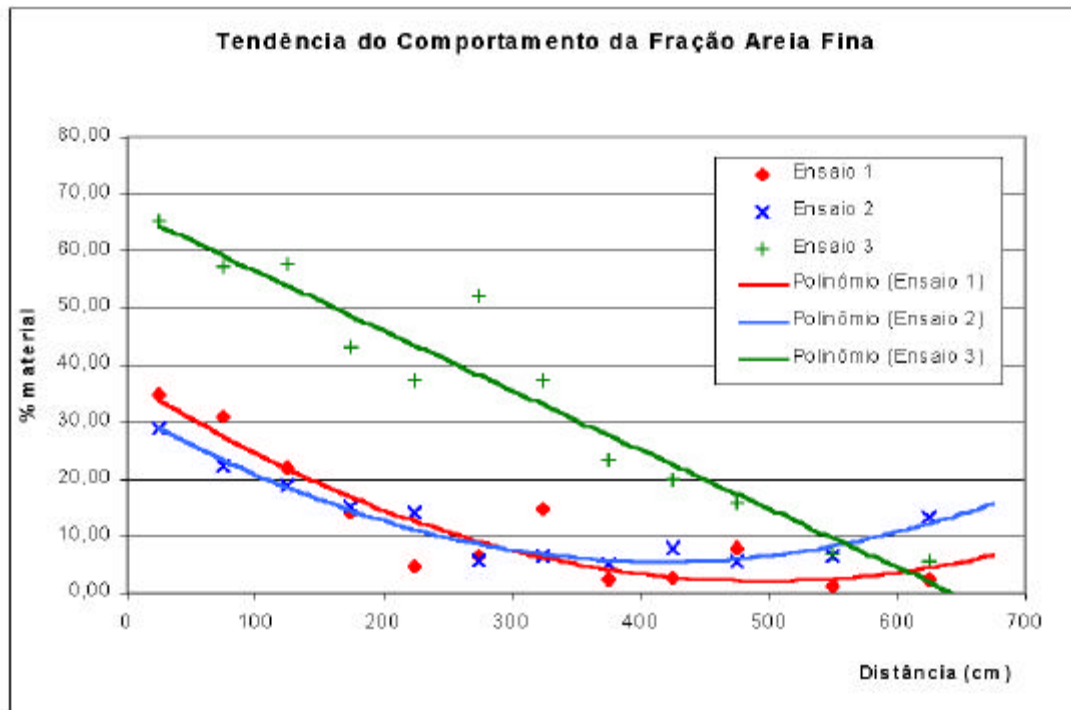


Figura 5.19: Tendência da fração areia fina

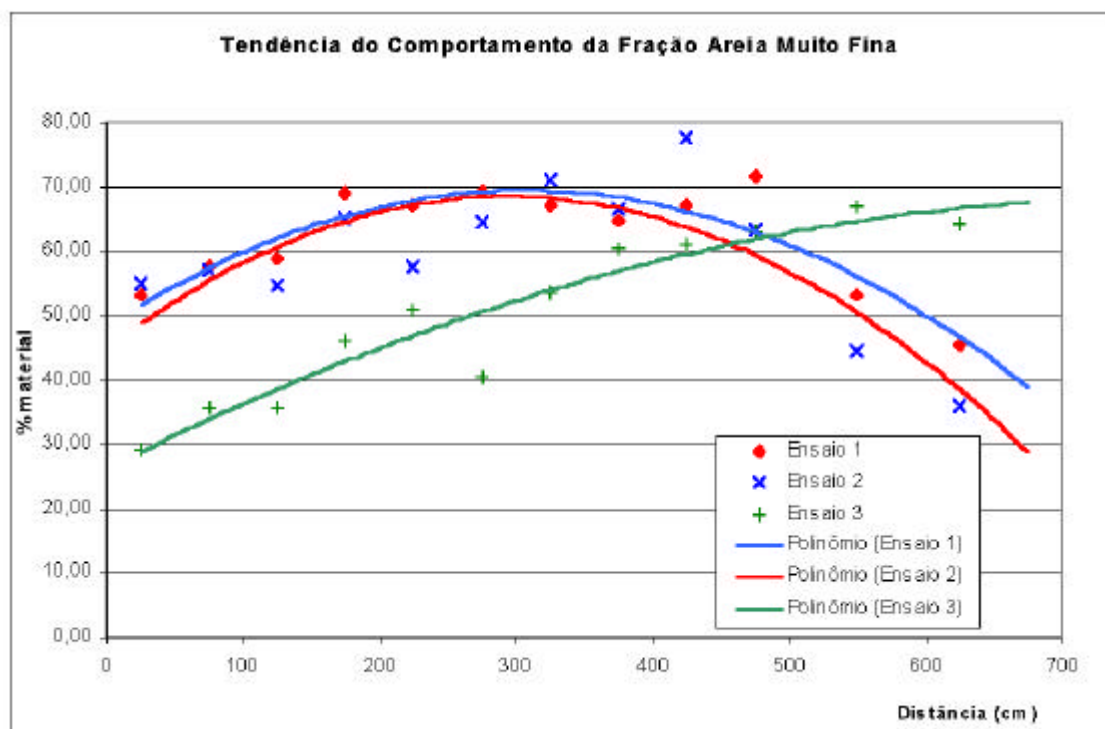


Figura 5.20: Tendência da fração areia muito fina

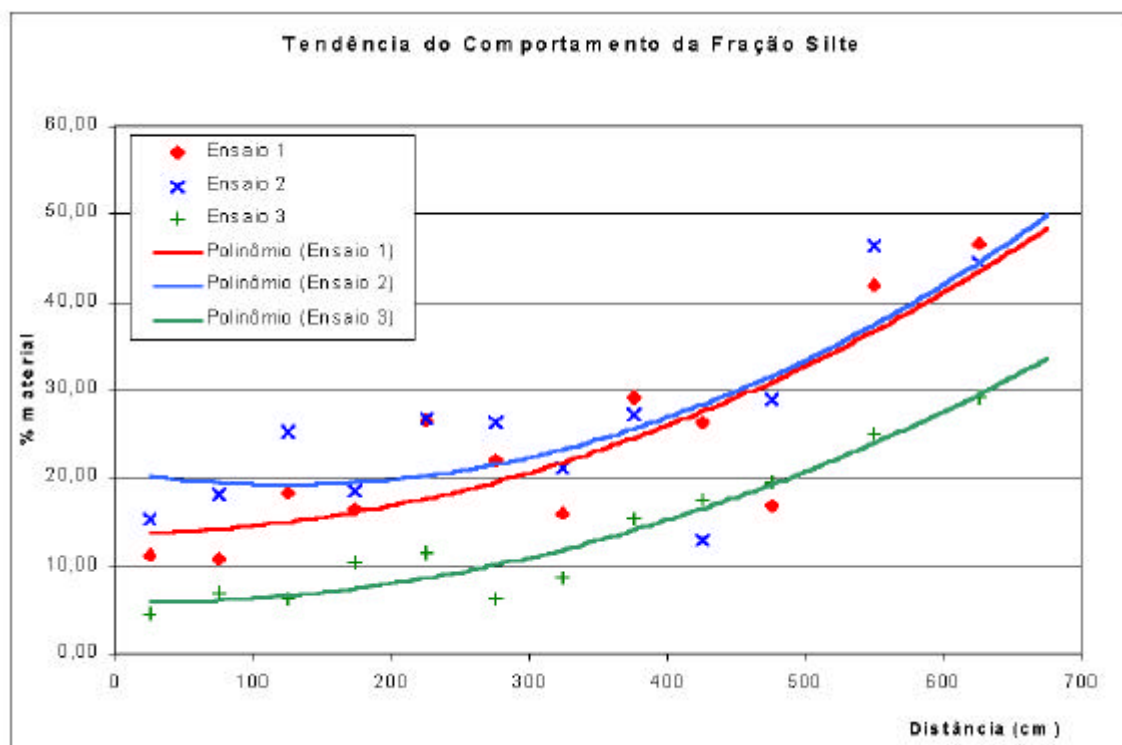


Figura 5.21: Tendência da fração silte

5.3.2.3 Formas de fundo

Com relação à avaliação das formas de fundo, foram utilizadas as metodologias descritas no capítulo 4.5.3.2. As figuras 5.22, 5.24 e 5.26, demonstram os resultados das figuras extraídas das filmagens realizadas dos depósitos nos três ensaios, respectivamente. Já as figuras 5.23, 5.25 e 5.27 apresentam, em destaque, a borda do canal (linhas cinza claro) e as marcas dos depósitos (linhas cinza escuro) dos ensaios. Observando o depósito gerado pela corrente de densidade simulada no ensaio 1 (Figuras 5.22 e 5.23) constata-se que: a) nos primeiros 50cm não foi possível extrair os resultados através de fotos; b) dos 50 aos 125cm nota-se que o comportamento do depósito foi similar, ou seja, com um fundo plano, sem grandes marcas de depósitos; apenas pequenas perturbações transversais à calha podem ser notadas. Nesta zona, a espessura do depósito vai diminuindo conforme citado anteriormente; c) no intervalo de 125-150cm, surgem as primeiras marcas de fundo com uma seqüência de ondulações muito próximas; d) no intervalo de 150 a 200cm, este padrão se repetiu, porém com um espaçamento maior entre as ondulações maiores; e) à partir do 175cm, nota-se através das ondulações, que o fluxo seguia uma trajetória meandrante, sendo da direita para a esquerda, no início e logo após da esquerda para a direita. As

marcas arredondadas que aparecem neste intervalos são partículas de poeira que ficaram na superfície da água e que depositaram-se neste locais quando o canal foi esvaziado; f) à partir dos 200cm até os 325cm nota-se o mesmo padrão de comportamento anterior com uma série de ondulações, igualmente espaçadas e com a variação do eixo destas oscilações o que sugere que o fluxo tende ao meandramento dentro da calha ou que possam estar ocorrendo reflexões do fluxo dentro deste cânion; g) nos 325cm a 350cm um comportamento diferenciado foi notado com a inversão das ondulações que pode ter sido causada quando do esvaziamento do canal, ou ainda, por algum efeito localizado na quebra de declividade do canal; h) à partir deste intervalo, o fundo voltou a ser plano com pequenas marcas no talude da calha. as espessuras dos depósitos eram pequenas e algumas marcas de erosão podem ser notadas e; i) na saída (625cm) são encontradas pequenas marcas de erosão que foram provocados pelo esvaziamento da água.

Com relação ao depósito formado pela realização do segundo ensaio (Figuras 5.24 e 5.25), observa-se que: a) devido ao transbordamento da calha ocorrido nos primeiros 50cm do canal, conforme foi relatado anteriormente, ocorreu um excesso de material depositado, nesta região, notam-se ondulações em forma quase circular no material transbordado; b) já dos 50cm aos 100cm o material de fundo se mostrou praticamente plano sem marcas visíveis; é interessante notar a presença de uma grande marca em forma de um “V” que se formou no sentido do fluxo; c) dos 150 aos 225cm começam a aparecer as ondulações que foram observadas ocorreram no primeiro ensaio. Neste intervalo, foram detectadas marcas de ondulações no sentido contrário ao fluxo. Estas contra-marcas podem ter sido formada pelo efeito do esvaziamento do canal. Com o auxílio de tratamento de imagem foi possível detectar e individualizar algumas ondulações no sentido do fluxo que demarcam esta zona; d) nos 225 a 300cm ainda se observam muitas contra-marcas, enquanto que as marcas na direção do fluxo só puderam ser identificadas em determinados pontos, principalmente junto aos taludes. Neste intervalo, também se nota a presença de partículas de poeira que são depositadas na hora do esvaziamento do canal; e) no intervalo dos 300 aos 375cm, as contra-marcas desaparecem, notando-se apenas algumas marcas junto aos taludes, além de umas pequenas marcas no centro do canal. Esta região apresenta nitidamente, um fundo mais plano, sem muitas deformações; f) nas regiões finais da calha, o depósito é nitidamente plano e; g) na saída da calha, na zona de alargamento do canal, nota-se apenas uma camada homogênea de material sem nenhuma alteração no fundo.

Para o terceiro ensaio (Figuras 5.26 e 5.27), observa-se que: a) nos primeiros 50cm não ocorreram depósitos significativos por se tratar de uma zona de desenvolvimento do fluxo; b) no intervalo de 50 a 150cm, tem-se uma zona de ondulações com espaçamento quase constante

notando-se um pequeno meandramento do fluxo da esquerda para a direita; c) após os 150cm até os 275cm, o espaçamento e a forma das ondulações foram se modificando, porém a variação do caminho preferencial continuou; d) dos 275cm aos 500cm este comportamento também se repetiu; e) dos 500 aos 600cm, o depósito se caracterizou por ser mais plano, porém, diferentemente dos demais, apresentou algumas marcas de fundo; f) com relação à saída da calha observa-se, um comportamento diferenciado daquele encontrado por outros ensaios, com quatro curvas de deposição. Devido a maior espessura dos depósitos nesta região, formou-se um leque deposicional. A tabela 5.16 resume as formas de fundo encontradas em cada trecho do canal.

Tabela 5.16: Formas de fundo dos depósitos

| | Depósito plano | Depósito com ondulações | Depósito plano |
|----------|----------------|------------------------------------|-------------------|
| Ensaio 1 | 0-50 | 50-100; 100-325 | 325 - 625 |
| Ensaio 2 | 0-150 | 150-325 | 325 - 625 |
| Ensaio 3 | - | 50-150; 150-350; 350-400 e 400-500 | 500 – 625 (leque) |

Pela tabela 5.16, notamos novamente a semelhança entre os dois primeiros ensaios, que apresentaram formas de leito parecidas. Estas formas são intimamente ligadas a velocidade da corrente. Como nos dois primeiros ensaios, as velocidades médias foram similares, era esperado o mesmo comportamento no depósito. No terceiro ensaio, as formas de fundo foram mais definidas, com ondulações mais visíveis. Os três ensaios apresentam uma tendência do modelo de cone deposicional de Bouma (1962), com uma região plana-paralela, uma região de ondulações, e novamente uma região plana.

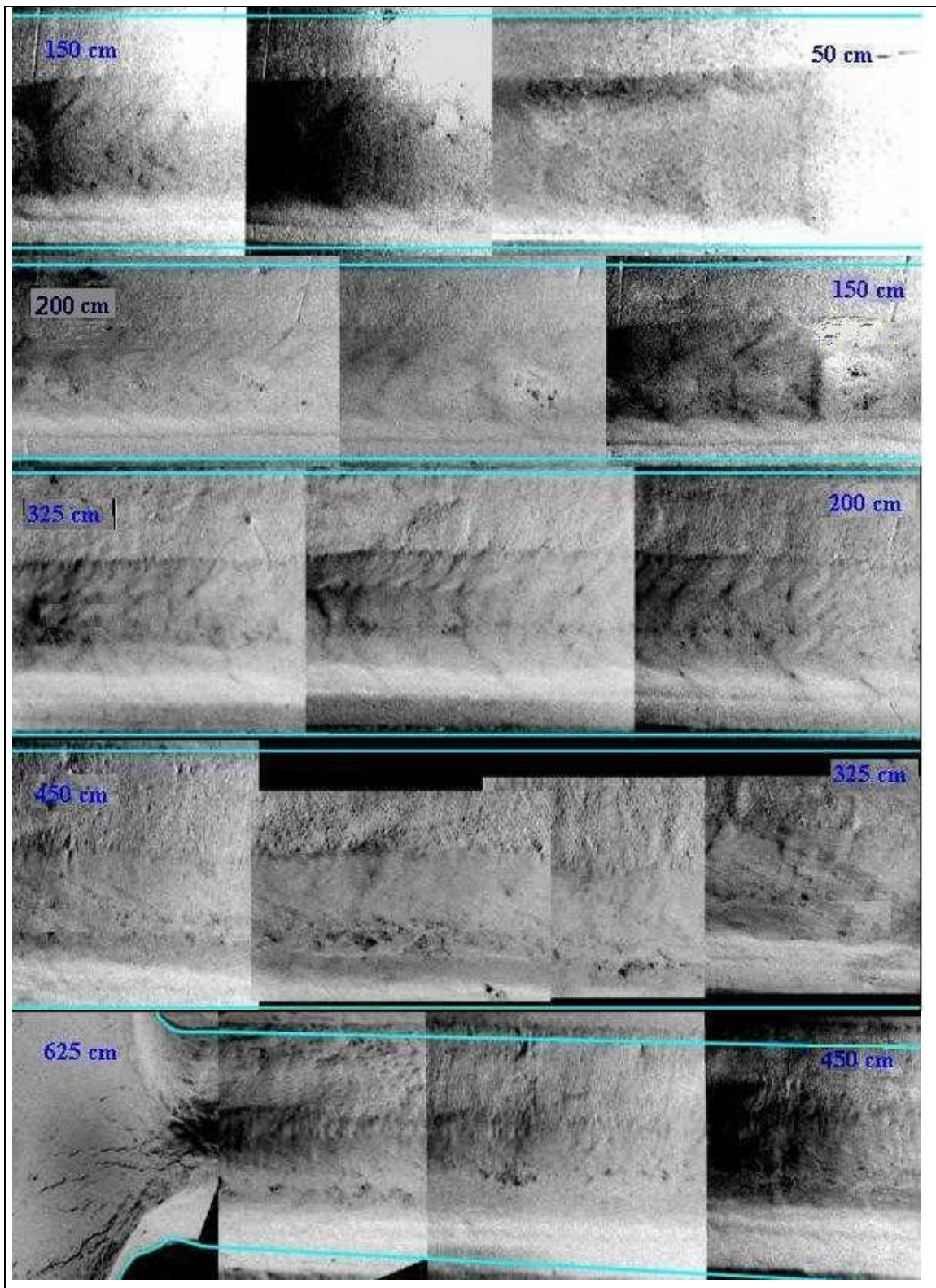


Figura 5.22: Vista dos depósitos ao longo do canal gerados pela passagem da corrente de densidade – Ensaio 1

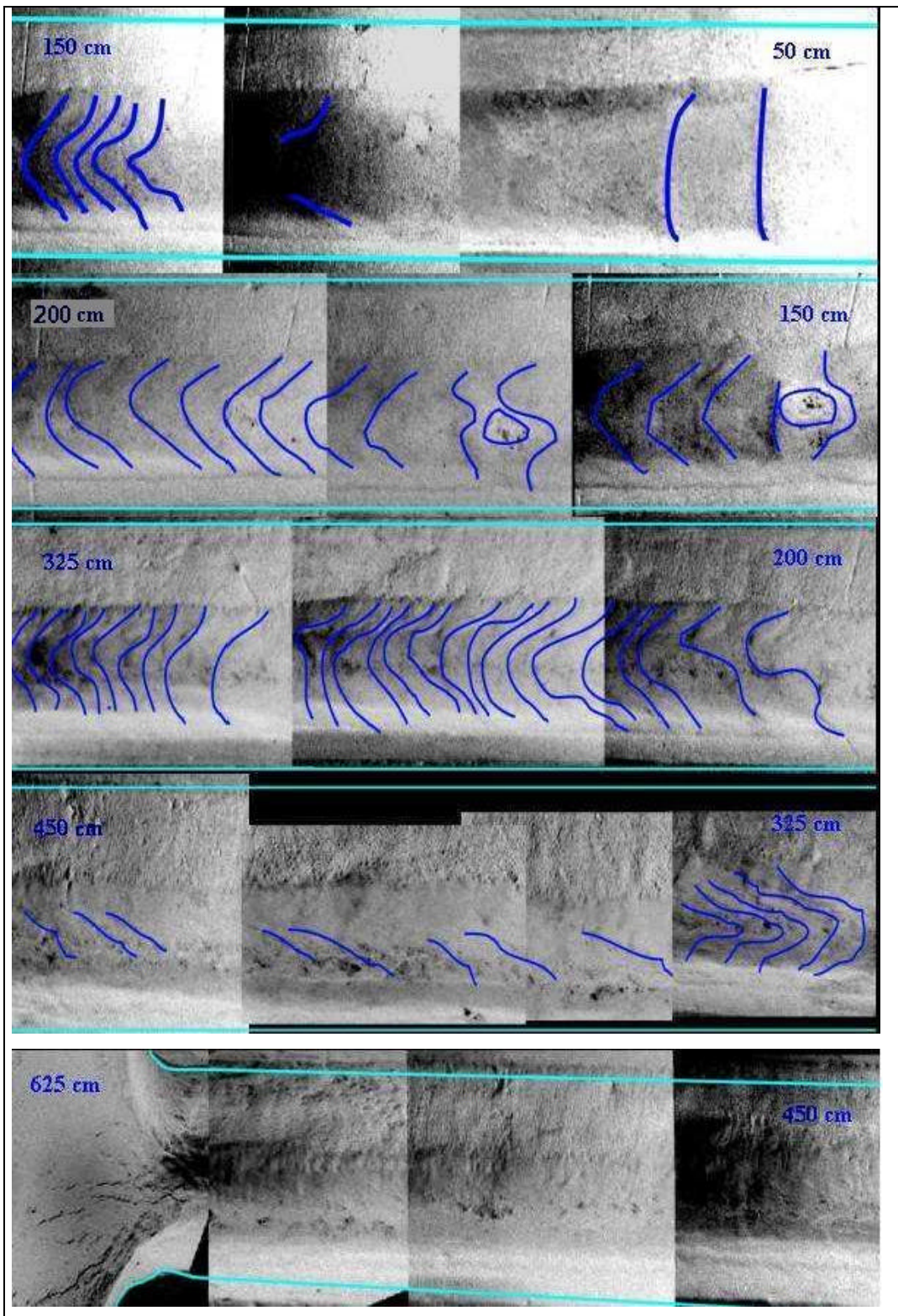


Figura 5.23: Interpretação dos depósitos ao longo do canal gerados pela passagem da corrente de densidade – Ensaio 1

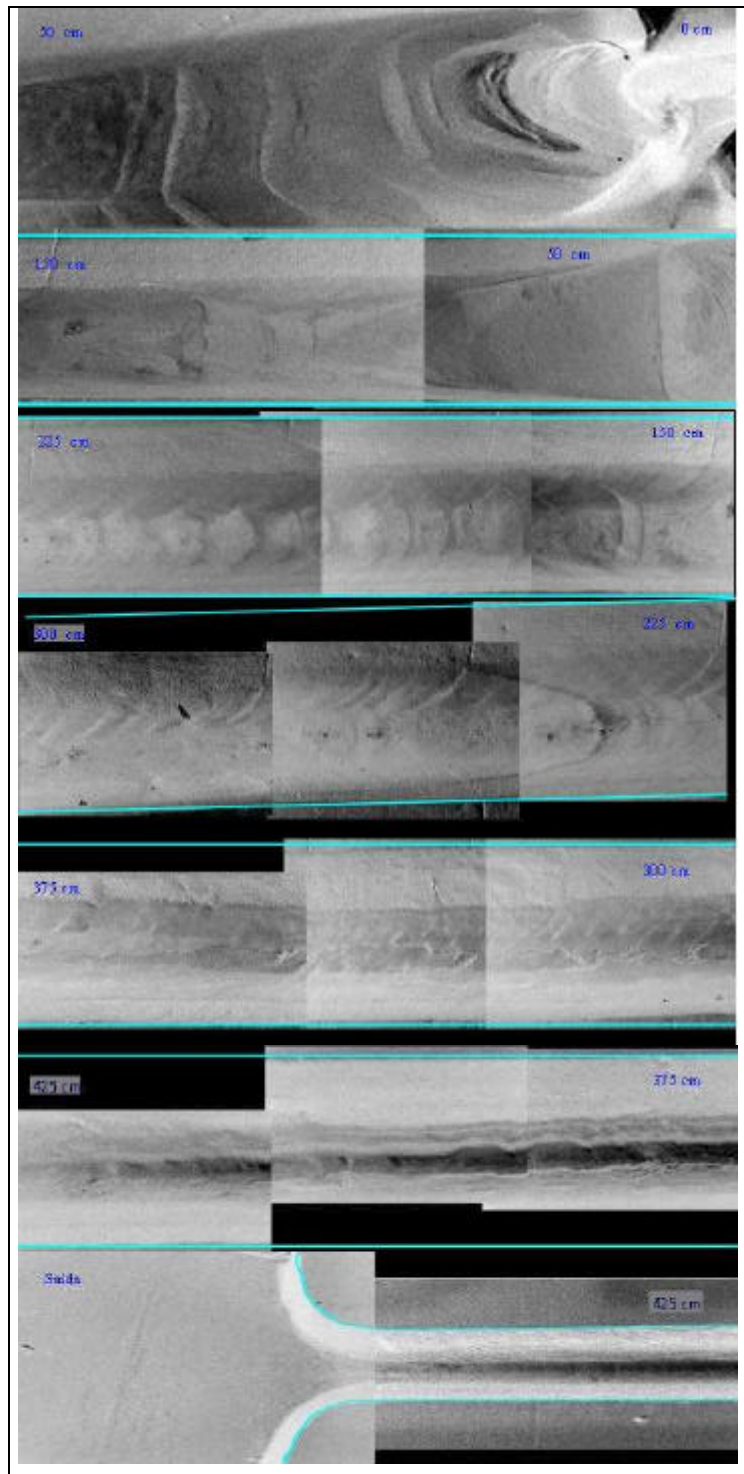


Figura 5.24: Vista dos depósitos ao longo do canal gerados pela passagem da corrente de densidade – Ensaio 2

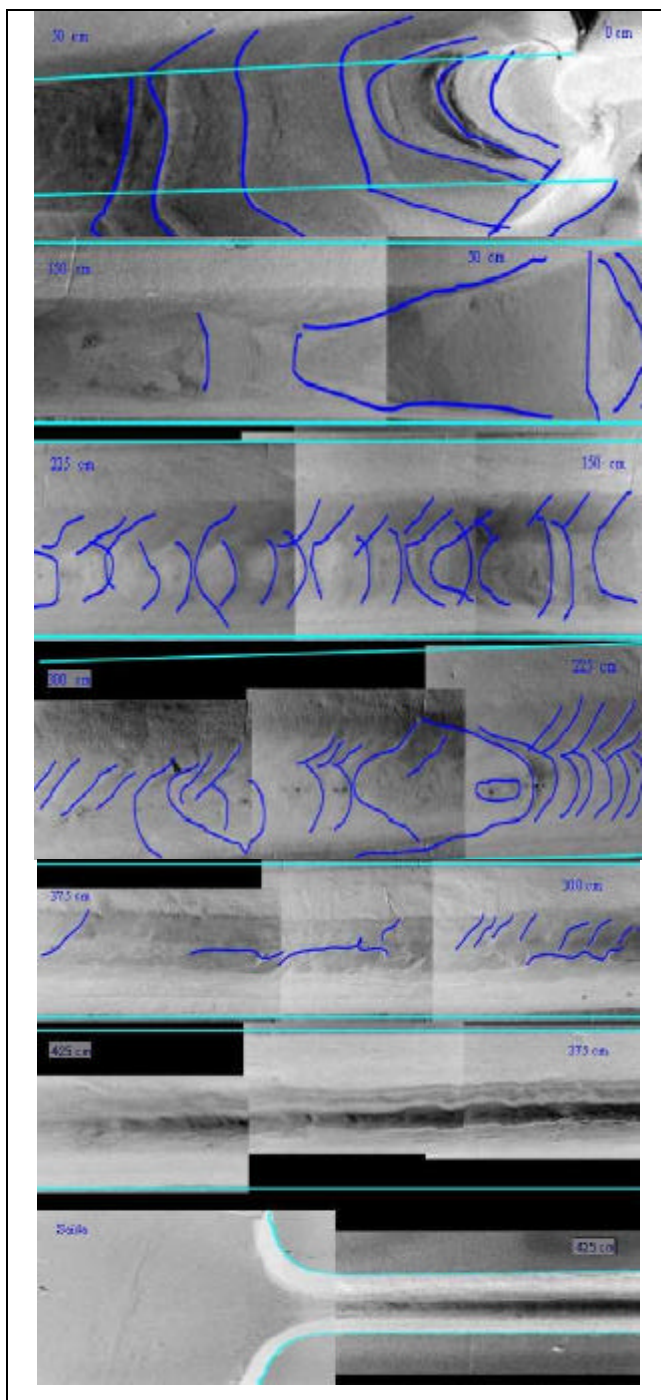


Figura 5.25: Interpretação dos depósitos ao longo do canal gerados pela passagem da corrente de densidade – Ensaio 2

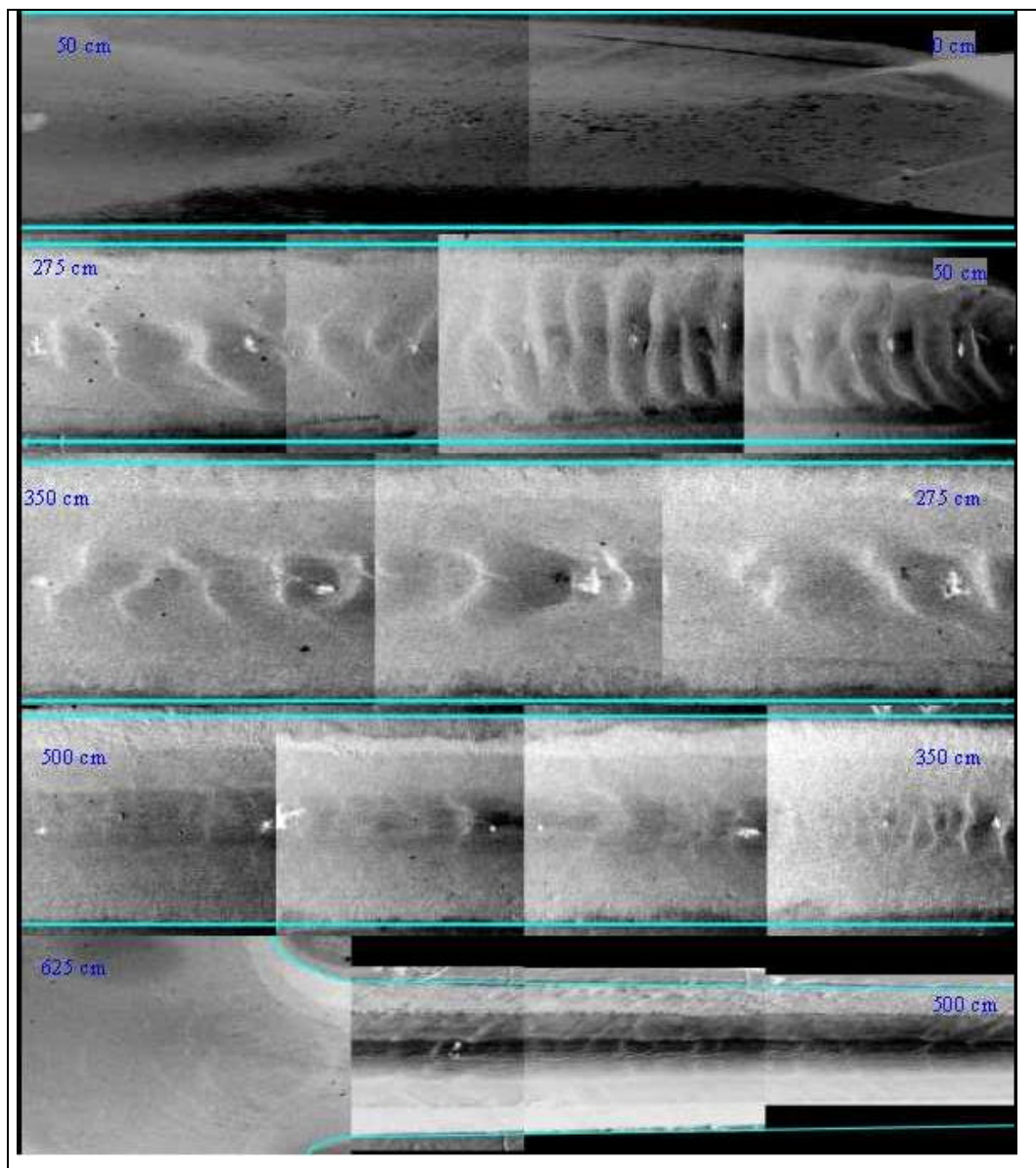


Figura 5.26: Vista dos depósitos ao longo do canal gerados pela passagem da corrente de densidade – Ensaio 3

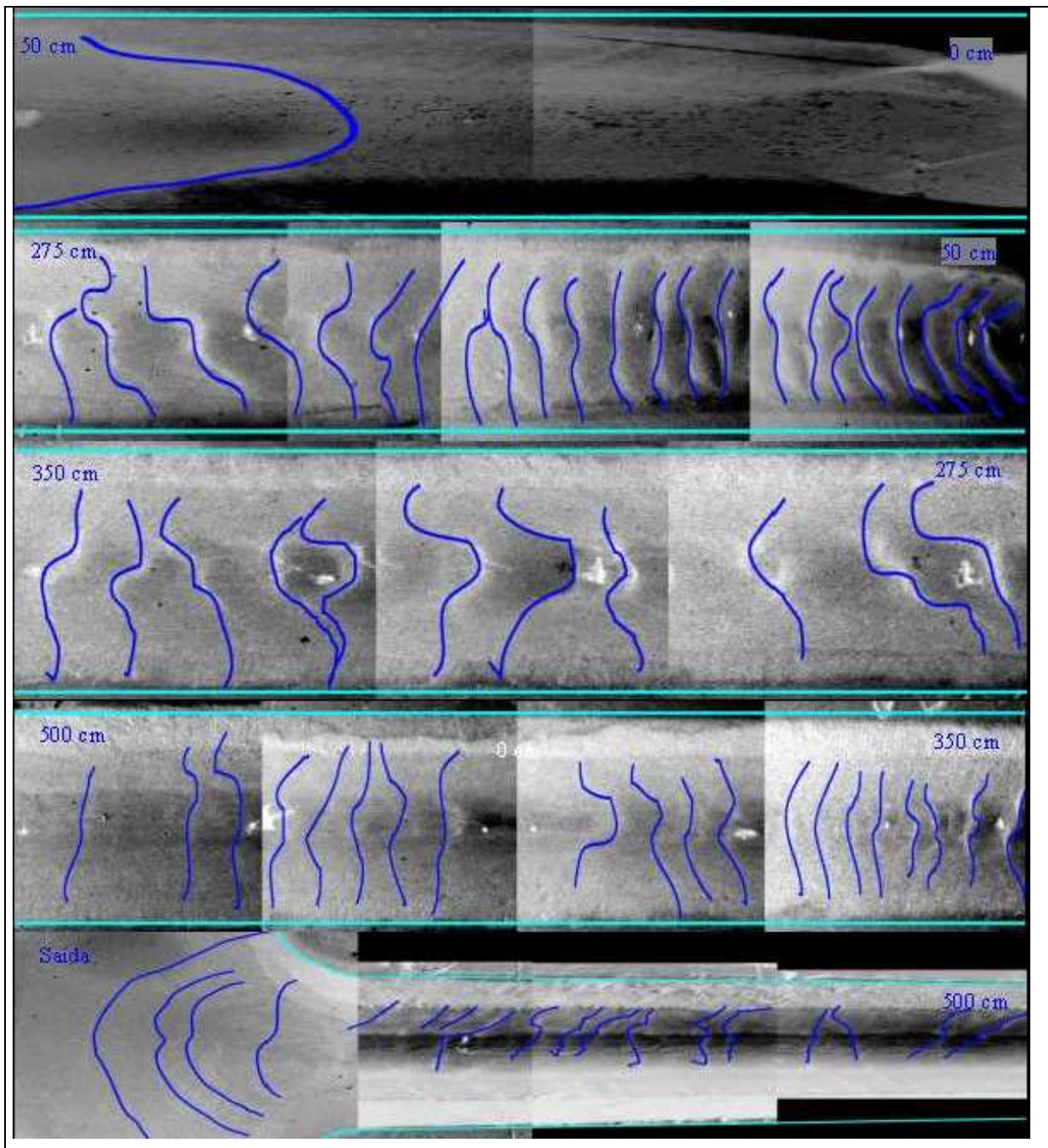


Figura 5.27: Interpretação dos depósitos ao longo do canal gerados pela passagem da corrente de densidade – Ensaio 3

5.3.3 Conclusões Parciais

Pode-se concluir nesta etapa que nos três ensaios não foi verificado uma mudança substancial no comportamento da velocidade da corrente após mudança da região confinada para

a região não confinada do canal. A tendência da velocidade manteve-se nesta região. O mesmo se dá na quebra de declividade (325cm), onde nos dois primeiros ensaios a velocidade seguiu o mesmo comportamento anterior à quebra, e, no terceiro ensaio, houve uma ligeira aceleração da corrente.

Nestes resultados, podemos observar que a vazão da corrente de densidade influencia na disposição dos grãos no canal, uma vez que com vazões baixas, os grãos não atingiram distâncias muito longas, ficando retido no início do canal. Já quando a vazão foi aumentada, a competência do escoamento em transportar os grãos aumentou, permitindo uma melhor distribuição ao longo do canal. No primeiro ensaio, como o volume era pequeno, a calha não chegou a transbordar, mas ficou acumulada uma quantidade razoável de sedimento nos primeiros centímetros do canal. No segundo ensaio que possuía a mesma vazão do ensaio 1, a deposição excessiva no início da calha prejudicou o andamento do fluxo. No terceiro, que tinha um grande volume, não ocorreu este problema, pois a vazão se encarregou de distribuir melhor os grãos.

Apesar da distribuição granulométrica inicial (material injetado) dos grãos apresentar uma composição mais homogênea entre a areia fina e areia muito fina, novamente predominou no depósito a fração mais fina, caracterizando que a baixa competência do fluxo em carregar as partículas maiores.

Nota-se que nos dois primeiros ensaios, onde a variável mantida constante foi a vazão injetada, a tendência do depósito para as três frações avaliadas foram muito similares independente das espessuras medidas. Situação diferente ocorre com o terceiro ensaio que apresenta um comportamento diferenciado para as frações areia fina e areia muito fina. Isso vem a contribuir para a hipótese de que a vazão controla o transporte dos grãos e, portanto, a variação da sua granulometria ao longo do canal, pois foi justamente esta variável alterada em cada ensaio realizado. Esses resultados de poucos ensaios são importantes, visto que a avaliação do tamanho de grãos e a distribuição das frações ao longo da distância podem ser perfeitamente realizadas na prática, através de testemunhos de sondagens, sísmicas, etc.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 QUANTO A SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A seleção e caracterização de materiais foi realizada de modo a identificar materiais, com características distintas entre si, capazes de simular as correntes de densidade não conservativas. Cinco materiais granulares com características distintas foram pré-selecionados para a simulação, são eles: carvão 205, carvão 207, calcário B, calcário C e areia quartzosa. Destes, dois foram descartados após a primeira fase do trabalho: o calcário B, por apresentar características muito similares ao calcário C e a areia quartzosa pela dificuldade de se obter frações mais finas.

Recomenda-se que para estudos futuros que novos materiais granulares sejam pré-selecionados e caracterizados e que a velocidade de queda dos materiais selecionados seja determinada experimentalmente.

6.2 QUANTO À IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA

6.2.1 Canal de pequeno porte

Através dos ensaios realizados estabeleceu-se a seguinte metodologia para as simulações:

- a preparação/separação dos materiais para o ensaio é fundamental para a qualidade da simulação;
- o registro que controla a entrada de materiais deve estar regulado a meia abertura;
- a presença do septo direcionador junto ao difusor não se faz necessário;
- a segunda alternativa de mistura no reservatório de alimentação, com um tampão colocado no início da região mais afilada do canal foi a mais adequada;
- a coleta padronizada dos depósitos facilitou a comparação de resultados;
- o registro dos ensaios com a utilização de duas vídeos-câmeras e o posterior tratamento de imagens, apresentou resultados satisfatórios para a análise das características da corrente.

6.2.2 Canal tridimensional de geometria simplificada.

Devido ao pequeno número de ensaios realizados neste canal não foi possível estabelecer uma metodologia mais detalhada como no canal de pequeno porte, porém pode-se recomendar:

- que o agitador eletromagnético, disposto dentro do reservatório de alimentação seja ligado, com uma certa antecedência do ensaio (~25 minutos) permitindo que a mistura fique totalmente homogênea.
- que sejam coletadas amostras após ou, se possível, durante o ensaio, para avaliarmos a variação de concentração ao longo do tempo, isto é, se as variações deste parâmetro são significativas e afetam o desenvolvimento da corrente de densidade.

O processo de peneiramento duplo do material e o processo de lavagem dos grãos demonstraram uma melhoria na qualidade do material que forma a mistura. Mesmo assim, durante os ensaios são encontradas frações mais finas, que conforme já comentado, provavelmente provêm de uma desagregação do grão.

6.3 QUANTO À METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Com relação as metodologias desenvolvidas para a avaliação dos resultados pode-se destacar que:

- tanto a análise qualitativa, através dos vídeos gerados quanto a análise quantitativa, efetuada através das coletas de amostras e da análise granulométrica dos depósitos formados, permitiram que fossem determinadas as faixas granulométricas adequadas, para cada material, na simulação de correntes de densidade não conservativas. Apenas a falta de uma padronização na coleta de amostras dos ensaios prejudicou um pouco a comparação entre resultados, não prejudicando porém, a análise em si;
- a utilização dos dados adquiridos através de video-camêra e tratamento das imagens, permitiu que fossem realizadas as análises sobre o comportamento dinâmico e geométrico da corrente. Aliado a isso, a metodologia aperfeiçoada de coleta e de análise granulométrica desenvolvida, facilitou a avaliação dos padrões de deposição das correntes;
- que a utilização do distanciômetro a laser para medir o volume dos depósitos não foi possível, uma vez que, após o tratamento dos dados e da aplicação da metodologia desenvolvida, as medidas não apresentaram valores coerentes.

- que as medidas pontuais da espessura do depósito apresentaram resultados satisfatórios.

Recomenda-se que seja realizada a calibração da metodologia do distanciômetro a laser para comprovar os seus resultados. E, também, para os futuros estudos, que as câmeras sejam fixadas em suportes e que sejam padronizados e demarcados os intervalos a serem fotografados.

6.4 QUANTO AOS RESULTADOS OBTIDOS

6.4.1 Tamanho de grão adequado a simulação de correntes de densidade não conservativas.

As faixas granulométricas mais adequadas para a formação da corrente de densidade não conservativa estão resumidas na tabela 6.1.

Tabela 6.1: Faixas granulométricas adequadas de cada material, para a simulação de correntes de densidade não conservativas.

| Material | Faixa Granulométrica (mm) |
|------------|---------------------------|
| Areia | 0,177 a 0,063 |
| Calcário B | 0,177 a 0,063 |
| Calcário C | 0,177 a 0,063 |
| Carvão 205 | 0,250 a 0,063 |
| Carvão 207 | 0,250 a 0,063 |

As simulações subseqüentes comprovaram que esta faixa de valores realmente é adequada à formação de correntes de densidade nas condições de instalações apresentadas, pois todas as correntes se propagaram e seus depósitos aconteceram ao longo de toda a extensão do canal, permitindo a obtenção de dados para análises futuras.

6.4.5 Quanto às características da corrente e a análise dos padrões de deposição

6.4.5.1 Canal pequeno porte

Quanto às características dinâmicas, as velocidades médias de avanço das correntes, indicaram uma correlação com a massa específica da mistura e com a densidade do material

utilizado. Pode-se dizer que a concentração da mistura, também, possui uma correlação com a velocidade de avanço, devido a sua dependência com a densidade do material.

Da análise das características geométricas da corrente, podemos notar que a altura da corrente varia inversamente com a massa específica da mesma, bem como com o tamanho do grão. Pode-se dizer, também, que há uma correlação inversa entre a velocidade do fluxo e a altura da cabeça.

Por sua vez para a altura do corpo notou-se um comportamento similar à altura da cabeça, apresentando, também, uma relação inversa com a massa específica da mistura. Para o tamanho dos grãos, os resultados apresentados não indicaram uma correlação forte.

As análises dos resultados, avaliadas sob o ponto de vista da distância percorrida pela corrente, indicam um padrão de deposição variável tanto sob o aspecto quantitativo, quanto qualitativo. Quantitativamente, através dos resultados das curvas de distribuição de volume do depósito ao longo do comprimento, nota-se uma tendência de volumes de depósito diminuindo similares a uma tendência de curva exponencial, com grandes quantidades nas regiões mais próximas à fonte e reduzindo drasticamente nas regiões mais distantes dela. Qualitativamente, estes depósitos foram avaliados através da distribuição dos tamanhos dos grãos presentes nestas zonas.

Independente das características particulares de cada um dos ensaios, podemos notar que as frações maiores (correspondentes a areia fina) ficam retidas nas zonas mais proximais do canal (até 50cm), as frações intermediárias (correspondentes a areia muito fina) conseguem atingir distâncias um pouco mais longas (150cm) e com os grãos mais finos chegam até as regiões mais distais do canal (150-250cm).

6.4.5.2 Canal tridimensional de geometria simplificada

Avaliando as condições de entrada dos ensaios, ou seja, a influência da vazão e volume, correlacionando-as com as medidas realizadas, pode-se notar que a velocidade de avanço, as espessuras, as formas de fundo e a distribuição granulométrica do material estão mais intimamente ligadas à vazão de entrada do que ao volume total, sendo então a vazão a maior responsável pela diferenciação de comportamentos e formas.

Considerando as características dinâmicas da corrente, ou seja, a velocidade de avanço da cabeça, notou-se um comportamento geral tendendo a um decaimento linear com algumas oscilações de velocidades em torno de um valor médio. Essas oscilações podem estar atreladas ao

desprendimento de vórtices atrás da cabeça, ou ainda, a perturbações internas na frente da corrente, provocados pela turbulência do escoamento. Não foram notadas modificações significativas nos valores da velocidade da cabeça, nas regiões de quebra de declividade e na saída da calha, onde o fluxo se torna não confinado. Cabe salientar que a discretização da velocidade foi realizada de 25 em 25cm e alguma modificação pode não ter sido detectada.

Notou-se que o aumento da vazão em 2,5 vezes causou um aumento da velocidade média do fluxo em 1,6 vezes. Novos ensaios devem ser realizados para indicar se esta relação de aumento se mantém ou não.

Analisando o padrão de deposição formado pela simulação das correntes, nota-se que, em relação às quantidades expressas pela espessura da corrente, temos um decrescimento tendendo a uma exponencial, isto é, com grandes quantidades de material acumulado nas regiões mais proximais do canal. Isto foi notado nos três ensaios, independente do volume de material utilizado. A influência do volume, nesse caso, pode ser notada no terceiro ensaio, que apresentou a mesma tendência em forma exponencial, porém, com quantidades de material de depósito maior, em torno de quatro vezes a espessura dos outros ensaios. Já qualitativamente, ou seja, através da análise da distribuição granulométrica ao longo da distância, notou-se que a vazão influencia o comportamento dos grãos. Com baixas vazões, a fração areia fina, tende a se depositar nas regiões mais proximais do canal, enquanto que para a fração areia muito fina, o comportamento é diferente, apresentando uma maior concentração de grãos nas zonas intermediárias do canal. Já a fração silte, começa a predominar apenas nos trechos mais distais do canal. Com o aumento da vazão a fração areia fina tem maior capacidade de se manter mais no fluxo, chegando a distâncias maiores, o mesmo ocorrendo para as outras frações.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, J.; MORRIS, S. 1994. Observation on experimental, nonchannelized, high-concentration turbidity currents and variations in deposits around obstacles. Journal of Sedimentary Research, Tulsa, v. A64, n. 4, p.899-909.
- ALTINAKAR, M. S.; GRAF, W. H.; HOPFINGER, E. J. 1996. Flow structure in turbidity currents. Journal of Hydraulic Research, Delft, v. 34 p.713-718.
- BAGNOLD, R. A. 1962. Auto-suspension of transported sediment: turbidity currents. Proceedings of the Royal Society of London, London, n. 265, p. 315-319.
- BARBOSA, A. A. 1998. Correntes de densidade em reservatórios. 250p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade de São Carlos, São Paulo.
- BONNECAZE, R. T.; HUPPERT, H. E.; LISTER, J. R. 1993. Particle-driven gravity currents. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, v. 250, p. 339-369.
- BOUMA, A. H. 1962. Sedimentology of some flysch deposits: a graphic approach to facies interpretation. Amsterdam: Elsevier; 168p.
- BRITTER, R. E.; LINDEN, P. F. 1980. The motion of the front of a gravity current travelling down a incline. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, v.99, pt 3, p. 531-543.
- BRITTER, R. E.; SIMPSON, E. J. 1978. Experiments on the dynamics of a gravity current head. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, v.88, p.223-240.
- BRUHN, C. H. L. 1998. Deep-water reservoirs from the eastern Brazilian rift and passive margin basins. In: AAPG International Conference & Exhibition, 1998, Rio de Janeiro. Extended abstracts. Rio e Janeiro: Exxon Exploration. pt. 2. 187p.
- BURSIK, M. I.; WOODS, A. W. 2000. The effects of topography on sedimentation from particle-laden turbulent density currents. Journal of Sedimentary Research, Tulsa, v.70, n. 1, p. 53-63.
- ELISSON, T.H.; TURNER, J. S. 1959. Turbulent entrainment in stratified flows. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, v.6, p.423-448.
- FABIAN, S. 2002. Modelagem física de correntes de densidade em canal bidimensional de declividade variável. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

- FISCHER, R. V. 1983. Flow transformations in sediment gravity flows. Geology, Boulder, v.11, p.273-274.
- GARCIA, M. 1994. Depositional turbidity currents laden with poorly sorted sediment. Journal of Hydraulic Engineering, New York, v.120, n. 11, p. 1240-1263.
- GARCIA, M.; PARKER, G. 1989. Experiments on hydraulic jumps in turbidity currents near a canyon-fan transition. Science, Washington, v. 245, n. C₃, p. 393-396.
- GARCIA, M.; PARKER, G. 1993. Experiments on entrainment of sediment into suspension by a dense bottom current. Journal of Geophysical Research, v. 98, n.C₃, p. 4793-4807.
- HUPPERT, H. E.; SIMPSON, J. E. 1980. The slumping of gravity currents. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, v.99, pt 4, p. 785-799.
- KNELLER, B. 1995. Beyond the turbidite paradigm: physical models for deposition of turbidites and their implications for reservoir prediction. In: Characterization of deep marine clastic systems. London: The Geological Society Special Publication, p. 31-49. (Geological Society Special Publication, n. 94).
- KNELLER, B.; BUCKEE, C. 2000. The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological implications. Sedimentology, Oxford, v.47, Suppl. 1, p. 62-94.
- KUENEN, P. H. 1951. Properties of turbidity currents of high density. Tulsa: Society of Economic Palaeontologists 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.
- LEE, H. Y. e YU, W. S. 1997. Experimental study of reservoir turbidity current. Journal of Hydraulic Engineering, New York, v.123, n. 6, p. 520-529.
- 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.
- LUTHI, S. 1981. Experiments on non-channelized turbidity currents and theirs deposits. Marine Geology, Amsterdam. V.40, p. M₅₉-M₆₈.
- MIDDLETON, G. V. 1966a. Experiments on density and turbidity currents I. Motion of the head. Canadian Journal of Earth Sciences, Ottawa, v.3, p. 523-546.

- MIDDLETON, G. V. 1966b. Small-scale models of turbidity currents and the criterion for auto-suspension. Journal of Sedimentary Petrology, Tulsa, v.36, n.1, p. 202-208.
- MIDDLETON, G. V. 1970. Experimental studies related to problems of flysch sedimentation. In: Flysch Sedimentology in North America. Lajoie. p. 253-272 (Geological Association of Canada Special Paper, 7).
- MIDDLETON, G. V. 1993,. Sediment deposition from turbidity currents. Annual Review of Earth Planet Science, Palo Alto, v.21, p. 89-114.
- MIDDLETON, G. V.; HAMPTON, M. A. 1976. Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity flows. In: Marine Sediment Transport and Environmental Management. New York, Wiley, p. 197-218.
- MIDDLETON, G. V.; NEAL, W. J. 1989. Experiments on the thickness of beds deposited by turbidity currents. Journal of Sedimentary Petrology, Tulsa, v.59, n.2 , p. 297-307.
- MIDDLETON, G. V.; SOUTHARD, J. B. 1984. Mechanics of sediment transport. 2ed. Tulsa: Society of economic Palaeontologists and Mineralogists 401p. (SEPM Short Course, v.3).
- MOTTA, V. F. 1972. Curso de Teoria da Semelhança. Porto Alegre, Ed. URGs. 154p.
- MULDER, T.; ALEXANDER, J. 2001. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. Sedimentology, Oxford, v.48, p. 269-299.
- MULDER, T.; SAVOYE, B.; SYVISTSKI, J. P. M. 1997. Numerical modelling of a mid-sized gravity-flow: The 1979 Nice turbidity current (dynamics, processes, sediment budget and seafloor impact). Sedimentology, Oxford, v.44, p. 305-326.
- MUTTI, E.; TINTERRI, R.; REMANCHA, E.; MAVILLA, N. ANGELLA, S.; FAVAL, L. 1999. An introduction to the analysis of ancient turbidite basins from an outcrop perspective. Tulsa: AAPG 86p. (AAPG Course Notes, 39).
- PARKER, G.; FUKUSHIMA, Y. 1987. Experiments on turbidity currents over an erodible bed. Journal of Hydraulic Research, Delft, v. 171, p. 145-181.
- RIMOLDI, B.; ALEXANDER, J.; MORRIS, S. 1996. Experimental turbidity currents entering density-stratified water: analogues for turbidites in Mediterranean hypersaline basins. Sedimentology; Oxford, v.43, p. 527-540.

- SHANMUGAM, G. 1997. The Bouma sequence and the turbidite mind set. Earth Science Reviews, Amsterdam, v.42. p.201-229.
- SHANMUGAM, G. 2000. 50 years of the turbidite paradigm 1950s-1990s. Deep-water processes and facies models: a critical perspective. Marine and Petroleum Geology, Guilford, v.17. p.285-342.
- SIMPSON, E. J. 1972. Effects of the lower boundary on the head of a gravity current. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, v.53, p.759-768.
- SIMPSON, E. J. 1997. Gravity currents in the environment and the laboratory. 2.ed. Cambridge University, 244p.
- SIMPSON, E. J.; BRITTER, R. E. 1979. The dynamics of the head of a gravity current advancing over a horizontal surface. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, v.94, p.447-495.
- STOW, D. A. V.; MAYALL, M. 2000. Deep-water sedimentary systems: New models for the 21st Century. Marine and Petroleum Geology, Guilford, v. 17; p. 125-135.
- STOW, D. A. V.; READING, H. G.; COLLINSON, J. D. 1996. Deep seas. In Reading, H. G. (Ed.) Sedimentary Environments 3.ed. Oxford, Blackwell Science. p. 395-454.
- ZENG, J. e LOWE, R. D. 1997. Numerical simulation of turbidity currents flow and sedimentation: I. Theory. Sedimentology, Oxford, v.44, p.67-84.
- ZENG, J.; LOWE, R. D.; PRIOR, D. B.; WISEMAN JR, W. J.; BORNHOLD, B. D. 1991. Flow properties of turbidity currents in Bute Inlet, British Columbia. Sedimentology, Oxford, v.38, p.975-996.

ANEXOS

ANEXOS A: CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE DISTÂNCIA A LASER.

Um dos processos de medição de resultados nos ensaio, no canal tridimensional de geometria simplificada é a leitura de espessuras dos depósitos formados. Empregou-se o distanciômetro laser, juntamente com uma mesa de coordenadas automatizada. Esta mesa possui um sistemas de eixos (X e Y) que permite a leitura de uma determinada área. Esses eixos possuíam motores que permitiam a sua rotação. Além disso, há uma haste na vertical fixa, onde é acoplado a cabeça MD250 ADV do medidor a laser e que pode ser regulada em diversas alturas, dependendo da precisão desejada na leitura (esta haste é deslocada através dos eixos automatizados).

Esse sistema de varredura, que permite a aquisição das informações do medidor a laser, é controlado por uma placa digital microprocessada com entradas e saídas analógicas e digitais. Esta placa é responsável pelas configurações de entrada e pelo comando dos movimento nos dois eixos bem como e monitora as posições finais e críticas do equipamento.

A configuração da placa microprocessada, com relação às distâncias percorridas pela haste vertical tanto na direção X quanto na direção Y, é dada em passo de tempo e não numa unidade de comprimento.

Placa Digital Microprocessada

A placa digital microprocessada (Figura 4.8b) possui os seguintes comandos (Tabela A.1) no seu display:

A placa pode ser programada para funcionar de forma contínua ou discreta, ou seja, se a leitura será pontual ou contínua ao longo de uma determinada distância. Deve-se programar, além do modo de operação, o número de linhas e colunas da varredura, além do tempo de estabilização dos sensores, se houver.

Tabela A.1: Funções dos comandos da placa microprocessada

| Botão | Função |
|-------|--|
| 1 | Inicia a aquisição de dados |
| 2 | Transfere os dados armazenados nas leituras |
| 3 | Ajusta a posição da haste nas direções (\leftarrow , \rightarrow , \uparrow , \downarrow) sem fazer a aquisição de dados. |
| 4 | Configura o tempo de estabilização da leitura – Só serve para o modo discreto de leitura |
| 5 | Configura as distâncias percorridas, através da entrada do seguintes dados: - Número de Linhas (Coord. Y): - Passo de tempo da Linha: - Número de Colunas(Coord. X): - Passo de tempo da Coluna: |
| 6 | Modo de Leitura: 1- Contínuo 2- Discreto |

Processo de Leitura:

O sistema de leituras, nas coordenadas X e Y, se dava como segue (Figura A.1)

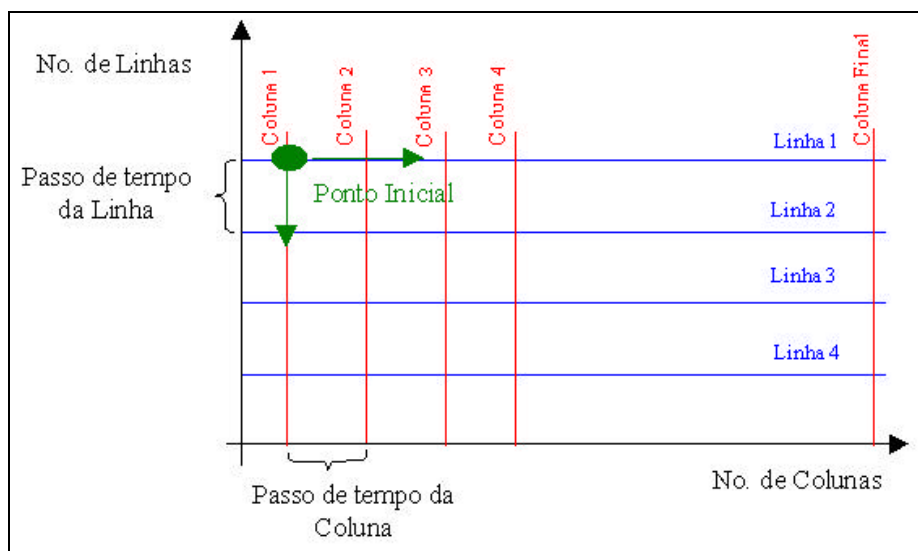


Figura A.1: Esquema de leitura do sistema Laser/Mesa/Placa Microprocessada.

Após a localização da haste com a cabeça de leitura MD250 ADV, no ponto inicial era programado o número de linhas, o número de colunas, o passo de tempo da linha e o passo de tempo da coluna. Após apertar o botão 1 (início da aquisição) a haste se movimentava para a direita, sobre a linha 1 e cada coluna que a cabeça passava, sobre essa linha, era medida e registrada uma leitura. Quando a haste chegava no final das colunas programadas (coluna final), ela voltava pelo mesmo caminho até o início, passando então, para a linha 2. Esse processo se repetia até atingir o número de linhas programado inicialmente. Quando a leitura é realizada em modo contínuo, o passo de linha da coluna é o mínimo, ou seja, “001”. Desse modo, são medidos os pontos ao longo de toda a linha que a cabeça está percorrendo, sem interrupções e o número de dados corresponde ao número de colunas programado inicialmente.

Após a aquisição dos dados (num máximo de 16000), esses eram descarregados qualquer computador através das saídas analógicas, com a utilização do botão 2 (transferência de dados).

Calibração:

Para facilitar o trabalho dos operadores foi realizada uma calibração de distâncias percorridas, nas duas direções, que transforma os valores de passo de tempo, em distâncias em centímetros. Primeiro, foram calibradas as distâncias percorridas no sentido das colunas. Como neste trabalho só foram realizadas leituras em modo contínuo, o passo de tempo da coluna é sempre 001. A distância percorrida nesse sentido é, então, medida através do número de colunas programadas inicialmente. Assim, foram programados diversas corridas com diversos número de colunas. Em cada uma delas, era medida a distância percorrida em centímetros com auxílio de uma trena. A tabela A.2 exprime os resultados encontrados.

Com os dados da tabela A.2, foi plotado um gráfico (Figura A.2) onde o número de colunas de leitura é relacionado com a distância percorrida. Ajustando uma lei de variação entre essas duas variáveis encontra-se, com um coeficiente de correlação de 0,999, a equação:

Tabela A.2: Distância percorrida pela cabeça MD250 ADVem função do números de colunas.

| Coluna | Distância (cm) |
|--------|----------------|
| 30 | 2,4 |
| 100 | 7,8 |
| 200 | 15,9 |
| 300 | 24,2 |
| 400 | 32,6 |
| 500 | 40,4 |
| 600 | 48,3 |
| 700 | 56,2 |

$$Dist_{Colunas} = 0,08071 \cdot NoColunas - 0,07696 \quad (A. 1)$$

Onde:

$Dist_{Colunas}$ = Distância percorrida no sentido das colunas (cm).

$NoColunas$ = Número de colunas programadas.

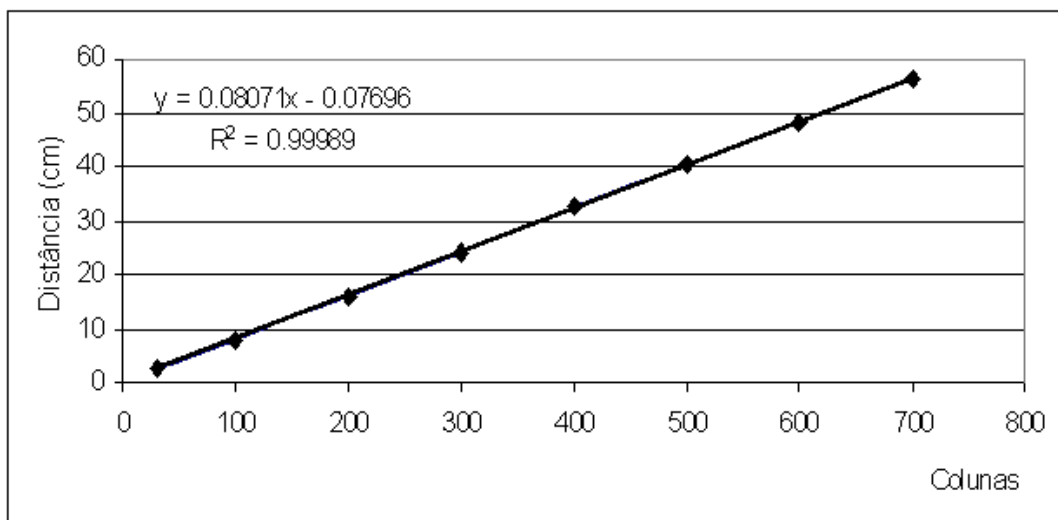


Figura A.2: Regressão linear da calibração colunas.

Já para a conversão do passo de tempo da linha é diferente, sendo realizados dois procedimentos de calibração. Primeiro procedimento consiste na medição para uma linha da distância percorrida pela cabeça de leitura em diferentes passos de tempo de linha e foram medidas as distâncias percorridas (Tabela A.3).

Tabela A.3: Distância percorrida pela cabeça MD250 ADV em função do números de linhas.

| Passo de tempo da Linha | Distância (cm) |
|-------------------------|----------------|
| 10 | 0,74 |
| 20 | 1,49 |
| 30 | 2,22 |
| 40 | 3,04 |

Com os dados da tabela A.3, foi plotado um gráfico (Figura A.3) e realizado uma regressão linear com, novamente, um coeficiente de correlação de 0,999. A equação encontrada foi:

$$Dist_{Linhas} = 0,0763 \cdot PassoLinha - 0,035 \quad (A. 2)$$

$Dist_{Linhas}$ = Distância percorrida no sentido das linhas (cm).

$PassoLinha$ = Passo de tempo da Linha.

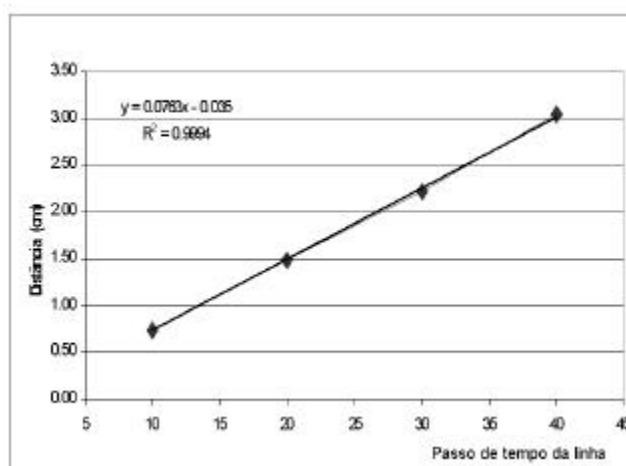


Figura A.3: Curva de calibração da linhas (Coord. Y)

A equação A.2 é válida para uma linha apenas. Quando se deseja obter o valor da distância percorrida para mais de uma linha é só multiplicar o número de linhas pelo valor dado pela equação A.2. Para facilitar a operação do sistema, foi construída a tabela A.4 que mostra a distância percorrida pela haste no sentido da linha em função do número de linhas e do passo utilizado.

Nesta tabela, os valores estão em centímetros. Os intervalos que não apresentam valores para as distâncias correspondem aos limites físicos da mesa de coordenadas automatizada, a qual possui uma área de varredura da ordem dos 1000cm².

No canto inferior direito da tabela estão os valores da calibração da coluna. Isso foi realizado para que seja transportado junto aos equipamentos, permitindo que o usuário defina no local as configurações de entrada do sistema de leitura e aquisição das espessuras do depósito.

Para ilustrar a utilização da tabela A.4, consideramos que o usuário escolha a seguinte configuração:

Nº de linhas: 005

Passo da linha: 030

Nº de colunas: 100

Passo da coluna: 001 (modo contínuo)

A área de varredura o sistema de medidas será: $11.27 \times 7.99 = 90,04\text{cm}^2$.

Tabela A.4: Distâncias percorridas (cm) pela cabeça MD250 ADVno sentido das linhas.

| Linha\Passo | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 33 | 40 | 50 | 60 | 70 |
|--------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|--------------|
| 1 | 0,35 | 0,73 | 1,11 | 1,49 | 1,87 | 2,25 | 2,48 | 3,02 | 3,78 | 4,54 | 5,31 |
| 3 | 1,04 | 2,18 | 3,33 | 4,47 | 5,62 | 6,76 | 7,45 | 9,05 | 11,34 | 13,63 | 15,92 |
| 5 | 1,73 | 3,64 | 5,55 | 7,46 | 9,36 | 11,27 | 12,41 | 15,09 | 18,90 | 22,72 | 26,53 |
| 7 | 2,43 | 5,10 | 7,77 | 10,44 | 13,11 | 15,78 | 17,38 | 21,12 | 26,46 | 31,80 | 37,14 |
| 9 | 3,12 | 6,55 | 9,99 | 13,42 | 16,85 | 20,29 | 22,35 | 27,15 | 34,02 | 40,89 | 47,75 |
| 10 | 3,47 | 7,28 | 11,10 | 14,91 | 18,73 | 22,54 | 24,83 | 30,17 | 37,80 | 45,43 | - |
| 13 | 4,50 | 9,46 | 14,42 | 19,38 | 24,34 | 29,30 | 32,28 | 39,22 | 49,14 | - | - |
| 15 | 5,20 | 10,92 | 16,64 | 22,37 | 28,09 | 33,81 | 37,24 | 45,26 | - | - | - |
| 17 | 5,89 | 12,38 | 18,86 | 25,35 | 31,83 | 38,32 | 42,21 | - | - | Colunas | Dist, |
| 19 | 6,58 | 13,83 | 21,08 | 28,33 | 35,58 | 42,83 | 47,18 | - | - | 1 | 0,00 |
| 20 | 6,93 | 14,56 | 22,19 | 29,82 | 37,45 | 45,08 | 49,66 | - | - | 30 | 2,34 |
| 22 | 7,62 | 16,02 | 24,41 | 32,80 | 41,20 | 49,59 | - | - | - | 60 | 4,77 |
| 23 | 7,97 | 16,74 | 25,52 | 34,29 | 43,07 | - | - | - | - | 90 | 7,19 |
| 24 | 8,32 | 17,47 | 26,63 | 35,78 | 44,94 | - | - | - | - | 100 | 7,99 |
| 25 | 8,66 | 18,20 | 27,74 | 37,28 | 46,81 | - | - | - | - | 150 | 12,03 |
| 30 | 10,40 | 21,84 | 33,29 | 44,73 | - | - | - | - | - | 200 | 16,07 |
| 35 | 12,13 | 25,48 | 38,83 | - | - | - | - | - | - | 250 | 20,10 |
| 40 | 13,86 | 29,12 | 44,38 | - | - | - | - | - | - | 300 | 24,14 |
| 45 | 15,59 | 32,76 | 49,93 | - | - | - | - | - | - | 350 | 28,17 |
| 50 | 17,33 | 36,40 | - | - | - | - | - | - | - | 400 | 32,21 |
| 55 | 19,06 | 40,04 | - | - | - | - | - | - | - | 450 | 36,24 |
| 60 | 20,79 | 43,68 | - | - | - | - | - | - | - | 500 | 40,28 |
| 65 | 22,52 | 47,32 | - | - | - | - | - | - | - | 550 | 44,31 |
| 70 | 24,26 | 50,96 | - | - | - | - | - | - | - | 600 | 48,35 |
| 75 | 25,99 | 54,60 | - | - | - | - | - | - | - | 650 | 52,38 |
| 80 | 27,72 | 58,24 | - | - | - | - | - | - | - | 700 | 56,42 |
| 85 | 29,45 | 61,88 | - | - | - | - | - | - | - | 750 | 60,46 |

ANEXO B: PROGRAMA CC – CONVERTOR DE COORDENADAS

Após a aquisição das leituras, realizadas pelo medidor de distância a laser e armazenadas na placa digital microprocessada, os valores eram transferidos para um computador através das saídas analógicas. Para isso era utilizado um programa computacional específico, chamado “L1”, que possibilitava a comunicação entre a placa e um computador qualquer, o qual criava um arquivo, em formato ASCII, com os seguintes resultados (Figura B.1)

```
Linhas / Passo : 015 / 040
Colunas / Passo : 600 / 001

000 000 189.2
000 001 189.5
000 002 190.1
000 003 190.1
000 004 189.8
000 005 189.8
000 006 189.8
. . .
. . .
. . .
000 597 186.7
000 598 186.7
000 599 186.7
001 000 189.8
001 001 190.1
001 002 190.4
001 003 190.1
001 004 190.1
```

Figura B.1: Resultado da transferência de dados

Nas primeira linhas, estão indicadas as configurações de entrada. Com relação as três colunas de resultados: a primeira corresponde ao número da linha que foi realizada a leitura

(coord Y); a segunda representa a coluna (coord X) que foi medida e a terceira indica a distância do ponto visado pela cabeça do laser (cota, em mm).

O programa CC- Conversor de Coordenadas foi desenvolvido para transformar esse arquivo ASCII num arquivo em formato de planilha eletrônica, no seguinte formato (Figura B.2)

| | | |
|---------|--------|------|
| 0.0000 | 0.0000 | 0.00 |
| 0.0038 | 0.0000 | 0.03 |
| 0.0845 | 0.0000 | 0.03 |
| 0.1652 | 0.0000 | 0.06 |
| 0.2459 | 0.0000 | 0.03 |
| . | . | . |
| . | . | . |
| . | . | . |
| 441.521 | 0.0000 | 2.08 |
| 442.328 | 0.0000 | 2.08 |
| 443.135 | 0.0000 | 2.11 |
| 0.0000 | 24.829 | 0.03 |
| 0.0038 | 24.829 | 0.06 |
| 0.0845 | 24.829 | 0.06 |

Figura B.2: Arquivo de resultado utilizando o programa CC.

Neste arquivo, a primeira coluna corresponde a coordenada X (colunas) a segunda coluna corresponde a coordenada Y (linha) e a terceira coluna corresponde a cota medida (Coord Z). O primeiro ponto de leitura é tomado de referência, assim todos os pontos estão relacionados a ele.

O Programa:

O programa CC – Conversor de Coordenadas, foi desenvolvido na linguagem de programação em Visual Basic 5.0. Ele utiliza uma rotina simples de cálculo numa interface gráfica que permite a transformação do arquivo gerado em ASCII em arquivo em formato (.txt, ou .xls).

O programa possui uma tela de apresentação (Figura B.3), com as informações do programa e com as teclas de entrar ou sair do programa.



Figura B.3: Tela de apresentação do programa

Ao clicar na tecla “entrar”, abre a tela principal do programa (Figura B.4). Os dados de entrada são o passo de tempo da linha que foi utilizado (*Passo da Linha*), o nome do arquivo gerado no programa L1 (*Nome do Arquivo para a conversão*). O resultado do CC é um arquivo em que o usuário determina o nome e a extensão a ser utilizada (*Nome do Arquivo de Saída*). Ao clicar a tecla “Abrir”, o programa executa a sua rotina e gera o arquivo no diretório definido pelo usuário. Automaticamente, ele volta à tela de apresentação para a realização de uma novo procedimento.

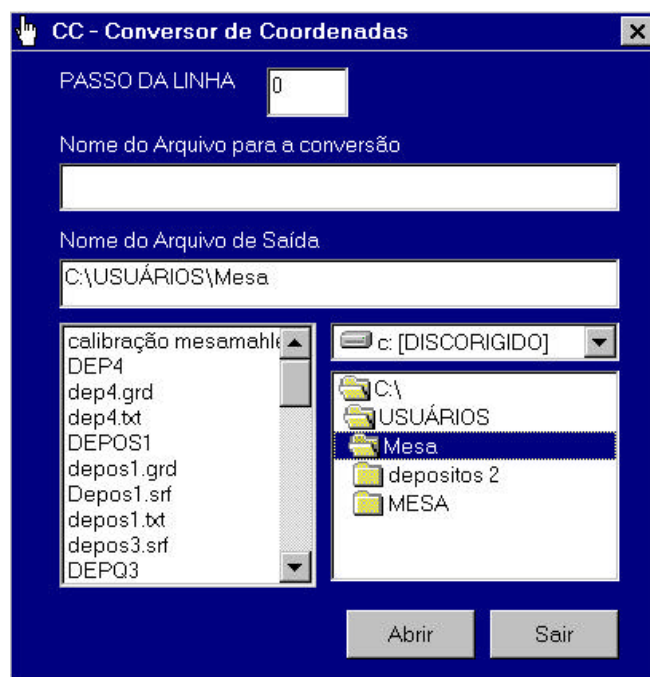


Figura B.4: Tela principal do programa.

Rotina de cálculo

Ao clicar o Botão abrir da tela principal do programa, ele executa a seguinte rotina, transformando as colunas correspondentes do arquivo ASCII (passo de tempo) num arquivo de três colunas em centímetros.

```
Private Sub Command1_Click()
```

```
'LENDOS DADOS DE ENTRADA
```

```
Dim numero As Currency
```

```
Open Text1.Text For Input As #1
```

```
Input #1, A
```

```
Input #1, B
```

```
Input #1, C
```

```
Input #1, D
```

```
Dim CA(20000), CB(20000), CC(20000) As Currency
```

```
On Error GoTo 1:
```

```
For ii = 1 To 16000
```

```
Input #1, CA(ii), CB(ii), CC(ii)
Next ii
1 Close #1
numero = ii - 1
Close #1

'DECLARANDO AS COORDENADAS X, Y E Z
Dim CORDX(20000) As Currency
Dim CORDY(20000) As Currency
Dim CORDZ(20000) As Currency

'TRANSFORMANDO EM DISTÂNCIAS
Dim DIST, MENOR As Currency
PASSO = Text10.Text
DIST = 0.0763 * PASSO - 0.035
MENOR = CORDZ (1) / 10

For ii = 1 To numero
    CORDX(ii) = CB(ii) * 0.08071 - 0.07696
    If CORDX(ii) < 0 Then CORDX(ii) = 0
    CORDY(ii) = CA(ii) * DIST
    CORDZ(ii) = MENOR - CC(ii) / 10
Next ii

'IMPRIMINDO OS ARQUIVOS DE SAÍDA
Arquivo1 = Text2
Open Arquivo1 For Output As #1
    For ii = 1 To numero
        Print #1, CORDX(ii), CORDY(ii), CORDZ(ii)
    Next ii
End Sub
```

ANEXO C: CD DE FILMAGENS DOS ENSAIOS

Insira o CD na unidade correspondente no computador. Automaticamente, ele deve iniciar a apresentação. Caso contrário, deve ser aberto o arquivo “Anexo III-Ensaio.pps”.

ANEXO D: DADOS BRUTOS DOS ENSAIOS DA SEGUNDA ETAPA

Grupo 1

Material = Carvão 207

Granulometria = 0,297-0,125mm

Massa específica da mistura = 1022 kg/m³

| Distância (cm) | Tempo (s) | Velocidade (m/s) | Aceleração (m/s²) | Altura da Cabeça (cm) | Altura do Corpo (cm) |
|-----------------------|------------------|-------------------------|-------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 20,00 | 2,11 | 0,0949 | 0,0451 | | |
| 25,00 | 3,20 | 0,0467 | -0,0441 | 2,56 | 5,09 |
| 50,00 | 10,33 | 0,0353 | -0,0016 | 4,76 | 5,86 |
| 57,00 | 12,65 | 0,0302 | -0,0022 | | |
| 75,00 | 18,48 | 0,0309 | 0,0001 | 4,62 | 6,13 |
| 79,90 | 20,13 | 0,0298 | -0,0005 | | |
| 88,40 | 23,37 | 0,0262 | -0,0011 | | |
| 100,00 | 27,72 | 0,0267 | 0,0001 | 5,52 | 4,54 |
| 109,40 | 31,37 | 0,0257 | -0,0003 | | |
| 119,80 | 35,15 | 0,0275 | 0,0005 | | |
| 125,00 | 37,17 | 0,0259 | -0,0008 | 5,71 | 5,73 |
| 139,30 | 42,76 | 0,0256 | 0,0000 | | |
| 150,00 | 46,89 | 0,0259 | 0,0001 | 5,65 | 4,70 |
| 153,40 | 48,93 | 0,0166 | -0,0046 | | |
| 169,20 | 54,67 | 0,0276 | 0,0019 | | |
| 175,00 | 57,39 | 0,0214 | -0,0023 | 6,03 | 5,18 |
| 186,20 | 62,30 | 0,0228 | 0,0003 | | |
| 200,00 | 69,15 | 0,0202 | -0,0004 | 5,93 | 5,31 |
| 210,70 | 73,96 | 0,0223 | 0,0005 | | |
| 225,00 | 80,85 | 0,0208 | -0,0002 | 5,38 | 4,45 |
| 229,20 | 82,52 | 0,0264 | 0,0044 | | |
| 238,70 | 87,22 | 0,0203 | -0,0013 | | |
| 250,00 | 93,35 | 0,0184 | -0,0003 | 5,31 | |

Grupo 2**Material = Carvão 207****Granulometria = 0,297-0,125mm****Massa específica da mistura = 1010 kg/m³**

| Distância (cm) | Tempo (s) | Velocidade (m/s) | Aceleração (m/s²) | Altura da Cabeça (cm) | Altura do Corpo (cm) |
|-----------------------|------------------|-------------------------|-------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 20,00 | 2,50 | 0,0803 | 0,0324 | | |
| 25,00 | 3,78 | 0,0493 | -0,0182 | 3,32 | 7,34 |
| 50,00 | 12,52 | 0,0288 | -0,0026 | 5,36 | 5,60 |
| 57,00 | 16,63 | 0,0174 | -0,0026 | | |
| 75,00 | 25,57 | 0,0202 | 0,0003 | 6,10 | 5,99 |
| 79,90 | 28,83 | 0,0157 | -0,0013 | | |
| 88,40 | 33,54 | 0,0180 | 0,0005 | | |
| 100,00 | 39,70 | 0,0191 | 0,0002 | 5,95 | 5,18 |
| 109,40 | 44,61 | 0,0191 | 0,0000 | | |
| 119,80 | 50,28 | 0,0184 | -0,0001 | | |
| 125,00 | 52,96 | 0,0194 | 0,0004 | 6,70 | 5,31 |
| 139,30 | 61,13 | 0,0176 | -0,0002 | | |
| 150,00 | 67,24 | 0,0175 | 0,0000 | 6,24 | 3,94 |
| 153,40 | 70,22 | 0,0114 | -0,0020 | | |
| 169,20 | 80,15 | 0,0159 | 0,0005 | | |
| 175,00 | 83,89 | 0,0155 | -0,0001 | 6,44 | 3,76 |
| 186,20 | 92,22 | 0,0135 | -0,0002 | | |
| 200,00 | 103,04 | 0,0127 | -0,0001 | 6,25 | 4,40 |
| 210,70 | 110,78 | 0,0138 | 0,0001 | | |
| 225,00 | 121,70 | 0,0131 | -0,0001 | 6,12 | 4,02 |
| 229,20 | 125,37 | 0,0114 | -0,0005 | | |
| 238,70 | 132,41 | 0,0135 | 0,0003 | | |
| 250,00 | 142,13 | 0,0118 | -0,0002 | 4,73 | |

Grupo 3

Material = Carvão 205

Granulometria = 0,125-0,053mm

Massa específica da mistura = 1010 kg/m³

| Distância (cm) | Tempo (s) | Velocidade (m/s) | Aceleração (m/s²) | Altura da Cabeça (cm) | Altura do Corpo (cm) |
|-----------------------|------------------|-------------------------|-------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 20,00 | 2,83 | 0,0708 | 0,0250 | | |
| 25,00 | 3,89 | 0,0505 | -0,0169 | 4,23 | 3,82 |
| 50,00 | 10,65 | 0,0370 | -0,0020 | 3,51 | 3,61 |
| 57,00 | 12,80 | 0,0331 | -0,0015 | | |
| 75,00 | 17,87 | 0,0355 | 0,0005 | 4,18 | 3,94 |
| 79,90 | 19,04 | 0,0418 | 0,0054 | | |
| 88,40 | 21,78 | 0,0313 | -0,0037 | | |
| 100,00 | 25,11 | 0,0350 | 0,0011 | 4,78 | 4,32 |
| 109,40 | 27,80 | 0,0356 | 0,0004 | | |
| 119,80 | 31,09 | 0,0317 | -0,0012 | | |
| 125,00 | 32,65 | 0,0332 | 0,0010 | 5,53 | 4,51 |
| 139,30 | 37,74 | 0,0283 | -0,0009 | | |
| 150,00 | 41,57 | 0,0284 | 0,0001 | 5,41 | 4,33 |
| 153,40 | 43,50 | 0,0176 | -0,0057 | | |
| 169,20 | 49,39 | 0,0269 | 0,0016 | | |
| 175,00 | 51,63 | 0,0262 | -0,0002 | 6,19 | 4,33 |
| 186,20 | 55,98 | 0,0258 | -0,0001 | | |
| 200,00 | 61,43 | 0,0253 | -0,0001 | 6,10 | 4,13 |
| 210,70 | 66,04 | 0,0232 | -0,0004 | | |
| 225,00 | 72,89 | 0,0209 | -0,0003 | 5,41 | 4,96 |
| 229,20 | 74,96 | 0,0212 | 0,0005 | | |
| 238,70 | 79,61 | 0,0204 | -0,0001 | | |
| 250,00 | 86,04 | 0,0176 | -0,0004 | 5,60 | 3,94 |

Grupo 4

Material = Carvão 205

Granulometria = 0,125-0,053mm

Massa específica da mistura = 1022 kg/m³

| Distância (cm) | Tempo (s) | Velocidade (m/s) | Aceleração (m/s ²) | Altura da Cabeça (cm) | Altura do Corpo (cm) |
|----------------|-----------|------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------|
| 20,00 | 3,02 | 0,0672 | 0,0229 | | |
| 25,00 | 3,96 | 0,0542 | -0,0143 | 2,66 | 2,95 |
| 50,00 | 9,78 | 0,0434 | -0,0019 | 3,44 | 3,69 |
| 57,00 | 11,52 | 0,0403 | -0,0018 | | |
| 75,00 | 15,80 | 0,0422 | 0,0005 | 3,59 | 3,03 |
| 79,90 | 17,04 | 0,0397 | -0,0021 | | |
| 88,40 | 19,70 | 0,0323 | -0,0028 | | |
| 100,00 | 23,20 | 0,0336 | 0,0004 | 3,11 | 3,41 |
| 109,40 | 26,33 | 0,0310 | -0,0008 | | |
| 119,80 | 29,65 | 0,0313 | 0,0000 | | |
| 125,00 | 31,41 | 0,0298 | -0,0008 | 3,78 | 3,61 |
| 139,30 | 36,72 | 0,0274 | -0,0004 | | |
| 150,00 | 40,70 | 0,0273 | 0,0000 | 3,54 | 2,97 |
| 153,40 | 42,85 | 0,0164 | -0,0053 | | |
| 169,20 | 49,41 | 0,0247 | 0,0013 | | |
| 175,00 | 51,98 | 0,0228 | -0,0008 | 4,13 | 3,69 |
| 186,20 | 57,04 | 0,0226 | 0,0000 | | |
| 200,00 | 63,43 | 0,0220 | -0,0001 | 4,89 | 3,76 |
| 210,70 | 68,78 | 0,0203 | -0,0003 | | |
| 225,00 | 76,13 | 0,0198 | -0,0001 | 5,03 | 4,06 |
| 229,20 | 78,48 | 0,0187 | -0,0004 | | |
| 238,70 | 83,61 | 0,0186 | 0,0000 | | |
| 250,00 | 90,43 | 0,0167 | -0,0003 | 4,43 | |

Grupo 5

Material = Carvão 205

Granulometria = 0,297-0,125mm

Massa específica da mistura = 1010 kg/m³

| Distância (cm) | Tempo (s) | Velocidade (m/s) | Aceleração (m/s ²) | Altura da Cabeça (cm) | Altura do Corpo (cm) |
|----------------|-----------|------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------|
| 20,00 | 2,80 | 0,0714 | 0,0255 | | |
| 25,00 | 3,89 | 0,0463 | -0,0228 | 3,51 | 4,51 |
| 50,00 | 11,78 | 0,0317 | -0,0018 | 5,13 | 4,70 |
| 57,00 | 14,39 | 0,0272 | -0,0016 | | |
| 75,00 | 21,33 | 0,0262 | -0,0001 | 4,95 | 5,68 |
| 79,90 | 23,07 | 0,0282 | 0,0012 | | |
| 88,40 | 26,37 | 0,0258 | -0,0007 | | |
| 100,00 | 30,72 | 0,0267 | 0,0002 | 5,67 | 5,38 |
| 109,40 | 34,57 | 0,0244 | -0,0006 | | |
| 119,80 | 38,67 | 0,0253 | 0,0002 | | |
| 125,00 | 40,67 | 0,0270 | 0,0014 | 6,31 | 5,88 |
| 139,30 | 46,93 | 0,0231 | -0,0007 | | |
| 150,00 | 51,37 | 0,0249 | 0,0005 | 6,07 | 3,36 |
| 153,40 | 53,09 | 0,0201 | -0,0030 | | |
| 169,20 | 60,13 | 0,0228 | 0,0004 | | |
| 175,00 | 62,65 | 0,0233 | 0,0002 | 6,18 | 4,27 |
| 186,20 | 67,98 | 0,0216 | -0,0003 | | |
| 200,00 | 75,48 | 0,0187 | -0,0004 | 6,29 | 4,04 |
| 210,70 | 81,39 | 0,0189 | 0,0001 | | |
| 225,00 | 89,96 | 0,0172 | -0,0002 | 5,87 | 4,72 |
| 229,20 | 92,09 | 0,0206 | 0,0018 | | |
| 238,70 | 97,26 | 0,0186 | -0,0004 | | |
| 250,00 | 104,46 | 0,0159 | -0,0004 | 5,15 | |

Grupo 6

Material = Carvão 205

Granulometria = 0,297-0,125mm

Massa específica da mistura = 1022 kg/m³

| Distância (cm) | Tempo (s) | Velocidade (m/s) | Aceleração (m/s ²) | Altura da Cabeça (cm) | Altura do Corpo (cm) |
|----------------|-----------|------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------|
| 20,00 | 2,50 | 0,0818 | 0,0342 | | |
| 25,00 | 3,20 | 0,0722 | -0,0124 | 3,03 | 3,55 |
| 50,00 | 8,83 | 0,0447 | -0,0048 | 3,86 | 3,63 |
| 57,00 | 10,96 | 0,0329 | -0,0056 | | |
| 75,00 | 16,74 | 0,0312 | -0,0003 | 5,16 | 4,76 |
| 79,90 | 18,50 | 0,0284 | -0,0014 | | |
| 88,40 | 22,13 | 0,0239 | -0,0013 | | |
| 100,00 | 26,89 | 0,0248 | 0,0002 | 4,81 | 4,46 |
| 109,40 | 30,85 | 0,0240 | -0,0002 | | |
| 119,80 | 35,20 | 0,0239 | 0,0000 | | |
| 125,00 | 37,39 | 0,0237 | -0,0001 | 5,93 | 5,05 |
| 139,30 | 44,20 | 0,0210 | -0,0004 | | |
| 150,00 | 48,72 | 0,0237 | 0,0006 | 5,85 | 3,50 |
| 153,40 | 50,72 | 0,0172 | -0,0033 | | |
| 169,20 | 57,72 | 0,0228 | 0,0008 | | |
| 175,00 | 60,37 | 0,0225 | 0,0000 | 6,03 | 3,27 |
| 186,20 | 65,63 | 0,0215 | -0,0002 | | |
| 200,00 | 73,09 | 0,0187 | -0,0004 | 5,16 | 3,52 |
| 210,70 | 79,63 | 0,0167 | -0,0003 | | |
| 225,00 | 88,96 | 0,0158 | -0,0001 | 5,21 | 3,53 |
| 229,20 | 91,83 | 0,0151 | -0,0002 | | |
| 238,70 | 97,78 | 0,0162 | 0,0002 | | |
| 250,00 | 106,20 | 0,0143 | -0,0002 | 5,38 | |

Grupo 7

Material = Calcário B

Granulometria = 0,125-0,053mm

Massa específica da mistura = 1022 kg/m³

| Distância (cm) | Tempo (s) | Velocidade (m/s) | Aceleração (m/s ²) | Altura da Cabeça (cm) | Altura do Corpo (cm) |
|----------------|-----------|------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------|
| 20,00 | 1,96 | 0,1056 | 0,0575 | | |
| 25,00 | 2,63 | 0,0810 | -0,0375 | 2,40 | 3,03 |
| 50,00 | 10,37 | 0,0326 | -0,0066 | 5,64 | 3,65 |
| 57,00 | 13,33 | 0,0244 | -0,0028 | | |
| 75,00 | 21,54 | 0,0226 | -0,0002 | 5,27 | 6,61 |
| 79,90 | 23,54 | 0,0245 | 0,0010 | | |
| 88,40 | 28,67 | 0,0166 | -0,0015 | | |
| 100,00 | 35,20 | 0,0179 | 0,0002 | 4,92 | 6,39 |
| 109,40 | 41,91 | 0,0141 | -0,0006 | | |
| 119,80 | 49,72 | 0,0134 | -0,0001 | | |
| 125,00 | 53,35 | 0,0147 | 0,0004 | 5,93 | 5,55 |
| 139,30 | 66,22 | 0,0112 | -0,0003 | | |
| 150,00 | 76,70 | 0,0108 | 0,0000 | 7,55 | 5,10 |
| 153,40 | 82,72 | 0,0058 | -0,0009 | | |
| 169,20 | 99,93 | 0,0093 | 0,0002 | | |
| 175,00 | 106,07 | 0,0099 | 0,0002 | 6,62 | 5,94 |
| 186,20 | 122,57 | 0,0068 | -0,0002 | | |
| 200,00 | 140,63 | 0,0078 | 0,0001 | 4,88 | 4,68 |
| 210,70 | 156,41 | 0,0069 | -0,0001 | | |
| 225,00 | 178,22 | 0,0048 | | | |
| 229,20 | | | | | |
| 238,70 | | | | | |
| 250,00 | | | | | |