

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE PORTANTE DE FRAÇÕES FINAS NAS
CORRENTES DE TURBIDEZ**

RICHARD EDUARD DÜCKER

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 Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Luiz Emílio Sá Brito de Almeida

Banca Examinadora:

Amauri Antunes Barcelos NECOD/UFRGS

Luiz Augusto Magalhães Endres IPH/UFRGS

Paulo Sérgio Gomes Paim UNISINOS

Porto Alegre, dezembro de 2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE PORTANTE DE FRAÇÕES FINAS NAS
CORRENTES DE TURBIDEZ**

RICHARD EDUARD DÜCKER

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 Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Porto Alegre, dezembro de 2007

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 a orientação do Prof. Luís Emílio Sá Brito de Almeida.

Muitas pessoas contribuíram para que este projeto se tornasse possível. Gostaria de expressar aqui minha gratidão a todos que, de forma direta ou indireta, colaboraram para que este trabalho fosse realizado.

A meus pais, Enir e Bibi, pelo incentivo e apoio incondicionais que sempre me dedicaram, e por estarem sempre dispostos a me ajudar nos momentos em que mais precisei, não só durante o período do mestrado, mas durante toda minha trajetória como estudante.

À professora Ana Luiza de Oliveira Borges, pelas imprescindíveis contribuições através da discussão e estruturação do trabalho, assim como pelas leituras e correções realizadas ao longo do desenvolvimento deste estudo.

Ao professor Rogério Dornelles Maestri, pela troca de idéias, sugestões e críticas que serviram de estímulo para o desenvolvimento do trabalho.

À Ana e ao Maestri pelos conhecimentos passados, tanto profissionais quanto pessoais, e pela oportunidade oferecida que culminou na realização desta dissertação.

À Joana, por estar sempre presente ao meu lado, me apoiando, dando forças e disposta a ajudar. Também por servir como um exemplo de dedicação, disciplina e responsabilidade.

Aos colegas Rafael Manica, Daniel Ullmann de Brito e Alexandre Mahler pela convivência e companheirismo ao longo destes anos, além do auxílio durante a pesquisa. Ao Manica, agradeço também pelas discussões e correções para o aprimoramento do trabalho especialmente na reta final do mesmo.

À todos os colegas e ex-colegas do Neced que de alguma forma colaboraram, em especial Amauri Antunes Barcelos, Cristian Valenti Schenk, Éder Luís Rodrigues, Eduardo Puhl, Fábio Nieves, Jorge Luís Menezes da Silva, Marcelo Devenute Ávila, Marco Aurélio da Rosa, Pedro Luís da Costa Ferreira, Rafael Marczewsky Gonçalves, Renata Giacomel, Renato Brito, Rodrigo Sartor e Sérgio Rodrigues,.

À empresa PETRÓLEO BRASILEIRO S/A pelo financiamento que permitiu o desenvolvimento da pesquisa, e aos geólogos Adriano Viana e Antônio Cosme Del Rey pelas discussões e esclarecimentos relacionados à geologia.

RESUMO

Este estudo apresenta uma investigação experimental, através da simulação física de correntes de turbidez de baixa densidade, utilizando diferentes materiais (suspensos e dissolvidos), em diferentes proporções, com o intuito de avaliar seu comportamento geométrico (alturas de cabeça e corpo), dinâmico (velocidades de avanço da cabeça) e especialmente deposicional (distribuição granulométrica dos depósitos ao longo do canal), investigando também a capacidade de transporte dos fluxos. Além disso, foi testado o uso do sal em substituição às frações finas de sedimento na simulação de correntes de turbidez.

As simulações foram realizadas nas dependências do NECOD, em um canal bidimensional de vidro, com dimensões 300 x 12,5 x 20 cm, utilizando na formação das correntes misturas com diferentes proporções de material dissolvido e/ou suspenso. Três fases de simulações foram conduzidas, cada uma com diferentes materiais compondo as misturas: a primeira composta por carvão 207 ($\rho = 1360 \text{ kg/m}^3$) e sal; a segunda composta por carvão 205 ($\rho = 1190 \text{ kg/m}^3$) e sal; e na terceira fase, misturas compostas por carvão 205 e bentonita. Cada uma destas misturas teve a massa específica composta por cinco diferentes proporções de material: 100% de carvão, 75%, 50%, 25%, 0%. Todas os ensaios tiveram a mesma massa específica (1010 kg/m^3) do fluido injetado, o mesmo volume (4 litros) e a mesma vazão (6,5 litros/min). Além disso, o carvão utilizado para a composição das misturas seguiu a mesma curva granulométrica, ou seja, todas as composições tiveram a mesma granulometria.

Fixando a massa específica, volume e vazão de injeção dos fluxos, foi possível analisar a influência das frações finas dos materiais que compunham as correntes de turbidez no que diz respeito à geometria, dinâmica e seus padrões de deposição.

Na análise da geometria das correntes verificou-se que na medida em que mais material fino compõe o fluxo, menores são as dimensões das correntes de densidade, principalmente o corpo. No caso de correntes que têm na sua composição o sal, este desempenha papel semelhante ao material granular fino. Já nas características cinemáticas, verificou-se que quanto menor a granulometria do sedimento do fluxo, e conseqüentemente menor a velocidade de queda do mesmo, mais lenta é a sua deposição, fazendo com que a corrente desacelere mais lentamente. As correntes que utilizaram sal na sua composição foram as que mantiveram sua velocidade por distâncias maiores.

Quanto aos padrões de deposição, o comportamento das correntes de turbidez geradas pelas diferentes misturas mostrou-se bastante semelhante. Os fluxos com sal dissolvido carregaram grãos mais grossos para distâncias um pouco maiores, entretanto esta diferença não chega a ser considerada significativa. Esse comportamento também é corroborado, quando se analisa a capacidade de transporte dos fluxos, que apresentaram pequenas diferenças para os dois tipos de fração fina avaliadas e quando foi ajustada a lei de degradação de tamanho de grão, que evidenciou uma pequena diferença na capacidade de transporte dos fluxos compostos por carvão/bentonita, e carvão/sal.

Ainda, a comparação entre correntes de turbidez compostas por sal e diferentes tipos de carvão (com diferentes densidades) indica que, quantitativamente, os depósitos gerados pelos escoamentos formados por carvão menos denso (carvão 205) são melhores distribuídos ao longo do canal quando da presença de sal na composição da mistura.

Os dados mostram que, para as correntes de baixa densidade geradas neste trabalho, é possível a substituição dos sedimentos finos por sal na simulação física de correntes de densidade, apesar das pequenas diferenças notadas nas características geométricas, dinâmicas e deposicionais. Esta substituição simplificaria as simulações físicas em escala reduzida destes fluxos, tanto na realização dos ensaios quanto na análise dos dados.

ABSTRACT

This work presents an experimental investigation of low-density turbidity currents using different proportion of suspended sediments (mineral coal and bentonite) and/or dissolved material (salt), in order to evaluate their kinematics (head velocity), geometric (head and body height) and depositional (mass and grain size distribution) behaviour as well as their capacity of transport. Beyond that, it was investigated the use of dissolved material (salt) replacing finer sediments in these flows. Hence, three sets of experiments were conducted in a bi-dimensional channel (300 x 12.5 x 20 cm) with five different sediment ratios (100% mineral coal; 75%; 50%; 25%; 0%). Three different mixtures are used in each set. Mineral coal 207 ($\rho = 1360 \text{ kg/m}^3$) and salt in the first one. Mineral coal 205 ($\rho = 1190 \text{ kg/m}^3$) and salt in the second set and then mineral coal 205 and bentonite. The bulk density (1010 kg/m^3), flow rate (6.5 litre/min), grain size distribution and volume (4 litres) were kept constant in order to compare the sets.

The results were evaluated regarding the flow-deposit properties. It was verified that as the finer sediment increases in the mixture, the current dimensions became thinner, especially at the body, and the flows decelerate less than the ones with coarse sediments. In terms of depositional patterns, it was detected same trends of deposition (thinning downstream) only with a slight modification of flow transport capacity for the flows contained dissolved salt (coarser grains reaching distal zones).

The comparison between the first and second sets of experiments show that the deposit generated by the second set (mineral coal 205 of lower density) is better distributed along the channel only when there is salt dissolved in the mixture.

The results presented here lead us to conclude that, despite the fact that there is some difference amongst the flow-deposit properties, it is possible to use salt replacing the finer portion of the sediments, which can cause a lot of simplifications of experimental procedures and further analysis as well.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIV
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 JUSTIFICATIVA	3
3 OBJETIVOS.....	4
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
4.1 GENERALIDADES	5
4.2 AS CORRENTES DE TURBIDEZ	6
4.3 GEOMETRIA E DINÂMICA DAS CORRENTES DE TURBIDEZ.....	6
4.4 EFICIÊNCIA DE FLUXO.....	9
4.5 INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO FINA NOS PROCESSOS DE SEDIMENTAÇÃO ...	10
4.6 SÍNTESE.....	11
5 MATERIAIS E MÉTODOS	12
5.1 INSTALAÇÕES E EQUIPAMENTOS.....	12
5.1.1 Canal de declividade variável.....	12
5.1.2 Sistema de alimentação sólida.....	13
5.1.3 Mecanismo de ignição	15
5.1.4 Acompanhamento e registro dos ensaios	15
5.1.5 Granulômetro Laser.....	16
5.1.6 Peneirador Tyson de intensidade variável.....	17
5.2 MATERIAL SEDIMENTAR – MISTURA INJETADA.....	18
5.2.1 Carvão.....	18
5.2.2 Sal.....	18
5.2.3 Bentonita.....	18
5.3 METODOLOGIA	19
5.3.1 Mistura.....	19
5.3.2 Metodologia dos ensaios	20
5.3.3 Metodologia da aquisição e tratamento dos dados	21
5.3.3.1 Dinâmica	21
5.3.3.2 Geometria.....	22
5.3.3.3 Depósito	23

6 ENSAIOS.....	24
6.1 PROGRAMA DE ENSAIOS.....	24
7 RESULTADOS E ANÁLISES.....	27
7.1 ENSAIOS PRELIMINARES.....	27
7.1.1 Geometria.....	27
7.1.2 Dinâmica.....	32
7.1.3 Padrões de deposição.....	34
7.1.4 Conclusões Parciais.....	37
7.2 PRIMEIRA E SEGUNDA FASES DE ENSAIOS.....	38
7.2.1 Geometria.....	38
7.2.2 Dinâmica.....	44
7.2.3 Padrões de deposição.....	51
7.2.4 Conclusões parciais.....	63
7.2.4.1 Geometria.....	63
7.2.4.2 Dinâmica.....	63
7.2.4.3 Padrão de deposição.....	63
7.3 FASE PRELIMINAR E PRIMEIRA FASE DE ENSAIOS (EFEITO DA DENSIDADE DO SEDIMENTO).....	64
7.3.1 Geometria.....	65
7.3.2 Dinâmica.....	68
7.3.3 Padrões de Deposição.....	73
7.3.4 Conclusões parciais.....	78
7.3.4.1 Geometria.....	78
7.3.4.2 Dinâmica.....	78
7.3.4.3 Padrões de deposição:.....	79
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80
8.1 CONCLUSÕES GERAIS.....	80
8.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	82
REFERÊNCIAS.....	83
APÊNDICE A.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Exemplos de correntes de densidade conservativa (em cima) e não conservativa.	3
Figura 4.1	Esquema ilustrando a geometria e a dinâmica de uma corrente de turbidez.....	6
Figura 4.2	Geometria das correntes de densidade.....	7
Figura 5.1	Canal bidimensional de pequeno porte.....	13
Figura 5.2	Sistema de alimentação sólida.....	14
Figura 5.3	Sistema de injeção - difusor.....	14
Figura 5.4	(a) Filmadora DCR-TRV110 e (b) Filmadora DCR-TRV120	15
Figura 5.5	Analisador de partículas a laser	16
Figura 5.6	Peneirador Tyson de intensidade variável.....	17
Figura 5.7	Seqüência ilustrando a metodologia.....	20
Figura 5.8	Marcações no canal para a tomada de medidas.....	22
Figura 5.9	Seções de referência para tomadas de medidas	22
Figura 5.10	Pontos de medição da geometria das correntes	23
Figura 5.11	Amostras acondicionadas em potes plásticos para análise granulométrica.....	23
Figura 7.1	Seqüência de fotos tiradas no mesmo trecho do canal	28
Figura 7.2	Alturas da cabeça da corrente - Ensaios Preliminares.....	30
Figura 7.3	Alturas do corpo das correntes 40cm atrás do nariz nos Ensaios Preliminares....	30
Figura 7.4	Alturas do corpo das correntes 60cm atrás do nariz nos Ensaios Preliminares....	31
Figura 7.5	Valores médios da geometria dos Ensaios Preliminares	32
Figura 7.6	Velocidades de avanço dos Ensaios Preliminares	33
Figura 7.7	Linhas de tendência das velocidades de avanço.....	34
Figura 7.8	Porcentagem de peso do material depositado separado segundo frações granulométricas expressas em micras – Ensaio Preliminar I	35
Figura 7.9	Porcentagem de peso do material depositado separado segundo frações granulométricas expressas em micras – Ensaio Preliminar II.....	35
Figura 7.10	Porcentagem de peso do material depositado separado segundo frações granulométricas expressas em micras – Ensaio Preliminar III.....	36
Figura 7.11	Porcentagem de peso do material depositado separado segundo frações granulométricas expressas em micras – Ensaio Preliminar IV	36
Figura 7.12	Porcentagens totais de deposição por trecho	37
Figura 7.13	Altura da cabeça – Fase I (sal + carvão).....	39
Figura 7.14	Altura da cabeça – Fase II (carvão + bentonita).....	40
Figura 7.15	Altura do corpo 40cm atrás do nariz – Fase I (sal + carvão).....	41
Figura 7.16	Altura do corpo 40cm atrás do nariz – Fase II (carvão + bentonita).....	41

Figura 7.17	Altura do corpo 60cm atrás do nariz – Fase I (sal + carvão).....	42
Figura 7.18	Altura do corpo 60cm atrás do nariz – Fase II (carvão + bentonita).....	42
Figura 7.19	Valores médios da geometria dos Ensaios das Fases I e II	43
Figura 7.20	Velocidade da cabeça – Fase I (carvão + sal).....	44
Figura 7.21	Velocidade da cabeça – Fase II (carvão + bentonita).....	45
Figura 7.22	Velocidade da cabeça – Fase I (carvão + Sal).....	46
Figura 7.23	Velocidade da cabeça – Fase II (carvão + bentonita).....	47
Figura 7.24	Velocidade da cabeça – comparação Ensaio I e V	48
Figura 7.25	Velocidade da cabeça – comparação Ensaio II e VI	48
Figura 7.26	Velocidade da cabeça – comparação Ensaio III e VII.....	49
Figura 7.27	Velocidade da cabeça – comparação Ensaio Sal 100% e VIII.....	49
Figura 7.28	Linhas de tendência aplicadas aos gráficos de velocidade de avanço – Fases I e II.	50
Figura 7.29	Velocidades médias da cabeça das correntes – Fases I e II.....	51
Figura 7.30	Variação, ao longo do canal, do D_{50} do material depositado – Fase I (carvão + sal).....	53
Figura 7.31	Variação, ao longo do canal, do D_{50} do material depositado – Fase II (carvão + bentonita).....	54
Figura 7.32	Depósito quase seco de carvão com bentonita	54
Figura 7.33	Comparação dos D_{50} entre os ensaios equivalentes das Fases I e II	55
Figura 7.34	Lei de Degradação aplicada aos Ensaios I e V	57
Figura 7.35	Lei de Degradação aplicada aos Ensaios II e VI	57
Figura 7.36	Lei de Degradação aplicada aos Ensaios III e VII.....	58
Figura 7.37	Lei de Degradação aplicada ao Ensaio IV	58
Figura 7.38	Curvas granulométricas do material depositado nos trechos 50-60cm, 130-140cm e 230-240cm do canal.....	59
Figura 7.39	Massa depositada ao longo do canal nos Ensaios I e V.....	60
Figura 7.40	Massa depositada ao longo do canal nos Ensaios II e VI.....	60
Figura 7.41	Massa depositada ao longo do canal nos Ensaios III e VII	60
Figura 7.42	Massas totais de depósito separadas por tamanho de grão dos Ensaios I e V.....	61
Figura 7.43	Massas totais de depósito separadas por tamanho de grão dos Ensaios II e VI ...	62
Figura 7.44	Massas totais de depósito separadas por tamanho de grão dos Ensaios III e VII.	62
Figura 7.45	Comparação das alturas da cabeça das correntes – Ensaios Preliminares e Ensaio da Primeira Fase	65
Figura 7.46	Comparação das alturas do corpo das correntes 40 cm atrás do nariz – Ensaio Preliminares e Ensaio da Primeira Fase.....	66

Figura 7.47 Comparação das alturas do corpo das correntes 60 cm atrás do nariz – Ensaios Preliminares e Ensaios da Primeira Fase.....	67
Figura 7.48 Valores médios da geometria dos Ensaios Preliminares e Primeira Fase de ensaios.....	68
Figura 7.49 Velocidades do Ensaio EP I e Ensaio I	69
Figura 7.50 Velocidades do Ensaio EP II e Ensaio II.....	69
Figura 7.51 Velocidades do Ensaio EP III e Ensaio III	70
Figura 7.52 Velocidades do Ensaio EP IV e Ensaio IV	70
Figura 7.53 Linhas de tendência Fase Preliminar e Fase I.....	71
Figura 7.54 Velocidades médias dos Ensaios Preliminares e Fase I	72
Figura 7.55 Porcentagens de deposição por trecho – Ensaio I e Ensaio Preliminar I.....	74
Figura 7.56 Porcentagens de deposição por trecho – Ensaio II e Ensaio Preliminar II.....	74
Figura 7.57 Porcentagens de deposição por trecho – Ensaio III e Ensaio Preliminar III	75
Figura 7.58 Porcentagens de deposição por trecho – Ensaio IV e Ensaio Preliminar IV.....	75
Figura 7.59 Tamanho médio dos grãos depositados nos Ensaios Preliminares.....	76
Figura 7.60 Tamanho médio dos grãos depositados nos ensaios da Fase I.....	76
Figura 7.61 Comparações,entre os Ensaios Preliminares e os Ensaios da Fase I, dos tamanhos médios de grãos depositados	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1	Características técnicas das câmeras filmadoras empregadas	16
Tabela 6.1	Quantidade de carvão por diâmetro do grão utilizado para a formação das correntes das Fases I e II	25
Tabela 6.2	Características dos ensaios	26
Tabela 7.1	Alturas (cm) da cabeça e do corpo medidas a 40 cm e 60 cm do nariz – Ensaios Preliminares	29
Tabela 7.2	Alturas médias da cabeça das correntes, corpo 40cm e corpo 60cm.....	38
Tabela 7.3	D ₅₀ dos depósitos (em micras) coletados em diferentes regiões do canal	52
Tabela 7.4	Valores da equação da Lei de Degradação do Tamanho do Grão.....	56
Tabela 7.5	Nomenclatura dos ensaios	65
Tabela 7.6	Quantidades de carvão usadas e respectivas concentrações volumétricas	72
Tabela 7.7	Número de Reynolds e Froude Densimétrico médio dos ensaios	73

LISTA DE SÍMBOLOS

- d densidade [-]
- Fr' número de Froude Densimétrico [-]
- Re número de Reynolds [-]
- ρ massa específica [kg/m³]
- D₅₀ diâmetro do sedimento tal que 50% da amostra tem diâmetro inferior [mm]
- D_{50_x} D₅₀ em uma determinada posição x do canal [mm]
- D_{50₀} D₅₀ no primeiro trecho do canal [mm]
- a constante de calibração da lei de degradação de tamanho de grão [-]

1 INTRODUÇÃO

As correntes de densidade se caracterizam por serem o deslocamento relativo entre duas camadas de fluidos com diferentes densidades. Essa diferença de densidades pode ser atribuída, por exemplo, à presença de material dissolvido, à presença de material em suspensão ou à diferença de temperatura. As correntes de densidade que apresentam material sólido em suspensão, como sendo o causador da diferença de densidade entre o fluxo e o meio, são chamadas de correntes de turbidez. Estas, por sua vez, apresentam troca de material com a superfície inferior, onde a corrente flui, através dos processos de erosão e sedimentação. Devido a esta característica, estas correntes são ditas não-conservativas. Por outro lado, quando não ocorrem trocas entre o material que causa o contraste de densidades e o substrato por onde flui a corrente, ela é dita conservativa.

Na evolução de correntes conservativas ocorre apenas a diminuição da concentração por efeito de aumento da diluição devido à incorporação de fluido ambiente. Contudo, em correntes não conservativas, ocorrem tanto redução quanto aumento da concentração, devido não só à incorporação do fluido ambiente, mas também pelas trocas com o substrato.

A compreensão dos parâmetros que regem este tipo de fluxo despertam grande interesse científico e econômico desde o trabalho de Kuenen e Migliorini (1950). Este tipo de escoamento possui papel importante no transporte de sedimentos em lagos e oceanos. O transporte de sedimentos da plataforma continental até as águas oceânicas profundas, dá origem aos sistemas deposicionais turbidíticos. Estes são as acumulações clásticas volumetricamente mais significativas em águas marinhas profundas e incluem alguns dos maiores corpos sedimentares do mundo.

Os sistemas deposicionais turbidíticos são responsáveis pelo armazenamento de grande parte dos hidrocarbonetos encontrados na costa brasileira, uma vez que, sob certas condições de porosidade e permeabilidade, eles se constituem em excelentes rochas reservatório. Surge daí um dos principais interesses na análise e compreensão das correntes de turbidez, principalmente para a indústria de petróleo. Segundo D'ávila e Paim (2003), cerca de 90% das reservas de petróleo do país, descobertas pela Petrobrás, estão contidas em depósitos gerados por correntes de turbidez e/ou fluxos gravitacionais similares, com um valor de mercado de algumas centenas de bilhões de dólares.

O uso de simulação física em modelos reduzidos no campo da sedimentação é uma ferramenta bastante útil para a criação de um sistema análogo, uma vez que pode reproduzir o ambiente natural. Cabe lembrar que devido à técnica de redução de escala aplicada nas

simulações físicas, frações sedimentares na faixa dos siltes e argilas assumem dimensões muito pequenas, impossíveis de serem representadas fisicamente sem que se comprometa a manutenção das propriedades físicas e das características hidrodinâmicas do fluido. Sob o ponto de vista experimental, a procura de um material capaz de representar em modelo físico, estas frações é bastante instigante. Assim, o uso do sal é atrativo, na medida em que poderia causar o mesmo efeito que as frações finas na capacidade portante dos grãos de maiores dimensões

As frações finas desempenham um papel importante na portabilidade das frações mais grossas e na capacidade de transporte das correntes de turbidez. Entretanto, em função de sua concentração, podem afetar parâmetros característicos da mistura, como sua densidade e viscosidade, podendo influenciar a velocidade de queda dos grãos e a intensidade da turbulência do escoamento.

É neste aspecto que se insere este estudo. Avaliar o uso de sal e de bentonita para simular o efeito das frações finas de sedimento sobre a portabilidade das correntes de turbidez

2 JUSTIFICATIVA

Este estudo surgiu de observações feitas a partir dos dados coletados nas simulações realizadas no Núcleo de Estudos em Correntes de Densidade (NECOD) com correntes de densidade conservativas (Fabian, 2002) e não-conservativas (Manica, 2002), nos quais foram notadas diferenças quantitativas e qualitativas nas características dinâmicas e geométricas da frente de propagação destas correntes (figura 2.1). Essas diferenças despertaram o interesse de como uma corrente de densidade se desenvolveria quando formada por uma parcela conservativa (sal) e uma parcela não conservativa (carvão mineral), verificando o efeito do sal sobre o poder de suporte das frações de material granular. Com este espírito, o sal estaria simulando o efeito de frações de sedimento muito finas sobre a capacidade de suporte e transporte do fluxo de turbidez. Posteriormente, surgiu a idéia do emprego da bentonita, um tipo de argila, no lugar do sal, para se verificar eventuais mudanças nas características dinâmicas e deposicionais dos fluxos, ao se empregar um material sólido fino que se encontra em suspensão e não diluído na corrente.

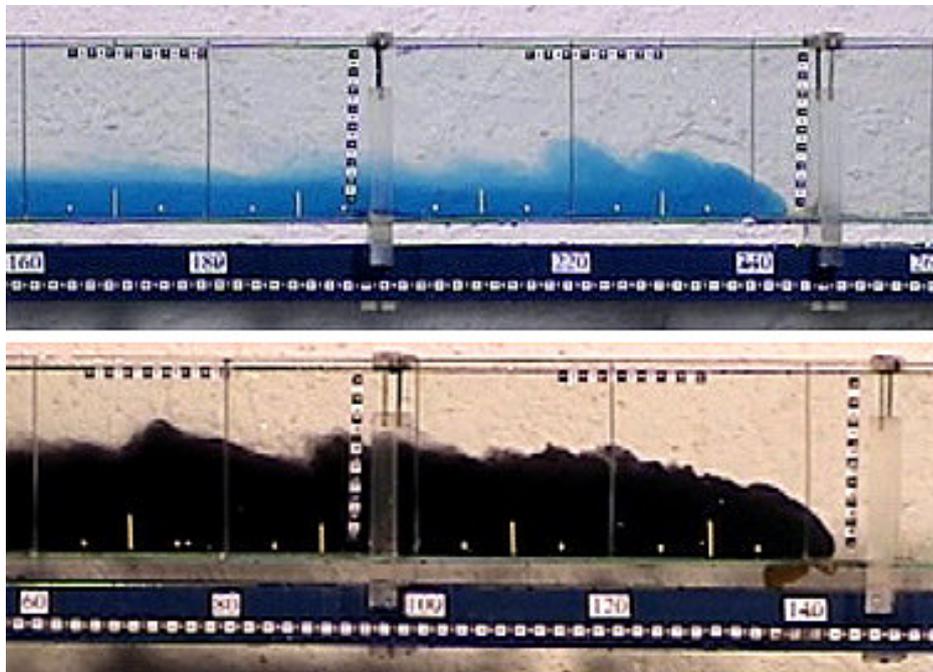


Figura 2.1 Exemplos de correntes de densidade conservativa (em cima) e não conservativa

3 OBJETIVOS

Este trabalho está inserido em uma das linhas de pesquisa do NECOD, que foi criado a partir da parceria entre a Petrobrás e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Esta parceria tem como objetivo investigar como transitam nos cânions submarinos e no fundo oceânico, para onde se dirigem e onde estão localizados os sedimentos que dão origem às rochas reservatório, em uma tentativa de diminuir os custos e os riscos nas operações de prospecção de poços de petróleo em águas oceânicas profundas.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o uso, em modelos físicos, de material sólido dissolvido ou suspenso (sal e bentonita) para simular o efeito das frações finas de sedimento presentes nas correntes de turbidez de baixa densidade.

Dentro deste objetivo geral estão destacados os seguintes objetivos secundários.

- adaptar a metodologia de ensaios de correntes de densidade em laboratório para fluxos compostos simultaneamente por material dissolvido e suspenso.

- investigar as mudanças no comportamento geométrico, dinâmico e deposicional das correntes de turbidez, procurando-se avaliar se há mudança na capacidade de transporte destes fluxos, com a utilização das diferentes frações finas/dissolvidas propostas.

- verificar a possibilidade de utilização do sal no lugar das parcelas mais finas do sedimento.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 GENERALIDADES

A partir da década de 50 é que os primeiros experimentos com correntes de turbidez foram efetuados, com o trabalho inovador de Kuenen & Migliorini (1950), o qual utilizou modelos reduzidos para o estudo de correntes de turbidez. Após este trabalho, inúmeros outros foram elaborados, todos com o intuito de entender os mecanismos de transporte e deposição dos sedimentos em águas profundas.

Dois problemas básicos surgem no estudo de depósitos turbidíticos *in situ*: o primeiro é saber se os turbiditos presentes no fundo do oceano foram realmente gerados por correntes de turbidez ou por um outro fluxo gravitacional; o segundo, 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 (Middleton, 1993).

As correntes de turbidez têm um papel importante na formação e modificação do leito oceânico. Estes fluxos são os principais responsáveis pelo transporte e deposição de sedimentos desde a plataforma continental até as águas oceânicas profundas, onde se localizam os principais sistemas turbidíticos. Este processo de transporte e deposição de sedimentos, que caracteriza as correntes de turbidez não conservativas, tem, como possível mecanismo de iniciação, a remobilização do sedimento depositado na plataforma continental ou na cabeça do talude continental. As correntes de turbidez também podem ser geradas diretamente pela descarga fluvial em oceanos, onde a carga de sedimentos está ligada à área fonte, ou ainda, por escorregamento do material presente no talude. Entretanto, o crescimento dos sistemas turbidíticos ocorre quando o sistema fluvial pode descarregar diretamente na plataforma continental (Kneller e Buckee, 2000).

A existência de correntes de turbidez de grandes dimensões, quando da ocorrência de deslizamentos no fundo dos oceanos, foi inferida, principalmente, devido à ruptura sucessiva de cabos submarinos, pelo levantamento da morfologia do leito oceânico e pela presença, em águas profundas, de corpos de areia com registros da fauna de águas rasas. Tentativas de medir diretamente as propriedades das correntes de turbidez, através do monitoramento das correntes em canais submarinos começaram na década de 60 e continuam até os dias atuais. A maioria das tentativas resultaram somente em registros imperfeitos, devido à imprevisibilidade dos grandes eventos e a sua capacidade de destruir os equipamentos instalados no fundo do mar (Middleton, 1993).

4.2 AS CORRENTES DE TURBIDEZ

Tradicionalmente, as correntes de turbidez são definidas como fluxos gravitacionais de sedimentos onde o mesmo é mantido em suspensão pela turbulência do fluido (Kneller e Buckee, 2000). Entretanto, pode-se caracterizar uma corrente de turbidez utilizando quatro diferentes definições baseadas na: reologia dos fluidos, mecanismo de suporte dos grãos, na força motriz e na relação velocidade/tempo.

Uma boa descrição deste tipo de fluxo exige a caracterização da sua geometria, da evolução da sua velocidade ao longo do meio no qual ela se propaga, bem como da textura do depósito turbidítico por ela gerado.

4.3 GEOMETRIA E DINÂMICA DAS CORRENTES DE TURBIDEZ

As correntes de turbidez geralmente apresentam uma forma específica, podendo ser dividida em três partes: a cabeça, o corpo e, as vezes, a cauda (figura 4.1). A cabeça é geralmente mais alta que o resto da corrente, devido à resistência imposta pelo fluido ambiente. Nesta região ocorre intensa instabilidade, turbulência e mistura de fluidos. Quando o escoamento da corrente gravitacional se dá num plano horizontal, a cabeça permanece com um tamanho quase constante, mas, para planos inclinados, a cabeça aumenta de tamanho continuamente. Conforme Middleton (1993), a cabeça da corrente é o principal local de erosão de material na corrente.

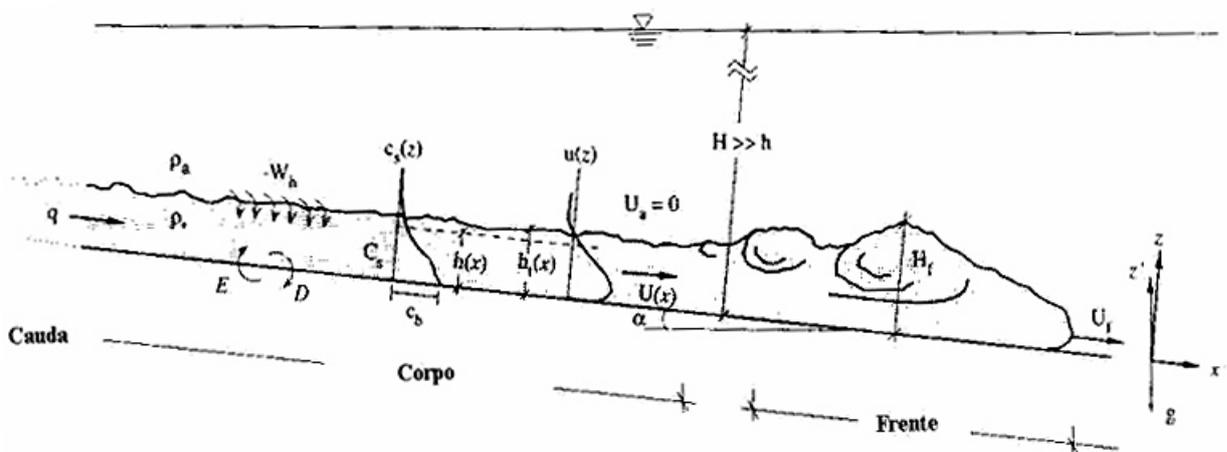


Figura 4.1 Esquema ilustrando a geometria e a dinâmica de uma corrente de turbidez (Fonte: Altinalkar et al., 1996)

Uma análise mais próxima da região da cabeça da corrente (figura 4.2) mostra que ela é composta por fendas e rachas por onde o fluido ambiente penetra no corpo da corrente. Uma mistura muito maior dos fluidos, através da incorporação de fluido ambiente ao fluxo (aproximadamente 90% da mistura), acontece atrás da cabeça sob forma de desprendimento de vórtices de Kelvin Helmholtz (figura 4.2a). Internamente, a região da cabeça mostra que o sentido do movimento interno das partículas é fortemente divergente, predominantemente para cima, o que ajuda a prover a força turbulenta para manter o sedimento suspenso.

Já o corpo da corrente usualmente apresenta velocidade maior que a cabeça, na ordem de 30 a 40% (Kneller e Buckee, 2000), sendo a principal região de deposição de material. Britter e Simpson (1978) usaram observações e medidas visuais para dividir a corrente, atrás da cabeça, 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.

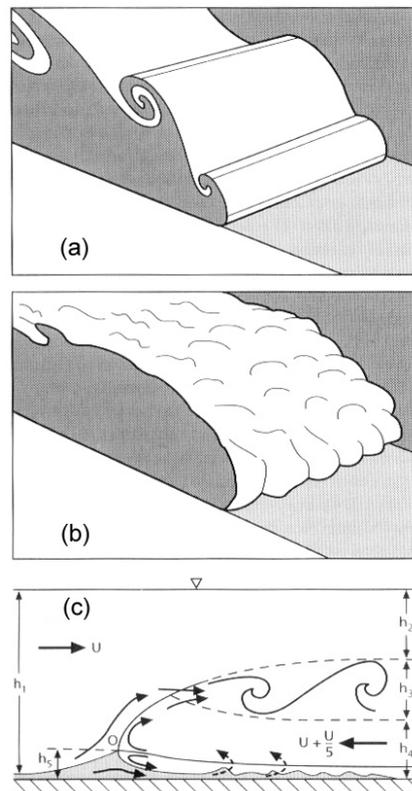


Figura 4.2 Geometria das correntes de densidade (Fonte: Simpson 1987)

(a) Instabilidades de Kevin Helmholtz (vórtices); (b) Os lobos e rachas que se desenvolvem no limite da cabeça da corrente e (c) Uma seção da corrente com vários parâmetros da cabeça e do fluxo: h_5 altura do nariz da corrente; h_4 , altura do corpo; h_3 , zona de mistura; h_2 , altura do fluido ambiente; h_1 , altura total do fluido ambiente; U , velocidade.

O movimento contínuo da cabeça da corrente com velocidade constante requer a transferência de fluido mais denso da cauda para a cabeça, no intuito de compensar a perda de carga, a mistura de fluidos e a perda de fluido denso na região da cabeça. (figura 4.2c). Ainda é pouco conhecida a distribuição de velocidades e a natureza das condições de contorno na corrente de densidade. O fluxo dentro da cabeça é muito instável e não uniforme por causa da entrada de fluido proveniente do corpo e cauda da corrente, da incorporação de fluido ambiente e do desprendimento de vórtices.

Inicialmente, a identificação dos principais parâmetros que atuam no escoamento pode ser feita a partir da análise das equações que definem esse tipo de escoamento. Entretanto, somente a simulação física dessas correntes permite avaliar qual a influência de cada um deles na definição de suas características geométricas (altura da cabeça, altura do corpo, entre outras) e dinâmica (velocidade de avanço da corrente e oscilações). Em função de serem conservativas ou não, as correntes de densidade apresentam diferentes relações entre suas características geométricas e dinâmicas

Fabian (2002) cita, baseado em seus experimentos, que correntes de densidade conservativas apresentam aspectos e características dinâmicas semelhantes às das correntes não conservativas. Contudo, por se tratarem de escoamentos sem a presença de processos de erosão e deposição de sedimentos, as correntes conservativas permitem uma análise apenas dos parâmetros que afetam o seu movimento sem a influência dos processos de troca de sedimentos. Posteriormente, com a comparação da dinâmica de correntes conservativas e não conservativas, pode-se estabelecer, com mais precisão, a influência dos processos de erosão e deposição nessas correntes.

Já Bonnecaze et al. (1993) citam que correntes de turbidez não conservativas são consideravelmente mais complexas que as conservativas por causa da concentração de partículas em suspensão. Conseqüentemente, a força motriz de empuxo da corrente muda ao longo do tempo e do espaço ao longo da corrente. As partículas tendem a se depositar, diminuindo a diferença de densidade entre a corrente e o fluido ambiente. Alternativamente, se a corrente está passando rápido o suficiente sobre um fundo erodível, os sedimentos podem ser incorporados à mesma, o que aumenta a concentração e a força de empuxo que move a corrente. Tanto a taxa de sedimentação quanto a taxa de incorporação de material dependem da velocidade e das dimensões da corrente de gravidade, portanto, existe uma grande associação entre o transporte de sedimentos e a dinâmica do fluxo.

Segundo Middleton (1993), três aspectos são importantes na dinâmica das correntes de turbidez e seus padrões de depósitos: o critério da auto suspensão, a troca de sedimento com o fundo e a mistura na interface superior da corrente.

O critério da auto suspensão (Bagnold, 1962) ocorre em fluídos que recebem uma entrada de energia gravitacional suficiente para manter a turbulência do fluído e para sustentar as partículas em suspensão. Essas partículas passam a induzir o movimento do fluido e receber desse, a energia para continuar em suspensão. Esse processo é chamado de auto suspensão porque o sedimento suspende a si próprio no sentido em que ele não requer gasto de energia líquida pelo fluido.

Outro processo que influencia na dinâmica do fenômeno 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, pois aumenta a diferença de densidade entre o fluxo e o meio, provocando o seu movimento por distâncias maiores. A situação inversa também é possível devido ao processo de deposição de material da corrente para a 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.

Ainda segundo Middleton (1993), o carregamento de fluido ambiente para dentro da corrente de densidade, provocando a mistura dos fluidos na interface superior do fluxo, seria outro aspecto importante na dinâmica das correntes de densidade. Esta mistura seria função do Número de Froude Densimétrico, um adimensional que relaciona a força de inércia com a força da gravidade.

4.4 EFICIÊNCIA DE FLUXO

O conceito de eficiência de fluxo, definido como sendo a habilidade do fluxo de carregar sedimento em direção à bacia, foi lançado como forma de analisar/explicar a presença de sedimentos mais grossos na bacia. Com base nas observações de campo, Mutti (1992) concluiu que a geometria final de camadas individuais ou grupo de camadas depositadas é determinada não só pela declividade e configuração da bacia, mas também pela eficiência do fluxo, a qual é controlada pela faixa granulométrica do sedimento suspenso e o volume do fluxo. Nesta interpretação, fluxos altamente eficientes são fluxos com grandes volumes e/ou que carregam quantidades significativas de finos e que têm competência para transportar areias através de grandes distâncias devido à baixa taxa de perda de quantidade de

movimento. Enquanto que os fluxos não eficientes possuem, relativamente, pequenos volumes e/ou carregam basicamente sedimento grosso, e têm uma alta taxa de perda de quantidade de movimento. Estes conceitos foram incorporados por Reading e Richards (1994) na sua classificação de sistemas turbidíticos baseada no tamanho de grão e tipo de sistema de alimentação. Estes mesmos autores acrescentam que, apesar das críticas ao conceito de eficiência, esta distinção é valiosa porque traz à tona a importância do tamanho de grão e o volume de sedimento como dois parâmetros fundamentais que influenciam o “caráter” da fácies, arquitetura e escala de sistemas de águas profundas.

4.5 INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO FINA NOS PROCESSOS DE SEDIMENTAÇÃO

Observações de depósitos naturais, estudos experimentais de transporte e deposição de sedimentos, bem como considerações gerais sobre a dinâmica dos grãos de sedimento indicam que a deposição do mesmo por correntes de turbidez deve ser tratada em termos de diversas populações de faixas granulométricas. Isso ocorre porque, para um mesmo fluxo, grupos de grãos de diferentes tamanhos são geralmente mantidos em suspensão através de diferentes mecanismos de suporte. Da mesma forma, o processo de sedimentação ocorre em etapas, as quais vão se sucedendo a medida em que a eficácia do mecanismo de suporte dos grãos muda em função da desaceleração do fluxo (Lowe, 1982).

A primeira fase de sedimentação geralmente envolve a deposição dos cascalhos mais grossos e sedimentação do material em suspensão para formar a gradação inversa, bem como a gradação normal e massiva de cascalhos. A deposição de cascalho fino e areia ocorre durante a segunda fase através da sedimentação por arraste. A corrente agora com baixa densidade residual continua, eventualmente, depositando sua carga sedimentar durante uma terceira fase de sedimentação.

O aumento na proporção de finos na corrente leva à manutenção dos grãos em suspensão, uma vez que as frações finas se mantêm suspensas até a corrente praticamente desaparecer. A presença de finos também diminui a velocidade de queda do material mais grosso e, assim, retarda sua sedimentação. Gladstone et al. (1998) em seus experimentos, utilizando apenas dois tamanhos de grãos, constatam que pequenas diferenças na velocidades das correntes ocorrem quando elas são compostas 100% por sedimento fino e quando são compostas predominantemente por finos. O mesmo estudo também relata que a adição de pequenas porções de partículas grossas a uma corrente composta por sedimento fino não causa variações significativas na velocidade do fluxo. Entretanto, variações significativas de

velocidade ocorrem quando os fluxos contêm 100% de sedimento grosso ou quando contêm 90% sedimento grosso e 10% sedimento fino. Ou seja, a adição de pequenas porções de finos a uma corrente compostas por grãos grossos causa uma mudança substancial no comportamento do fluxo.

4.6 SÍNTESE

A análise da literatura referente ao tema deste trabalho, sobretudo daqueles aqui apresentados, nos sugere que as correntes de turbidez são fenômenos hidráulicos e sedimentológicos muito complexos. Também, se compreende que os fluxos de maior interesse para os geólogos são os eventos catastróficos de grandes proporções, que são extremamente difíceis de se observar e medir na natureza (Middleton, 1993).

Uma alternativa tem sido a utilização de simulações físicas para explorar alguns aspectos hidráulicos das correntes de turbidez, entretanto, apesar dos sucessos obtidos, as mesmas têm sérias limitações quanto ao seu uso para reproduzir a sedimentação destes fluxos diretamente. A complexidade da interação entre o sedimento em suspensão, a turbulência e a mistura na parte superior do fluxo ainda não está totalmente explicada, dados os conhecimentos atuais do fenômeno. Mesmo que muitas incertezas permaneçam, progressos significativos têm acontecido na interpretação de turbiditos e no entendimento dos aspectos do comportamento hidráulico das correntes de turbidez. Os problemas que ainda permanecem, embora difíceis, têm sido vigorosamente atacados nos últimos anos por pesquisadores de diversas áreas (geologia, oceanografia, meteorologia e hidráulica).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo do efeito de frações finas, conservativas ou não, sobre as correntes de turbidez e seus depósitos, foi realizado nas instalações experimentais do Neced, existentes no Pavilhão Fluvial do IPH, seguindo a metodologia de ensaios desenvolvida pelo Núcleo, mas adaptada para a situação em análise. No que segue serão descritas as instalações e as metodologias empregadas.

5.1 INSTALAÇÕES E EQUIPAMENTOS

As instalações experimentais são compostas por um canal de declividade variável, pelo sistema de alimentação sólida, pelo sistema para injeção da mistura no meio e por equipamentos para registro e análise das correntes e seus depósitos.

5.1.1 Canal de declividade variável

Para se atingir os objetivos propostos foram conduzidas séries de experimentos utilizando o canal bidimensional de pequeno porte. Este canal, com dimensões 300 x 12,5 x 20 cm e fundo posicionado na horizontal (figura 5.1), tem suas laterais e seu fundo de vidro, possibilitando assim a total visualização do desenvolvimento do fluxo. As placas de vidro que formam as paredes e o fundo do canal (com o mesmo comprimento do canal, para que não haja irregularidades na parte interna onde o fluxo se desenvolve) são fixadas em apoios de acrílico, que por sua vez são fixados em uma viga metálica. Esta viga se encontra apoiada sobre dois tripés metálicos de altura variável, o que permite mudanças de declividade do canal (embora o mesmo tenha sido usado neste trabalho apenas na horizontal). A montante do canal se localiza o reservatório onde a mistura que formará a corrente é realizada, antes de ser injetada no canal. A extremidade final do canal possui uma câmara, para a dissipação dos fluxos, evitando que eles sofram reflexão e interfiram no depósito gerado. Esta câmara tem 32 x 40 cm e está conectada a um conduto com registro por onde o canal é esvaziado. A parte superior da câmara possui a mesma altura das laterais do canal, enquanto que sua parte inferior encontra-se a 30 cm abaixo do fundo do canal.

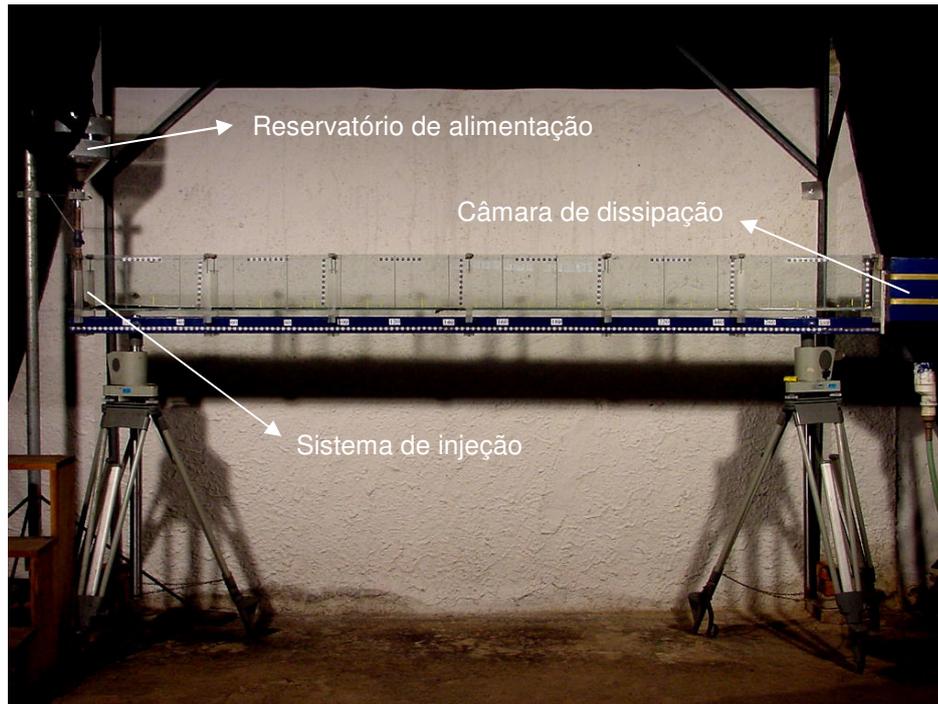


Figura 5.1 Canal bidimensional de pequeno porte

5.1.2 Sistema de alimentação sólida

O sistema de alimentação sólida é composto por um reservatório, que recebe a mistura, um conduto dotado de registro e um difusor (figura 5.2).

O reservatório de alimentação encontra-se montado em uma estrutura metálica, 70 cm acima da base do canal. A partir da abertura de um tampão, localizado na parte inferior do reservatório, a mistura é liberada para o conduto. Através de um registro, é controlada a quantidade de mistura que sai do reservatório e atinge o difusor, o qual, posicionado a 45° com a horizontal, permite a injeção da mistura ao longo de toda a seção transversal do canal. Este difusor é composto por um conduto de PVC com 25 mm de diâmetro e dotado de cinco orifícios com 10 mm de diâmetro e comprimento de 11,5 cm (figura 5.3).

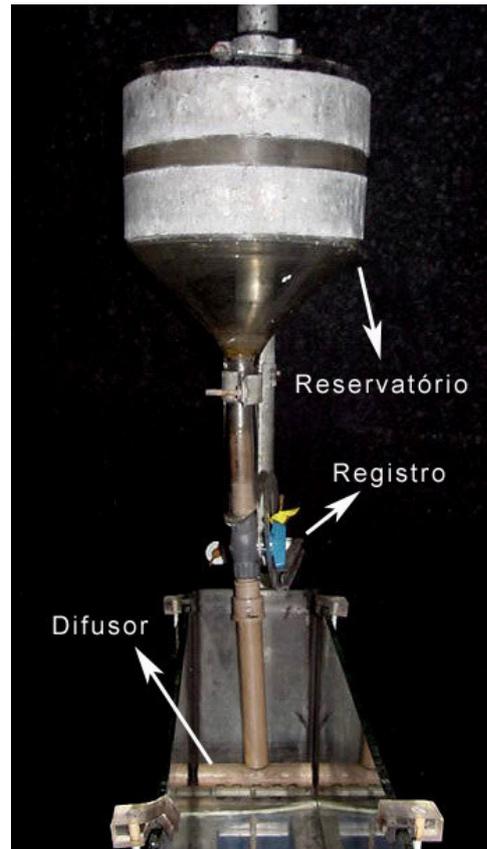


Figura 5.2 Sistema de alimentação sólida

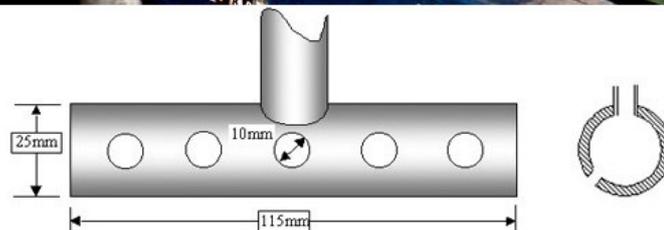


Figura 5.3 Sistema de injeção - difusor

5.1.3 Mecanismo de ignição

Nas simulações físicas de correntes de densidade, dois mecanismos de ignição dos fluxos são comumente adotados: uma alimentação contínua de material durante um determinado tempo, chamado ensaio de fluxo contínuo de material, ou a liberação abrupta de um volume de material fixo, chamado ensaio por pulso. O primeiro, simularia o aporte contínuo de sedimentos causado por cheias fluviais catastróficas de rios que alimentam o sistema, enquanto que, o segundo, simularia fluxos induzidos por sismos ou desmoronamentos de pacotes sedimentares no topo do talude. Neste estudo optou-se por adotar o mecanismo de ignição através do método de fluxo contínuo.

5.1.4 Acompanhamento e registro dos ensaios

Para a avaliação das características dinâmicas e geométricas da corrente de densidade foram utilizadas duas vídeo-câmeras digitais, sendo que uma acompanhava o desenvolvimento da cabeça da corrente e a outra acompanhava o corpo da mesma. Os registros da primeira câmera serviram, basicamente, para a aquisição de dados referentes à velocidade e à aceleração da cabeça da corrente, enquanto que as imagens obtidas pela segunda foram utilizadas para a análise da geometria das correntes (altura da cabeça e do corpo). As imagens adquiridas foram posteriormente processadas em computadores com emprego de softwares específicos para tratamento de imagens.

As vídeo-câmeras utilizadas eram equipamentos digitais da Marca Sony, modelos DCR-TRV110 e DCR-TRV120 (figura 5.4), cujas características técnicas se encontram apresentadas na tabela 5.1.

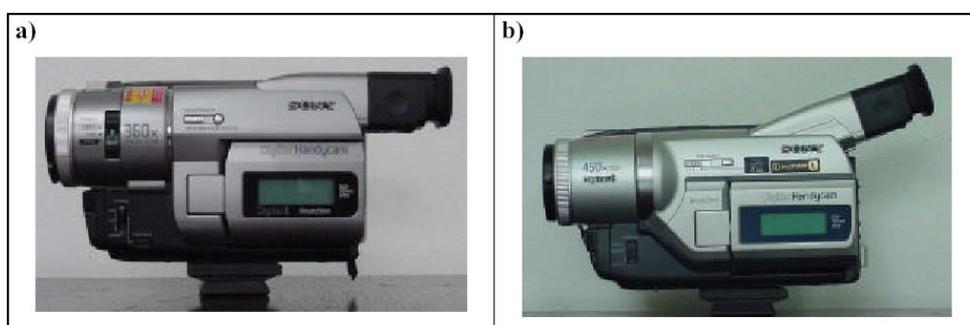


Figura 5.4 (a) Filmadora DCR-TRV110 e (b) Filmadora DCR-TRV120

Tabela 5.1 Características técnicas das câmeras filmadoras empregadas

Modelo	DCR-TRV110	DCR-TRV120
Sistema de gravação	Digital 8mm	
Resolução horizontal	500 linhas (240 sistema VHS-C)	
Zoom ótico	25x	
Taxa de transferência	29,97 quadros / segundo	
Zoom digital	360x	450x
Conexão com computador	Entrada "fire wire"	

5.1.5 Granulômetro Laser

Para a análise granulométrica dos depósitos formados pelas correntes de turbidez foi utilizado, primeiramente, o tradicional método do peneiramento. Em um segundo momento, após a aquisição de um analisador de partículas a laser modelo Cilas 1180 (figura 5.5) pelo Necod, a análise granulométrica passou a ser feita com o uso deste aparelho.



Figura 5.5 Analisador de partículas a laser

Com o uso do granulômetro, a análise granulométrica tornou-se um processo mais automatizado, tendo como conseqüências uma redução do tempo despendido nas análises, um aumento da precisão e da quantidade de informações acerca dos sedimentos utilizados nas simulações e da textura dos depósitos gerados.

A rotina de cada operação deste equipamento para analisar as amostras é iniciada com a introdução de uma pequena quantidade de material coletado em uma cuba contendo água, sendo que o grau de umidade da amostra não influencia o resultado, agilizando o

processo em comparação ao método tradicional onde a secagem da amostra em estufa era imprescindível. Uma vez inserida na cuba, a mistura da água com o sedimento da amostra é homogeneizada através de um agitador mecânico (um ultra-som também pode ser utilizado para dispersar agregados de partículas), sendo a mesma recirculada através de uma bomba por uma tubulação que conduz a mistura até a seção de medição. A medição por sua vez, é realizada através da incidência de um feixe de raio laser sobre as partículas de sedimento, sendo o tamanho das mesmas medido em função da refração ou desvio provocado por elas. A tecnologia empregada pelo aparelho lhe permite distinguir partículas com tamanho variando entre 0,04 a 2500 μm .

5.1.6 Peneirador Tyson de intensidade variável

Antes das misturas de carvão serem compostas para os experimentos, o carvão deve ser selecionado e separado por faixas granulométricas. A separação de grandes quantidades de carvão é realizada através do peneirador Tyson de intensidade variável (figura 5.6).

O peneirador utiliza um motor de 8 pólos/1CV, comandado por um conversor de frequência, onde a intensidade de vibração do equipamento pode ser ajustada. Isto torna-o mais adequado aos materiais utilizados e às granulometrias desejadas, aumentando a eficiência do peneiramento.

Um conjunto de três peneiras, com dimensões de 2,00 x 0,6 x 0,15 m e malhas diferentes, pode ser utilizado a cada peneiramento. Como o equipamento foi instalado a 90 cm do chão, o material passante pelo conjunto de peneiras sobrepostas pode, ainda, ser recolhido junto ao fundo do peneirador.



Figura 5.6 Peneirador Tyson de intensidade variável

5.2 MATERIAL SEDIMENTAR – MISTURA INJETADA

As misturas injetadas foram compostas por sal, bentonita e carvão mineral em proporções distintas, de forma a simular as frações finas (os dois primeiros materiais) e frações mais grossas (carvão) dos sedimentos naturais.

5.2.1 Carvão

O carvão utilizado na primeira e na segunda fase de ensaios é o carvão mineral 205 do tipo Cardiff, obtido junto à empresa Rio Deserto S.A., de Criciúma, Santa Catarina. Sua massa específica é de 1190 kg/m^3 e sua forma é classificada como semi angular e semi arredondada (Manica, 2002). Tem como faixa granulométrica predominante as frações entre 0,177 e 0,063 mm, com D_{50} de 0,090 mm, o que conduz a uma velocidade de queda igual a 0,001 m/s (Manica, 2002).

Já nos ensaios preliminares foi utilizado o carvão mineral 207 do tipo Cardiff, obtido junto à mesma empresa. A massa específica deste carvão é 1360 kg/m^3 , sua forma é classificada como angular a semi-angular. A faixa granulométrica predominante deste material compreende 0,250 a 0,125 mm, com seu D_{50} de 0,150 mm, o que conduz a uma velocidade de queda de 0,0042 m/s (Manica, 2002).

5.2.2 Sal

Para a confecção da porção conservativa das misturas foi utilizado Cloreto de Sódio (NaCl), popularmente conhecido como “sal” ou “sal comum”, largamente utilizado na alimentação. Atualmente o mesmo é produzido pela evaporação da água do mar ou vindo de outras fontes como lagos de sal ou pedras de sal.

5.2.3 Bentonita

Bentonita é o nome genérico das argilas constituídas essencialmente de minerais do grupo das esmectitas, independentemente de sua origem ou ocorrência. A bentonita possui propriedades bastante específicas que têm justificado um grande número de aplicações. No Brasil, as principais aplicações da bentonita são como aglomerante em areias de fundição, com 45% do consumo total, na pelotização de minério de ferro com 30% do consumo e os outros 25% do consumo estão distribuídos entre a perfuração de poços de petróleo e para

captação de água, terra higiênica para gatos, indústria química e farmacêutica, e clarificantes. A bentonita tem sido ainda empregada em catálise, na remoção de poluentes de água, e em cosméticos.

Embora a literatura referente à caracterização de bentonitas de várias regiões do mundo seja muito ampla, são poucos os trabalhos desenvolvidos com bentonitas brasileiras. Por ter granulometria bastante reduzida, o material foi escolhido para o trabalho. A bentonita usada neste estudo possui D_{50} igual a 0,0063 mm.

5.3 METODOLOGIA

A seguir são descritas as metodologias empregadas para a realização dos experimentos, desde a confecção das misturas até a realização do ensaio, bem como para a aquisição e tratamento dos dados.

5.3.1 Mistura

Nas simulações, as misturas de água, sal e carvão mineral utilizadas para a formação das correntes tiveram, aproximadamente, a mesma massa específica de 1010 kg/m^3 , obtidas com a mistura de diferentes quantidades de sedimento em um volume de água de 4 litros, permitindo assim avaliar a influência de cada parcela constituinte.

Nos ensaios preliminares, onde o carvão utilizado foi o do tipo 207 (massa específica de 1360 kg/m^3), a obtenção de uma mistura com massa específica de 1010 kg/m^3 exige a adição de 208g de carvão. Fazendo variar a quantidade de carvão, e completando com sal até atingir a massa específica desejada, criaram-se cinco seqüências de ensaios: 0g (apenas solução salina), 52g, 104g, 156g e 208g de carvão (somente material em suspensão). Quando o carvão empregado é o do tipo 205 (massa específica 1190 kg/m^3), são necessários 360g de material para se atingir 1010 kg/m^3 na massa específica da mistura em 4 litros de água.

O controle do volume de sal misturado foi feito através de um densímetro graduado, com precisão de 1 kg/m^3 . A mistura era então vigorosamente agitada e uma amostra era retirada para a medição da massa específica na proveta (figura 5.7). Da mesma forma, os ensaios da segunda fase tiveram a bentonita adicionada até que a massa específica desejada fosse alcançada, ou seja, o sal da primeira fase de ensaios foi substituída por bentonita na segunda fase.

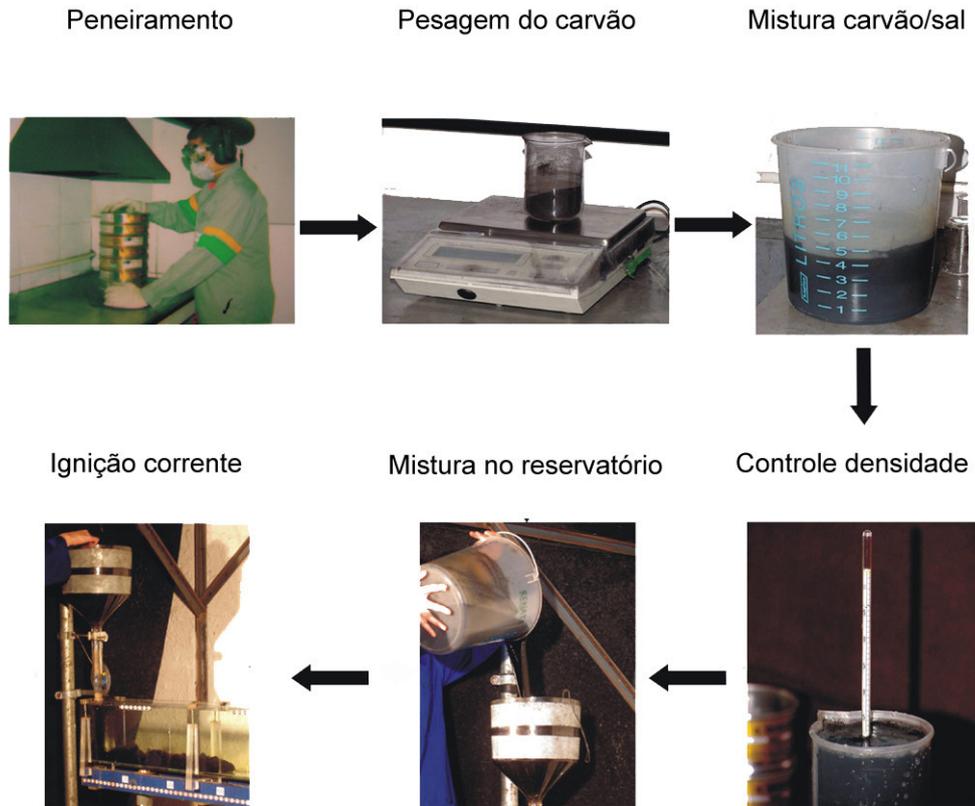


Figura 5.7 Seqüência ilustrando a metodologia

5.3.2 Metodologia dos ensaios

A metodologia empregada para os ensaios é composta por uma série de procedimentos que iniciam com o preparo das instalações e dos equipamentos e finalizam com o tratamento dos dados registrados e coletados, passando pelo método empregado para a execução do ensaio propriamente dito.

O preparo das instalações exige a verificação da declividade do canal feito através do uso de nível eletrônico (para garantir que o canal estivesse na horizontal) e o posicionamento dos equipamentos que irão registrar o ensaio. Os tripés com as vídeo câmeras eram colocados sobre as marcações no chão, para permitir o registro de imagens sempre do mesmo ponto.

O canal era então completado com água através de uma mangueira colocada na sua extremidade final até que o nível da água alcançasse o limite superior da câmara de dissipação. A saída do reservatório acima do canal era fechada para a colocação da mistura e se iniciava sua agitação. Após a certificação de que todos os aparelhos que registrariam o ensaio estavam ligados, a mistura era então introduzida no canal, passando por um conduto com difusor numa vazão de, aproximadamente, 6,5 l/min. Esta vazão foi calibrada, para uma

dada posição de abertura do registro, através da razão entre o volume injetado e o tempo para o esvaziamento do reservatório de alimentação.

Quanto à técnica empregada para gerar as correntes de densidade, foi adotada a simulação de correntes simples, ou seja, fluxo composto por apenas uma injeção de mistura, conforme denominação adotada pelo Neced. Desta forma, a corrente evoluía sobre o fundo de vidro do canal, sem que houvesse um substrato móvel que permitisse a troca de sedimento. Também devemos notar que, apesar do canal permitir alterações na sua declividade, todos os ensaios foram realizados com o mesmo posicionado na horizontal.

Decorridas algumas horas após a realização do ensaio, com o material já sedimentado, o registro a jusante do canal era aberto, para deixar que apenas um fio de água saísse, fazendo com que o nível da água baixasse lentamente, evitando assim que houvesse remobilização dos depósitos formados.

5.3.3 Metodologia da aquisição e tratamento dos dados

A metodologia de aquisição e tratamento de dados visa permitir registrar a passagem da corrente a fim de se obter parâmetros característicos de sua dinâmica, sua geometria e seus padrões deposicionais.

5.3.3.1 Dinâmica

Para a análise da dinâmica da corrente, o canal foi marcado, longitudinalmente, em intervalos de 5cm (figura 5.8), no intuito de cronometrar a passagem da corrente por cada marcação, para posteriormente serem calculadas as velocidades e acelerações da cabeça da corrente. Os tempos de passagem foram tomados com a utilização das imagens adquiridas pela primeira vídeo-câmera e de softwares para tratamento de imagens (Adobe Premiere® e DV Studio®). Através de uma planilha eletrônica, estes dados foram transformados em velocidades e acelerações locais para posterior análise.

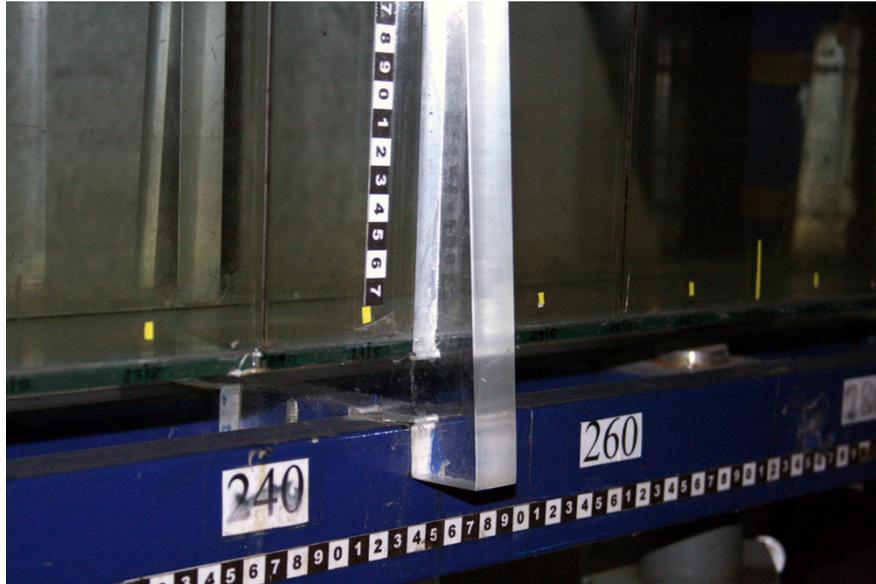


Figura 5.8 Marcações no canal para a tomada de medidas

5.3.3.2 Geometria

As imagens fornecidas pela segunda vídeo-câmera foram utilizadas para o estudo da geometria das correntes. A análise da geometria das correntes se baseia na avaliação das alturas da cabeça e do corpo, assim como de sua forma, sobre fotos (quadros) isolados quando a frente da corrente passava por seções distantes 40 cm umas das outras. Foram tomadas medidas de altura da cabeça e do corpo das correntes em seções determinadas do canal, ou seja, sete medidas no primeiro caso, e seis medidas no segundo (figura 5.9). As medidas da altura do corpo foram realizadas em duas posições: uma a 40 cm e outra a 60 cm atrás do nariz (figura 5.10). As escalas horizontais e verticais fixadas ao longo do canal serviram de referência para a tomada das dimensões da cabeça e do corpo, através de fotografias, no software *Image Tool*.

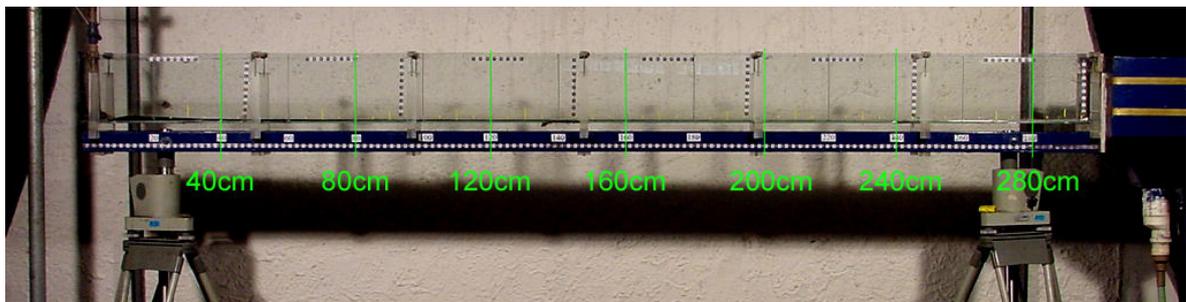


Figura 5.9 Seções de referência para tomadas de medidas

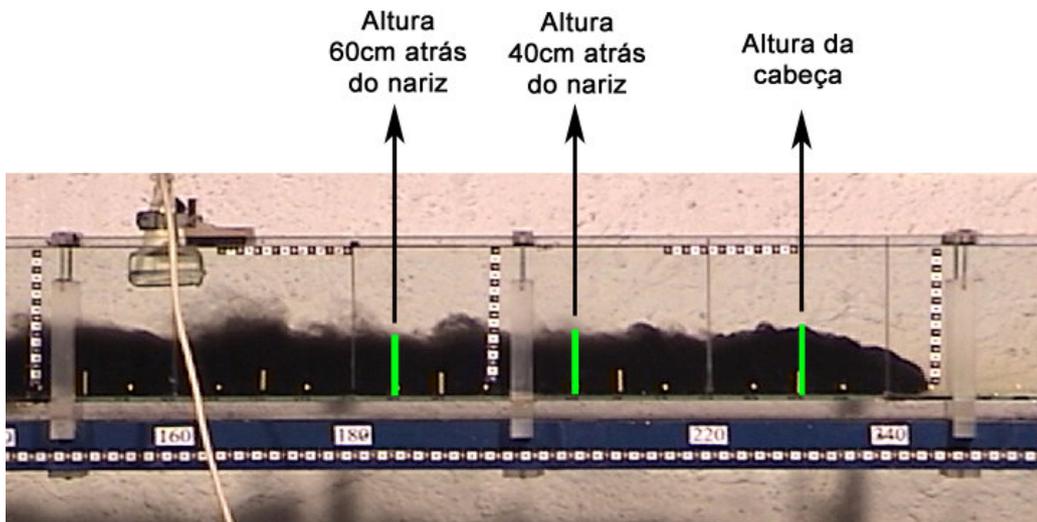


Figura 5.10 Pontos de medição da geometria das correntes

5.3.3.3 Depósito

Com o canal já sem água, o material era completamente coletado com o auxílio de uma espátula. Nos ensaios preliminares, o material foi recolhido a cada 50 cm, totalizando seis amostras por experimento. Já na primeira e segunda fase, o depósito foi amostrado em intervalos de 10 cm, acondicionado em potes plásticos e etiquetados para a pesagem e posterior análise de granulometria (figura 5.11).



Figura 5.11 Amostras acondicionadas em potes plásticos para análise granulométrica

6 ENSAIOS

6.1 PROGRAMA DE ENSAIOS

Entende-se por ensaio o conjunto de operações que compreendem a preparação da mistura a compor a corrente de densidade, a preparação da instalação, a ignição da corrente, o esvaziamento do canal e a coleta de dados após a sedimentação do material.

Para se atingir os objetivos propostos, séries de simulações foram conduzidas no canal conforme metodologia descrita. Inicialmente, foram realizados ensaios com misturas de água e sal para formar correntes de densidade com a mesma massa específica e volume das misturas a serem testadas, com o intuito de calibrar a vazão, através do ajuste do registro que se encontra entre o reservatório e o difusor.

Foram também feitas marcas no chão do pavilhão, a 10 metros de distância do canal, para que os tripés portando as vídeo câmeras ficassem sempre na mesma posição, numa distância tal que a paralaxe não fosse significativa.

Devido à sua simplicidade de manuseio, o canal permite grande agilidade no preparo dos ensaios.

Os ensaios foram divididos em três grupos. O primeiro grupo foi composto por ensaios preliminares, onde utilizou-se carvão do tipo 207 e sal para a formação das correntes. Estes ensaios serviram para testar e ajustar as metodologias de ensaios e de confecção das misturas. Os registros obtidos permitiram avaliar as características dinâmicas, geométricas e de granulometria dos depósitos.

Os outros dois grupos de ensaios foram as Fases I e II. Na Fase I as correntes foram compostas por uma mistura de água, sal e carvão mineral do tipo 205. Este grupo de ensaios procura determinar a influência do uso de diferentes proporções de sal e de carvão na composição da massa específica da mistura que forma a corrente de densidade, através da avaliação das alterações sofridas por suas características geométricas, dinâmicas e seus padrões deposicionais.

Na Fase II, o sal dos ensaios da Fase I foi substituído por bentonita. Esse grupo de ensaios tem por objetivo estabelecer a influência da bentonita no suporte dos grãos maiores durante o desenvolvimento da corrente de turbidez. Foi dispensada atenção especial às alterações sofridas na capacidade de transporte e seleção de grãos dos fluxos de densidade, quando na presença de material muito fino em sua composição. Posteriormente, estes dados serão confrontados com os dados das correntes geradas por carvão e sal.

Foi definida uma proporção de faixas granulométricas para a composição do carvão a ser usado nas simulações, que pode ser vista na tabela 6.1. Para a fase preliminar e a primeira fase de ensaios, com as correntes compostas por carvão (207 e 205, respectivamente) e sal, foram realizadas três repetições de cada ensaio, totalizando vinte e sete experimentos (tabela 6.2). Para a segunda fase, com as correntes compostas por carvão 205 e bentonita, foram realizados quatro ensaios com duas repetições cada. Cada ensaio teve repetições, no intuito de evitar possíveis comportamentos anômalos devido a erros experimentais.

Tabela 6.1 Quantidade de carvão por diâmetro do grão utilizado para a formação das correntes das Fases I e II

Ensaio	Tipo Carvão	Massa Total (g)	Tamanho do grão (mm)			
			0,297 - 0,210	0,210 - 0,149	0,149 - 0,105	0,105 - 0,074
EP I	207	52	7,8 g	13 g	18,2 g	13 g
EP II		104	15,6 g	26 g	36,4 g	26 g
EP III		156	23,4 g	39 g	54,6 g	39 g
EP IV		208	31,2 g	52 g	72,8 g	52 g
I e V	205	90	13,5 g	22,5 g	31,5 g	22,5 g
II e VI		180	27 g	45 g	63 g	45 g
III e VII		270	40,5 g	67,5 g	94,5 g	67,5 g
IV		360	54 g	90 g	126 g	90 g
		%	15%	25%	35%	25%

Tabela 6.2 Características dos ensaios

Ensaio	Fase	Tipo de carvão	Proporção de carvão	Proporção de sal dissolvido	Proporção de bentonita	Repetições	Volume	Massa Específica
Sal 100%	Preliminar	-	-	100%	-	3	4 litros	1010 kg/m ³
Preliminar I		207 ($\rho = 1360\text{kg/m}^3$)	25% (52g)	75%	-	3	4 litros	1010 kg/m ³
Preliminar II		207 ($\rho = 1360\text{kg/m}^3$)	50% (104g)	50%	-	3	4 litros	1010 kg/m ³
Preliminar III		207 ($\rho = 1360\text{kg/m}^3$)	75% (156g)	25%	-	3	4 litros	1010 kg/m ³
Preliminar IV		207 ($\rho = 1360\text{kg/m}^3$)	100% (208g)	-	-	3	4 litros	1010 kg/m ³
Ensaio I	Primeira (Fase I)	205 ($\rho = 1190\text{kg/m}^3$)	25% (90g)	75%	-	3	4 litros	1010 kg/m ³
Ensaio II		205 ($\rho = 1190\text{kg/m}^3$)	50% (180g)	50%	-	3	4 litros	1010 kg/m ³
Ensaio III		205 ($\rho = 1190\text{kg/m}^3$)	75% (270g)	25%	-	3	4 litros	1010 kg/m ³
Ensaio IV		205 ($\rho = 1190\text{kg/m}^3$)	100% (360g)	-	-	3	4 litros	1010 kg/m ³
Ensaio V	Segunda (Fase II)	205 ($\rho = 1190\text{kg/m}^3$)	25% (90g)	-	75%	2	4 litros	1010 kg/m ³
Ensaio VI		205 ($\rho = 1190\text{kg/m}^3$)	50% (180g)	-	50%	2	4 litros	1010 kg/m ³
Ensaio VII		205 ($\rho = 1190\text{kg/m}^3$)	75% (270g)	-	25%	2	4 litros	1010 kg/m ³
Ensaio VIII		-	-	-	100%	2	4 litros	1010 kg/m ³

7 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos dos experimentos e suas respectivas análises. A partir das imagens obtidas durante a evolução da corrente, foram determinadas as alturas do corpo e da cabeça da corrente (parâmetros geométricos) e as velocidades de propagação da cabeça (parâmetros dinâmicos). Partindo da coleta de amostras do material sedimentado no canal, foi determinada a distribuição longitudinal da granulometria (padrão deposicional).

Primeiramente, serão expostos os resultados e as análises dos Ensaio Preliminares. Posteriormente, serão exibidos os resultados e as análises da Primeira e da Segunda fases de ensaios, já estabelecendo comparações entre as mesmas. Finalizando, serão apresentadas as comparações entre os Ensaio Preliminares e a Primeira Fase de Ensaio.

7.1 ENSAIOS PRELIMINARES

7.1.1 Geometria

A figura 7.1 apresenta uma seqüência de fotos tiradas durante a passagem das correntes, com diferentes teores de sal e carvão, em diferentes trechos do canal. Nelas pode-se notar mudanças na geometria da corrente a medida que a parcela de sedimento adicionado varia. Na corrente conservativa (100% Sal) observa-se claramente o desenvolvimento de cabeça e corpo bem definidos. Essa definição desaparece na medida em que a concentração do material dissolvido diminui e aumenta a quantidade de material em suspensão. Um desprendimento de vórtices mais intenso junto à cabeça e um aumento das dimensões da corrente (tanto a cabeça como o corpo) também são verificados.

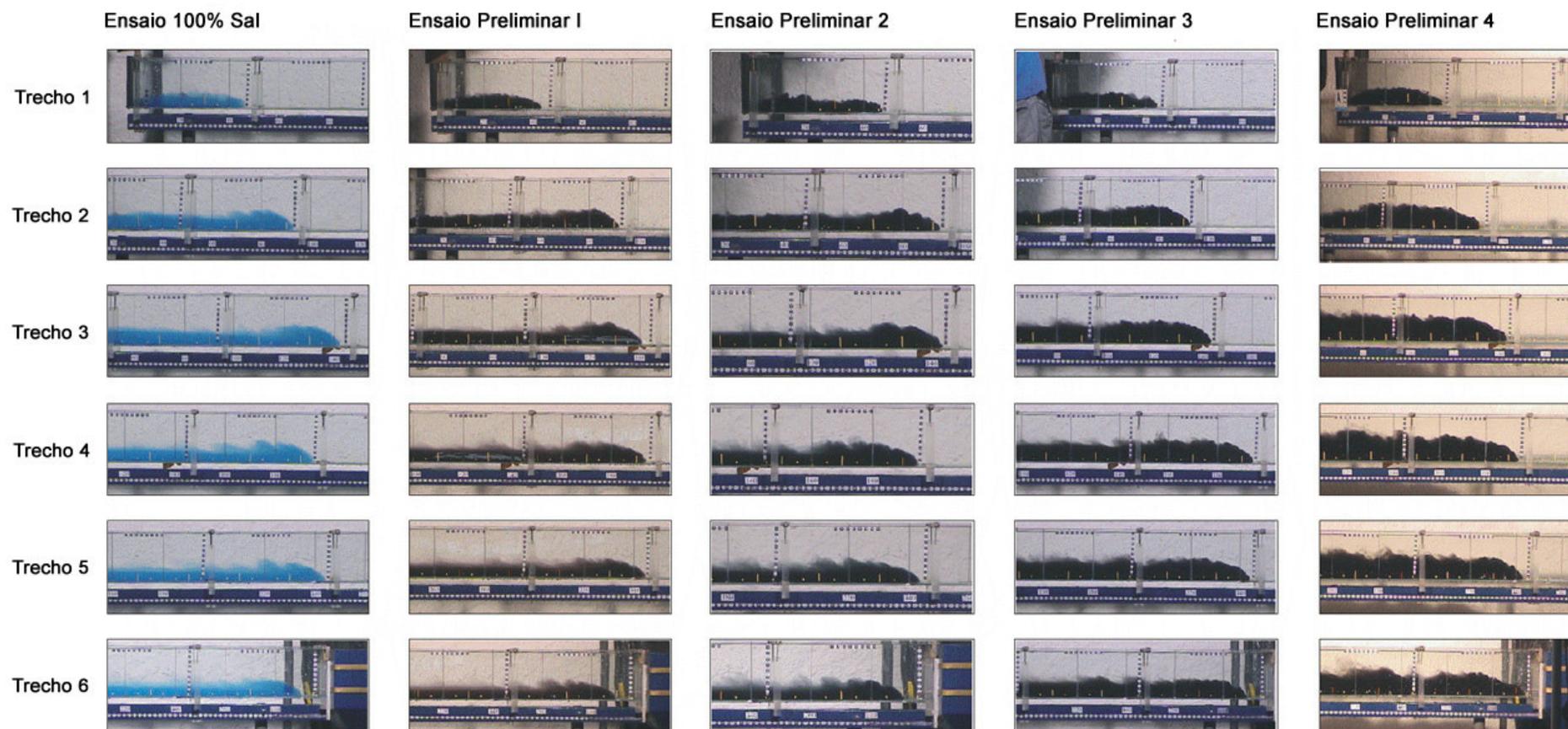


Figura 7.1 Sequência de fotos tiradas no mesmo trecho do canal

A tabela 7.1 apresenta as alturas da cabeça e do corpo das correntes determinadas segundo procedimento descrito no item 5.3.3.2.

Tabela 7.1 Alturas (cm) da cabeça e do corpo medidas a 40 cm e 60 cm do nariz – Ensaio Preliminares

		Média	Desvio Padrão	40 cm	80 cm	120 cm	160 cm	200 cm	240 cm	280 cm
Cabeça	Sal 100%	7,09	1,27	4,64	6,79	7,52	8,03	8,18	7,31	7,20
	EP I	6,95	1,08	4,71	7,19	7,31	7,59	7,43	7,33	7,07
	EP II	6,81	1,57	3,89	6,17	7,67	8,30	7,98	6,83	6,85
	EP III	7,54	1,97	3,59	7,05	8,75	8,46	8,31	8,63	8,01
	EP IV	9,25	1,45	6,50	9,45	10,54	10,02	9,36	9,71	9,14
Corpo 40 cm	Sal 100%	3,83	0,73	-	5,10	4,27	3,44	3,50	3,39	3,27
	EP I	4,66	0,59	-	5,14	5,03	5,03	4,71	4,34	3,69
	EP II	5,80	0,57	-	6,20	5,49	6,10	5,56	6,23	5,20
	EP III	6,87	0,84	-	6,01	7,48	7,24	7,36	6,76	6,39
	EP IV	9,57	0,84	-	8,83	10,16	10,76	9,21	9,12	9,34
Corpo 60 cm	Sal 100%	4,52	0,81	-	5,32	5,04	5,03	4,41	3,95	3,40
	EP I	5,08	0,44	-	4,97	5,35	5,61	5,13	4,82	4,56
	EP II	6,01	0,60	-	5,44	6,42	6,43	6,10	5,88	5,81
	EP III	6,49	0,69	-	5,32	6,58	6,56	7,02	6,85	6,59
	EP IV	9,12	1,45	-	6,88	9,97	10,20	10,26	8,85	8,54

O comportamento de cada parâmetro medido pode ser visualizado nas figuras 7.2, 7.3 e 7.4. O ensaio realizado com a mistura composta exclusivamente por carvão tem suas dimensões sensivelmente maiores.

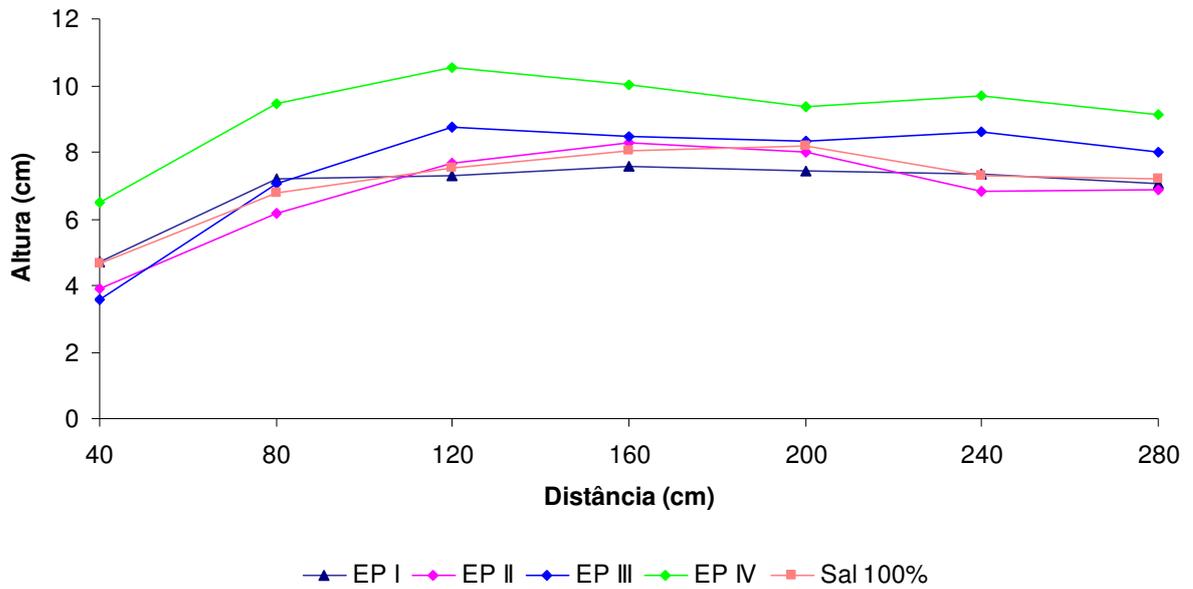


Figura 7.2 Alturas da cabeça da corrente - Ensaios Preliminares

As medidas pontuais do tamanho da cabeça das correntes apresenta apenas o EP IV como tendo um comportamento claramente diferenciado. Os demais ensaios apresentam comportamento sem uma tendência clara quando comparados uns com os outros. Assim, quando a corrente é composta exclusivamente por material granular (EP IV) a cabeça é mais proeminente. Ao passo que na presença do sal não se observa diferença notável na altura da cabeça.

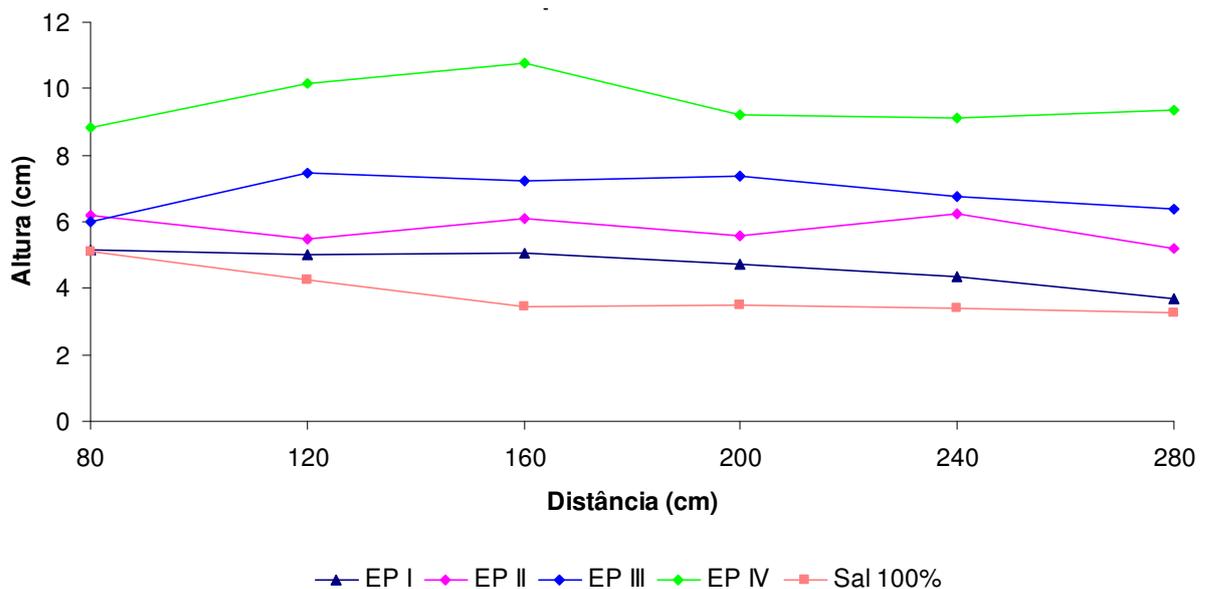


Figura 7.3 Alturas do corpo das correntes 40cm atrás do nariz nos Ensaios Preliminares

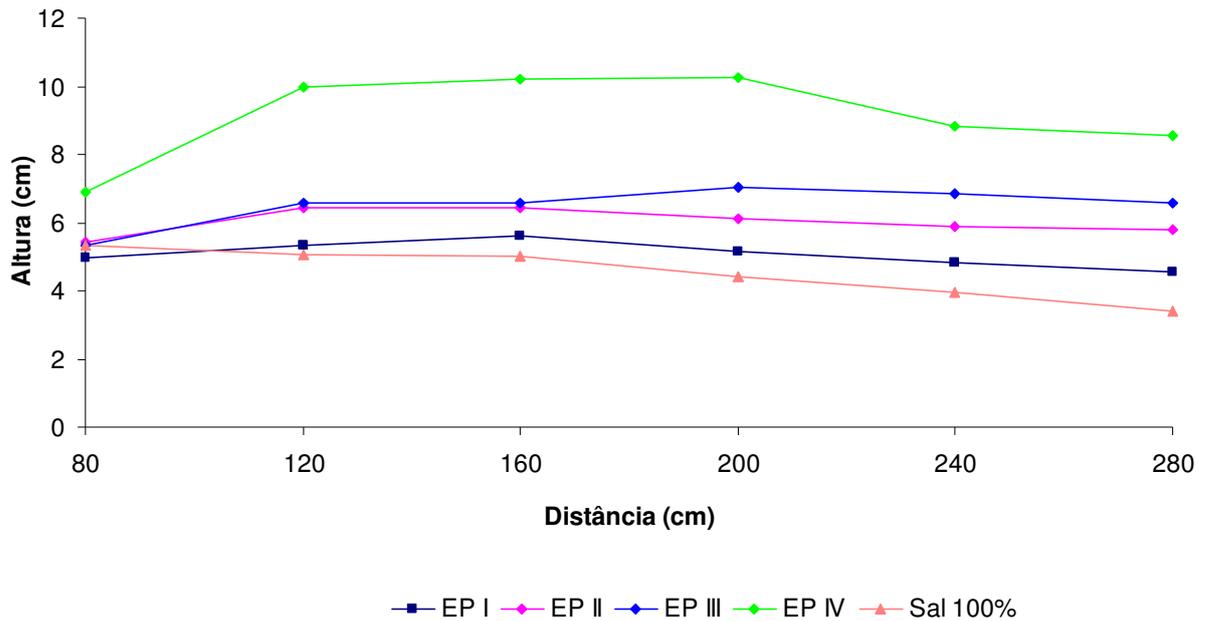


Figura 7.4 Alturas do corpo das correntes 60cm atrás do nariz nos Ensaio Preliminares

Já os valores pontuais de altura do corpo das correntes apresentam-se bem distintos e com um comportamento mais linear ao longo da distância. Nota-se que na medida que há mais material em suspensão nos fluxos (carvão mineral) a altura do corpo aumenta. Este comportamento é facilmente notado nas medidas tomadas a 40 cm atrás do nariz, e também, nas medidas tomadas a 60 cm atrás do nariz, principalmente da metade do canal em diante.

Quanto à variação das alturas da cabeça e do corpo ao longo do canal, nota-se que a partir da distância 120 cm, há uma tendência à estabilização destes valores.

Na figura 7.5 são mostrados os valores médios, calculados a partir das medidas tomadas ao longo do canal para a cabeça, o corpo a 40 cm do nariz e o corpo a 60 cm do nariz. Nota-se que para o ensaio só com sal há uma distinção bem clara entre a altura da cabeça e do corpo, a qual diminui na medida em que aumenta a quantidade de carvão em suspensão. Há pouca diferenciação entre as dimensões médias do corpo tomadas a 40 cm e 60 cm atrás do nariz. A diferença de altura, inicialmente bastante significativa entre a cabeça e o corpo, é reduzida gradativamente nos ensaios na medida em que o carvão é adicionado, até o ponto onde os valores praticamente se igualam, nos fluxos 100% não conservativos (EP IV). O fato de não haver muito contraste entre a altura de corpo e cabeça nas correntes exclusivamente compostas por material em suspensão dificulta a identificação e a definição do que é cabeça e do que é corpo.

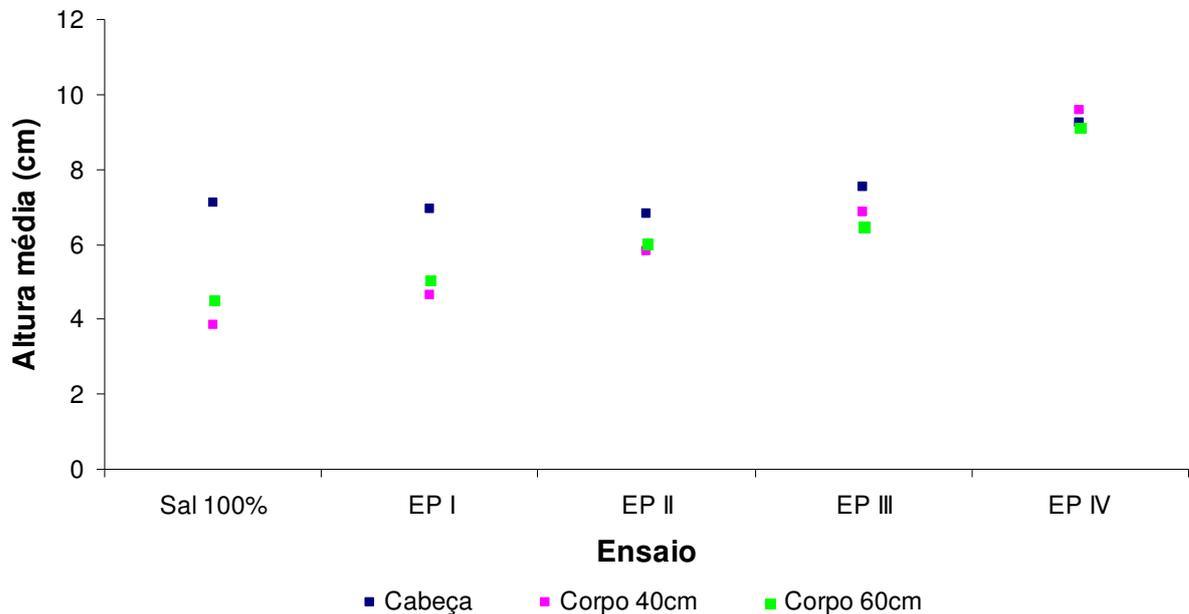


Figura 7.5 Valores médios da geometria dos Ensaios Preliminares

7.1.2 Dinâmica

Sabe-se que a velocidade de avanço de uma corrente de turbidez é diretamente proporcional à diferença de densidade entre o fluido que a compõe e o fluido ambiente (para fluxos sem diferenças significativas de reologia), ou seja, quanto mais densa for a corrente, mais rapidamente ela se desenvolve. Uma corrente composta exclusivamente por sal (corrente conservativa), tem a tendência de perder densidade por incorporação de fluido ambiente, através das fendas e rachas formadas na cabeça e pela formação de vórtices atrás da cabeça. Já uma corrente de turbidez, que contém material sedimentar em suspensão, além deste processo de incorporação de fluido ambiente, sofre uma diminuição da sua massa específica através do processo de sedimentação das partículas, de tal forma que a desaceleração da corrente é mais intensa do que no caso anterior.

Os ensaios realizados neste estudo evidenciam claramente o comportamento, descrito anteriormente, em relação à velocidade de avanço de correntes de turbidez. A tabela A.1 do Apêndice A mostra os valores pontuais de velocidades de avanço da cabeça para os Ensaios da Fase Preliminar (valores em m/s), avaliadas em diferentes posições ao longo do canal.

A figura 7.6 mostra o comportamento dinâmico dos fluxos dos Ensaios Preliminares. Nota-se que, ao longo da evolução da corrente, a variação da velocidade de propagação é da

ordem de 4,4 cm/s, especialmente quando os ensaios contêm uma certa parcela de sal. Contudo, quando a corrente é composta apenas por carvão, a deposição do material ao longo do canal diminui o contraste de densidade, fazendo com que a corrente sofra uma desaceleração através da queda constante da velocidade, visível na figura 7.6. Outro elemento notável são as oscilações registradas na velocidade, sugerindo instantes de aceleração e desaceleração provavelmente causados pelo desprendimento de vórtices na interface, quando então ocorrem trocas entre a mistura e o fluido ambiente.

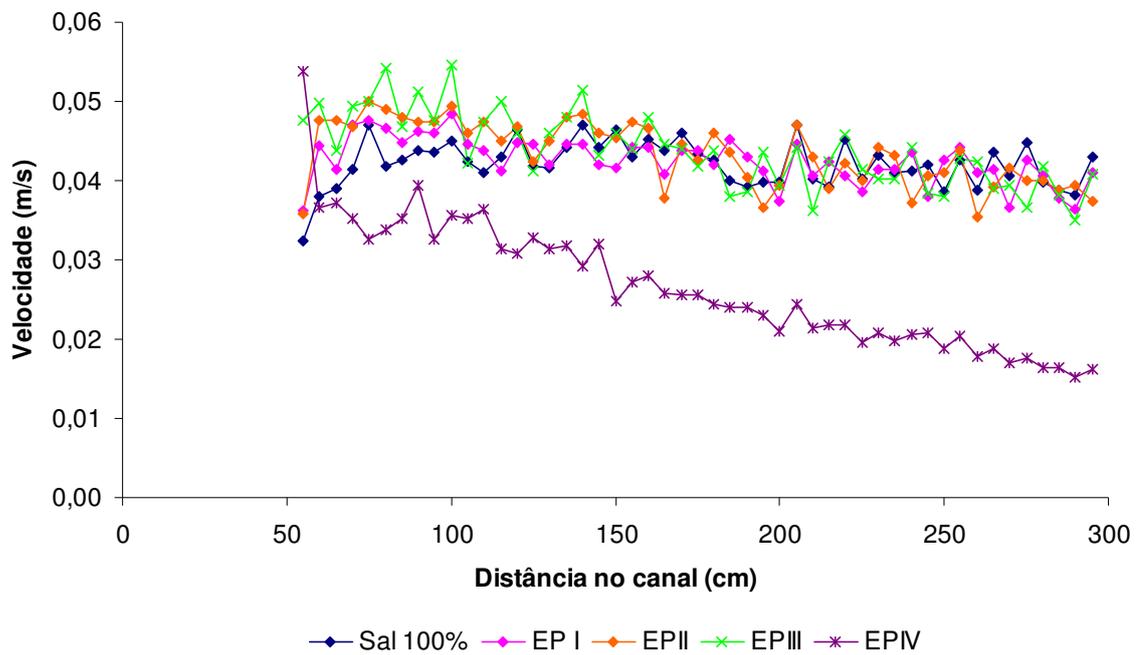


Figura 7.6 Velocidades de avanço dos Ensaio Preliminares

As linhas de tendência (figura 7.7) permitem identificar com clareza a gradativa desaceleração sofrida pelas correntes de turbidez na medida em que a mistura passa a ser composta por parcelas crescentes de material sedimentar.

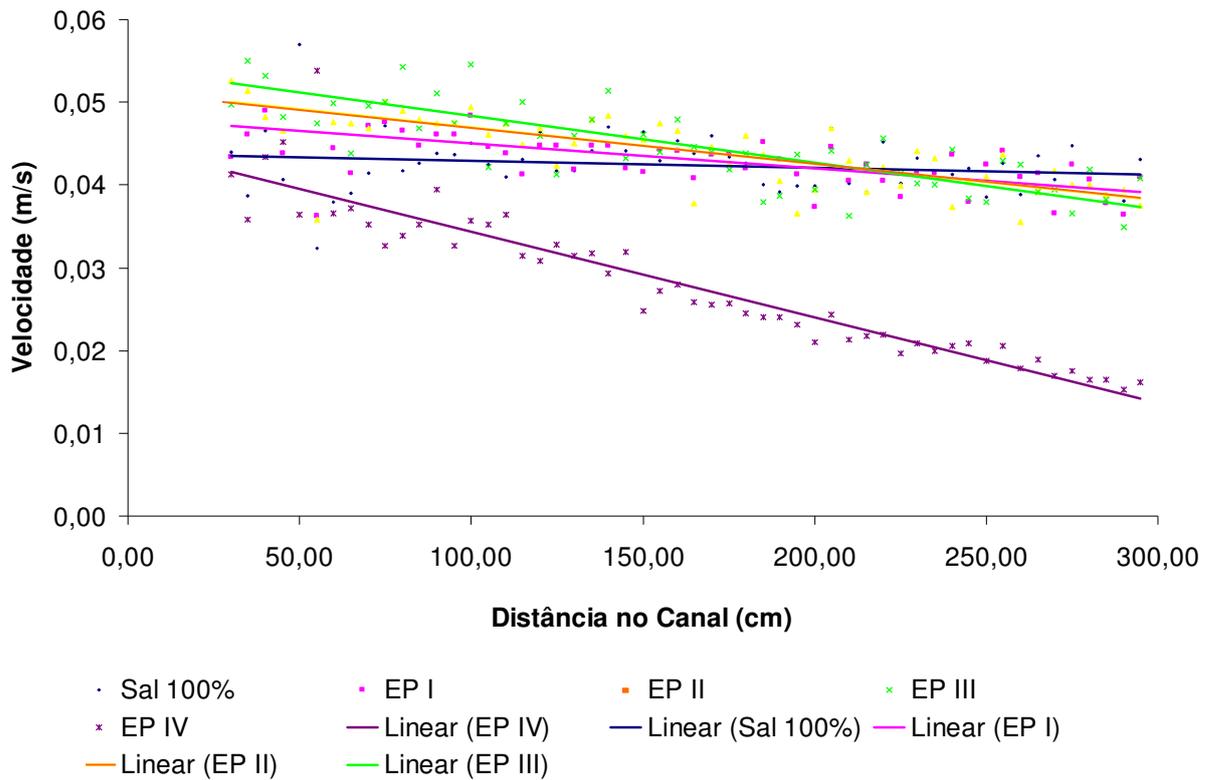


Figura 7.7 Linhas de tendência das velocidades de avanço – Ensaios Preliminares

7.1.3 Padrões de deposição

A análise granulométrica dos depósitos dos Ensaios Preliminares foi feita através de peneiramento das amostras recolhidas após o esvaziamento do canal. As peneiras usadas neste processo são as mesmas usadas anteriormente na preparação do material para a formação das correntes, para que se possa avaliar qual a percentagem de cada tamanho de grão sedimentado por trecho de canal.

Após a secagem do material coletado nos depósitos, os mesmos foram peneirados e, em seguida, pesados. Como cada ensaio utilizou quantidade diferente de carvão em sua composição, para permitir a comparação entre os ensaios foi utilizada a razão entre o material depositado e a quantidade de material adicionado ao fluxo, o que fornece a percentagem depositada. Os valores das percentagens de cada faixa de tamanho de grão no depósito, separado por trecho do canal, são apresentados nas figuras 7.8, 7.9, 7.10 e 7.11.

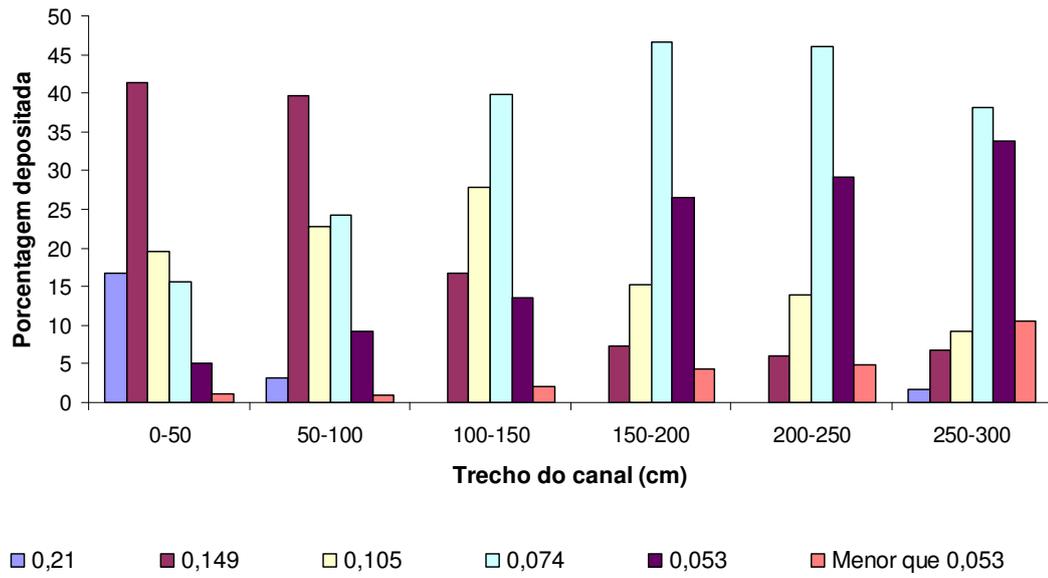


Figura 7.8 Percentagem de peso do material depositado separado segundo frações granulométricas expressas em micra – Ensaio Preliminar I

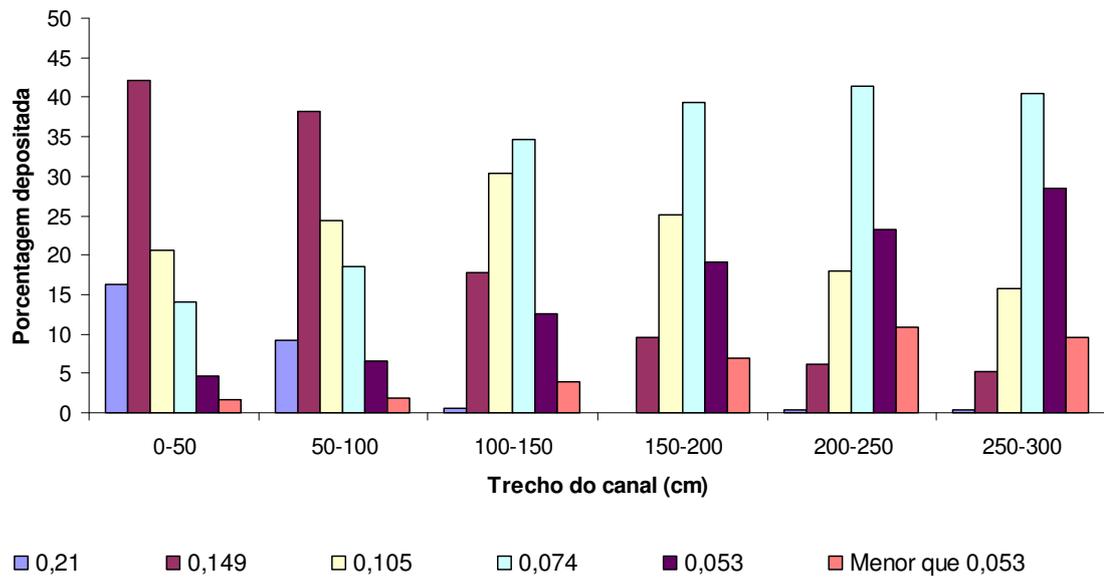


Figura 7.9 Percentagem de peso do material depositado separado segundo frações granulométricas expressas em micra – Ensaio Preliminar II

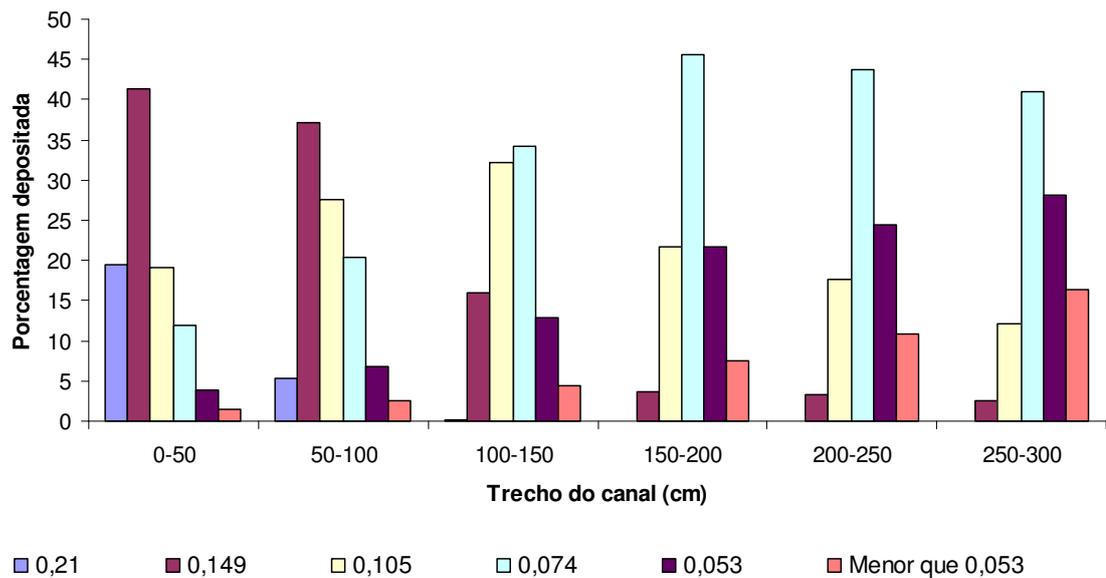


Figura 7.10 Porcentagem de peso do material depositado separado segundo frações granulométricas expressas em micra – Ensaio Preliminar III

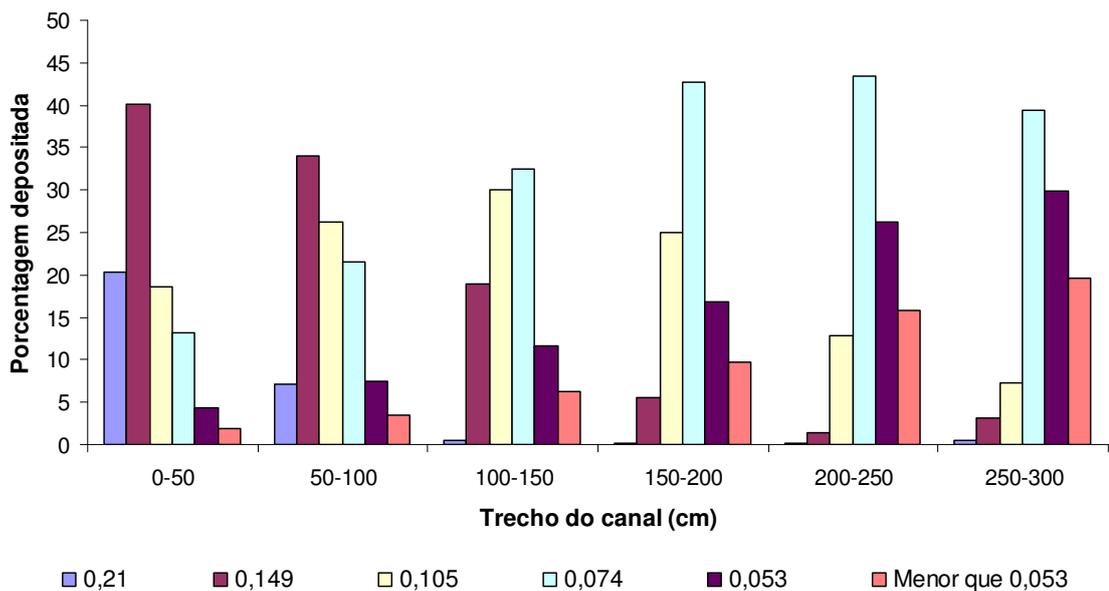


Figura 7.11 Porcentagem de peso do material depositado separado segundo frações granulométricas expressas em micra – Ensaio Preliminar IV

Comparando-se os resultados dos ensaios preliminares, nota-se que os depósitos não mostraram diferenças significativas na sua distribuição granulométrica. O mesmo se constata na análise quantitativa do depósito, quando os dados são agrupados em termos de porcentagem total de depósito por trecho, como mostra a figura 7.12. Cabe lembrar que esta porcentagem é calculada através da razão entre a quantidade de material depositado no trecho e a quantidade de material depositado ao longo de todo o canal, em virtude dos ensaios

utilizarem diferentes quantidades de sedimento. As porcentagens totais de deposição mostram-se foram semelhantes nos diferentes trechos do canal, uma vez que as proporções de material depositado em cada trecho do canal é muito similar. Apenas o Ensaio Preliminar IV apresenta uma distribuição um pouco melhor da quantidade de material depositado, embora não significativa.

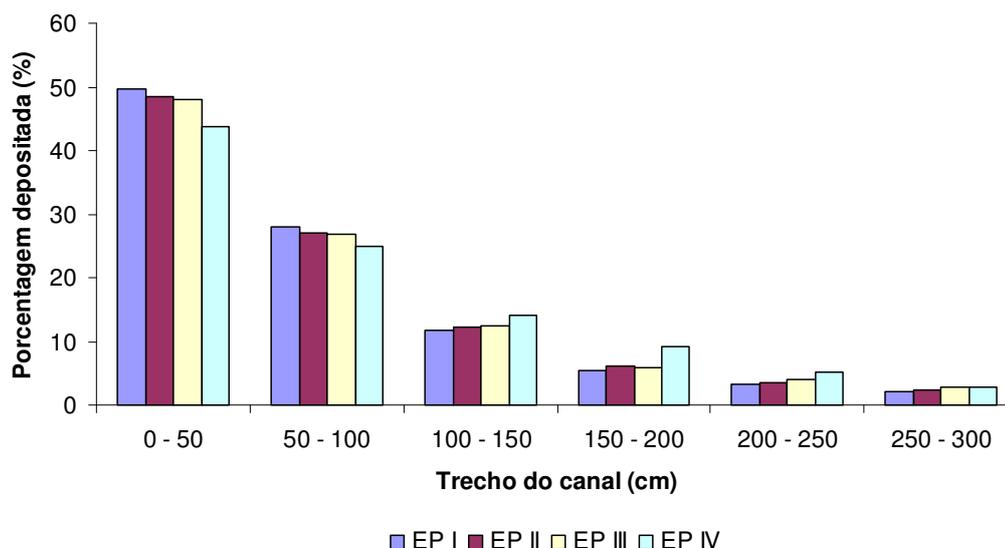


Figura 7.12 Porcentagens totais de deposição por trecho – Ensaios Preliminares

7.1.4 Conclusões Parciais

As correntes de densidade desta fase de ensaios mostraram uma forte influência da relação sal/sedimento nos aspectos geométricos, quando, a partir do aumento da proporção de sedimentos incorporado à corrente, corpo e cabeça da corrente perdem definição e sofrem aumento das suas dimensões.

A dinâmica dos fluxos também é fortemente influenciada pela proporção de sal/sedimento, pois a deposição do sedimento em suspensão na corrente contribui para a diluição do fluxo (além da mistura na interface com o fluido ambiente), conseqüentemente, desacelerando a corrente de turbidez de forma mais intensa na medida em que mais material sedimentar encontra-se incorporado ao fluxo.

Quanto ao material depositado, não houve alteração significativa do tamanho dos grãos depositados e da quantidade de material depositado ao longo do canal. Nota-se que, independente da composição da mistura, o material mais grosso se deposita na entrada do canal, onde também se observam as maiores quantidades de depósito.

7.2 PRIMEIRA E SEGUNDA FASES DE ENSAIOS

Finalizados os ensaios da Fase Preliminar, onde a mistura era composta por carvão 207, com densidade 1,36, passou-se para as fases seguintes do estudo. Na Fase I foi empregado o carvão 205, com densidade igual a 1,19, misturado ao sal. Na Fase II também foi utilizado o carvão 205, porém, a fração fina, antes simulada através do uso do sal, foi substituída por bentonita.

7.2.1 Geometria

A tabela 7.2 apresenta as médias das alturas da cabeça, do corpo 40cm atrás do nariz e do corpo 60cm atrás do nariz de cada ensaio, tomadas em cada uma das sete posições atingidas pela corrente ao longo do canal, conforme descrito no item 5.3.3.2.

Tabela 7.2 Alturas médias da cabeça das correntes (em cm), corpo 40cm e corpo 60cm

			Média	Desvio Padrão	40cm	80cm	120cm	160cm	200cm	240cm	280cm
Cabeça	Fase I	Ensaio I	6,78	1,30	4,33	6,51	7,17	8,01	7,54	6,92	6,94
		Ensaio II	6,98	1,38	4,21	7,20	7,06	8,34	7,18	7,25	7,63
		Ensaio III	6,78	1,17	4,40	6,36	7,37	7,31	7,42	7,38	7,25
		Ensaio IV	6,21	1,23	3,91	6,02	6,70	7,63	6,84	6,30	6,07
	Fase II	Ensaio V	6,96	0,99	4,98	7,04	7,33	7,77	7,59	7,14	6,89
		Ensaio VI	6,91	1,47	3,97	6,14	7,06	8,00	7,92	7,73	7,55
		Ensaio VII	6,66	1,52	3,58	6,00	7,00	7,91	7,46	7,00	7,64
		Ensaio VIII	6,78	1,25	4,05	7,06	7,41	7,59	7,41	7,41	6,53
Corpo 40cm	Fase I	Ensaio I	7,50	1,13	-	6,32	7,30	8,59	8,80	7,23	6,75
		Ensaio II	7,87	0,71	-	7,20	7,08	8,33	8,45	8,27	7,89
		Ensaio III	7,90	1,54	-	6,07	7,36	9,65	9,21	7,63	7,49
		Ensaio IV	7,64	1,15	-	6,70	7,07	7,66	9,11	8,56	6,75
	Fase II	Ensaio V	6,96	0,88	-	6,15	6,61	6,61	7,97	7,17	7,21
		Ensaio VI	7,93	1,18	-	7,28	7,19	7,79	7,95	8,78	8,60
		Ensaio VII	8,40	1,12	-	7,27	7,74	8,64	9,38	9,37	8,00
		Ensaio VIII	6,30	1,02	-	5,83	5,12	5,83	8,12	6,53	6,36
Corpo 60cm	Fase I	Ensaio I	6,94	0,93	-	5,74	6,93	7,58	7,64	6,59	7,17
		Ensaio II	7,47	1,09	-	5,94	7,41	8,51	8,45	7,45	7,05
		Ensaio III	7,84	1,68	-	5,25	7,18	8,59	9,45	8,73	7,87
		Ensaio IV	7,57	1,33	-	5,73	7,46	9,33	8,15	7,63	7,10
	Fase II	Ensaio V	6,34	0,72	-	5,79	6,78	7,06	6,31	6,51	5,61
		Ensaio VI	7,33	1,02	-	5,58	7,99	8,18	7,60	7,06	7,55
		Ensaio VII	7,84	1,92	-	5,00	7,64	10,18	7,91	8,09	8,18
		Ensaio VIII	5,03	0,78	-	4,41	4,24	5,83	5,29	4,41	6,00

Não foram consideradas as medidas de altura do corpo da corrente na seção 40cm, uma vez que o ponto de medição coincidia com o ponto onde estava o difusor de entrada de material e conseqüentemente não havia a formação do fluxo.

As figuras 7.13 e 7.14 ilustram os comportamentos da cabeça da corrente nos ensaios da Fase I (sal + carvão) e da Fase II (bentonita + carvão), respectivamente. Nota-se um comportamento similar para as diferentes misturas. As cabeças das correntes crescem até atingir seu máximo a aproximadamente 160 cm da fonte, a partir de onde sofrem um leve decaimento nos trechos finais do canal. Contudo, é possível observar que, nas correntes com bentonita este decaimento é ainda menor do que nas correntes com sal, bem como existe uma menor variação da altura da cabeça em função da composição da corrente. Em geral, a altura máxima da cabeça na posição 160 cm é da ordem de 8cm. Com sal ela varia entre 8,3 cm (Ensaio II) e 7,3 cm (Ensaio III). Já com bentonita, ela varia entre 8 cm (Ensaio VI) e 7,6 cm (Ensaio VIII).

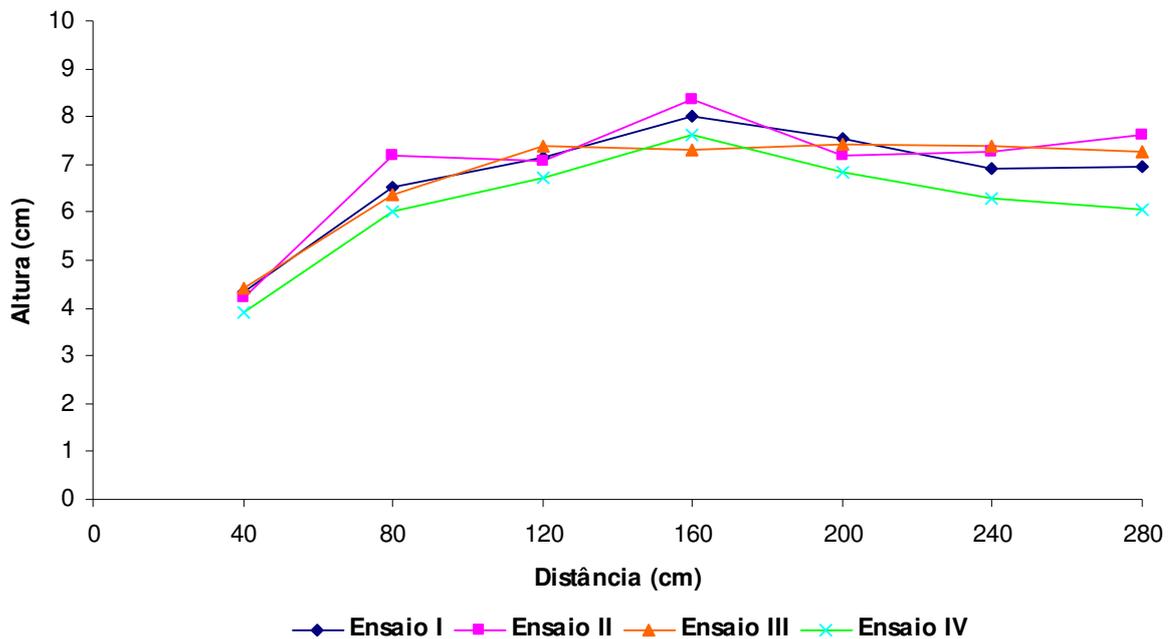


Figura 7.13 Altura da cabeça – Fase I (sal + carvão)

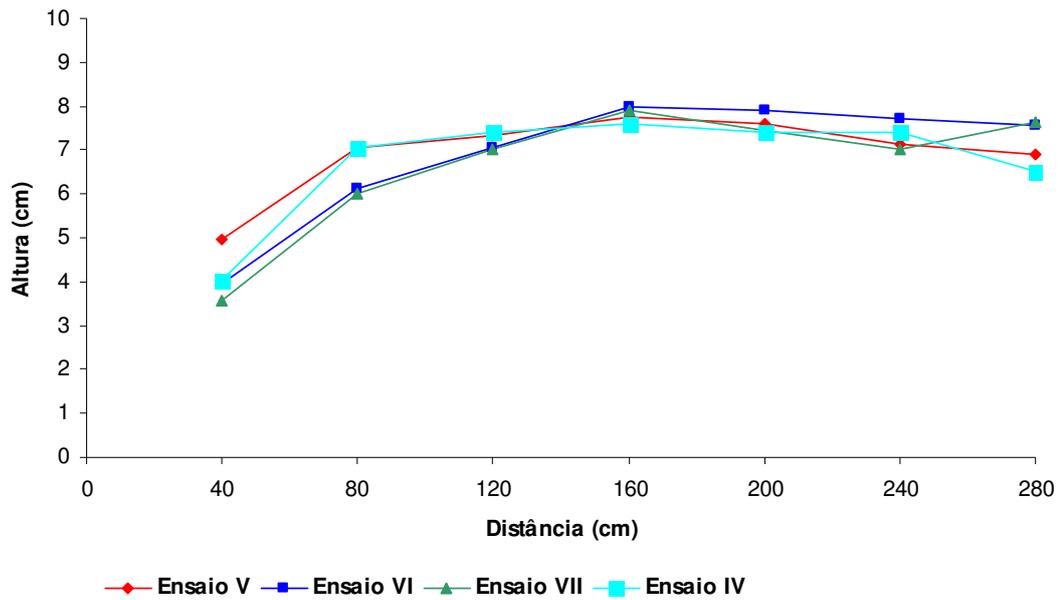


Figura 7.14 Altura da cabeça – Fase II (carvão + bentonita)

Nas medidas do corpo da corrente 40cm atrás do nariz (figuras 7.15 e 7.16) também nota-se uma tendência similar de aumento e decréscimo entre as diferentes misturas. Porém, nos ensaios da segunda fase, onde há a presença de material muito fino (bentonita), a altura do corpo começa a diminuir na medida em que há uma maior proporção deste material fino em suspensão.

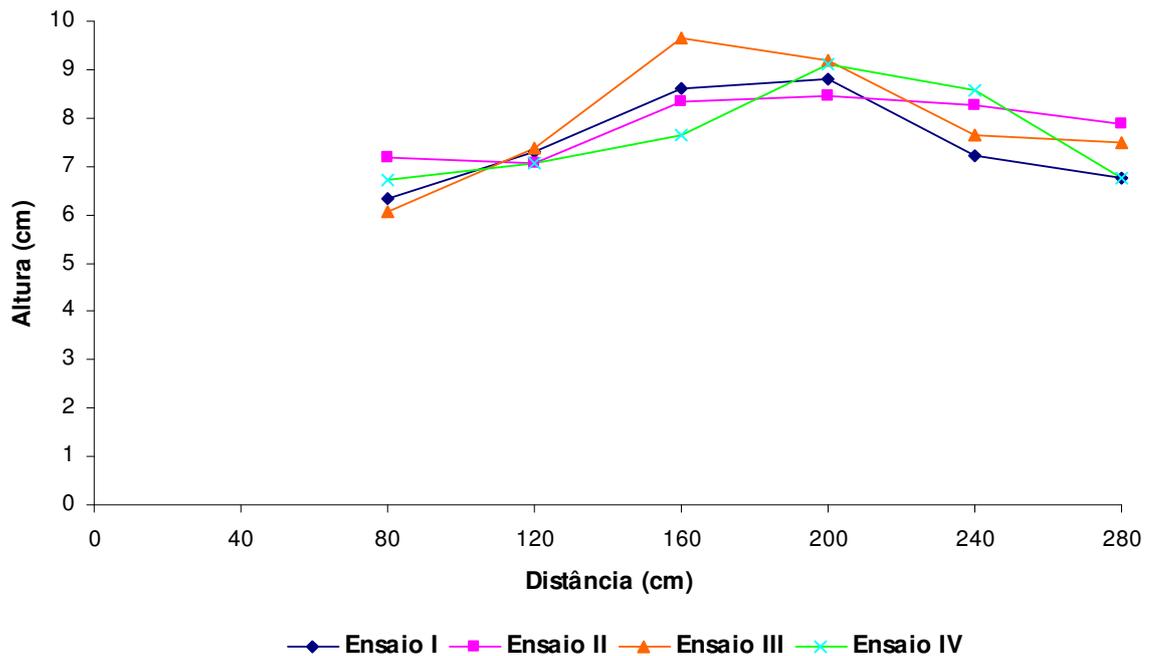


Figura 7.15 Altura do corpo 40cm atrás do nariz – Fase I (sal + carvão)

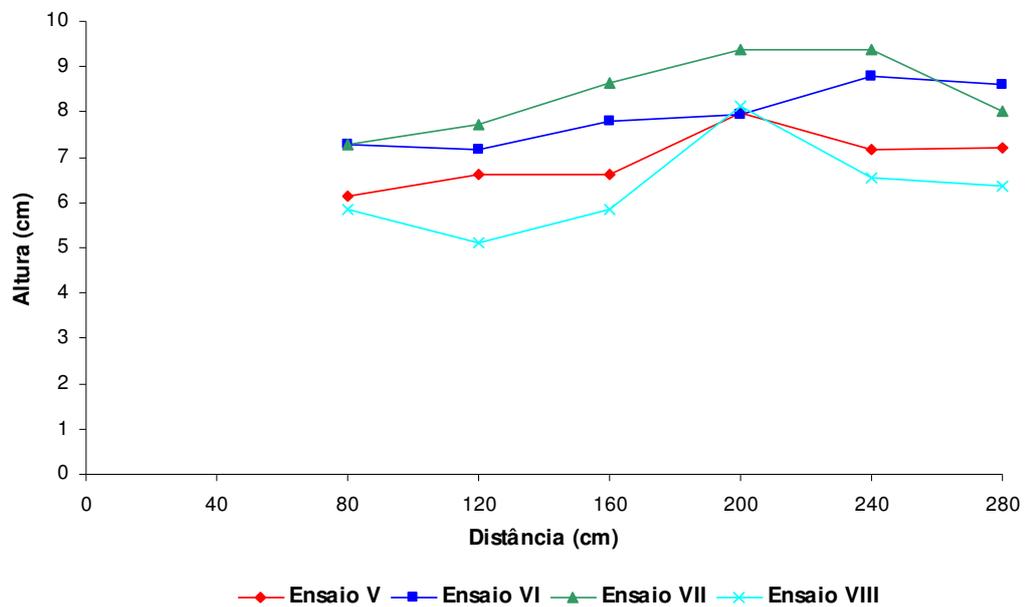


Figura 7.16 Altura do corpo 40cm atrás do nariz – Fase II (carvão + bentonita)

A diminuição das dimensões da corrente na presença de material fino em suspensão torna-se ainda mais clara quando se analisa as medidas tomadas 60cm atrás do nariz da corrente (figuras 7.17 e 7.18), nos ensaios da segunda fase. A altura do corpo das correntes nesta região do fluxo, para misturas de carvão e bentonita diminui de forma ainda mais pronunciada do que nas medidas tomadas a 40 cm atrás do nariz quando da presença de material muito fino em sua composição. Enquanto isso, nos fluxos com sal as diferenças na geometria são bastante reduzidas nas medidas tomadas a 60 cm atrás do nariz.

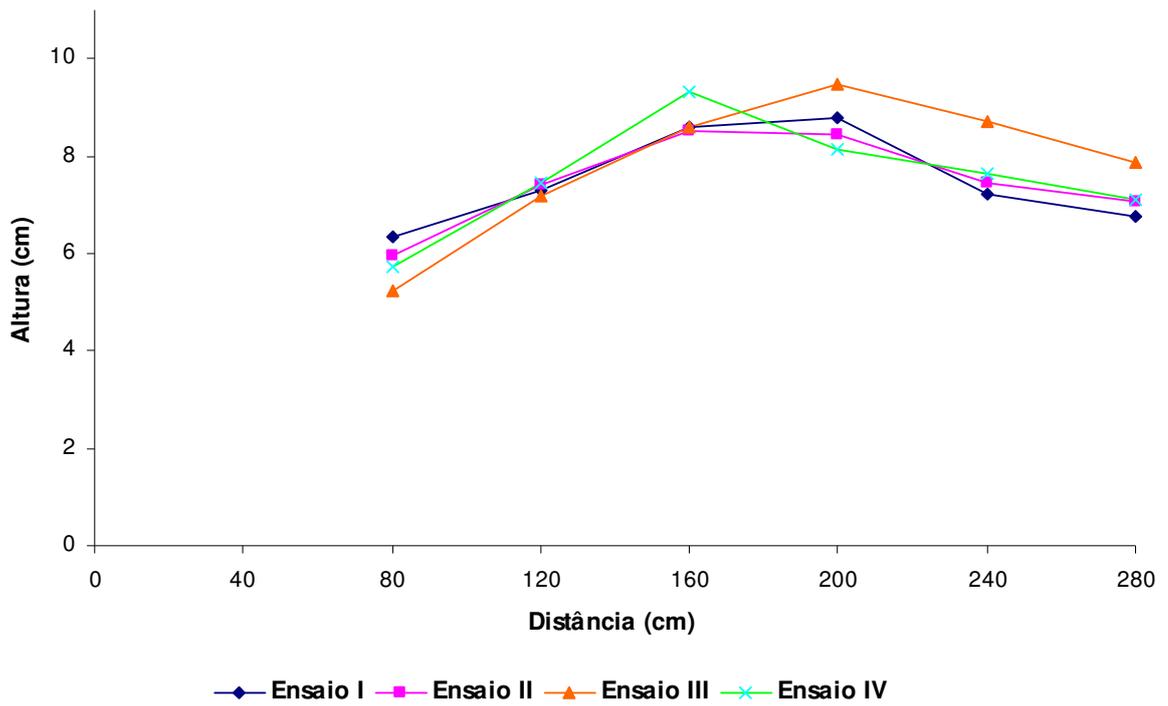


Figura 7.17 Altura do corpo 60cm atrás do nariz – Fase I (sal + carvão)

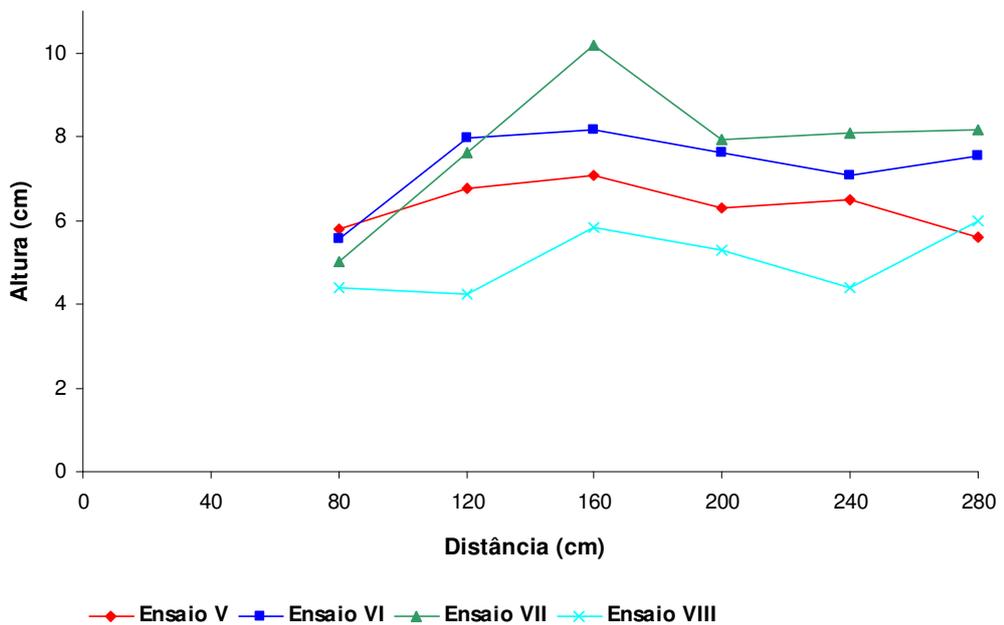


Figura 7.18 Altura do corpo 60cm atrás do nariz – Fase II (carvão + bentonita)

Resumindo, nos ensaios da primeira fase, onde as correntes eram compostas por carvão mineral e sal (ensaios I, II e III) e somente carvão (ensaio IV) as medidas e o

comportamento do fluxo, no que diz respeito à geometria, são muito semelhantes, tanto nas medidas da altura da cabeça como nas medidas da altura do corpo. Já nos ensaios da segunda fase, quando a mistura era composta por carvão mineral e bentonita, a tendência de crescimento e decaimento da altura da corrente é similar, porém com magnitudes diferentes. O que nos leva a concluir que quanto mais fino o sedimento que compõe a corrente de turbidez, menores são as dimensões do corpo da mesma.

A figura 7.19 mostra a variação dos valores médios das alturas da cabeça e do corpo (40 cm e corpo a 60 cm atrás do nariz), ou seja, para cada ensaio foi calculado o valor médio das alturas medidas ao longo do canal. Nota-se que para as correntes com sal (Fase I) a altura da cabeça é sempre menor que a altura do corpo, sendo que, à medida que diminui a presença de sal, há uma tendência da altura do corpo permanecer constante. Por outro lado, na presença de bentonita, a altura da cabeça nem sempre é menor e ocorre um aumento da variabilidade da altura do corpo. Percebe-se também que, em termos médios, na medida em que aumentam os teores de sal, a altura da cabeça tende à altura do corpo. Por outro lado, quando a corrente é composta exclusivamente por bentonita, a cabeça é maior do que o corpo, da mesma forma que o ensaio 100% Sal da Fase Preliminar.

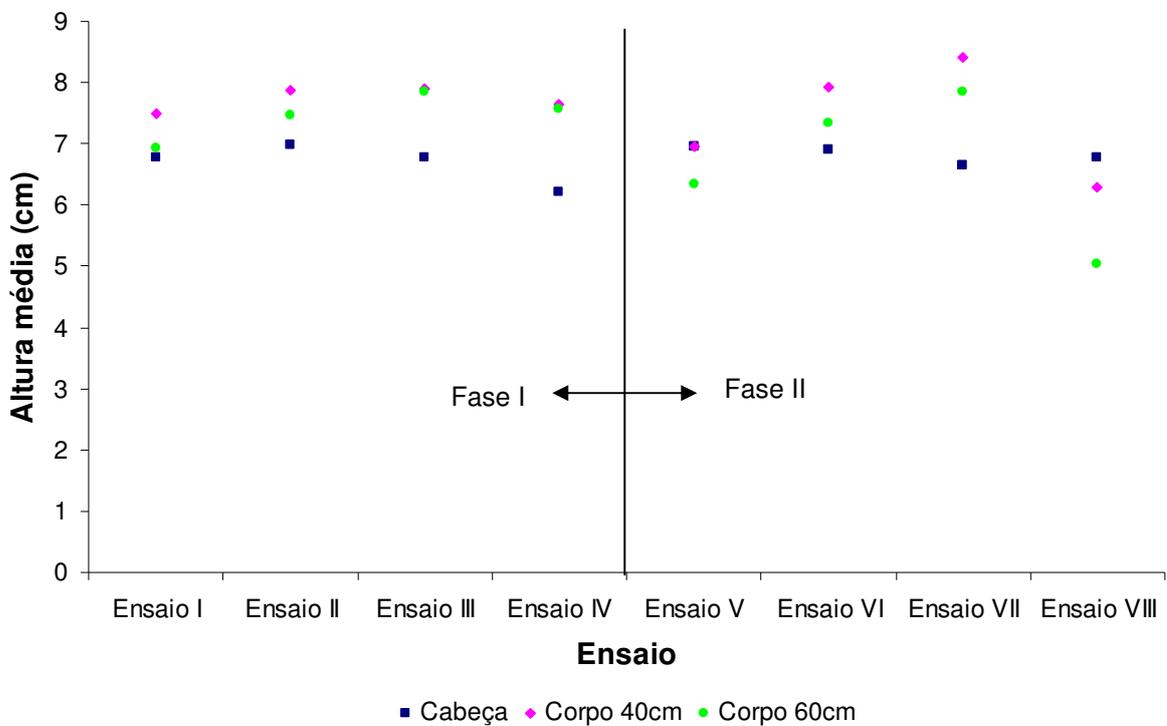


Figura 7.19 Valores médios da geometria dos Ensaios das Fases I e II

7.2.2 Dinâmica

Os dados referentes às velocidades e acelerações do fluxo foram coletados e processados conforme descrito no Capítulo 5. As velocidades médias, extraídas de todas as repetições, em função da posição ao longo do canal e da composição da mistura, estão apresentadas na tabela A.2 do Apêndice A.

As figuras 7.20 e 7.21 apresentam, graficamente, a variação das velocidades de propagação da cabeça da corrente para as misturas da Fase I (carvão e sal) e para as misturas da Fase II (carvão e bentonita), respectivamente.

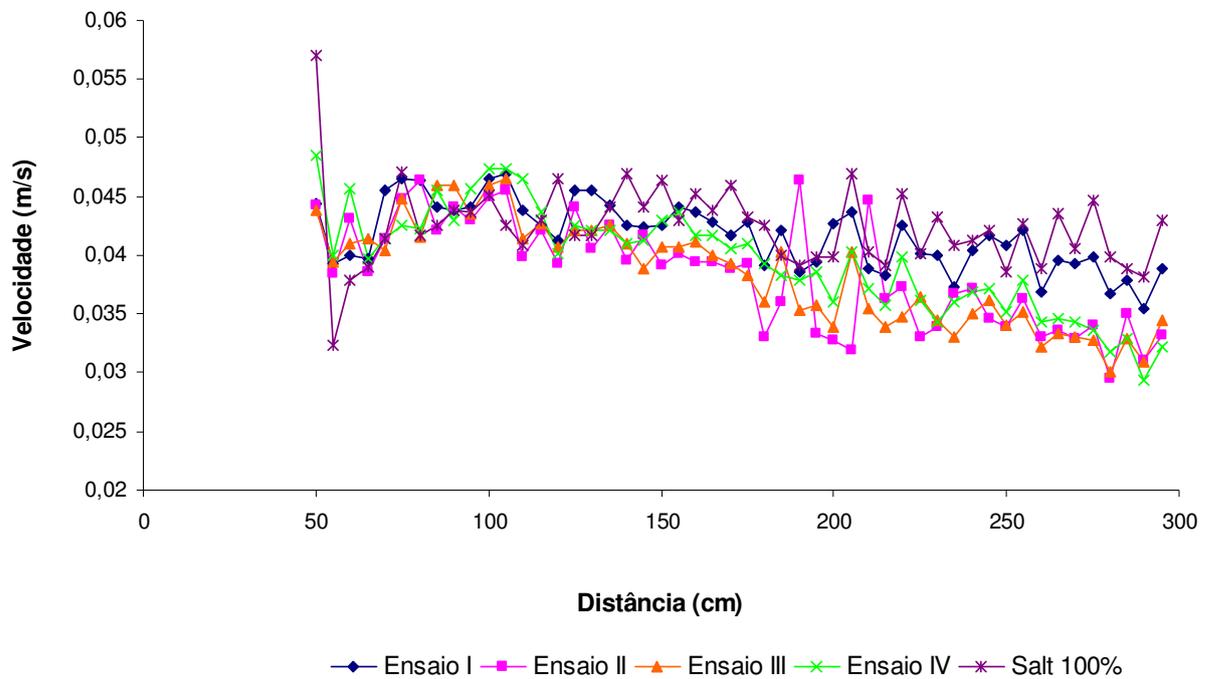


Figura 7.20 Velocidade da cabeça – Fase I (carvão + sal)

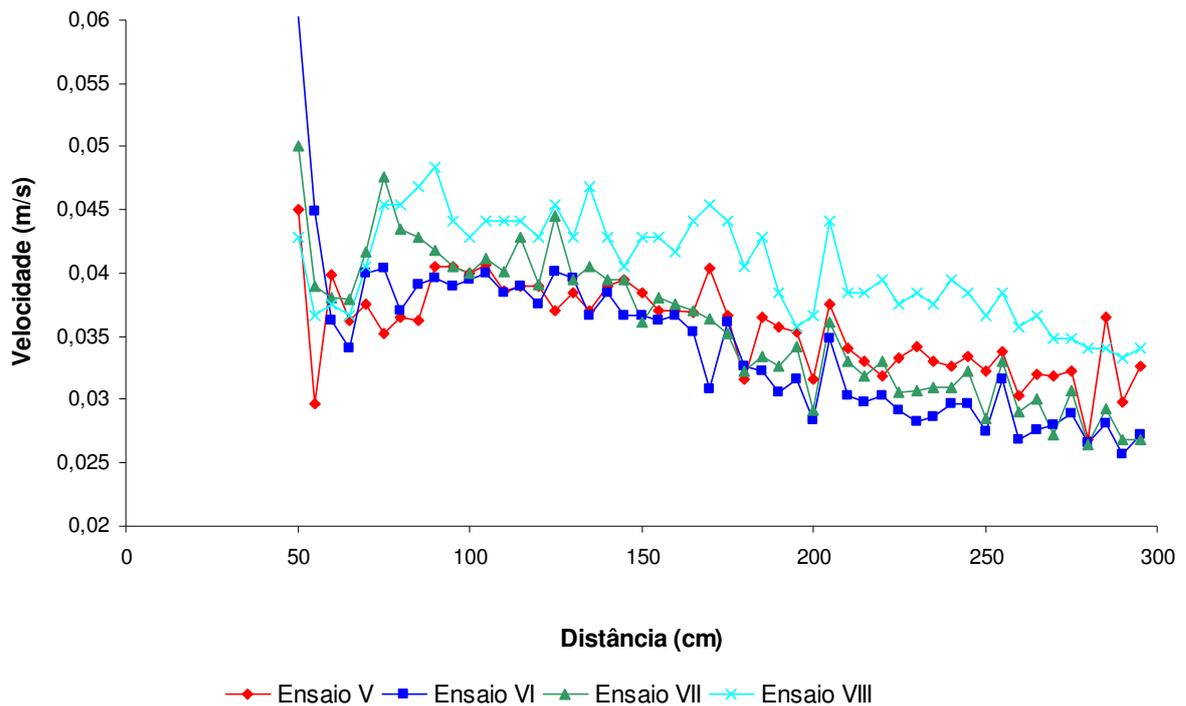


Figura 7.21 Velocidade da cabeça – Fase II (carvão + bentonita)

A zona do canal que vai do ponto de injeção até os 50 cm foi retirada da análise, uma vez que reflete uma zona de transição do fluxo (passagem da condição de fluxo saindo do bocal de injeção para a de corrente de densidade). Nesta zona, nota-se uma forte desaceleração, pois há forte influência das condições de admissão da mistura e o fluxo de densidade ainda não está estabelecido. Nas figuras 7.20 e 7.21 este comportamento é visualizado através da abrupta queda na velocidade representada pela reta no início do gráfico. A partir desta zona, a mistura evolui no canal como corrente de densidade.

Os ensaios realizados evidenciam claramente o comportamento da velocidade de avanço de correntes de turbidez descrito na literatura e já citados anteriormente. A corrente de turbidez avança pelo canal com velocidades que oscilam com períodos praticamente constantes devido principalmente ao desprendimento de vórtices) e que, à medida que aumenta o teor de material em suspensão, tende a sofrer uma desaceleração mais acentuada.

Na primeira fase de ensaios, com as correntes compostas por sal em solução e carvão mineral, os ensaios que continham mais carvão sofrem uma desaceleração mais pronunciada. Já na segunda fase, nota-se que todos os ensaios sofrem uma desaceleração maior que na primeira fase. Isso se deve ao fato de todos os ensaios usarem na sua mistura 100% de

material sedimentar. Ainda assim, nota-se que os ensaios que possuem mais carvão em sua composição desaceleram mais.

A bentonita, por ser composta por partículas com velocidade de queda menor do que as partículas do carvão se mantêm em suspensão por distâncias maiores. Conseqüentemente, quanto maior a fração de bentonita presente na mistura, mais a corrente mantém sua velocidade, chegando ao ponto de, no Ensaio VIII, com a mistura composta exclusivamente por bentonita, manter sua velocidade por uma distância maior, além de apresentar menor amplitude de variação a partir dos primeiros 50cm do canal. Este comportamento é percebido nos gráficos das figuras 7.22 e 7.23, onde uma linha de tendência foi adicionada aos dados de velocidade das correntes, ilustrando o gradiente de desaceleração sofrido pelas diferentes misturas ensaiadas.

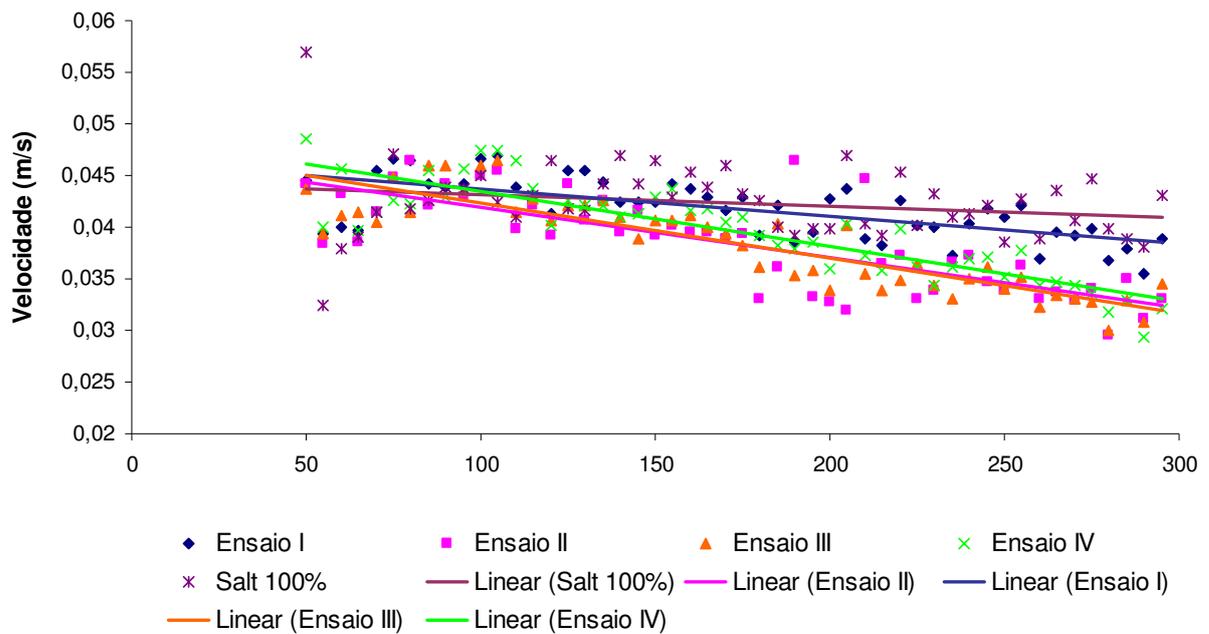


Figura 7.22 Velocidade da cabeça – Fase I (carvão + Sal)

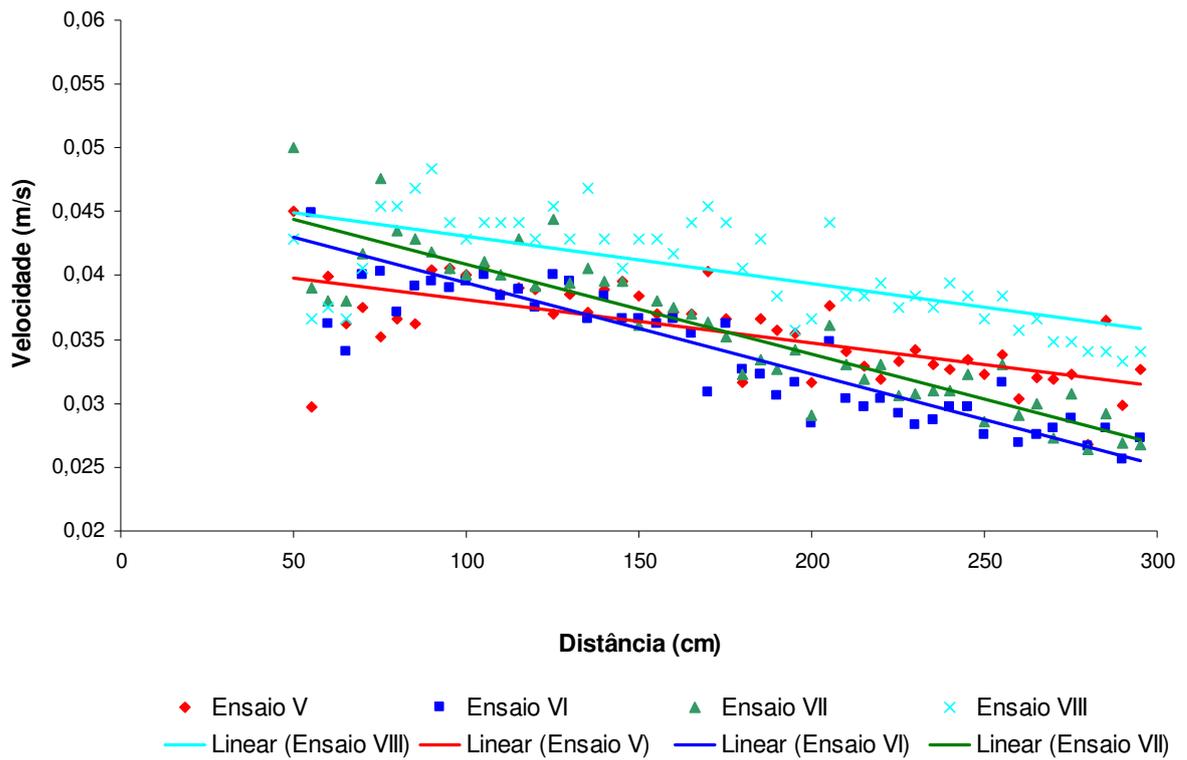


Figura 7.23 Velocidade da cabeça – Fase II (carvão + bentonita)

As figuras 7.24, 7.25, 7.26 e 7.27 ilustram as velocidades de avanço da cabeça da corrente dos ensaios ditos equivalentes, ou seja, aqueles que são compostos pela mesma proporção de carvão, porém com o elemento que representa as frações finas diferente (sal e bentonita).

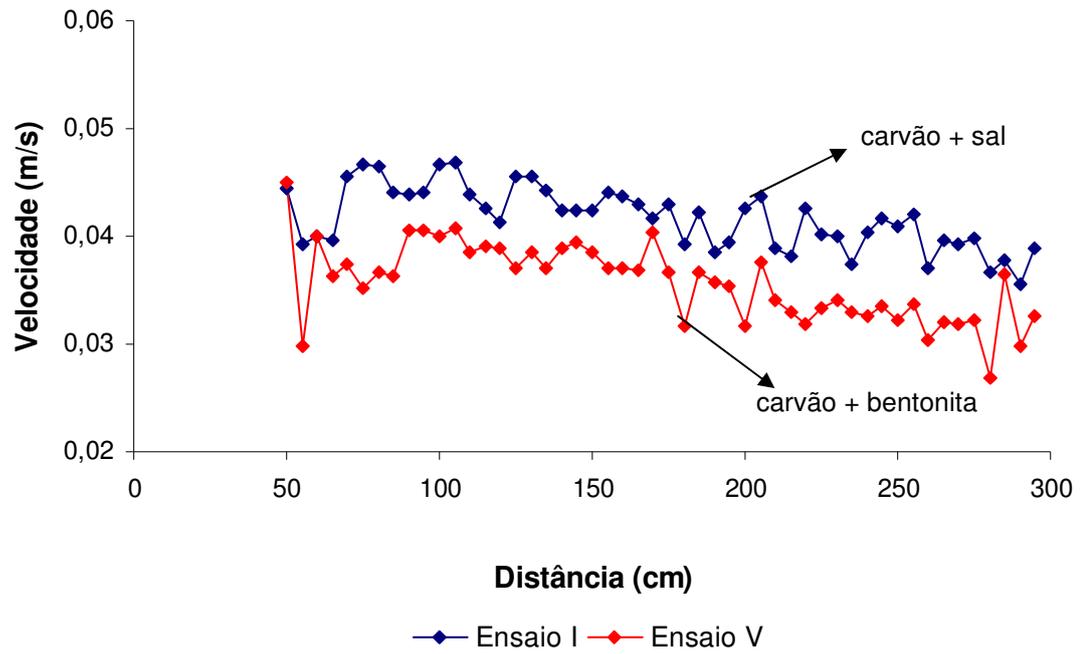


Figura 7.24 Velocidade da cabeça – comparação Ensaio I e V

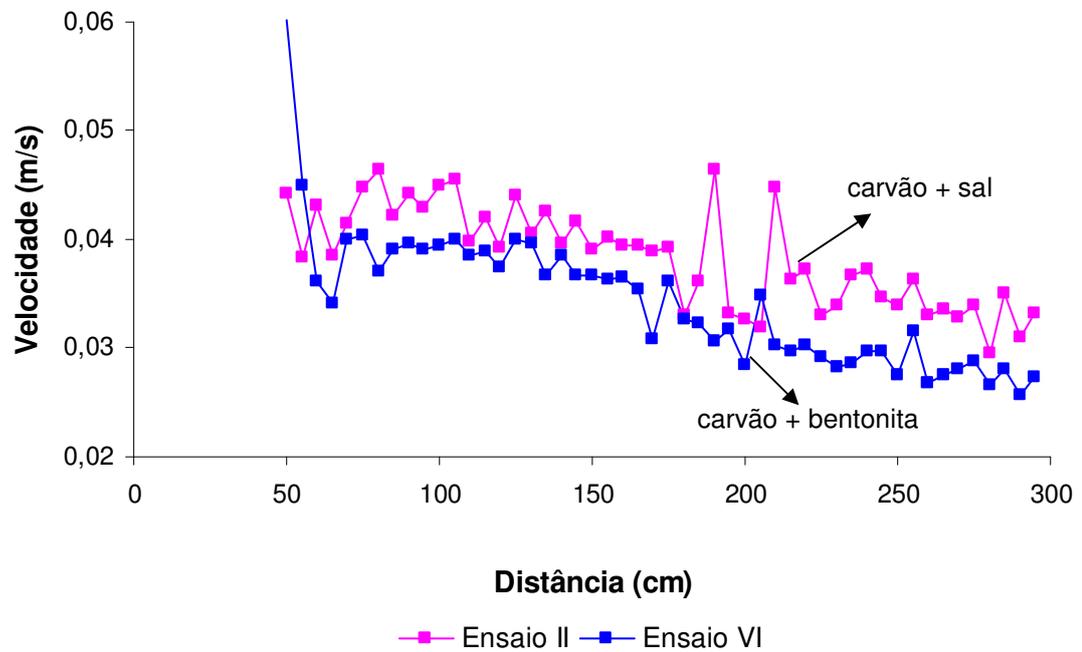


Figura 7.25 Velocidade da cabeça – comparação Ensaio II e VI

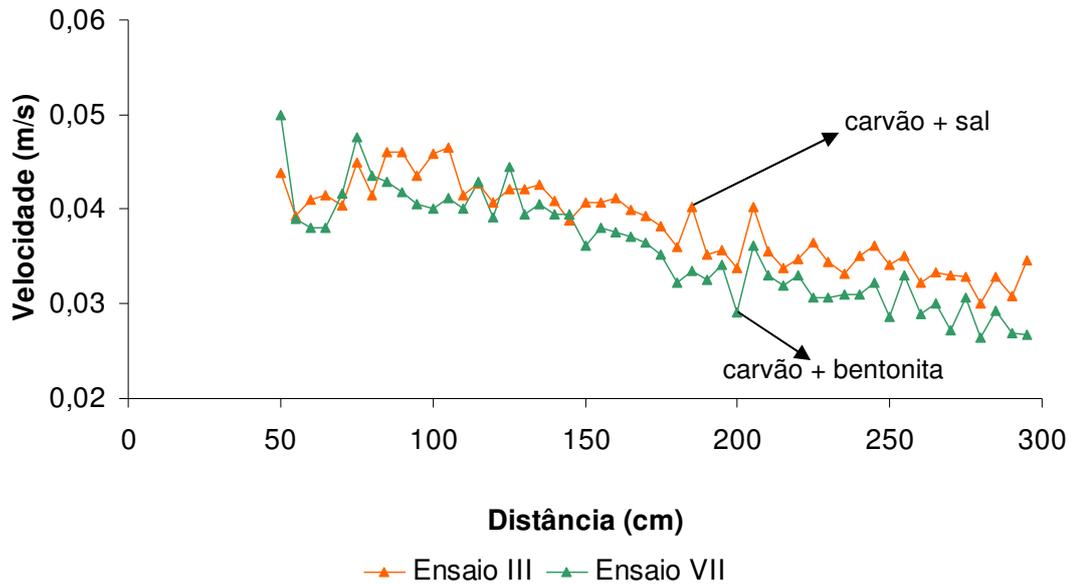


Figura 7.26 Velocidade da cabeça – comparação Ensaio III e VII

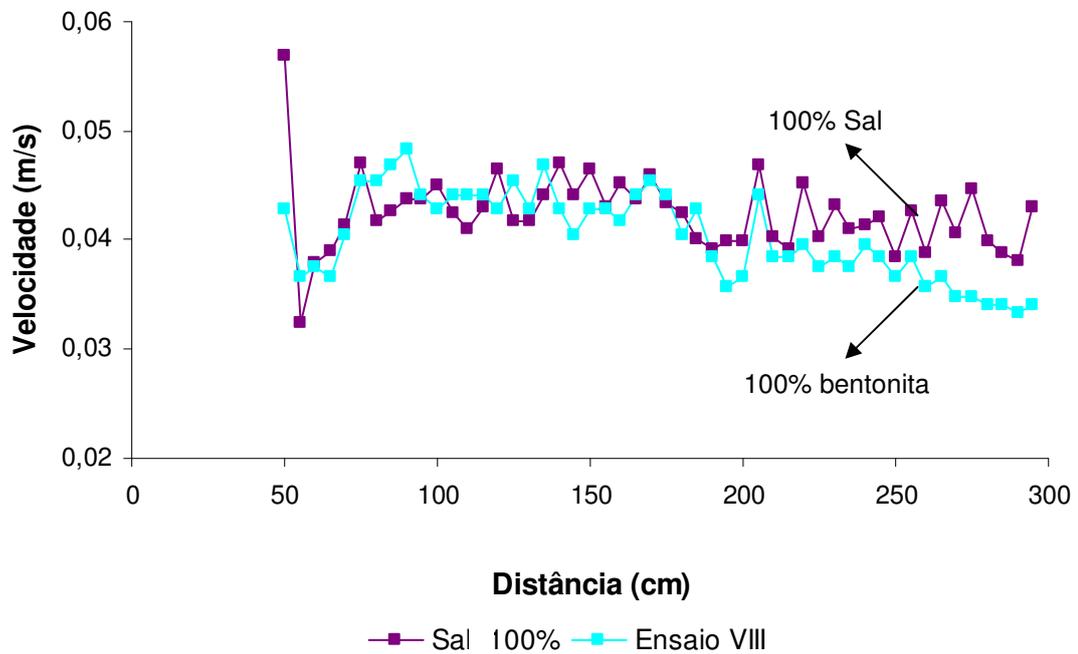


Figura 7.27 Velocidade da cabeça – comparação Ensaio Sal 100% e VIII

Observando as figuras 7.24, 7.25 e 7.26 é possível verificar que a velocidade de avanço da cabeça da mistura composta por carvão e sal é maior do que quando a mistura é composta por carvão e bentonita. Embora a medida que mais carvão é adicionado ao fluxo as

velocidades tendam a se equiparar, o gradiente de desaceleração aumenta, com os fluxos da segunda fase sofrendo desacelerações maiores (figura 7.28).

Na comparação dos ensaios 100% sal e Ensaio VIII, nota-se o que foi mencionado anteriormente: o fluxo composto exclusivamente por bentonita sofre uma desaceleração um pouco mais pronunciada do que o fluxo composto exclusivamente por sal, devido ao fato de que as partículas de bentonita, embora com velocidade de queda muito baixas, são capazes de se depositarem, fazendo com que a corrente perca contraste de densidade em relação ao meio e, conseqüentemente, desacelere. Nas correntes apenas compostas por sal, a desaceleração ocorre por perda de densidade devido à incorporação de fluido ambiente.

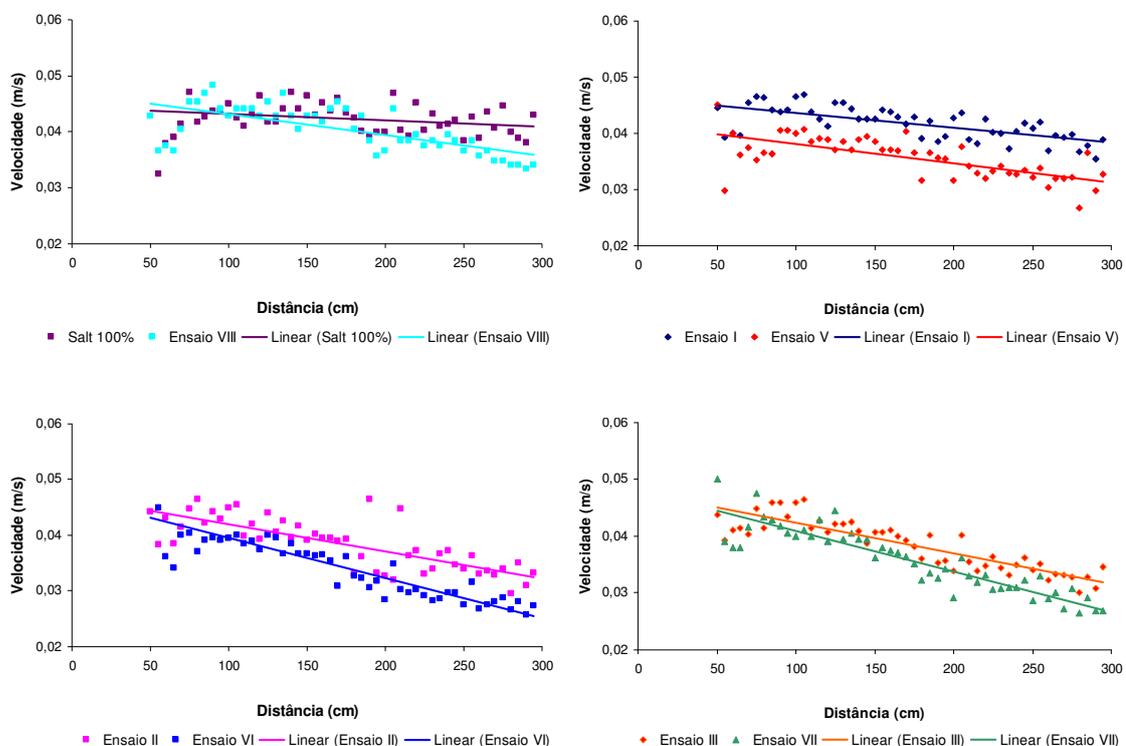


Figura 7.28 Linhas de tendência aplicadas aos gráficos de velocidade de avanço da corrente – Fases I e II

A figura 7.29 mostra de forma mais sintetizada o comportamento dinâmico dos fluxos das Fases I e II. Nela estão apresentadas as velocidades médias de avanço da corrente, considerando a média dos valores em cada posição do canal. Nota-se que para correntes com sal e carvão (Fase I) não há grande variabilidade da média das velocidades, a corrente avança com uma velocidade de cerca de 4,5 cm/s. Contudo, nas correntes com carvão e bentonita, há uma maior variabilidade, e o valor médio é de 3,78 cm/s, com uma tendência a aumentar em função do aumento do teor de carvão na mistura.

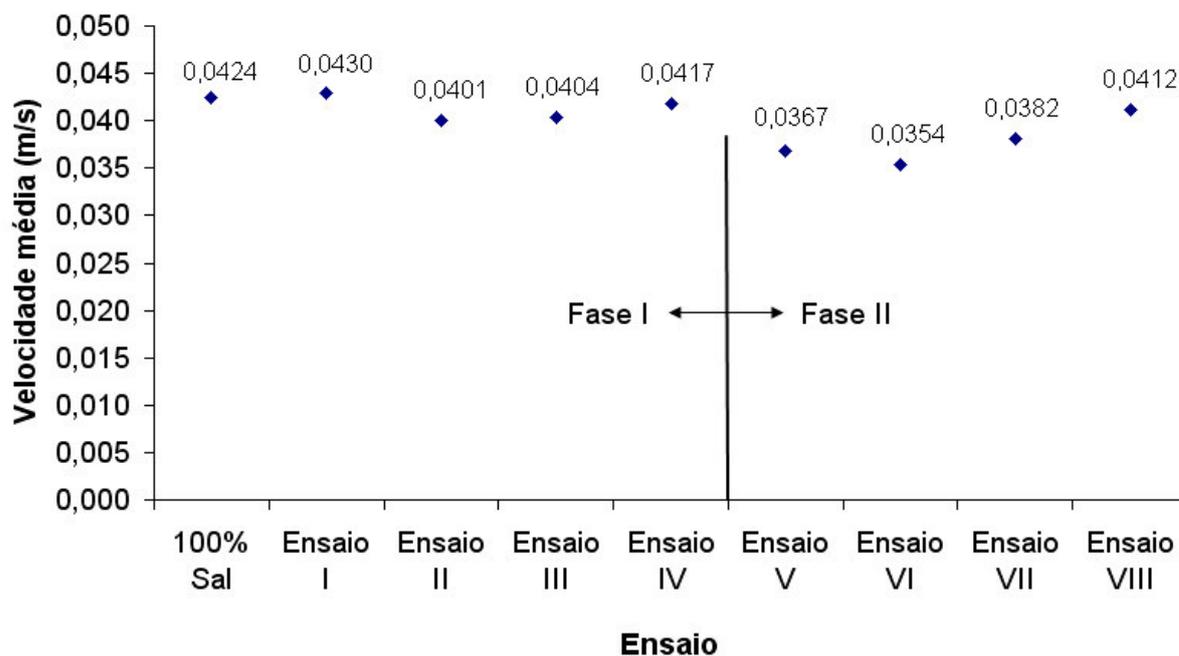


Figura 7.29 Velocidades médias da cabeça das correntes – Fases I e II

7.2.3 Padrões de deposição

A análise granulométrica, neste trabalho, compreende a distribuição longitudinal dos grãos ao longo do canal. Em cada uma das simulações, foram recolhidos os depósitos de 10 em 10cm, totalizando trinta amostras, que foram secadas e pesadas. Destas trinta amostras, quinze foram enviadas alternadamente para o analisador de partículas a laser, a fim de determinar sua granulometria. Embora visivelmente uma quantidade menor de material se deposita na medida em que se distancia da área fonte, não foi possível realizar a tomada de medida da espessura dos mesmos, pois devido à pouca quantidade de sedimento em alguns ensaios, tornou-se inviável fazer uma medida precisa.

Para os ensaios da primeira fase, realizados com carvão e sal, a análise granulométrica do material depositado não apresentou problemas. Entretanto, para a segunda fase, onde a bentonita foi usada juntamente com o carvão, houve uma distorção dos resultados, em decorrência do tamanho extremamente reduzido das partículas de bentonita e, conseqüentemente, da sua presença nos depósitos. Como a quantidade de amostra a ser utilizada pelo granulômetro é limitada pelo número de partículas, um determinado volume de bentonita apresenta um número muito maior de partículas do que o mesmo volume de carvão,

podendo assim distorcer o resultado. Na tentativa de corrigir a presença da bentonita e eliminar possíveis distorções na curva granulométrica foram realizadas um total de 10 análises unicamente com a bentonita bruta e, de posse dos resultados, foram subtraídas das análises dos depósitos dos ensaios da segunda fase a porção de partículas com tamanho menor que 0,028mm, pois da análise da bentonita resulta que 93% de suas partículas tem tamanho menor que 0,028mm. Dos ensaios realizados somente com carvão resulta que, no máximo, 9% do carvão tem dimensões menores que 0,028mm (e essa proporção só é encontrada nas regiões finais do canal, em raras ocasiões). Mesmo com estas correções, as partículas de bentonita distorceram os dados granulométricos.

A outra forma encontrada para se comparar os dados sem que a bentonita influencie a análise é a comparação da massa de cada faixa granulométrica depositada ao longo do canal, que será apresentado adiante neste capítulo.

Através do levantamento das frações granulométricas depositadas, pretende-se verificar eventuais mudanças na capacidade de transporte dos fluxos, ou seja, analisar se as diferentes composições de mistura alterariam a distribuição granulométrica dos grãos ao longo do canal, e caso alguma mudança fosse apresentada, identificar quais as misturas teriam capacidade para carregar grãos maiores para trechos mais distais do canal.

A partir dos dados da tabela 7.3 foram confeccionados os gráficos das figuras 7.30 e 7.31, que apresentam os D_{50} médios do material depositado ao longo do canal, para os ensaios das Fases I e II. Nota-se que o comportamento das misturas da Fase I são bastante similares, assim como nos ensaios da Fase II. Embora tenham sido verificadas algumas variações, elas podem ser consideradas não significativas, além da tendência de decréscimo dos valores de D_{50} dos depósitos ser a mesma para todos os fluxos. A exceção é o Ensaio V, que apresenta um D_{50} significativamente inferior a partir do intervalo 110 - 120. Essa diferença ocorre em função da quantidade bastante elevada de bentonita na corrente, como anteriormente citado, e, conseqüentemente, pouco carvão presente no depósito. Como a bentonita se contrai quando seca (figura 7.32), os grãos de carvão são envoltos por uma camada de bentonita que dificilmente é removida. Devido a isso, as amostras utilizadas no analisador de partículas continham uma parte do depósito predominantemente composto de bentonita, ou seja, podem não ter sido amostras representativas do depósito.

Tabela 7.3 D_{50} dos depósitos (em micras) coletados em diferentes regiões do canal

Ensaio/Trecho	10 - 20	30 - 40	50 - 60	70 - 80	90 - 100	110 - 120	130 - 140	150 - 160	170 - 180	190 - 200	210 - 220	230 - 240	250 - 260	270 - 280	290 - 300
I	134	127	125	110	100	98	93	87	80	71	63	60	56	54	55
II	135	130	127	113	107	100	93	87	80	73	65	63	59	56	55
III	165	150	117	108	97	91	85	77	75	71	63	59	56	54	54
IV	197	173	130	105	92	85	78	70	66	59	55	54	54	53	53
V	135	132	115	113	90	81	73	54	36	35	34	34	38	38	38
VI	139	130	116	112	107	102	86	77	69	58	54	51	47	46	45
VII	145	132	127	115	110	102	93	83	74	67	59	54	52	51	52

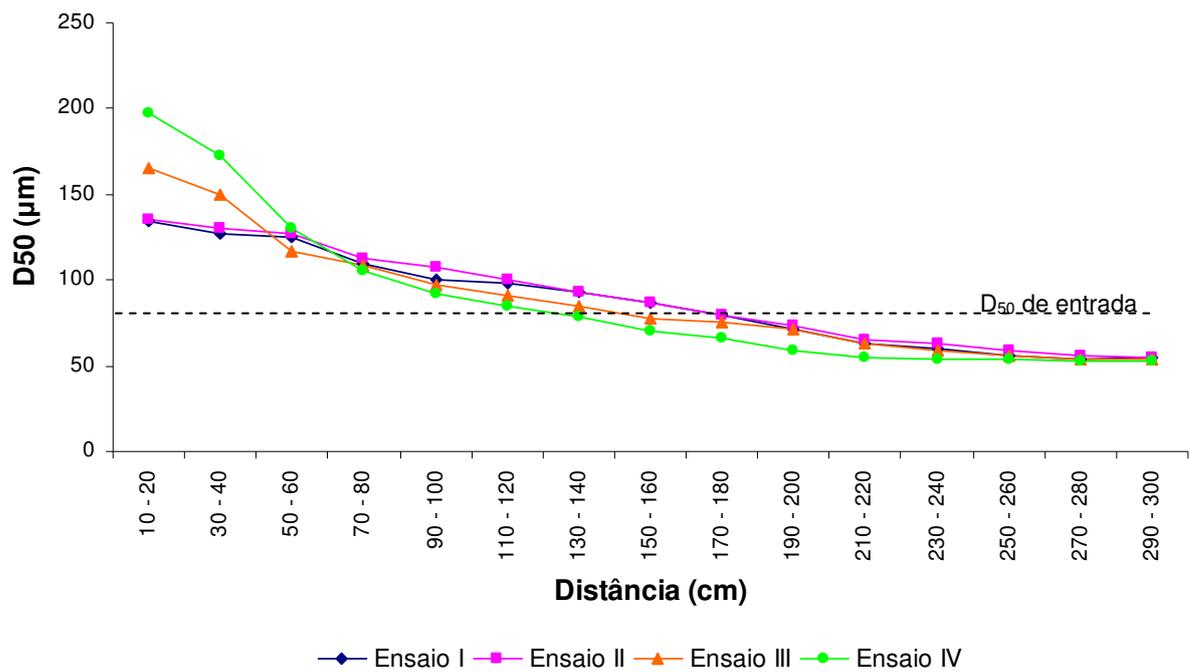


Figura 7.30 Variação, ao longo do canal, do D_{50} do material depositado – Fase I (carvão + sal)

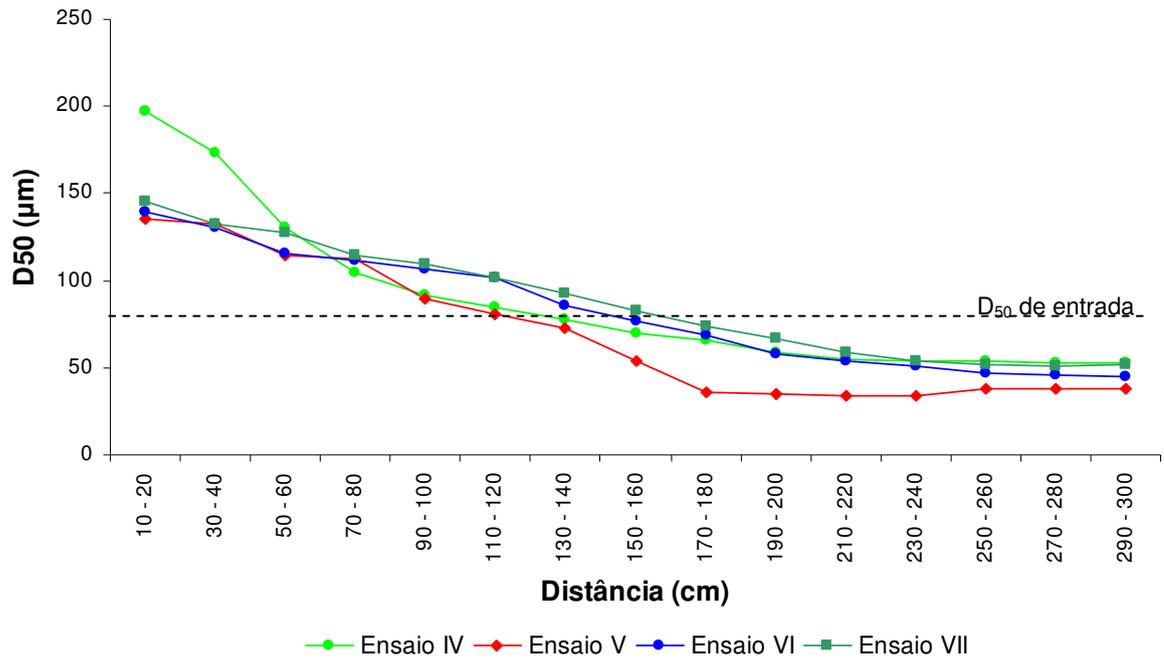


Figura 7.31 Variação, ao longo do canal, do D_{50} do material depositado – Fase II (carvão + bentonita)



Figura 7.32 Depósito quase seco de carvão com bentonita

Comparando os ensaios ditos equivalentes, fica evidente a distorção na análise causada pelas partículas finas de bentonita. A diferença entre os D_{50} dos ensaios equivalentes diminui notavelmente na medida em que menos bentonita está presente nas correntes de

turbidez, como pode ser visto na figura 7.33. Na comparação entre o Ensaio III e o Ensaio VII os dois depósitos já apresentam comportamentos bastante similares.

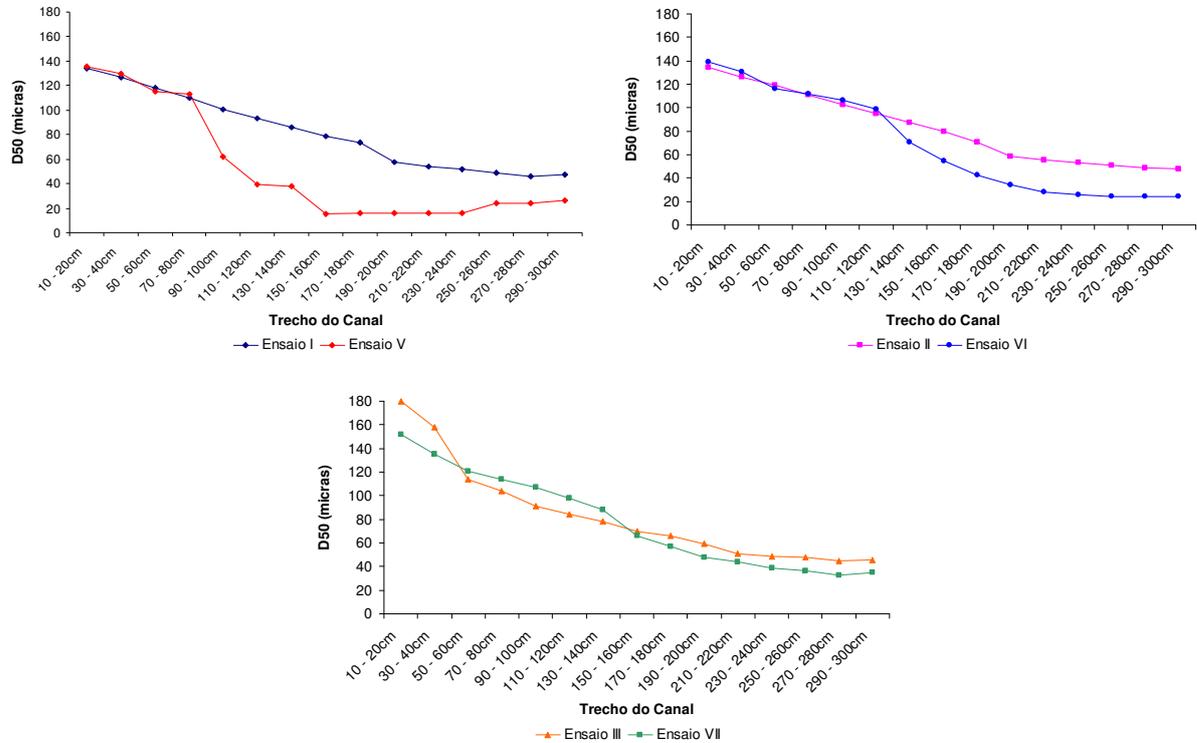


Figura 7.33 Comparação dos D_{50} entre os ensaios equivalentes das Fases I e II

A fim de descrever a variação do D_{50} do sedimento presente no depósito, ao longo do canal, foi ajustada uma lei de degradação do tamanho de grão cuja expressão é dada pela Equação 1, onde D_{50_x} é o valor do D_{50} numa determinada posição do canal (x), D_{50_0} é o valor do D_{50} no primeiro trecho do canal e 'a' é uma constante de calibração.

$$D_{50_x} = D_{50_0} \cdot e^{-ax} \quad (1)$$

Na tabela 7.4 são mostrados, para cada ensaio, os valores do D_{50} inicial, da constante ajustada e o coeficiente de correlação obtido.

Tabela 7.4 Valores da equação da Lei de Degradação do Tamanho do Grão ajustada

Fase	Ensaio	D50 ₀ (micras)	a	R ²	R ² médio
Fase I	I	134	0,00308	96,31%	94,71%
	II	135	0,00299	96,08%	
	III	165	0,00455	95,09%	
	IV	197	0,00617	91,34%	
Fase II	V	135	0,00508	89,97%	94,16%
	VI	139	0,00383	95,63%	
	VII	145	0,00367	96,87%	

Os gráficos com os valores pontuais do D₅₀ junto das linhas fornecidas pelas equações podem ser visto nas figuras 7.34, 7.35, 7.36 e 7.37. Nota-se que, à exceção do Ensaio V, os demais se ajustam bem à lei de degradação do tamanho dos grãos. Na presença de baixos teores de carvão na corrente, há uma tendência de que os ensaios com sal e carvão produzam depósitos com diâmetros maiores do que aqueles encontrados nos ensaios com bentonita e carvão (Fase II).

Contudo, há uma tendência à redução desta diferença, expressa através de expoentes “a” cuja diferença de valores tende a diminuir. À medida que aumenta a fração granular do sedimento (teor de carvão) em relação à fração mais fina (sal ou bentonita), que modifica a matriz de suporte dos grãos, nota-se uma inversão nesta tendência, a partir da metade do depósito. Ou seja, a mistura composta por bentonita e carvão começa a gerar depósitos com diâmetros maiores em relação aos ensaios compostos por sal e carvão.

Em geral, as misturas compostas por bentonita e carvão transferem, para jusante, diâmetros menores do que a mistura de sal e carvão, o que se percebe, analiticamente, pelos maiores expoentes “a” ajustados aos dados.

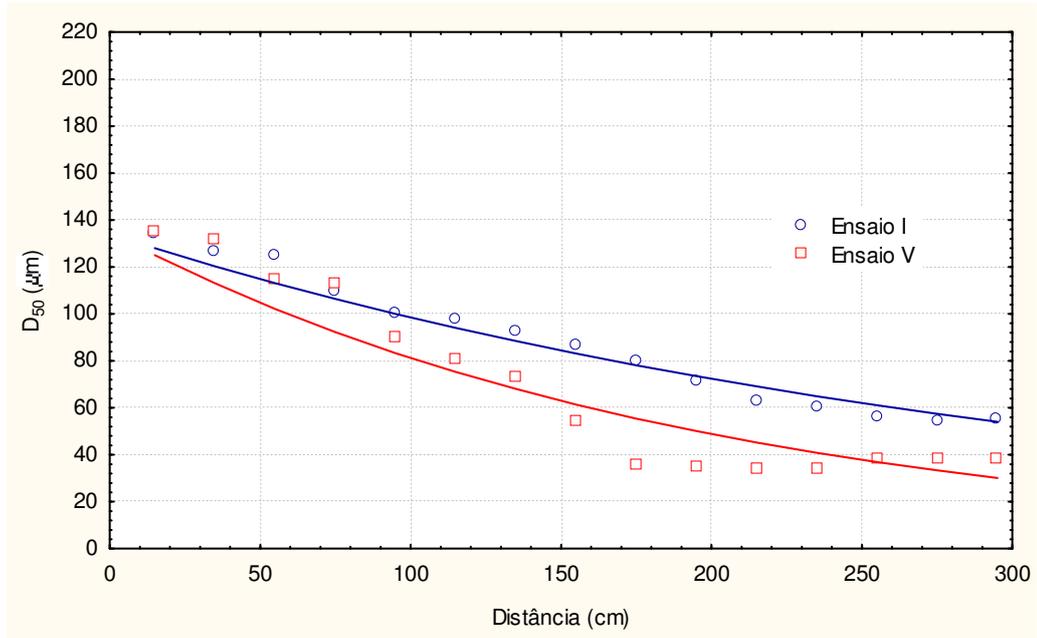


Figura 7.34 Lei de Degradação aplicada aos Ensaios I e V

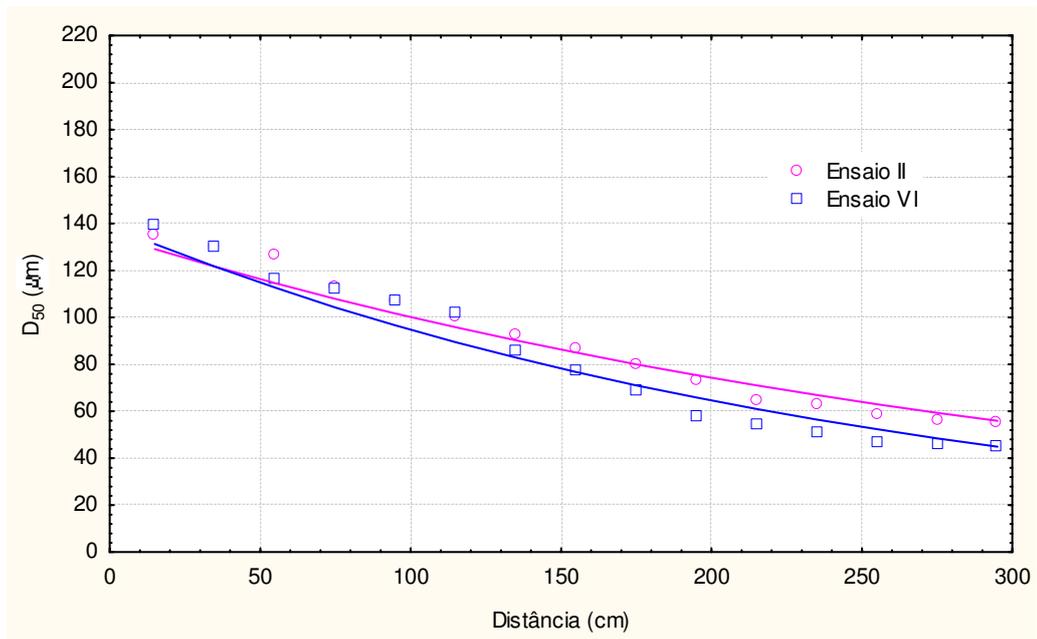


Figura 7.35 Lei de Degradação aplicada aos Ensaios II e VI

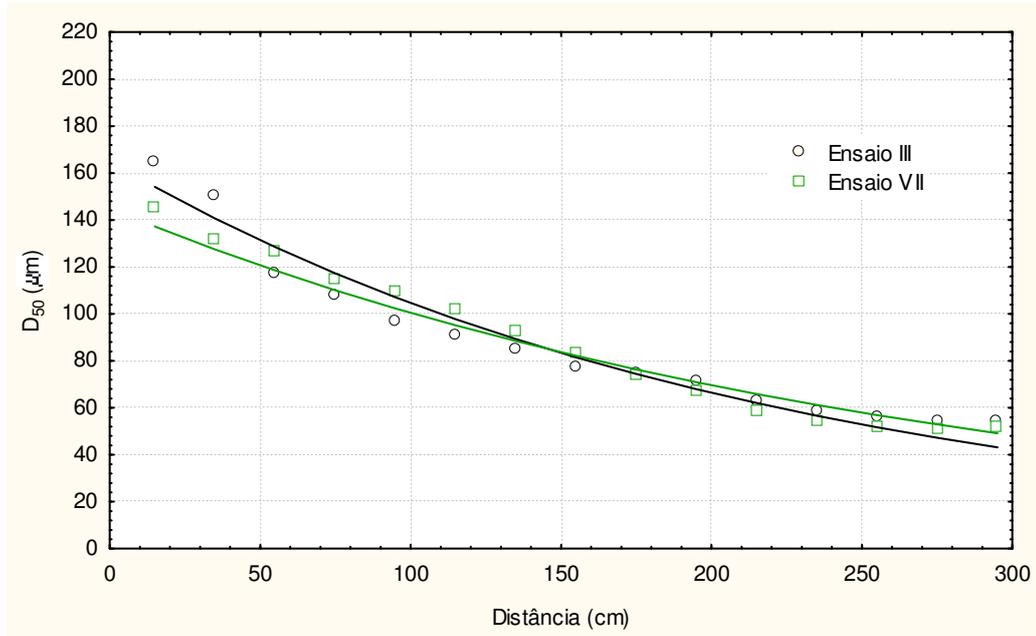


Figura 7.36 Lei de Degradação aplicada aos Ensaio III e VII

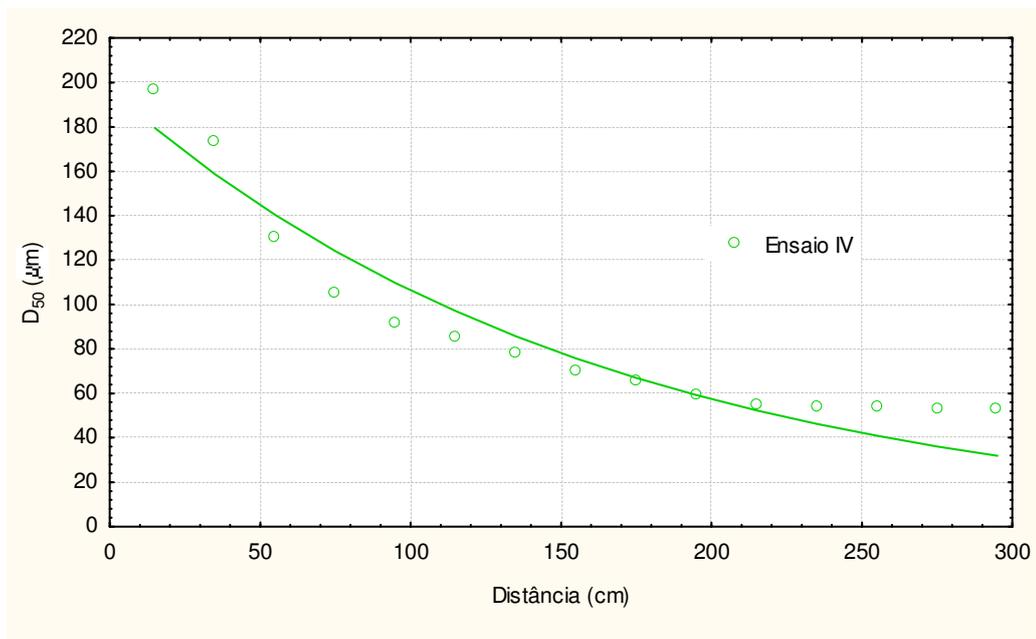


Figura 7.37 Lei de Degradação aplicada ao Ensaio IV

Na figura 7.37 é apresentada a variação do D_{50} para a mistura composta apenas por carvão (Ensaio IV), ou seja, sem a presença de finos que venham a favorecer a manutenção dos grãos em suspensão. Nota-se a deposição dos grãos maiores junto à fonte e um decaimento acentuado dos diâmetros (maior constante “a” ajustada aos dados).

A comparação das curvas granulométricas nos experimentos ilustra claramente a similaridade de comportamento da granulometria dos depósitos gerados, como mostra a figura

7.38, onde são representados três trechos do depósito do canal. Novamente, o Ensaio V é o único que possui diferenças significativas em relação aos demais, principalmente do trecho 130 – 140 em diante, devido às circunstâncias já mencionadas anteriormente.

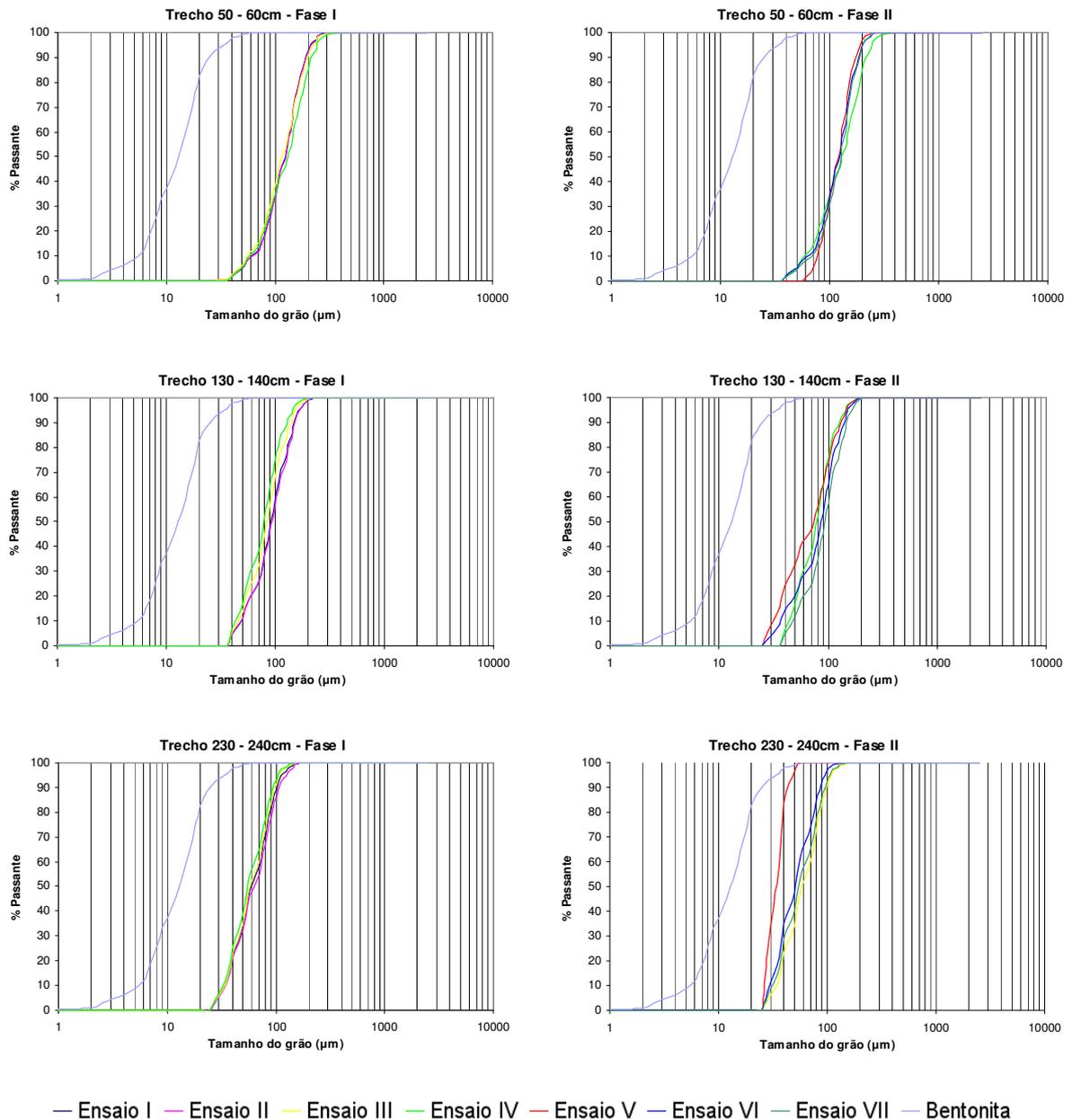


Figura 7.38 Curvas granulométricas do material depositado nos trechos 50-60cm, 130-140cm e 230-240cm do canal

A análise quantitativa dos depósitos, realizada através da medida de massa de depósito por trecho do canal também mostra claramente uma similaridade entre os depósitos, como ilustram as figuras 7.39, 7.40 e 7.41. Novamente, as pequenas diferenças apresentadas entre as quantidades de material depositado podem ser consideradas desprezíveis.

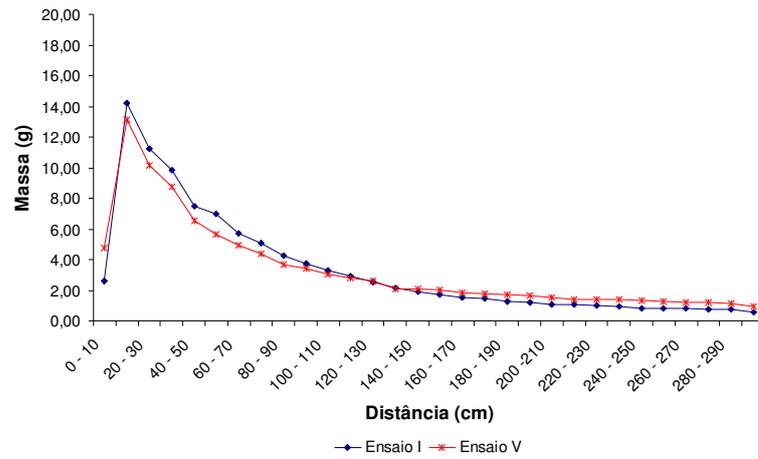


Figura 7.39 Massa depositada ao longo do canal nos Ensaios I e V

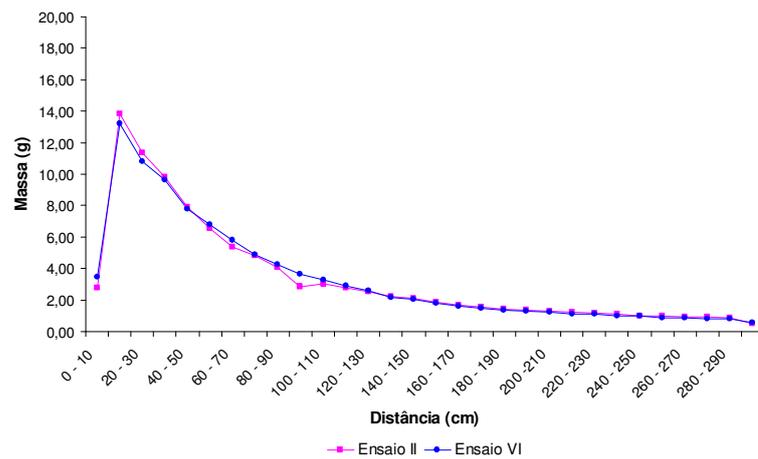


Figura 7.40 Massa depositada ao longo do canal nos Ensaios II e VI

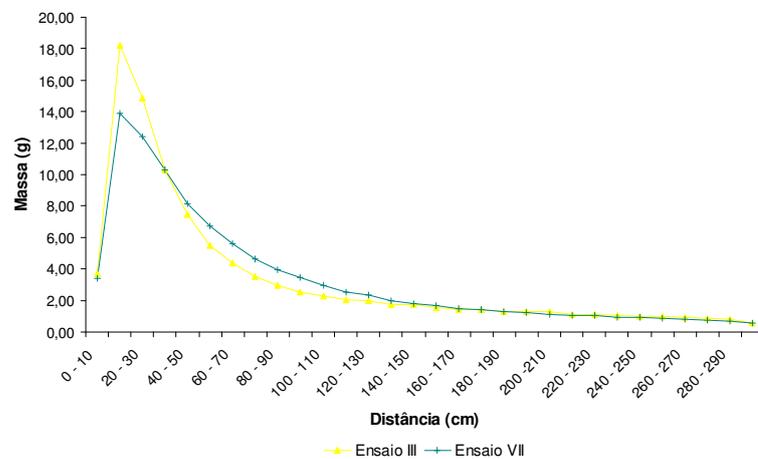


Figura 7.41 Massa depositada ao longo do canal nos Ensaios III e VII

Analisando os gráficos de massa depositada, quando separados por granulometria e comparando os ensaios formados por misturas equivalentes (figuras 7.42, 7.43 e 7.44), fica clara também a similaridade dos padrões de deposição das correntes de turbidez geradas. Ainda assim, as mínimas diferenças apresentadas indicam que as correntes geradas através das misturas sal e carvão são melhor distribuídas ao longo do canal do que aquelas geradas com bentonita e carvão. Embora praticamente insignificante, em todas as três comparações, as misturas contendo sal têm a capacidade de carregar grãos maiores até regiões mais distais da fonte. As exceções são as granulometrias 0,149mm e 0,105mm da comparação entre os ensaios III e VII. Nota-se também que a diferença entre os ensaios I e V é a maior de todas, seguida pela diferença entre os ensaios II e VI e depois III e VII. Isso nos conduz à conclusão lógica que quanto maior a quantidade de carvão no fluxo, menores são as diferenças entre os depósitos gerados.

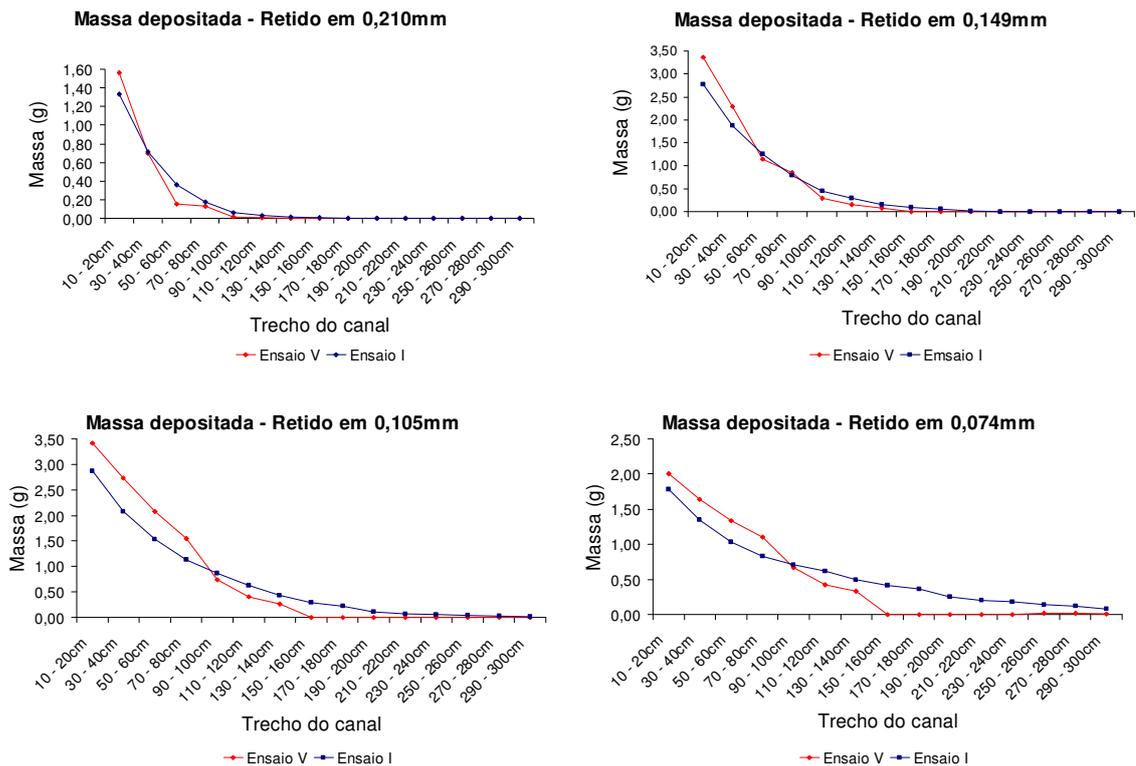


Figura 7.42 Massas totais de depósito separadas por tamanho de grão dos Ensaios I e V

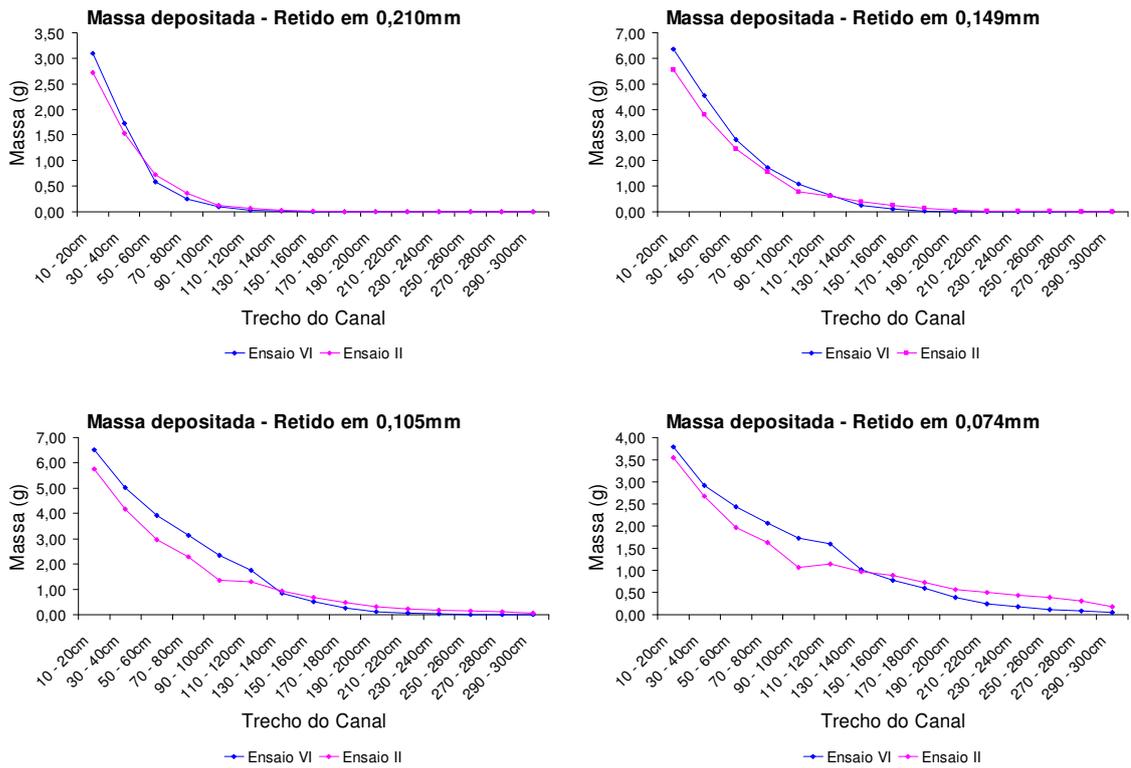


Figura 7.43 Massas totais de depósito separadas por tamanho de grão dos Ensaio II e VI

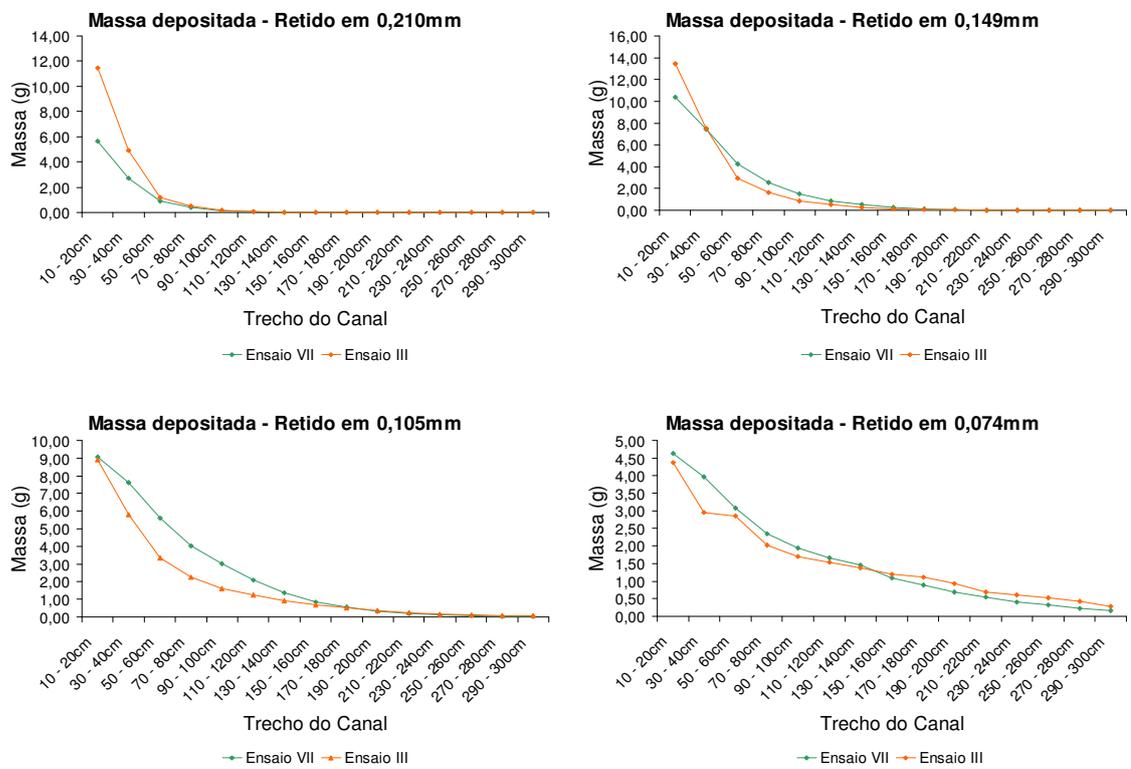


Figura 7.44 Massas totais de depósito separadas por tamanho de grão dos Ensaio III e VII

7.2.4 Conclusões parciais

7.2.4.1 Geometria

O sedimento fino incorporado aos fluxos da Fase II (bentonita) alterou o comportamento geométrico dos fluxos, fazendo com que a altura do corpo das correntes se desenvolvesse com dimensões menores, à medida que mais deste sedimento estava presente no fluxo. Enquanto a altura da cabeça das correntes não sofreu alterações significativas e nem com tendências definidas, o corpo foi alterado, com mais intensidade nas medidas tomadas a 60 cm do nariz da corrente. Enquanto isso, na Fase I, os fluxos compostos por sal e carvão não sofreram alterações geométricas significativas e nem com tendências definidas.

7.2.4.2 Dinâmica

A presença da bentonita fez com que as correntes apresentassem velocidades menores do que aquelas compostas com sal, tanto em termos de velocidade média quanto em termos de velocidades pontuais ao longo de todo canal. A diferença entre as velocidades das duas composições diminui à medida que mais carvão está presente no fluxo e menor é a presença de sal/bentonita na corrente. Apesar disso, o gradiente de desaceleração foi praticamente o mesmo em todos os casos, com desaceleração levemente maior quando da presença de bentonita, devido ao fato da deposição da mesma.

Em geral, as correntes com sal e carvão propagam-se mais rapidamente no canal do que as correntes com bentonita e carvão.

7.2.4.3 Padrão de deposição

No que diz respeito à distribuição longitudinal dos grãos, os fluxos depositaram quantidades similares de sedimento ao longo do canal, considerando-se os ensaios equivalentes, uma vez que não é possível comparar as massas depositadas entre todos os fluxos, porque os mesmos são formados por quantidades diferentes de sedimentos. As pequenas variações de massas depositadas não são significativas.

As correntes de turbidez também não apresentam diferenças significativas nas deposições de grãos, quando analisadas do ponto de vista de massa depositada por trecho e por tamanho de grão. Os grãos maiores, objetivo maior das análises, não sofrem mudanças

nas quantidades depositadas ao longo do canal, o que indica que a capacidade de transporte dos fluxos não é alterada quando a corrente é composta por carvão/sal e carvão/bentonita. Já os grãos mais finos, mostraram-se com distribuições diferentes. Entretanto, este fato se deve à presença de bentonita, que não foi completamente separada do carvão para a análise granulométrica, pois a metodologia adotada para fazer esta separação não obteve sucesso.

Os fluxos da Fase II, contendo bentonita, sofreram uma distorção na sua análise granulométrica, em função do tamanho reduzido de suas partículas. Devido a isso, diferentes tipos de análise tiveram que ser desenvolvidos para que se pudesse definir qual a influência da bentonita na distribuição dos grãos de carvão ao longo do canal.

7.3 FASE PRELIMINAR E PRIMEIRA FASE DE ENSAIOS (EFEITO DA DENSIDADE DO SEDIMENTO)

Os resultados da primeira fase obtidos neste trabalho, com correntes compostas por água, sal e carvão mineral 205, serão confrontados, nesta seção, com os resultados obtidos na fase preliminar de ensaios, realizada com correntes compostas por água, sal e carvão mineral 207. Os ensaios com as mesmas proporções de material sedimentar serão comparados, permitindo discutir o efeito da mudança da densidade do sedimento.

Os dois conjuntos de experimentos seguiram a mesma metodologia e utilizaram o mesmo aparato experimental, como já foi descrito. Além disso, a origem do carvão também é a mesma.

O carvão 207 é significativamente mais denso, tendo sua massa específica equivalente a 1360 kg/m^3 . Para efeito de comparação, são necessários 208 g do carvão 207 para se atingir a massa específica de 1010 kg/m^3 da mistura, enquanto que 360 g do carvão 205 são necessárias para se atingir a mesma massa específica. Conseqüentemente, uma mesma densidade de mistura equivale a diferentes concentrações em volume de carvão.

A granulometria do carvão utilizado na Fase Preliminar e na Primeira Fase de ensaios é a mesma. Através de um processo de peneiramento foram inseridas as mesmas proporções de tamanhos de grãos nos ensaios (ver tabela 6.1).

As comparações serão estabelecidas entre os ensaios equivalentes, ou seja, ensaios que utilizaram as mesmas proporções de carvão, juntamente com o sal. A tabela 7.5 indica quais são os ensaios equivalentes e quais as proporções de carvão utilizadas para a confecção de cada um deles.

Tabela 7.5 Nomenclatura dos ensaios

Proporção de Carvão	Ensaio Preliminares	Primeira Fase
25%	EP I	Ensaio I
50%	EP II	Ensaio II
75%	EP III	Ensaio III
100%	EP IV	Ensaio IV

7.3.1 Geometria

Como as tomadas de medidas dos aspectos geométricos dos fluxos foram realizadas todas no mesmo lugar, é possível estabelecer uma comparação direta entre os ensaios equivalentes (figura 7.45).

As alturas da cabeça da corrente se mostram similares nas comparações entre Ensaio I / EP I e II / EP II, tanto na tendência de aumento e decréscimo de tamanho, quanto nos valores apresentados. Na comparação entre os Ensaio III / EP III, a dimensão da cabeça do Ensaio Preliminar III começa a adquirir valores superiores aos do Ensaio III. Por fim, na comparação entre Ensaio IV / EP IV, onde as correntes são compostas exclusivamente por carvão, o Ensaio Preliminar IV alcança valores bastante superiores aos alcançados pelo Ensaio IV.

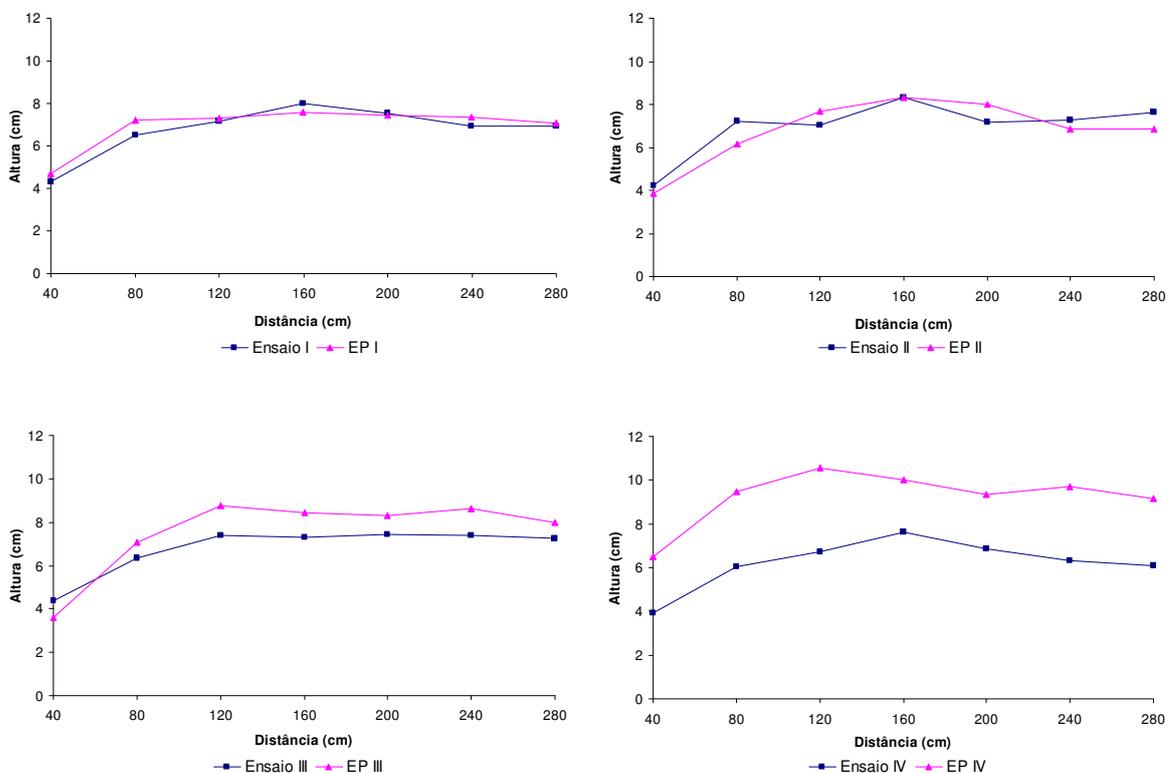


Figura 7.45 Comparação das alturas da cabeça das correntes – Ensaio Preliminares e Ensaio da Primeira Fase

Para porcentagens de carvão até 50% da massa específica, não há diferença significativa entre as alturas da cabeça das correntes geradas com os dois tipos de carvão. Contudo, na medida em que aumenta a quantidade de grãos de carvão no escoamento, a corrente gerada com o carvão de maior densidade (tipo 207) tende a apresentar alturas de cabeça maiores. Em fluxos compostos exclusivamente por carvão, as alturas da cabeça com a densidade do carvão maior chegam a ser o dobro daquela com carvão menos denso.

No que diz respeito à altura do corpo dos fluxos, medida a 40 cm atrás do nariz (figura 7.46), os Ensaio I e II apresentam valores superiores aos apresentados pelos Ensaio Preliminares I e II, respectivamente, desde o começo até o fim do canal. O Ensaio III mostra as duas primeiras medidas praticamente idênticas ao do EP III, e depois o Ensaio III apresenta valores superiores. Entretanto, no caso de correntes formadas por 100% de carvão, o comportamento se inverte, e o Ensaio Preliminar IV apresenta valores maiores que o Ensaio IV, com exceção do ponto medido quando a corrente alcança 200 cm de distância da fonte. As correntes formadas por material menos denso são sempre mais espessas do que aquelas formadas por material mais denso.

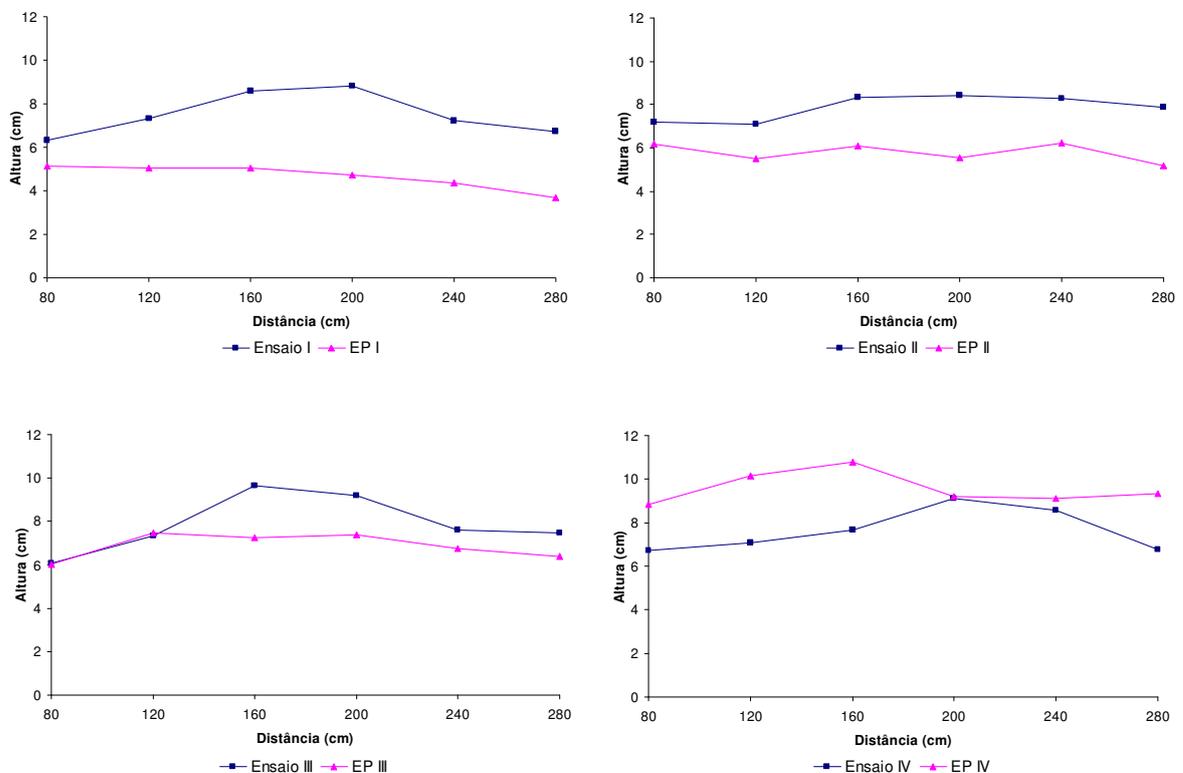


Figura 7.46 Comparação das alturas do corpo das correntes 40 cm atrás do nariz – Ensaio Preliminares e Ensaio da Primeira Fase

O mesmo comportamento verificado para as medidas do corpo a 40 cm do nariz se repete nas medidas a 60 cm atrás do nariz (figura 7.47). Nos três primeiros casos os Ensaios da Fase I têm valores maiores que os apresentados pelos Ensaios Preliminares, e tendências muito parecidas. Já nos ensaios compostos somente por sedimento o Ensaio IV, composto unicamente por carvão 205, apresenta valores menores que o Ensaio Preliminar IV, composto por carvão 207.

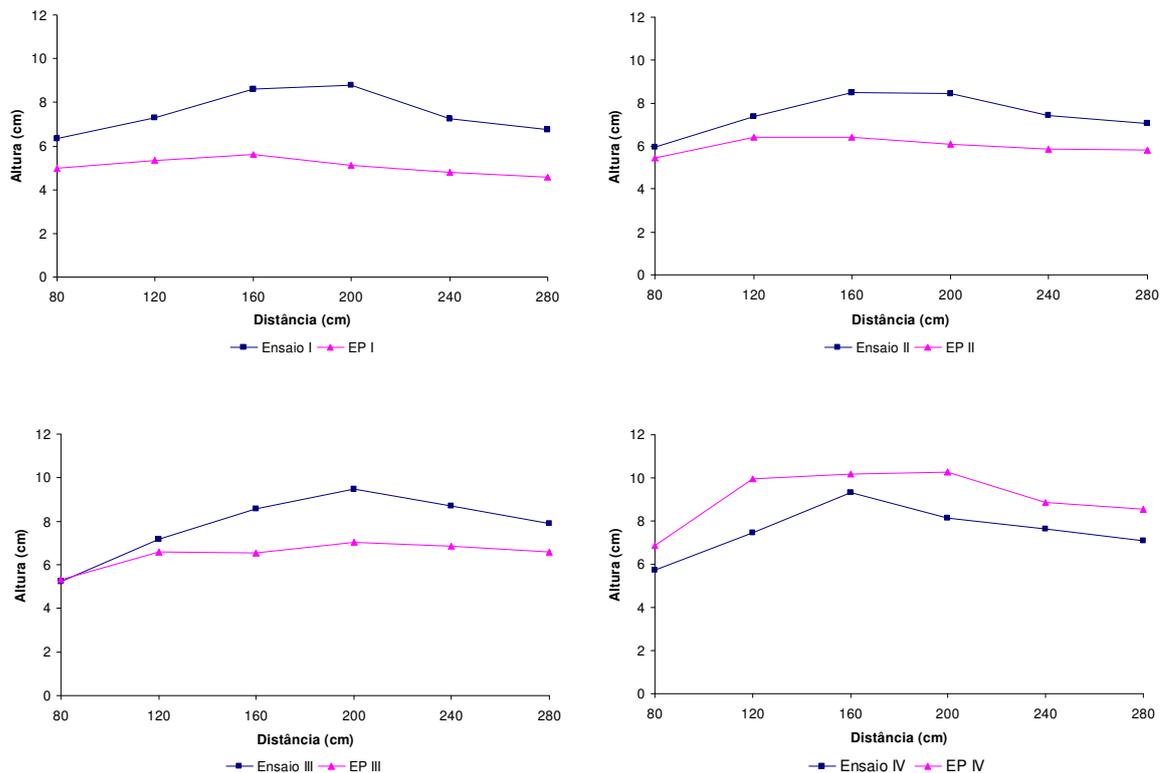


Figura 7.47 Comparação das alturas do corpo das correntes 60 cm atrás do nariz – Ensaios Preliminares e Ensaios da Primeira Fase

Nota-se que cabeça e corpo têm comportamentos distintos no que diz respeito às medidas pontuais de geometria. As dimensões da cabeça têm comportamento que vai modificando-se gradativamente a medida que mais material sedimentar é incorporado à mistura.

O corpo, por sua vez, apresenta um comportamento peculiar, nas duas situações em que as medidas foram tomadas. Quando da presença de sal no fluxo, os Ensaios da Fase I, que usam carvão 205 (menos denso) na sua composição, apresentam maiores dimensões do que os Ensaios Preliminares, que utilizam carvão 207 (mais denso). Todavia, quando as correntes são compostas exclusivamente por carvão, sem a adição do sal, os Ensaios Preliminares

apresentam dimensões do corpo maiores que os ensaios da Fase I. Isto indica que a presença do sal dissolvido influencia a geometria das correntes neste caso.

Foram também reunidos os valores médios, tanto de altura da cabeça quanto do corpo, para que fossem analisados. A figura 7.48 apresenta estes valores, tanto dos Ensaio Preliminares quanto da Fase I. Pode-se observar que nos Ensaio Preliminares os valores da cabeça e do corpo aumentam sistematicamente, cada qual com uma tendência, na medida que mais sedimento é adicionado à corrente de turbidez, até convergirem para um valor bastante semelhante. Já nos ensaios da Fase I, pode-se perceber que os valores da cabeça e do corpo, próximos no Ensaio I, distanciam-se na medida em que o carvão é adicionado, e ao contrário do caso anterior, as alturas sofrem um decréscimo.

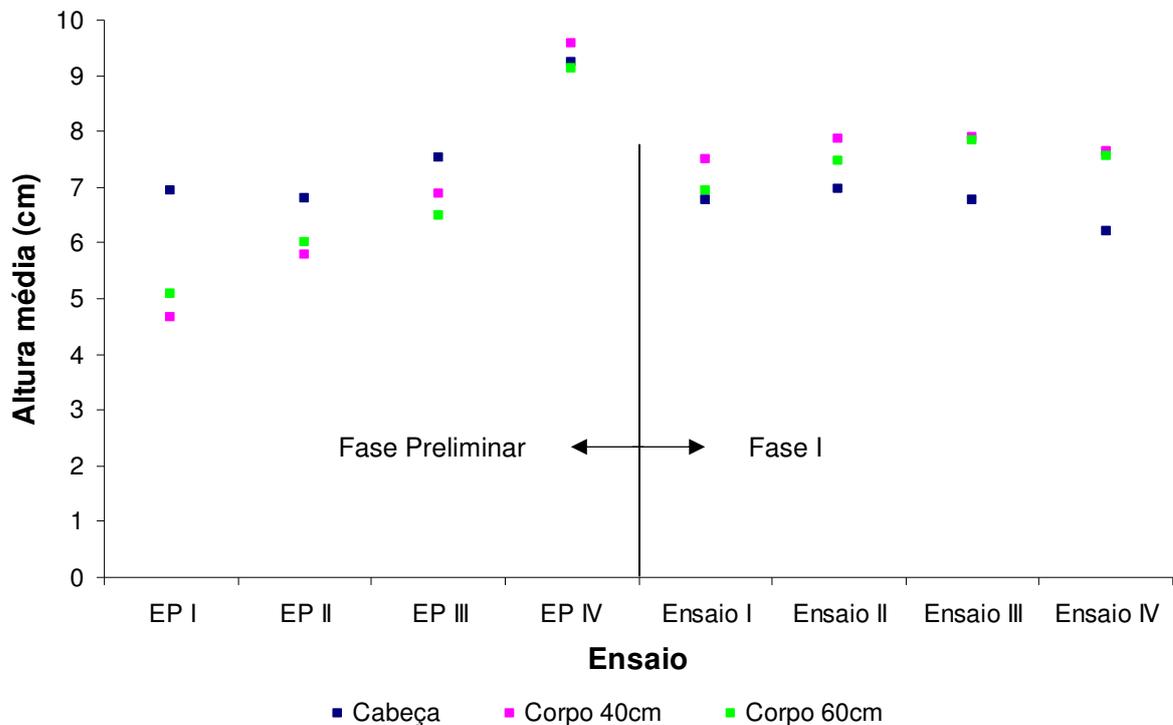


Figura 7.48 Valores médios da geometria dos Ensaio Preliminares e Primeira Fase de ensaios

7.3.2 Dinâmica

Os dados referentes às velocidades e acelerações do fluxo foram coletados e processados conforme descrito no Capítulo 5, o que possibilita a comparação direta entre os ensaios.

Os gráficos das figuras 7.49, 7.50, 7.51 e 7.52 mostram as velocidades dos fluxos, comparando os ensaios ditos equivalentes.

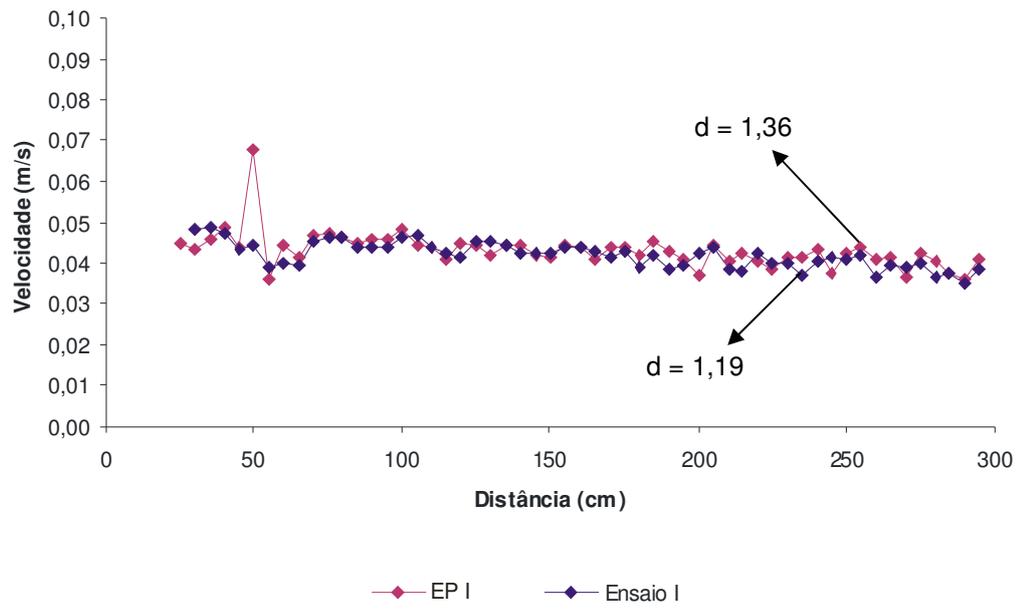


Figura 7.49 Velocidades do Ensaio EP I e Ensaio I

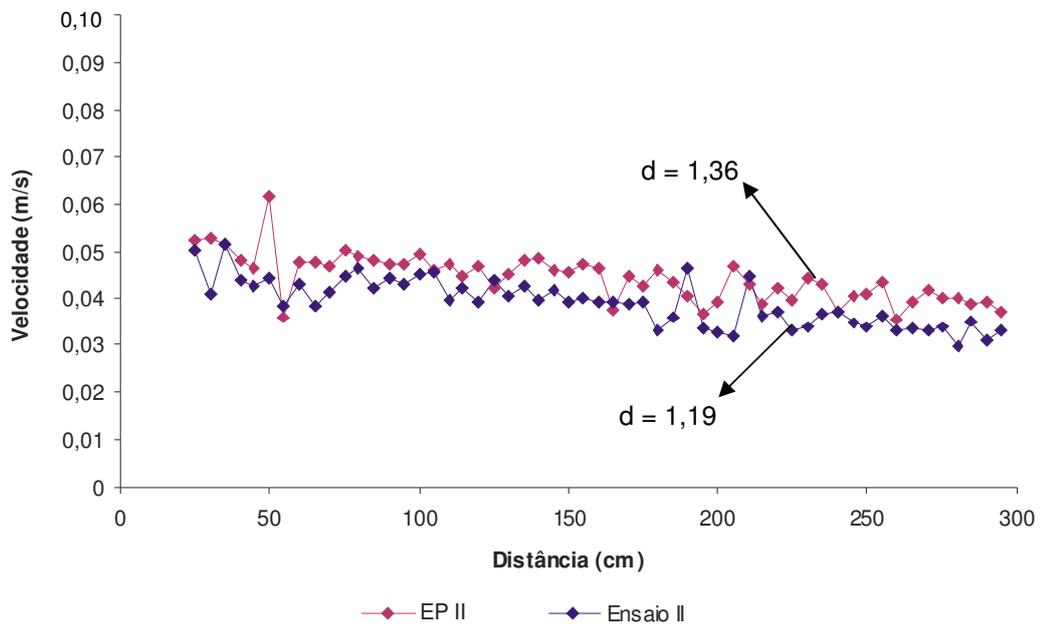


Figura 7.50 Velocidades do Ensaio EP II e Ensaio II

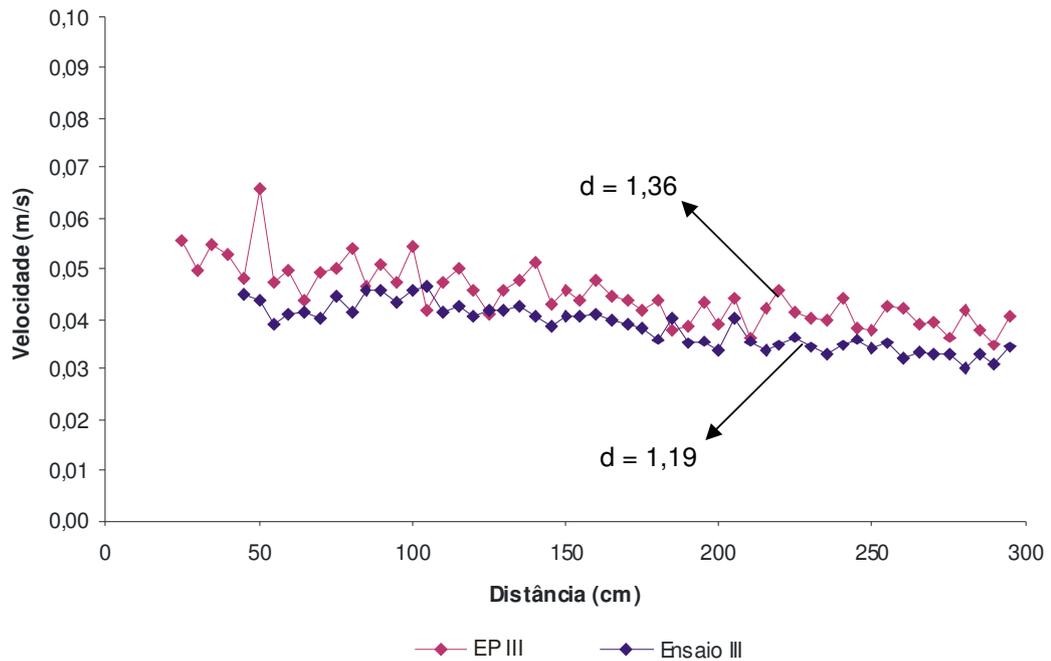


Figura 7.51 Velocidades do Ensaio EP III e Ensaio III

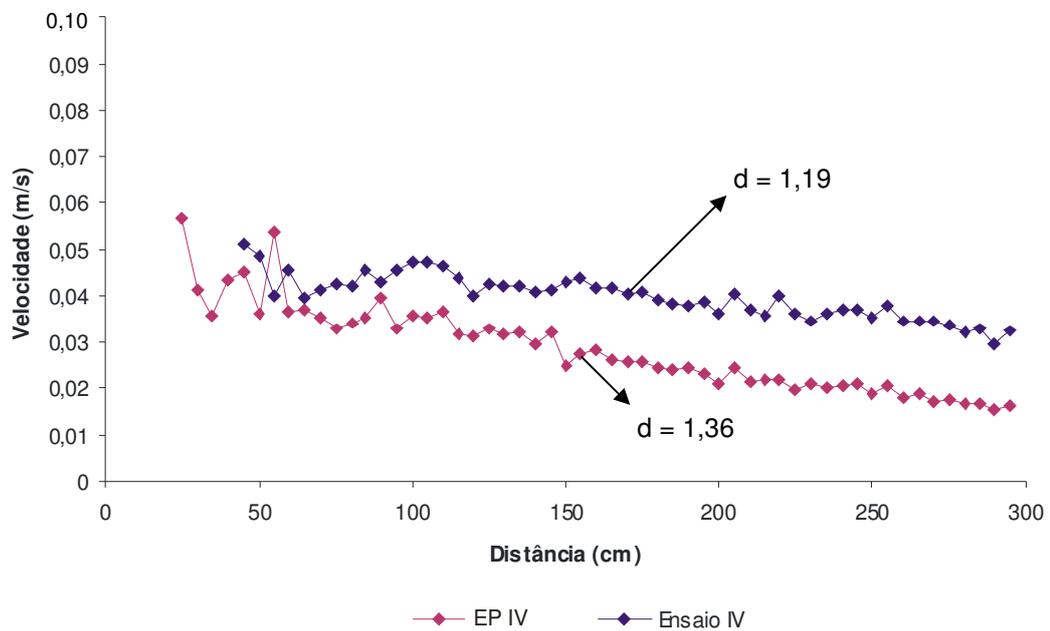


Figura 7.52 Velocidades do Ensaio EP IV e Ensaio IV

Nos ensaios com menor quantidade de carvão e, conseqüentemente, maior proporção de sal, as velocidades de propagação da cabeça apresentam valores muito semelhantes, não havendo grande distinção entre a corrente formada por material com densidade 1,36 ou por material com densidade 1,19. Inclusive, a linha de tendência é praticamente igual na primeira

comparação, como pode ser visto na figura 7.53. Neste caso, o desenvolvimento do fluxo é regido principalmente pelo sal presente na mistura.

Na medida em que mais material granular entra na composição da mistura, em suspensão, começam a ocorrer diferenças no comportamento dinâmico das correntes. Na presença de sal, as velocidades dos ensaios com carvão 207 ($d = 1,39$) são maiores do que com o carvão 205 ($d = 1,19$). Entretanto, nota-se que a tendência a desacelerações são praticamente iguais em todos os casos. Já para o caso dos fluxos exclusivamente compostos por carvão, sem a presença de sal, essa característica se inverte. Ou seja, com carvão 205 (mais leve) a sua velocidade de propagação é consideravelmente maior do que com carvão 207. Além disso, as tendências de desaceleração são distintas, pois enquanto a corrente composta por carvão 205 mantém o mesmo gradiente de velocidade das correntes com carvão e sal, a corrente composta exclusivamente por carvão 207 sofre uma desaceleração mais intensa.

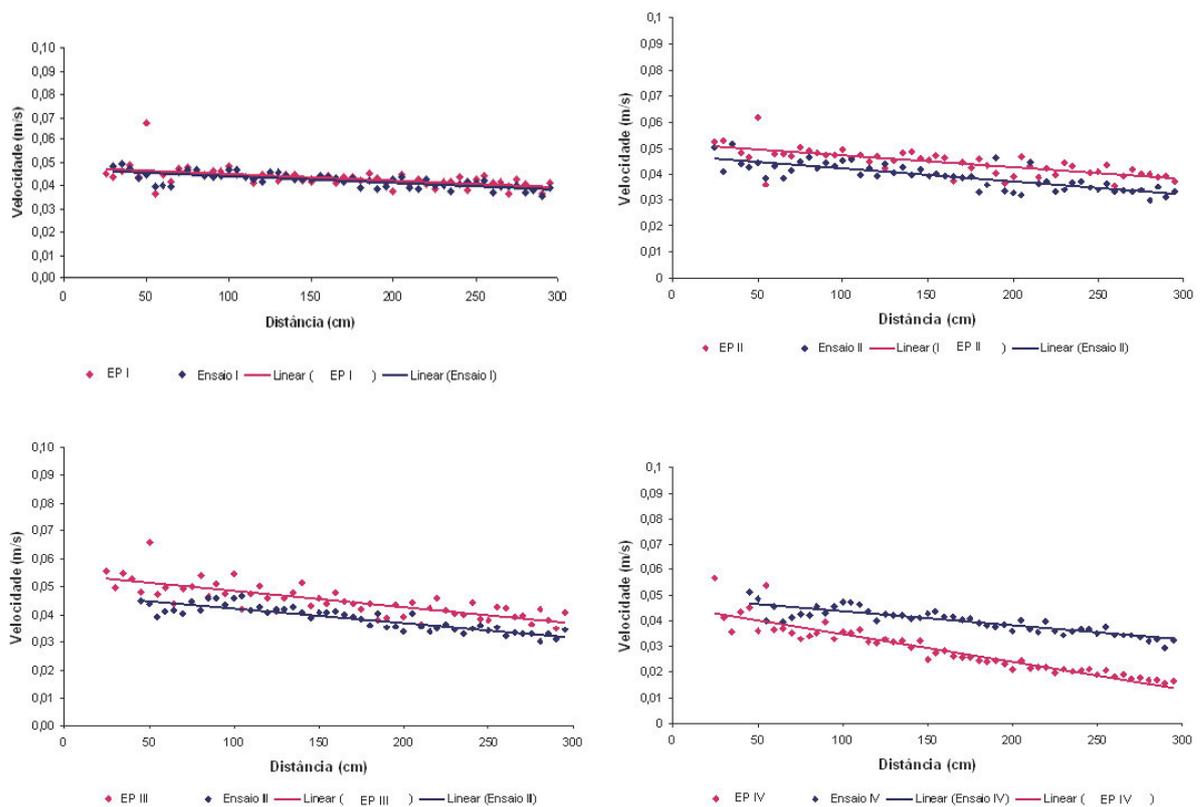


Figura 7.53 Linhas de tendência Fase Preliminar e Fase I

Quando da presença do sal, os fluxos com carvão 207, mais denso e presente em menor concentração volumétrica do que nos ensaios com o carvão 205, têm velocidades maiores, embora o gradiente de desaceleração seja o mesmo (tabela 7.6). Na ausência do sal,

nos fluxos compostos 100% por carvão, o comportamento se inverte, e a corrente com carvão 207 passa a ser mais lenta, enquanto o gradiente de desaceleração passa a ser sensivelmente maior do que nos fluxos com carvão 205. A explicação para este tipo de comportamento pode residir no fato de que a concentração volumétrica do carvão 207 é menor, conseqüentemente, a concentração de sal dissolvido deve ser maior para que o fluxo atinja a massa específica de 1010 kg/m^3 . Esta maior concentração de sal promoveria a suspensão das partículas do carvão 207. Entretanto, na ausência do sal, as partículas do carvão 207 (mais pesado do que o carvão 205) perderiam o “auxílio” na sustentação, e acabariam sedimentando mais rápido, gerando assim a desaceleração mais acentuada (figura 7.53). A comparação entre as velocidades médias das correntes da fase preliminar de ensaios e da Fase I pode ser vista na figura 7.54, onde fica evidente a diferença de velocidade entre os ensaios compostos apenas por carvão.

Tabela 7.6 Quantidades de carvão usadas e respectivas concentrações volumétricas

Ensaio Preliminares - Carvão 207 (d = 1,36)			Ensaio Primeira Fase - Carvão 205 (d = 1,19)		
Quantidade carvão	Quantidade carvão/litro	Concentração volumétrica	Quantidade carvão	Quantidade carvão/litro	Concentração volumétrica
52 g	13 g/l	0,95%	90 g	22,5 g/l	1,90%
104 g	26 g/l	1,90%	180 g	45 g/l	3,78%
156 g	39 g/l	2,86%	270 g	67,5 g/l	5,67%
208 g	52 g/l	3,81%	360 g	90 g/l	7,56%

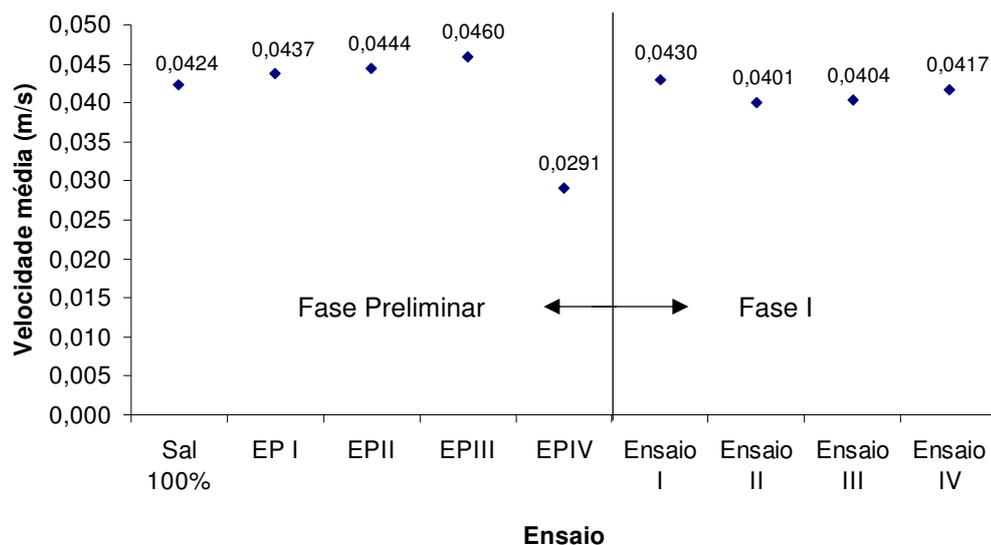


Figura 7.54 Velocidades médias dos Ensaio Preliminares e Fase I

Calculando-se o número de Reynolds, com as velocidades de propagação média e altura média da cabeça (tabela 7.7), nota-se que, com o carvão 205, seus valores são inferiores aos obtidos com o carvão 207, exceto quando a corrente é formada apenas por material granular (caso dos ensaios EP IV e Ensaio IV), onde o carvão menos denso conduz a Reynolds maior do que o do carvão mais denso.

Tabela 7.7 Número de Reynolds e Froude Densimétrico médio dos ensaios

Ensaio Preliminares (d = 1,36)			Primeira Fase (d = 1,19)		
Ensaio	Re	Fr'	Ensaio	Re	Fr'
EP I	2995	0,52	Ens I	2850	0,49
EP II	2952	0,49	Ens II	2630	0,43
EP III	3439	0,50	Ens III	2583	0,45
EP IV	2490	0,52	Ens IV	2466	0,49
Sal 100%	3017	0,27	Ens VIII	2686	0,45

7.3.3 Padrões de Deposição

As amostras dos depósitos gerados pelas correntes de turbidez dos Ensaio Preliminares foram recolhidas em seis intervalos de 50 cm cada e enviadas para a análise por peneiramento. Como nos ensaios da Primeira Fase as amostras foram recolhidas em 30 intervalos de 10 cm e analisadas em um granulômetro a laser, os dados tiveram que ser rearranjados de forma a permitir a sua comparação.

A análise quantitativa dos depósitos foi feita processando-se os dados das duas séries de ensaios em forma de porcentagem, ou seja, foram calculadas as frações depositadas em cada trecho em relação à massa total depositada no canal (figuras 7.55, 7.56, 7.57 e 7.58).

Percebe-se que o percentual de material depositado varia em função do tipo de carvão utilizado. Contudo, à medida que o material sedimentar vai sendo adicionado aos experimentos nota-se que o depósito do carvão mais denso tende a ser maior que o do carvão com menor densidade no primeiro metro do canal, tornando-se menor à medida que se afasta da fonte.

Com teores mais elevados de carvão na mistura (da ordem de 75% e 100%), nota-se uma deposição maior do carvão 205 nas seções iniciais do canal e, a partir da seção situada a 1,0 m da fonte, os depósitos mais pronunciados são causados pelo carvão 207. Em todos os ensaios verifica-se que cerca da metade do depósito concentra-se na região proximal do canal, ou seja, nos primeiros 50 cm.

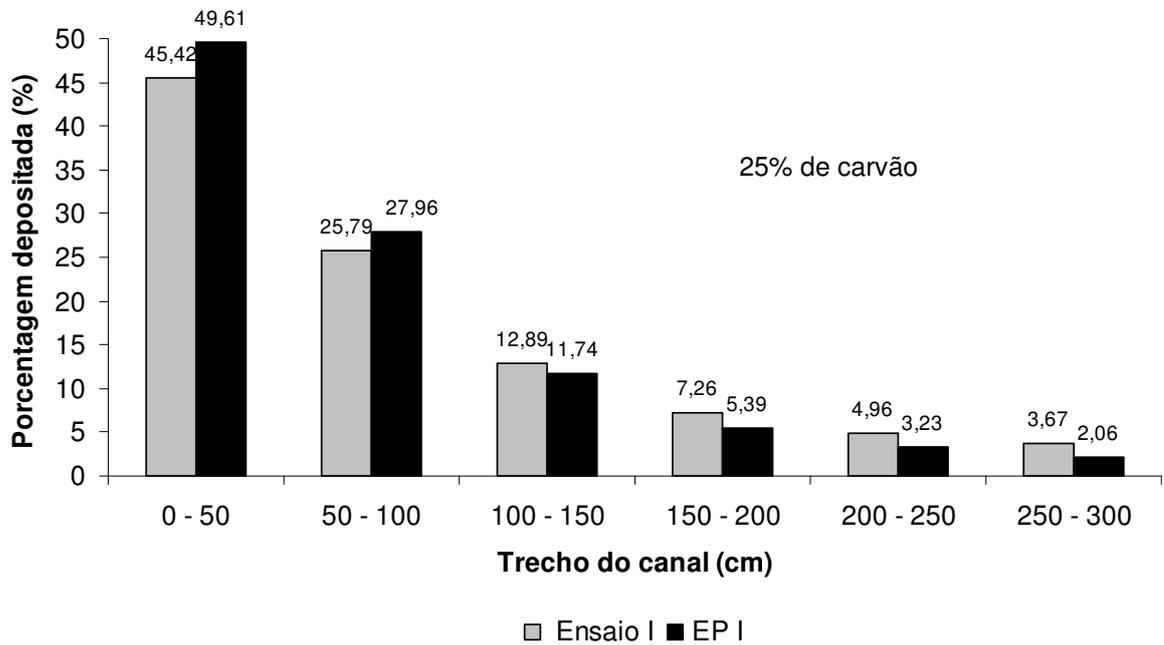


Figura 7.55 Porcentagens de deposição por trecho – Ensaio I e Ensaio Preliminar I

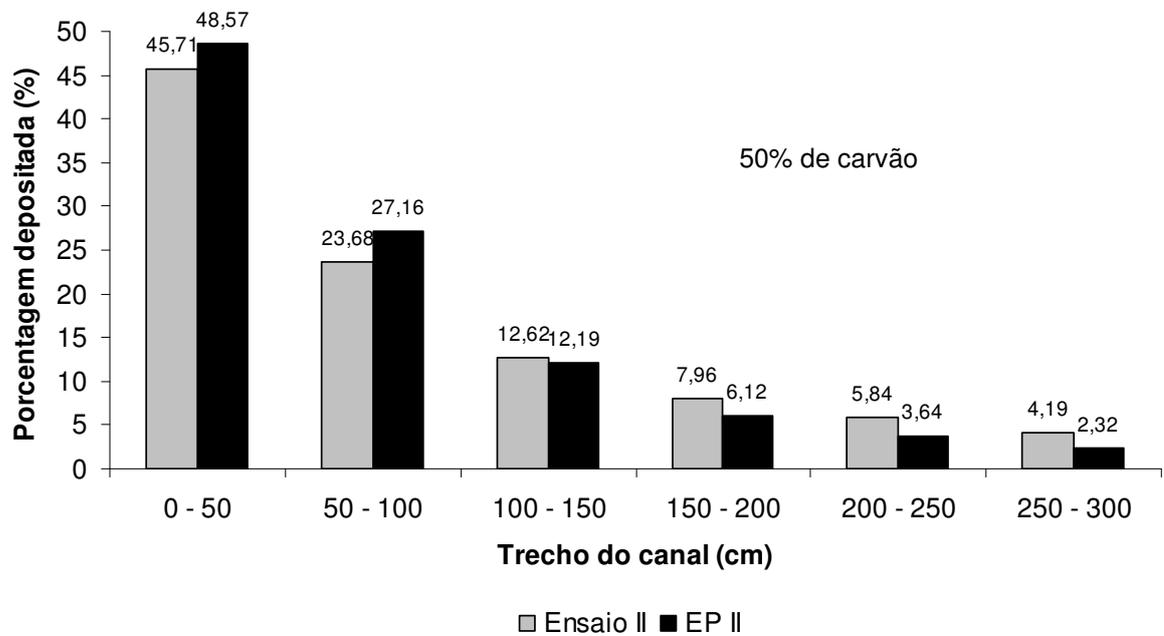


Figura 7.56 Porcentagens de deposição por trecho – Ensaio II e Ensaio Preliminar II

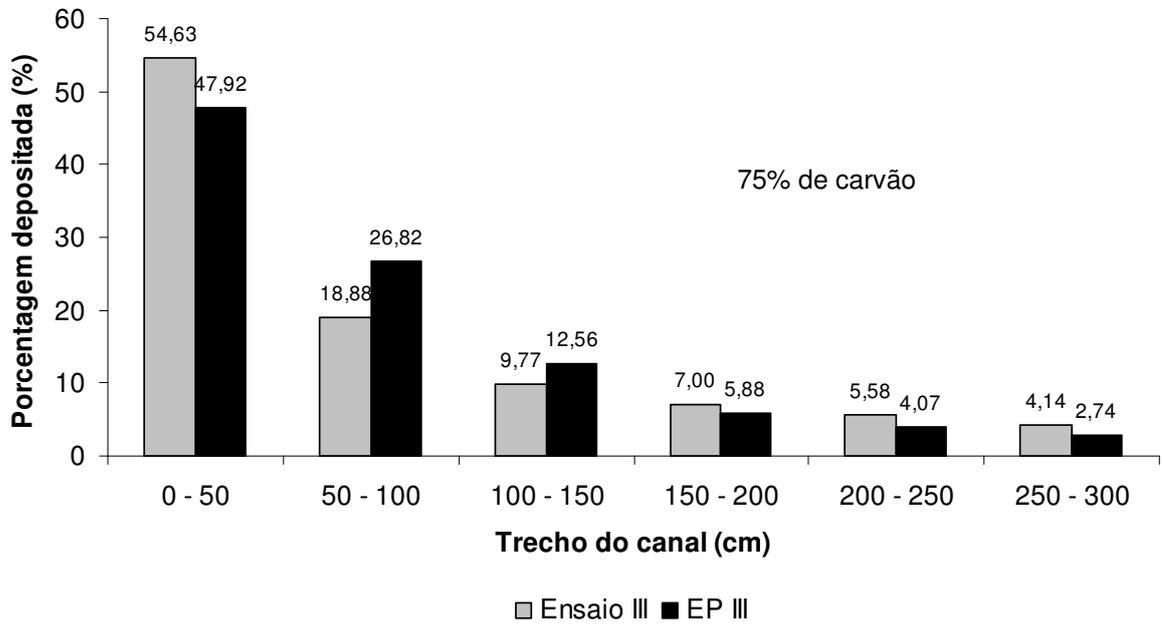


Figura 7.57 Porcentagens de deposição por trecho – Ensaio III e Ensaio Preliminar III

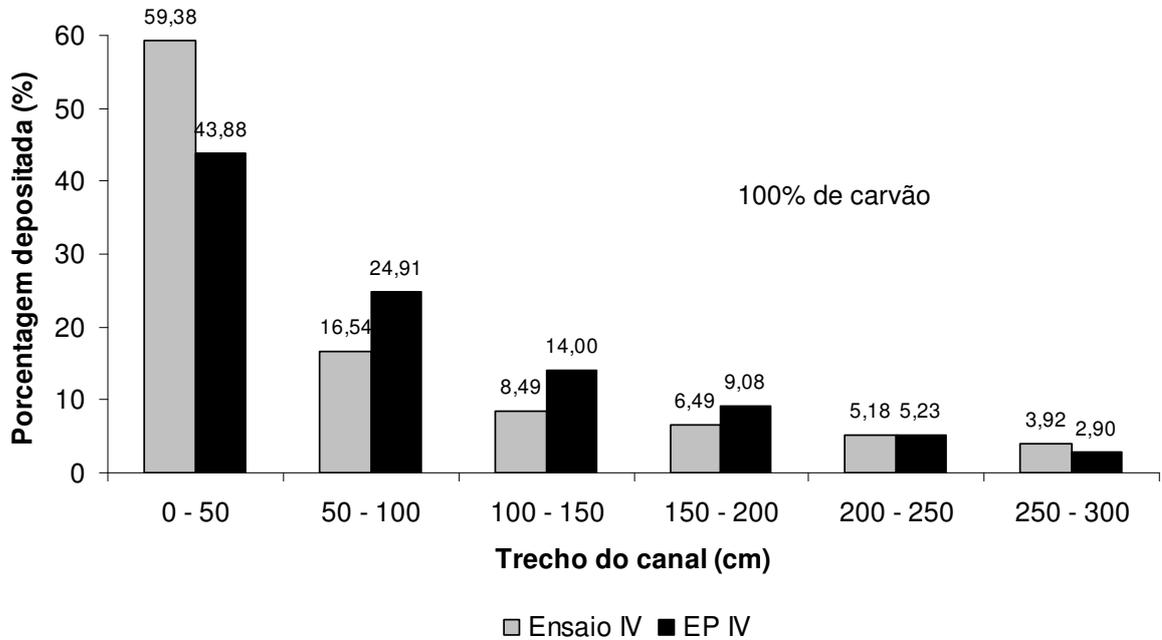


Figura 7.58 Porcentagens de deposição por trecho – Ensaio IV e Ensaio Preliminar IV

A análise qualitativa dos depósitos também foi realizada, usando como referência o tamanho médio dos grãos depositados por trecho do canal. As figuras 7.59 e 7.60 mostram esta análise para os Ensaios preliminares e para os ensaios da Fase I, respectivamente.

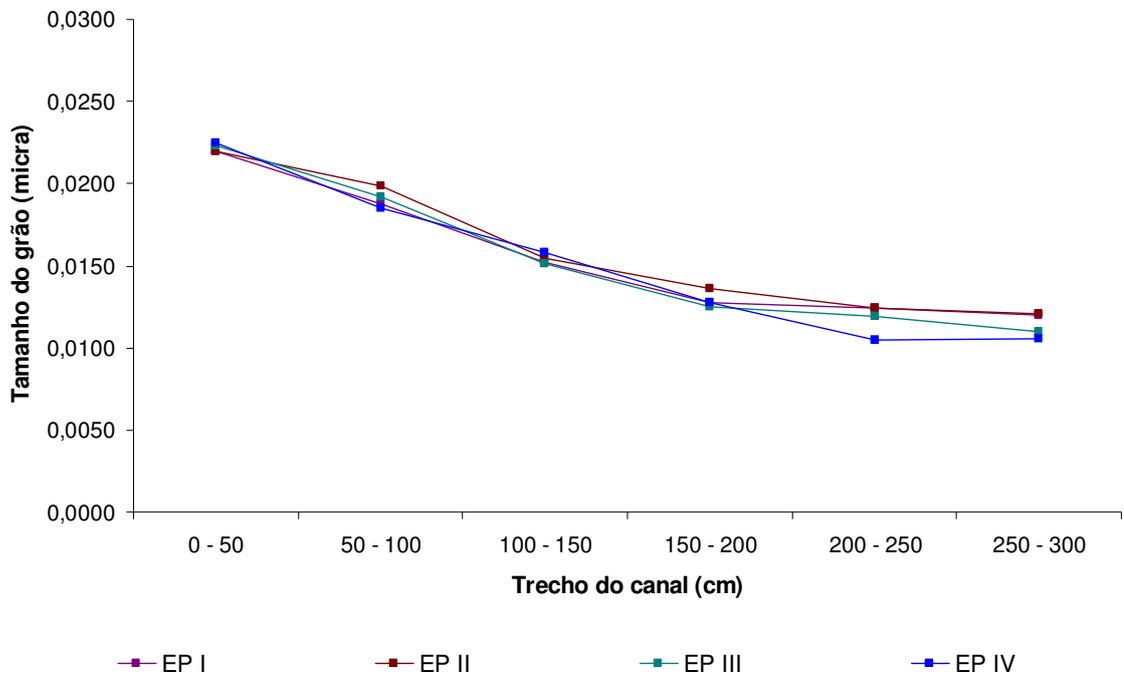


Figura 7.59 Tamanho médio dos grãos depositados nos Ensaios Preliminares

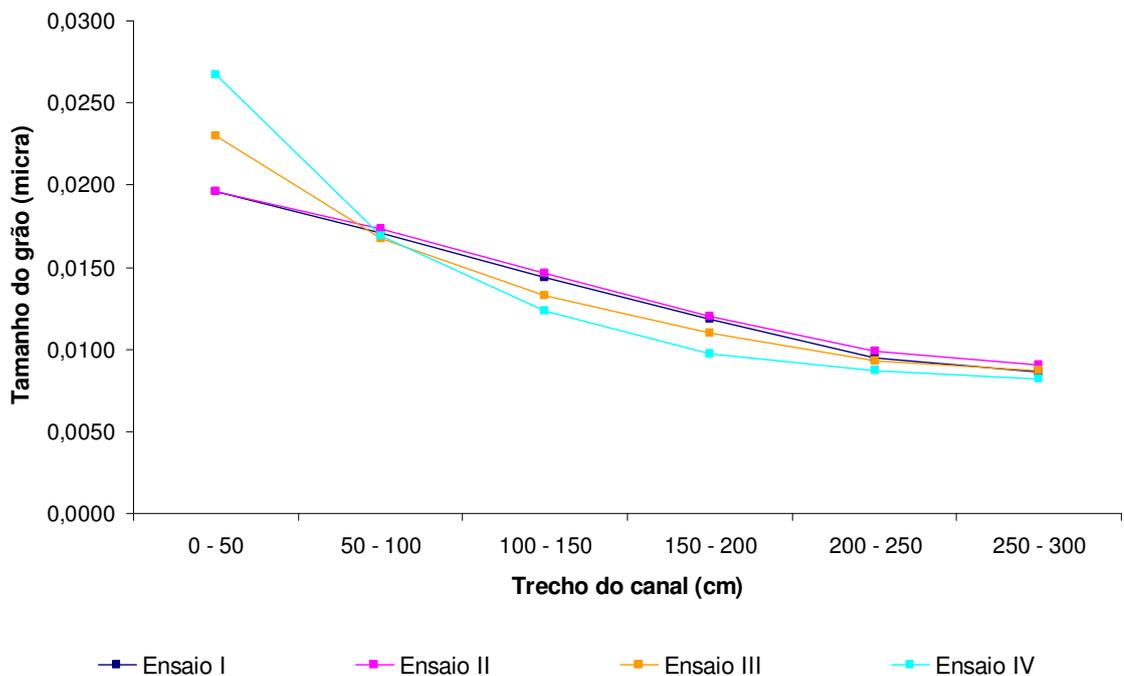


Figura 7.60 Tamanho médio dos grãos depositados nos ensaios da Fase I

Nota-se, nos Ensaio Preliminares, que os tamanhos de grãos nos quatro primeiros trechos é similar. Apenas nos dois últimos trechos do canal fica mais clara uma pequena variação, onde os fluxos com maior teor de sedimento em suspensão apresentam, em seu depósito, tamanhos médios de grãos inferiores aos fluxos com menor quantidade de sedimento em suspensão. Já nos ensaios da Fase I, os depósitos apresentam, embora de forma sutil, uma melhor distribuição ao longo do canal na medida em que a proporção de material dissolvido na corrente de turbidez é maior.

Os dados dos dois grupos de ensaios obtidos nesta análise foram confrontados, para que fosse possível a comparação entre ensaios equivalentes. Conforme pode ser visualizado na figura 7.61, os Ensaio Preliminares apresentam valores médios de tamanho de grãos depositados maiores que os apresentados pelos depósitos dos ensaios da Fase I. Assim, quando a corrente é composta por material de maior densidade, os diâmetros que se depositam nas partes mais distais do canal são de tamanho maior do que quando o material da corrente é menos denso.

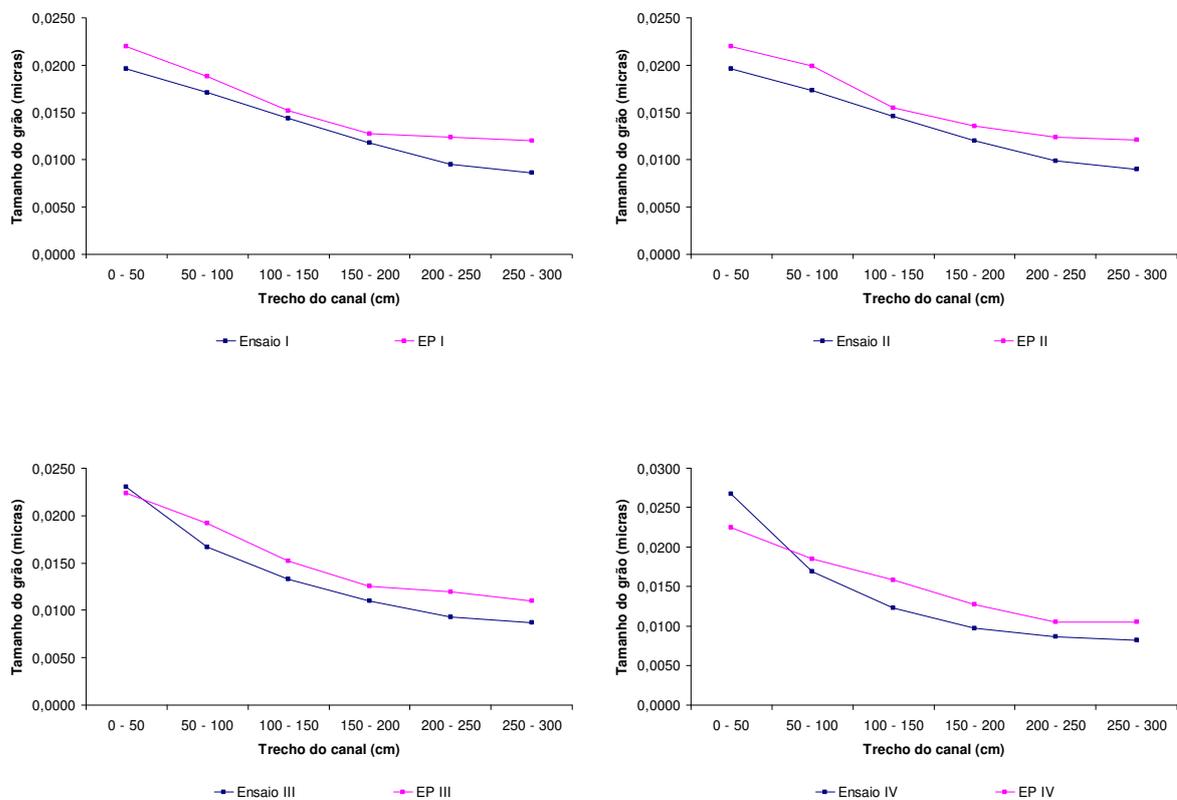


Figura 7.61 Comparações, entre os Ensaio Preliminares e os Ensaio da Fase I, dos tamanhos médios de grãos depositados

7.3.4 Conclusões parciais

7.3.4.1 Geometria

Comparando os ensaios realizados com carvão de diferentes densidades, são notadas alterações nas três características medidas: na cabeça, no corpo 40 cm atrás do nariz e no corpo 60 cm atrás do nariz.

A cabeça das correntes é a característica que apresenta as menores diferenças quando se estabelecem comparações entre ensaios equivalentes. Quando o sal é o componente majoritário (ensaios I/EP I e II/EP II) as diferenças são pequenas e sem um padrão definido. Entretanto, quando o carvão é o componente predominante na mistura, as diferenças aumentam e os fluxos compostos pelo carvão 207 (mais denso e presente em menor volume) apresentam valores mais altos para a altura da cabeça.

As medidas do corpo das correntes apresentaram resultados bastante semelhantes quando avaliadas a 40 cm e a 60 cm atrás do nariz. Os ensaios da Fase I, compostos por carvão 205 (mais leve e presente em maior volume) atingem alturas de corpo maiores que seus equivalentes compostos por carvão 207. Entretanto, chama a atenção o fato de que nos fluxos formados exclusivamente por carvão, esta característica se inverte, e as correntes constituídas por carvão 207 (mais denso) apresentam valores maiores tanto para o corpo quanto para a cabeça da corrente.

Logo, o tipo de carvão e/ou sua concentração volumétrica, assim como a concentração de sal, desempenham papel decisivo na determinação das características geométricas do fluxo.

7.3.4.2 Dinâmica

As velocidades de avanço da cabeça das correntes aqui apresentadas mostram uma tendência de desaceleração mais pronunciada, na medida em que mais material sedimentar é incorporado ao fluxo.

Analogamente ao que foi visto na análise geométrica, as velocidades dos fluxos compostos por carvão e sal mostram que os ensaios com carvão 207 (mais denso e em menor volume) apresentam velocidades maiores do que os ensaios com carvão 205. Os gradientes de desaceleração são também idênticos. É importante ressaltar o fato de que este padrão se inverte quando os fluxos são formados apenas por carvão, ou seja, a corrente de turbidez

constituída exclusivamente por carvão 205 é significativamente mais veloz do que sua equivalente composta por carvão 207. O gradiente de desaceleração aqui sofre uma mudança, tendo o fluxo composto por carvão 207 uma desaceleração mais pronunciada do que o fluxo formado por carvão 205.

Esta diferença de comportamento pode ser explicada pela maior concentração de sal dissolvido na composição das correntes com carvão 207. Como este carvão é mais denso que o tipo 205, a sua concentração volumétrica é menor. Portanto, para se atingir a massa específica de 1010 kg/m^3 , igual para todos os ensaios, é necessário uma maior concentração de sal. Quando as correntes são compostas apenas por carvão (Ensaio Preliminar IV e Ensaio IV), os grãos de carvão 207 perdem este diferencial de suporte da matriz formada pelo sal dissolvido, e passa a sedimentar mais rápido, fazendo com que esta corrente de turbidez perca velocidade mais rápido do que sua equivalente formada por carvão 205.

Nota-se que o sal desempenha um papel importante no comportamento dinâmico dos fluxos.

7.3.4.3 Padrões de deposição

Devido ao método e a discretização dos dados utilizados para analisar a granulometria dos depósitos nos Ensaios Preliminares, por peneiramento a cada 50cm de canal, o detalhamento das informações é menor do que nos ensaios da Fase I.

Os dados mostraram que quando a massa específica da corrente é composta predominantemente por sal, a tendência de deposição é muito parecida. Entretanto, quando o carvão é o componente predominante, diferenças no depósito tornam-se visíveis. Quantitativamente, os depósitos dos Ensaios Preliminares, realizados com carvão 207 (mais denso), apresentaram-se melhor distribuídos ao longo do canal do que os depósitos dos ensaios da Fase I, quando os experimentos foram compostos predominantemente por carvão.

Qualitativamente, os Ensaios Preliminares mostraram-se praticamente idênticos no que diz respeito ao padrão de deposição. Já os depósitos da Fase I apresentaram diferenças sutis, sendo os fluxos com maior quantidade de sal transportaram grãos maiores para regiões um pouco mais distais da fonte.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1 CONCLUSÕES GERAIS

Embora existam diferenças nas características geométricas e dinâmicas, as correntes de turbidez geradas neste estudo, pelas diferentes misturas, mostraram padrões de comportamento bastante semelhantes em relação às características posicionais. Fixando a massa específica, volume e vazão de injeção dos fluxos, foi possível analisar a influência das diferentes composições de materiais que formavam as correntes de turbidez, no que diz respeito à geometria, dinâmica e seus padrões de deposição.

Na análise da geometria das correntes, verificou-se que na medida em que mais material fino compõe o fluxo, menores são as dimensões das correntes de densidade, principalmente o seu corpo. No caso de correntes que têm na sua composição o sal, este desempenha papel semelhante ao material granular fino. Nas correntes formadas apenas com sal, nota-se a presença de uma cabeça e um corpo bem definidos. Esta definição desaparece na medida em que é incorporado material sedimentar ao fluxo.

Na análise da dinâmica do fluxo, comprovou-se o fato de que quanto mais material sedimentar compõe a corrente, maior será a desaceleração que a mesma irá sofrer, em função da perda de densidade causada pela deposição deste material em suspensão, além da incorporação de fluido ambiente no fluxo. Quanto menor a granulometria do sedimento do fluxo, e conseqüentemente menor a velocidade de queda do mesmo, mais lenta é a sua deposição, fazendo com que a corrente desacelere mais lentamente. As correntes que utilizaram sal na sua composição foram as que mantiveram sua velocidade por distâncias maiores.

Quanto aos padrões de deposição, o comportamento das correntes de turbidez geradas pelas diferentes misturas mostrou-se bastante semelhante. Os fluxos com sal dissolvido carregaram grãos mais grossos para distâncias um pouco maiores. Entretanto, esta diferença não chega a ser considerada significativa. Esse comportamento também é corroborado pela análise da capacidade de transporte dos fluxos, que apresentou pequenas diferenças para os dois tipos de fração fina avaliadas.

Ainda, verificou-se que as espessuras de todos os depósitos se tornam mais delgadas nas regiões mais distais em relação à fonte, uma vez que a massa depositada nestes trechos é consideravelmente menor do que no início do canal.

A comparação entre correntes de turbidez compostas por sal e diferentes tipos de carvão (com diferentes densidades) indica que, quantitativamente, os depósitos gerados pelos escoamentos formados por carvão menos denso (carvão 205) é melhor distribuído ao longo do canal quando da presença de sal na composição da mistura. Para os ensaios gerados com misturas compostas de 100% de carvão, esse comportamento se inverte, e o ensaio composto por material mais denso (carvão 207) mostrou-se melhor distribuído.

Esta inversão de comportamento foi também notada nas características geométricas e dinâmicas na comparação entre os Ensaio Preliminares (carvão 207) e os ensaios da Fase I (carvão 205). Quando as correntes continham sal dissolvido na sua composição, os Ensaio Preliminares, compostos por carvão mais denso, foram mais rápidos e apresentaram dimensões menores do corpo. Entretanto, quando as correntes foram formadas apenas por carvão, eles se apresentaram mais lentos e com maiores dimensões de corpo do que seu equivalente composto por carvão menos denso. O efeito causador desta mudança não foi plenamente identificado. Entretanto, pode estar associado à algum processo dinâmico relacionado à diferença de concentração volumétrica ou ao efeito do sal no suporte dos grãos de carvão.

Uma lei de degradação do tamanho do grão foi ajustada para a variação do valor do D_{50} dos depósitos formados nas Fases I e II de ensaios, com coeficiente de correlação médio de 94,71% na Fase I, e 94,16% na Fase II. Neste ajuste, o D_{50} em um determinado trecho do canal é função do valor do D_{50} no primeiro trecho e de uma constante de calibração. Esta lei ilustra a pequena diferença na capacidade de transporte dos fluxos compostos por carvão/bentonita, e carvão/sal, onde os fluxos com sal dissolvido transportam grãos com diâmetros levemente maiores para regiões mais distais.

A metodologia utilizada nas simulações realizadas no Necod foi adaptada satisfatoriamente aos fluxos compostos por diferentes materiais. Entretanto, o único problema encontrado é o fato dos ensaios que utilizaram grandes quantidades de bentonita na sua composição apresentarem distorções nos dados de granulometria, em função do pequeno tamanho das partículas do material. Em virtude disso, os dados obtidos do analisador de partículas a laser tiveram que ser trabalhados para que fosse possível isolar a análise granulométrica apenas dos grãos de carvão, verificando assim o efeito da bentonita sobre o carvão presente no fluxo.

Os dados mostram que, para as correntes de baixa densidade geradas neste trabalho, é possível a substituição dos sedimentos finos por sal na simulação física de correntes de densidade, apesar das pequenas diferenças notadas nas características geométricas, dinâmicas

e posicionais. Esta substituição simplificaria as simulações físicas em escala reduzida destes fluxos, tanto na realização dos ensaios quanto na análise dos dados, onde se almeja analisar os efeitos do carreamento dos grãos mais grossos.

8.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As simulações realizadas com correntes contendo bentonita na sua composição tiveram os dados relativos à granulometria distorcidos em função do tamanho extremamente pequeno das partícula. O objetivo de uma parte deste estudo era analisar o efeito da bentonita em eventuais mudanças na capacidade de transporte dos grãos de carvão, entretanto, como não foi possível separar de forma satisfatória estes dois componentes nas amostras recolhidas dos depósitos gerados pelas correntes de turbidez, a análise granulométrica das mesmas sofreu algumas distorções, principalmente no ensaio que continha a maior proporção de bentonita (Ensaio V). Devido a isso, recomenda-se que para futuros trabalhos envolvendo mais de um tipo de sedimento, seja desenvolvida uma metodologia para a separação dos diferentes tipos de material granular que sejam eventualmente utilizados na composição dos fluxos.

Os ensaios realizados neste trabalho tiveram a massa específica fixada em 1010 kg/m^3 , o que representa correntes de turbidez de baixa densidade. Atualmente, fluxos de alta densidade têm sido extensamente debatidos e pesquisados. Os resultados aqui obtidos não podem ser extrapolados para fluxos de alta densidade sem que haja um estudo a respeito. Uma série de ensaios envolvendo materiais com presença de argila e sem material coesivo, formando correntes de alta densidade, seria de grande interesse. Uma vez que a baixa densidade das misturas empregadas pode ser a razão das similaridades encontradas.

REFERÊNCIAS

- 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.
- BONNECAZE, R. T.; HUPPERT, H. E; LISTER, J. R., 1993. Particle-driven Gravity Currents. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, v.250, p.339-369.
- BRITTER, R.E.; SIMPSON, E. J. 1978. Experiments on the dynamics os a gravity current head. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, v. 88, p. 223-240
- BRITO, D. U.; MEDEIROS, D. S.; MANICA, R.; BORGES, A. L. O., MAESTRI, R D., 2002. Emprego de equipamento de visualização (Ecógrafo Médico) para o estudo de correntes de densidade não conservativas. Revista Técnica de Energia, Petróleo e Gás. Rio de Janeiro, vol.1, nº 2, p. 54-58.
- D'ÁVILA, R. S. F.; PAIM, P. S. G., 2003. Mecanismos de transporte e deposição de turbiditos. In: Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares. PAIM, P. S. G.; FACCINI, U. F.; NETTO, R. G. (Eds.). Universidade Vale do Rio dos Sinos.
- 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.
- GLADSTONE, C.; PHILLIPS, J. C.; SPARKS, R. S. J., 1998, Experiments on bidisperse, constant-volume gravity currents: propagation and sediment deposition. Sedimentology, v.45, p. 833-843.
- 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, vol. 47, Suppl. 1, p. 62-94.
- KUENEN, P. H.; MIGLIORINI, C. I., 1950. Turbidity currents as a cause of graded bedding. Journal of Geology, v. 58, p. 91-127.
- LEEDER, M., 1999. Sedimentology and Sedimentary Basins, from Turbulence to Tectonics. 2.ed. Blackwell Science, 592p.
- 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, vol. 52, p.279-297.

MANICA, R., 2002. Modelagem física de correntes de densidade não conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada, 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MIDDLETON, G. V., 1993. Sediment deposition from turbidity currents. Annual Review of Earth Planet Science, Palo Alto, vol. 21, p. 89-114.

MUTTI, E., 1992. Turbidite Sandstones. Agip, Instituto di Geologia, Università di Parma, San Donato Milanese, 275p.

READING, H. G.; RICHARDS, M., 1994. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system. *American Association of Petroleum Geologists. Bull.* 78, p. 792–822

SARTOR, R.; MANICA, R.; ÁVILA, M. D.; BORGES, A. L. O.; MAESTRI, R. D., 2002. Utilização de modelo físico simplificado para estudo de padrões deposicionais das correntes de densidade na interface base do talude e planície abissal. João Pessoa: Congresso Brasileiro de Geologia, 279p (*Anais: a geologia e o homem*).

SIMPSON, E. J., 1982. Gravity currents in the laboratory, atmosphere, and ocean, Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 14, p. 213-234.

SIMPSON, J. E.; BRITTER, R. E., 1979. The dynamics of the head of a gravity current advancing over a horizontal surface, Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, vol.94, p.447-495.

SIMPSON, J. E., 1997. Gravity Currents in the environment and the laboratory. Cambridge University Press

APÊNDICE A

Tabela A.1 Velocidades de avanço da cabeça das correntes da Fase Preliminar (m/s)

Dist. (cm)	100% Sal	EP I	EP II	EP III	EP IV
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20	0,080	0,115	0,091	0,145	0,098
25	0,044	0,045	0,052	0,056	0,056
30	0,044	0,043	0,053	0,050	0,041
35	0,039	0,046	0,051	0,055	0,036
40	0,046	0,049	0,048	0,053	0,043
45	0,041	0,044	0,047	0,048	0,045
50	0,057	0,068	0,061	0,066	0,036
55	0,032	0,036	0,036	0,048	0,054
60	0,038	0,044	0,048	0,050	0,037
65	0,039	0,041	0,048	0,044	0,037
70	0,041	0,047	0,047	0,049	0,035
75	0,047	0,048	0,050	0,050	0,033
80	0,042	0,047	0,049	0,054	0,034
85	0,043	0,045	0,048	0,047	0,035
90	0,044	0,046	0,047	0,051	0,039
95	0,044	0,046	0,047	0,048	0,033
100	0,045	0,048	0,049	0,055	0,036
105	0,042	0,045	0,046	0,042	0,035
110	0,041	0,044	0,047	0,047	0,036
115	0,043	0,041	0,045	0,050	0,031
120	0,046	0,045	0,047	0,046	0,031
125	0,042	0,045	0,042	0,041	0,033
130	0,042	0,042	0,045	0,046	0,031
135	0,044	0,045	0,048	0,048	0,032
140	0,047	0,045	0,048	0,051	0,029
145	0,044	0,042	0,046	0,043	0,032
150	0,046	0,042	0,045	0,046	0,025
155	0,043	0,044	0,047	0,044	0,027
160	0,045	0,044	0,047	0,048	0,028
165	0,044	0,041	0,038	0,045	0,026
170	0,046	0,044	0,045	0,044	0,026
175	0,043	0,044	0,043	0,042	0,026
180	0,043	0,042	0,046	0,044	0,024
185	0,040	0,045	0,044	0,038	0,024
190	0,039	0,043	0,040	0,039	0,024
195	0,040	0,041	0,037	0,044	0,023
200	0,040	0,037	0,039	0,039	0,021
205	0,047	0,045	0,047	0,044	0,024
210	0,040	0,041	0,043	0,036	0,021
215	0,039	0,042	0,039	0,042	0,022
220	0,045	0,041	0,042	0,046	0,022
225	0,040	0,039	0,040	0,041	0,020
230	0,043	0,041	0,044	0,040	0,021
235	0,041	0,041	0,043	0,040	0,020
240	0,041	0,044	0,037	0,044	0,021
245	0,042	0,038	0,041	0,038	0,021
250	0,039	0,043	0,041	0,038	0,019
255	0,043	0,044	0,044	0,043	0,020
260	0,039	0,041	0,035	0,042	0,018
265	0,044	0,041	0,039	0,039	0,019
270	0,041	0,037	0,042	0,039	0,017
275	0,045	0,043	0,040	0,037	0,018
280	0,040	0,041	0,040	0,042	0,016
285	0,039	0,038	0,039	0,038	0,016
290	0,038	0,036	0,039	0,035	0,015
295	0,043	0,041	0,037	0,041	0,016
Média	0,042	0,044	0,044	0,046	0,029
Des. Padrão	0,008	0,012	0,010	0,016	0,014

Tabela A.2 Velocidades de avanço da cabeça da corrente (m/s) – Fases I e II

Distância (cm)	100% Sal	Ensaio I	Ensaio II	Ensaio III	Ensaio IV	Ensaio V	Ensaio VI	Ensaio VII	Ensaio VIII
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
20	0,0803	0,1171	0,1315	0,1158	0,1250	0,1017	0,0955	0,1200	0,0909
25	0,0444	0,0605	0,0503	0,0620	0,0487	0,0381	0,0384	0,0510	0,0652
30	0,0439	0,0484	0,0408	0,0564	0,0620	0,0418	0,0462	0,0625	0,0556
35	0,0387	0,0490	0,0513	0,0507	0,0556	0,0399	0,0448	0,0516	0,0417
40	0,0465	0,0473	0,0438	0,0510	0,0575	0,0443	0,0455	0,0484	0,0375
45	0,0406	0,0433	0,0426	0,0451	0,0510	0,0441	0,0371	0,0517	0,0341
50	0,0570	0,0445	0,0442	0,0438	0,0485	0,0450	0,0602	0,0500	0,0429
55	0,0324	0,0393	0,0384	0,0394	0,0400	0,0297	0,0449	0,0390	0,0366
60	0,0379	0,0400	0,0432	0,0411	0,0457	0,0399	0,0362	0,0380	0,0375
65	0,0390	0,0397	0,0385	0,0414	0,0397	0,0362	0,0341	0,0380	0,0366
70	0,0414	0,0455	0,0414	0,0404	0,0415	0,0375	0,0400	0,0417	0,0405
75	0,0471	0,0466	0,0448	0,0449	0,0426	0,0352	0,0404	0,0476	0,0455
80	0,0417	0,0464	0,0464	0,0415	0,0423	0,0366	0,0371	0,0435	0,0455
85	0,0426	0,0441	0,0421	0,0460	0,0455	0,0363	0,0391	0,0429	0,0469
90	0,0438	0,0438	0,0441	0,0460	0,0430	0,0405	0,0396	0,0418	0,0484
95	0,0437	0,0441	0,0430	0,0435	0,0456	0,0406	0,0390	0,0405	0,0441
100	0,0451	0,0466	0,0450	0,0460	0,0474	0,0400	0,0395	0,0401	0,0429
105	0,0425	0,0469	0,0455	0,0465	0,0474	0,0407	0,0400	0,0411	0,0441
110	0,0409	0,0438	0,0398	0,0415	0,0465	0,0386	0,0385	0,0401	0,0441
115	0,0430	0,0425	0,0421	0,0427	0,0437	0,0390	0,0390	0,0429	0,0441
120	0,0465	0,0413	0,0392	0,0407	0,0402	0,0390	0,0375	0,0391	0,0429
125	0,0417	0,0455	0,0441	0,0421	0,0426	0,0370	0,0401	0,0445	0,0455
130	0,0417	0,0455	0,0406	0,0421	0,0421	0,0385	0,0396	0,0395	0,0429
135	0,0441	0,0443	0,0425	0,0426	0,0421	0,0371	0,0366	0,0405	0,0469
140	0,0470	0,0425	0,0395	0,0409	0,0410	0,0390	0,0385	0,0395	0,0429
145	0,0441	0,0425	0,0417	0,0388	0,0413	0,0395	0,0367	0,0395	0,0405
150	0,0464	0,0425	0,0392	0,0407	0,0429	0,0385	0,0366	0,0361	0,0429
155	0,0429	0,0441	0,0402	0,0407	0,0437	0,0370	0,0363	0,0380	0,0429
160	0,0453	0,0437	0,0395	0,0411	0,0417	0,0371	0,0366	0,0375	0,0417
165	0,0438	0,0429	0,0395	0,0400	0,0417	0,0369	0,0354	0,0370	0,0441
170	0,0460	0,0417	0,0388	0,0393	0,0406	0,0404	0,0308	0,0364	0,0455
175	0,0433	0,0429	0,0393	0,0383	0,0410	0,0366	0,0362	0,0352	0,0441
180	0,0426	0,0392	0,0331	0,0361	0,0392	0,0316	0,0327	0,0323	0,0405
185	0,0401	0,0422	0,0361	0,0403	0,0382	0,0366	0,0323	0,0335	0,0429
190	0,0392	0,0385	0,0464	0,0353	0,0379	0,0357	0,0306	0,0326	0,0385
195	0,0398	0,0395	0,0333	0,0358	0,0386	0,0354	0,0317	0,0342	0,0357
200	0,0398	0,0427	0,0327	0,0339	0,0360	0,0316	0,0284	0,0291	0,0366
205	0,0469	0,0437	0,0319	0,0402	0,0403	0,0376	0,0349	0,0361	0,0441
210	0,0403	0,0388	0,0447	0,0355	0,0372	0,0341	0,0303	0,0330	0,0385
215	0,0392	0,0382	0,0364	0,0338	0,0357	0,0330	0,0298	0,0319	0,0385
220	0,0453	0,0426	0,0373	0,0348	0,0398	0,0319	0,0303	0,0331	0,0395
225	0,0402	0,0402	0,0331	0,0364	0,0361	0,0333	0,0292	0,0306	0,0375
230	0,0433	0,0401	0,0339	0,0344	0,0343	0,0342	0,0283	0,0307	0,0385
235	0,0409	0,0373	0,0367	0,0331	0,0361	0,0330	0,0287	0,0309	0,0375
240	0,0413	0,0404	0,0372	0,0350	0,0369	0,0327	0,0297	0,0310	0,0395
245	0,0421	0,0418	0,0346	0,0361	0,0371	0,0335	0,0297	0,0323	0,0385
250	0,0385	0,0409	0,0339	0,0341	0,0352	0,0323	0,0275	0,0286	0,0366
255	0,0427	0,0421	0,0363	0,0351	0,0378	0,0337	0,0316	0,0330	0,0385
260	0,0388	0,0369	0,0331	0,0322	0,0343	0,0303	0,0269	0,0290	0,0357
265	0,0436	0,0395	0,0337	0,0334	0,0346	0,0320	0,0276	0,0300	0,0366
270	0,0406	0,0392	0,0329	0,0331	0,0344	0,0319	0,0280	0,0273	0,0349
275	0,0447	0,0399	0,0340	0,0328	0,0336	0,0323	0,0289	0,0307	0,0349
280	0,0398	0,0367	0,0295	0,0300	0,0318	0,0268	0,0266	0,0264	0,0341
285	0,0388	0,0379	0,0350	0,0329	0,0329	0,0365	0,0281	0,0293	0,0341
290	0,0381	0,0355	0,0311	0,0309	0,0293	0,0298	0,0257	0,0269	0,0333
295	0,0430	0,0388	0,0331	0,0345	0,0322	0,0327	0,0273	0,0268	0,0341
Média	0,0424	0,0430	0,0401	0,0404	0,0417	0,0367	0,0354	0,0382	0,0412
Des. Padrão	0,0083	0,0121	0,0143	0,0130	0,0139	0,0107	0,0113	0,0142	0,0102