

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE CORRENTES DE DENSIDADE EM AMBIENTES  
SALINOS SOB DIFERENTES CONTRASTES DE DENSIDADES**

**CAROLINA HOLZ BOFFO**

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

**Orientação:** Prof.<sup>a</sup> Ana Luiza de Oliveira Borges

**Banca Examinadora:**

Prof. Amauri Barcelos	UFPeI
Prof. Paulo Kroeff	IPH/UFRGS
Prof. Rafael Manica	IPH/UFRGS

Porto Alegre, dezembro de 2010.

## AGRADECIMENTOS

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

A realização deste trabalho é a concretização de um desejo que surgiu quando ainda estava cursando os primeiros semestres do curso de graduação. O interesse em explorar esta área da ciência foi crescendo com o passar dos anos e a convivência com meus colegas de IPH e com minha orientadora, professora Ana Luiza, nas disciplinas eletivas da graduação, nas conversas das pausas para cafezinho e nos almoços. O período de quase dez anos de dedicação e trabalho no IPH foi bastante importante para esta conquista.

Agradeço imensamente à minha orientadora, a professora Ana Luiza, que, durante todos esses nove anos, alimentou e incentivou a realização deste sonho. Agradeço também pela sua amizade, pela segurança por ela transmitida e pelo apoio e auxílio em diversos momentos importantes de minha vida. Pela confiança depositada em mim e por sua dedicação, que proporcionaram o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Rogério Maestri, que, com sua visão crítica, ajudou a nortear meu estudo, alertando sobre caminhos melhores a serem tomados para o desenvolvimento do trabalho. Agradeço a ele também pela sua amizade, pelos puxões de orelha e pelos elogios dados nos momentos certos. Pelos momentos descontraídos nas confraternizações e nos intervalos de almoço na sala do cafezinho.

Ao professor Ben Kneller, pelo curso que tivemos em Porto Alegre e pela saída de campo para observação de afloramentos de depósitos nas pré-cordilheiras argentinas, em abril de 2008, onde pudemos ver, em tamanho real, os resultados de correntes de turbidez, permitindo-nos ter uma idéia de como podem ter sido gerados. Pela oportunidade de conviver e de realizar com ele alguns ensaios no final de 2008. Pelas trocas de idéias e pelo auxílio na compreensão de meus resultados experimentais no final de 2009.

Ao meu querido colega Amauri Barcelos, que me ajudou a dar os primeiros passos no ramo da pesquisa e que me mostrou como era bonito “trabalhar com água e barro”. Que

esteve presente nas minhas maiores conquistas no meio acadêmico, que foram dois prêmios de destaque no Salão de Iniciação Científica da UFRGS. Agradeço a ele também por seus conselhos, que muitas vezes iam além das paredes que limitam o laboratório.

Aos meus colegas de laboratório: Cristian, Charles, Gi, Josi, Sérgio e Hurley, pela força e auxílio na realização dos ensaios. Aos colegas Manica, Richard, Slow, Pedro, Leonardo e Raul, pelo auxílio intelectual. Às queridas colegas Eva, Taís e Lisi, que, com seu eficiente trabalho, ajudaram a resolver os problemas administrativos e logísticos (e também por conversarem comigo sobre outros assuntos além de futebol).

À empresa PETRÓLEO BRASILEIRO S.A., pelo incentivo à pesquisa brasileira de qualidade, possibilitando sua projeção internacional.

Ao CNPq, pelo auxílio financeiro, através da bolsa de Mestrado.

A meus pais, Erica e Henrique, que, mesmo passando por grandes dificuldades durante toda a minha adolescência, conseguiram dar-me uma educação de qualidade e fazer com que eu chegasse até aqui. Por terem me incentivado e mostrado, desde muito cedo, que o estudo era a porta para a realização de meus sonhos. Aos meus irmãos Lucas e Gabriela, que dividiram comigo, desde os seus nascimentos, os melhores e piores momentos de nossas vidas. Aos meus avós, que com certeza estariam orgulhosos de ver que sua neta traz no sangue a vontade de vencer de nossos antepassados e tenta caminhar norteadas por seu exemplo.

Ao meu querido namorado, Tiago, que vibrou comigo quando de minha aprovação e ingresso no Mestrado. Por ter sido compreensivo e ter tido paciência quando eu precisava estudar, quando eu tinha as minhas crises de estresse, quando eu chorava. Pelo apoio financeiro, quando a minha bolsa de Mestrado acabou. Por ter dividido comigo as felicidades por nós vividas durante esse período.

Aos meus colegas de Mestrado, Fausto, Rodrigo e Pedro, os quais me acompanharam na época em que tínhamos provas de Matemática Aplicada, Hidrologia Estatística e outras disciplinas. Pelas nossas longas reuniões de estudo, cansativas, mas ao mesmo tempo agradáveis, na casa do Rodrigo.

A todas as outras pessoas que não foram citadas aqui, mas que também contribuíram para a conclusão desta etapa tão importante em minha vida.

A Deus, por ter me dado saúde, disposição, força, e por ter posto pessoas sensíveis e sábias em meu caminho, cujo apoio permitiu-me chegar até aqui.

## RESUMO

O presente trabalho tem como principal objetivo determinar, através de simulações físicas de correntes de densidade, quais concentrações de sedimentos são capazes de formar correntes do tipo hiperpicnal em ambientes com diferentes concentrações salinas. Tem também como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia experimental que permita a realização de ensaios dentro de um determinado padrão de uniformidade, de modo a facilitar a comparação entre os resultados.

O trabalho foi desenvolvido junto ao Núcleo de Estudos em Correntes de Densidades (NECOD), que, desde meados do ano 2000, desenvolve pesquisas através de simulações físicas de correntes de densidade.

Ao todo, foram simuladas 28 correntes, com diferentes contrastes de densidades entre o fluxo e o fluido ambiente, em um canal experimental unidirecional de pequeno porte. Todas as simulações foram registradas com câmeras filmadoras digitais, cujas imagens permitiram caracterizar os tipos de correntes formadas e também os valores para parâmetros característicos de cada uma delas. Para 16 experimentos, além de análises visuais das correntes, foram também feitas avaliações dos depósitos gerados.

Os dados mostram que, mesmo se injetando uma mistura de menor densidade que o fluido ambiente, é possível gerar correntes do tipo hiperpicnal. Para tentar compreender como uma mistura com densidade menor que o fluido ambiente conseguiu formar correntes do tipo hiperpicnal, foi empregada uma técnica para visualizar o escape de fluido intersticial das correntes. Através da utilização de um corante solúvel em água, foi registrada, por câmera de vídeo, a saída da água pigmentada do interior do corpo da corrente. Esta pode ser, efetivamente, a melhor explicação para justificar a formação das correntes hiperpicnais mesmo com contrastes de densidades não favoráveis para tanto.

Outro resultado obtido nos experimentos é que, para uma mesma concentração de mistura de sedimentos, partículas de menor diâmetro conseguem manter por mais tempo a integridade do corpo da corrente, enquanto que partículas de maior diâmetro não conseguem manter a forma da corrente. A explicação encontrada para tal acontecimento é que, quando são utilizadas partículas de menor diâmetro, há em suspensão um maior número delas e, também, a distância entre as partículas é menor, aumentando, assim, a interação entre elas. As forças de interação entre as partículas são proporcionais à tensão de cisalhamento, o que auxilia na manutenção das partículas em suspensão.

## ABSTRACT

The present work is aimed to determine through physical modeling which sediment concentrations are needed to generate hyperpycnal flows in the case of a density current entering a saline ambient. The study also aims at developing an experimental methodology to allow procedures to be conducted within certain standards, in order to make easier the comparison of results acquired by different researchers.

The study was conducted at the Núcleo de Estudos em Correntes de Densidades (NECOD), where studies with physical modeling of density currents are being carried out since mid-2000.

A total of 28 density currents were simulated with different density contrasts between the flow and the ambient fluid, all of them carried out in a small unidirectional flume. All experiments were recorded with digital video cameras, in order to classify the flows and to establish characteristic parameters from them. In addition to the visual analysis of the density flows, the sediment deposits of 16 experiments were also evaluated.

The data indicate that it was possible to generate hyperpycnal flows even with negative density difference, i.e. currents with lower density than the ambient. To investigate this unexpected result, a soluble dye was mixed with the current to visualize the escape of interstitial water from the current to the ambient. The escape of interstitial fluid from the density current is, effectively, the best explanation to the formation of hyperpycnal currents even in negative density contrasts.

Another result obtained was that density currents composed by finer sediment keep their body shape stable, while currents with the same sediment concentration composed by coarser sediment not sustain their body profile. This is explained by the increasing of interaction between the particles, i.e. in the case of a current composed of finer grains it will increase the number of particles and decrease the distance between them. Also, the interacting forces are proportional to the shear stress, which helps to keep the particles in suspension.

# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	II
RESUMO	IV
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XV
1 INTRODUÇÃO	1
2 JUSTIFICATIVA	4
3 OBJETIVOS	6
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
4.1 CORRENTES DE DENSIDADE	7
4.2 FLUXOS GRAVITACIONAIS DE SEDIMENTOS	8
4.3 PROCESSO DE FORMAÇÃO E MECANISMOS DE IGNIÇÃO DAS CORRENTES DE DENSIDADE COM SEDIMENTOS	12
4.4 TRANSFORMAÇÃO DE FLUXO E MECANISMOS DE TRANSPORTE	13
TURBULÊNCIA	14
ESCAPE DE FLUIDO	14
INTERAÇÃO ENTRE GRÃOS	14
MATRIZ COESIVA	14
TRANSFORMAÇÕES DE CORPO:	15
TRANSFORMAÇÕES GRAVITACIONAIS:	15
TRANSFORMAÇÕES DE SUPERFÍCIE:	15
TRANSFORMAÇÕES DE ELUTRIAÇÃO:	16
4.5 DEPÓSITOS GERADOS PELAS CORRENTES	17
4.6 SIMULAÇÃO DE CORRENTES DE TURBIDEZ NA PRESENÇA DE DIFERENTES CONCENTRAÇÕES E GRANULOMETRIAS	21
4.7 TRABALHOS ANTERIORES REALIZADOS NO NECOD	30
5 MATERIAIS E METODOLOGIA	36
5.1 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL	36
5.2 EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS	37
5.2.1 SISTEMA DE MISTURA	37
5.2.2 CÂMERAS FILMADORAS	37
5.2.3 CRONÔMETRO	37
5.2.4 DENSÍMETRO E TERMÔMETRO	38
5.2.5 BALANÇA	38
5.2.6 ESTUFA	38

5.2.7	ANALISADOR DE PARTÍCULAS	39
5.2.8	MICROCOMPUTADOR	39
<b>5.3</b>	<b>SEDIMENTO EMPREGADO</b>	<b>40</b>
<b>5.4</b>	<b>METODOLOGIA DOS ENSAIOS</b>	<b>41</b>
5.4.1	PREPARO DOS ENSAIOS	41
5.4.2	PREPARO DA MISTURA	42
5.4.3	DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS	43
5.4.4	TRATAMENTO DOS DADOS COLETADOS	44
<b>5.5</b>	<b>PLANO DE ENSAIOS</b>	<b>46</b>
5.5.1	PLANO DE ENSAIOS DA PRIMEIRA ETAPA: VARIAÇÕES DE CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS E VARIAÇÕES DE MASSAS ESPECÍFICAS DO AMBIENTE.	47
5.5.2	PLANO DE ENSAIOS DA SEGUNDA ETAPA: INFLUÊNCIA DA VAZÃO E DA VELOCIDADE DE INJEÇÃO NO TIPO DE CORRENTE FORMADA.	48
5.5.3	PLANO DE ENSAIOS DA TERCEIRA ETAPA: INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NA FORMAÇÃO DAS CORRENTES HIPERPICNAIS.	49
5.5.4	PLANO DE ENSAIOS DA QUARTA ETAPA: ESCAPE DE FLUIDO INTERSTICIAL.	51
5.5.5	OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS ADIMENSIONAIS RELATIVOS À INJEÇÃO DA CORRENTE	52
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>53</b>
<b>6.1</b>	<b>RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA: VARIAÇÕES DE CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS E VARIAÇÕES DE MASSAS ESPECÍFICAS DO FLUIDO AMBIENTE.</b>	<b>53</b>
6.1.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS CORRENTES SIMULADAS	53
6.1.2	IMAGENS DA EVOLUÇÃO DAS CORRENTES	55
6.1.3	ANÁLISES DOS DEPÓSITOS GERADOS PELAS CORRENTES	62
6.1.4	COMPARAÇÃO COM OUTRO TRABALHO SEMELHANTE	69
6.1.5	CONCLUSÕES PARCIAIS	73
<b>6.2</b>	<b>RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA: INFLUÊNCIA DA VAZÃO E DA VELOCIDADE DE INJEÇÃO NO TIPO DE CORRENTE FORMADA.</b>	<b>75</b>
6.2.1	IMAGENS DA EVOLUÇÃO DOS CORRENTES	76
6.2.2	COMPARAÇÃO COM TRABALHO SEMELHANTE	79
6.2.3	CONCLUSÕES PARCIAIS	80
<b>6.3</b>	<b>TERCEIRA ETAPA: INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NA FORMAÇÃO DAS CORRENTES HIPERPICNAIS.</b>	<b>82</b>
6.3.1	IMAGENS DA EVOLUÇÃO DAS CORRENTES	83
6.3.2	COMPARAÇÃO COM OUTRO TRABALHO SEMELHANTE	85
6.3.3	CONCLUSÕES PARCIAIS	94
<b>6.4</b>	<b>QUARTA ETAPA: ESCAPE DE FLUIDO INTERSTICIAL</b>	<b>94</b>
6.4.1	IMAGENS DA EVOLUÇÃO DOS CORRENTES	96
6.4.2	COMPARAÇÃO COM OUTROS TRABALHOS SEMELHANTES	98
6.4.3	CONCLUSÕES PARCIAIS	99
<b>7</b>	<b>PARAMETRIZAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>101</b>
7.1.1	CONCLUSÕES PARCIAIS	110
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>111</b>
<b>9</b>	<b>CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS</b>	<b>114</b>
<b>9.1</b>	<b>QUANTO ÀS INSTALAÇÕES UTILIZADAS</b>	<b>114</b>
<b>9.2</b>	<b>QUANTO AOS EQUIPAMENTOS</b>	<b>114</b>
<b>9.3</b>	<b>QUANTO AO PREPARO DOS ENSAIOS</b>	<b>114</b>
<b>9.4</b>	<b>QUANTO À ANÁLISE DOS DEPÓSITOS</b>	<b>115</b>

<b>9.5</b>	<b>QUANTO À ANÁLISE DOS VÍDEOS</b>	<b>115</b>
<b>9.6</b>	<b>QUANTO AOS EXPERIMENTOS REALIZADOS</b>	<b>115</b>
<u>10</u>	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>117</u>
<u>ANEXO</u>		<u>122</u>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Tipos de correntes de densidade, sendo: $\rho_c$ , a densidade da corrente; $\rho_a$ , a densidade do fluido ambiente; $\rho_{c1}$ e $\rho_{c2}$ , as densidades da corrente hipopical e hiperpical, respectivamente; e $\rho_{a1}$ e $\rho_{a2}$ , as densidades de estratificação do fluido ambiente. Adaptado de Mulder e Alexander (2001).	1
Figura 1.2: Afloramento de depósito de turbidito marinho observado em saída de campo ao Cerro Bola (Argentina, março de 2008). Podem-se observar depósitos espessos de areias, intercalados com depósitos mais finos de areias e folhelhos. Fotografia de Leonardo Torres da Silva.	3
Figura 1.3: Detalhe do afloramento de depósito de turbidito marinho mostrado na Figura 1.2, em que se nota areia, nas cores mais claras, e os folhelhos, com coloração mais escura. (Fonte: Saída de campo em Cerro Bola, na Argentina, em março de 2008; fotografia de Leonardo Torres da Silva.)	3
Figura 4.1: Esquema ilustrativo de uma corrente de densidade.	7
Figura 4.2: Fluxograma da divisão dos tipos de fluxos gravitacionais (adaptado de Mulder e Alexander, 2001).	9
Figura 4.3: Esquema de classificação de fluxos gravitacionais proposto por Mulder e Alexander (2001).	11
Figura 4.4: Ilustração sobre o tempo de duração das correntes. Corrente por pulso (A) e corrente quase-permanente (B). (Fonte: Modificada de Mutti <i>et al.</i> , 1999.)	13
Figura 4.5 : Mecanismos de transporte e sustentação de grãos (Modificado de Middleton e Hampton, 1973).	15
Figura 4.6: Tipos de transformação de fluxo. (Adaptado de Fisher, 1983.)	16
Figura 4.7: Sequência de imagens de uma corrente de densidade ao longo de seu deslocamento, mostrando a região diluída (acima da linha pontilhada) e a mais concentrada (abaixo da linha pontilhada). (Fotografias cedidas por Rafael Manica, 2009.)	17
Figura 4.8: Descrição de uma sequência completa de Bouma: depósito de turbidito. (Adaptado de Bouma, 1962.)	18
Figura 4.9: Sequência de depósito de uma corrente de alta densidade arenosa seguida de um depósito de corrente de baixa densidade. (Adaptado de Lowe, 1982.)	19
Figura 4.10: A: Sequência de um depósito com laminação paralela. B: Sequência com laminação cruzada. (Cedida por Leonardo Torres da Silva.)	19
Figura 4.11: Imagem de depósitos em Quebrada de Las Lajas, Argentina. (Cedida por Leonardo Torres da Silva).	20
Figura 4.12: Esquema ilustrando os principais mecanismos de deposição dos fluxos gravitacionais de sedimentos. (Adaptado de Lowe, 1982.)	21
Figura 4.13: Imagens da evolução de uma corrente simulada sendo a da esquerda a imagem real obtida durante o experimento e a da direita obtida através uma técnica de coloração para detecção da concentração de sedimentos. Na escala de cores o vermelho escuro representa elevada concentração de sedimentos e o azul escuro representa baixa concentração de sedimentos. (Gladstone e Pritchard, 2010).	22
Figura 4.14: Evolução horizontal da corrente ao longo do tempo sendo: A o início do experimento; B o início do levantamento da corrente; C o instante em que plumas levantam ao longo do corpo da corrente; D o instante em que a frente da corrente hiperpical para de se deslocar; E as partículas restantes no fluxo sobem para a superfície do fluido ambiente. (Gladstone e Pritchard, 2010).	23
Figura 4.15: (A) Variação da espessura da corrente ao longo da distância; (B) variação da velocidade de avanço da corrente ao longo da distância; (C) variação da massa de material depositada ao longo da distância; e (D) variação do tamanho médio das	

partículas ao longo da distância para diferentes declividades de fundo. (Fonte: Mulder e Alexander, 2002.)	26
Figura 4.16: (A) Variação da espessura da corrente; (B) variação da velocidade de avanço da corrente ao longo da distância para diferentes declividades. (Fonte: Mulder e Alexander, 2002).	26
Figura 4.17: Distância percorrida pelas correntes em função do tempo. (Fonte: Gladstone <i>et al.</i> , 1998.)	28
Figura 4.18: Distância percorrida pelas correntes em função da concentração inicial de material grosso. Valores registrados para dois instantes do experimento: 72 s após o início e 111 s após o início. O material grosso tinha diâmetro de 69 $\mu\text{m}$ . (Fonte: Gladstone <i>et al.</i> , 1998.)	28
Figura 4.19: Variação da densidade do depósito ao longo do canal. (Fonte: Gladstone <i>et al.</i> , 1998.)	29
Figura 4.20: Distância percorrida pelas correntes em função do tempo de ensaio. Experimento 1: de referência; Experimento 2: com adição de finos; e Experimento 3: com adição de material grosso. (Fonte: Gladstone <i>et al.</i> , 1998.)	29
Figura 4.21: Variação da densidade de depósito ao longo do canal. Experimento 1: de referência; Experimento 2: com adição de finos; e Experimento 3: com adição de material grosso. (Fonte: Gladstone <i>et al.</i> , 1998.)	30
Figura 4.22: Comparação das velocidades médias e alturas das cabeças das correntes conservativas e não-conservativas para as diferentes declividades testadas. (Fonte: Brito, 2005.)	33
Figura 4.23: Comparação entre os depósitos gerados no grande canal, à esquerda, e os depósitos gerados no pequeno canal, à direita. (Fonte: Brito, 2005.)	34
Figura 4.24: Comparações entre altura média da cabeça, à direita, e variações das velocidades das correntes, à esquerda, para as diferentes misturas de carvão e sal/bentonita. (Fonte: Dücker, 2007.)	34
Figura 4.25: Classificação das correntes de turbidez de alta densidade proposta por Manica (2009). (Fonte: Manica, 2009.)	35
Figura 5.1: Canal Unidirecional de Pequeno Porte (CUPP) utilizado para a realização dos experimentos.	36
Figura 5.2: (a) Filmadora DCR-TRV 110 e (b) DCR-TRV 120.	37
Figura 5.3: Imagem do laboratório de análises granulométricas onde está instalado o Analisador de Partículas a Laser.	39
Figura 5.4: Curva de distribuição granulométrica do material utilizado como sedimento nos ensaios experimentais.	40
Figura 5.5: Imagem do carvão 205 utilizado nos experimentos. Imagem obtida pelo Analisador de Partículas a Laser.	40
Figura 5.6: Esquema do posicionamento da câmera filmadora. A escala da distância entre a câmera filmadora e o canal experimental está distorcida.	41
Figura 5.7: Esquema ilustrando as seções de coleta do depósito; vista superior do canal experimental.	44
Figura 5.8: Ilustração do posicionamento das réguas para medida da velocidade de avanço da cabeça e determinação das alturas das correntes hiperpicnal e hipopicnal.	45
Figura 5.9: Esquema ilustrando a evolução da corrente e os pontos observados durante as análises dos vídeos.	46
Figura 5.10: Curva granulométrica dos sedimentos utilizados na terceira etapa.	50
Figura 6.1: Imagens dos vídeos dos ensaios da primeira etapa. Transformações das correntes ao longo do tempo. Correntes classificadas de acordo com valores de $\Delta\rho$	

- crescentes ( $\Delta\rho = (\rho_c - \rho_a)/\rho_a$ ). Imagens obtidas pelos registros cinematográficos dos ensaios. 56
- Figura 6.2: Distância de ocorrência do ponto de intumescimento em função dos valores de  $\Delta\rho$ . 58
- Figura 6.3: A: Relações entre a velocidade da pluma ( $V_p$ ) e valores de  $\Delta\rho \times 100$  para as diferentes massas específicas de ambiente. B: Relação entre a velocidade da pluma ( $V_p$ ) e a massa específica da mistura ( $\rho_c$ ) para as diferentes massas específicas de ambiente. 59
- Figura 6.4: Relações entre a velocidade da corrente hiperpicnal ( $V_c$ ) e valores de  $\Delta\rho \times 100$  para as diferentes massas específicas de ambiente. B: Relação entre a velocidade da corrente hiperpicnal ( $V_c$ ) e a massa específica da mistura ( $\rho_c$ ) para as diferentes massas específicas de ambiente. 59
- Figura 6.5: A: Relações entre a distância atingida pela corrente hiperpicnal e valores de  $\Delta\rho \times 100$  para as diferentes massas específicas de ambiente. B: Relação entre a distância atingida pela corrente hiperpicnal ( $V_c$ ) e a massa específica da mistura ( $\rho_c$ ) para as diferentes massas específicas de ambiente. 60
- Figura 6.6: Gráficos com valores de variações de velocidades ( $V_c$ ) e alturas da corrente hiperpicnal ( $H_c$ ) ao longo da distância do canal para os ensaios C1 até C8. 60
- Figura 6.7: Gráficos com valores de variações de velocidades ( $V_c$ ) e alturas da corrente hiperpicnal ( $H_c$ ) ao longo da distância do canal para os ensaios C9 até C16. 61
- Figura 6.8: A: relações entre as massas de carvão adicionadas ( $m_c$ ) à mistura e a respectiva massa depositada no fundo do canal ( $m_d$ ); B: relação entre a massa de carvão adicionada à mistura ( $m_c$ ) e a distância percorrida pela corrente hiperpicnal ( $L$ ), sendo ambas as relações para as diferentes massas específicas de fluido ambiente. 63
- Figura 6.9: A: relações entre massa de carvão depositada ( $m_d$ ) e diferença entre as massas específicas da corrente e fluido ambiente ( $\Delta\rho \times 100$ ); B: relação entre a massa depositada ( $m_d$ ) e a máxima distância percorrida pela corrente hiperpicnal ( $L$ ), sendo ambas as relações para as diferentes massas específicas de fluido ambiente. 63
- Figura 6.10: A: relações entre o número de Richardson da injeção ( $R_{ii}$ ) e a massa de carvão depositada ( $m_d$ ) e B: relação entre o número de Froude da injeção ( $F_{ri}$ ) e a massa de carvão depositada ( $m_d$ ), sendo ambas as relações para as diferentes massas específicas de fluido ambiente. 64
- Figura 6.11: Variações da velocidade de deslocamento ( $V$ ) e da espessura do depósito ( $Dep$ ) em função da distância para os ensaios C1 até C8. 65
- Figura 6.12: Variações da velocidade de deslocamento ( $V_c$ ) e da espessura do depósito ( $Dep$ ) em função da distância para os ensaios C9 até C16. 66
- Figura 6.13: Distribuição granulométrica do material depositado ao longo do canal para os ensaios C1 até C8. Material dividido por faixa, sendo: areia fina (AF); areia muito fina (AMF); silte grosso (SG); silte médio (SM); silte fino (SF); silte muito fino (SMF); e argila (A). 67
- Figura 6.14: Distribuição granulométrica do material depositado ao longo do canal para os ensaios C9 até C16. Material dividido por faixa, sendo: areia fina (AF); areia muito fina (AMF); silte grosso (SG); silte médio (SM); silte fino (SF); silte muito fino (SMF); e argila (A). 68
- Figura 6.15: Variações das velocidades de avanço das correntes simuladas na primeira etapa ao longo da distância do canal, sendo: “A”, as correntes simuladas em ambiente com massa específica de  $1010 \text{ kg.m}^{-3}$ ; “B”, as correntes simuladas em ambiente com massa específica de  $1015 \text{ Kg.m}^{-3}$ ; e “C”, as correntes simuladas em ambientes com  $1020 \text{ kg.m}^{-3}$  (C13 e C14),  $1025 \text{ kg.m}^{-3}$  (C15) e  $1030 \text{ kg.m}^{-3}$  (C16). 70
- Figura 6.16: Variações das espessuras das correntes simuladas na primeira etapa ao longo da distância do canal, sendo: “A”, as correntes simuladas em ambiente com massa específica de  $1010 \text{ kg.m}^{-3}$ ; “B”, as correntes simuladas em ambiente com massa

específica de $1015 \text{ kg.m}^{-3}$ ; e “C”, as correntes simuladas em ambientes com $1020 \text{ kg.m}^{-3}$ (C13 e C14), $1025 \text{ kg.m}^{-3}$ (C15) e $1030 \text{ kg.m}^{-3}$ (C16).	71
Figura 6.17: Variações do tamanho das partículas ( $D_{50}$ ) das correntes simuladas na primeira etapa ao longo da distância do canal, sendo: “A”, as correntes simuladas em ambiente com massa específica de $1010 \text{ kg.m}^{-3}$ ; “B”, as correntes simuladas em ambiente com massa específica de $1015 \text{ kg.m}^{-3}$ ; e “C”, as correntes simuladas em ambientes com $1020 \text{ kg.m}^{-3}$ (C13 e C14), $1025 \text{ kg.m}^{-3}$ (C15) e $1030 \text{ kg.m}^{-3}$ (C16).	72
Figura 6.18: Distâncias atingidas pelas correntes simuladas na primeira etapa em função do tempo, sendo: “A”, as correntes simuladas em ambiente com massa específica de $1010 \text{ kg.m}^{-3}$ ; “B”, as correntes simuladas em ambiente com massa específica de $1015 \text{ kg.m}^{-3}$ ; e “C”, as correntes simuladas em ambientes com $1020 \text{ kg.m}^{-3}$ (C13 e C14), $1025 \text{ kg.m}^{-3}$ (C15) e $1030 \text{ kg.m}^{-3}$ (C16).	73
Figura 6.19: Imagens dos vídeos dos ensaios da segunda, terceira e quarta etapas. Transformações das correntes ao longo da distância percorrida no canal. Imagens obtidas pelos registros cinematográficos dos ensaios.	78
Figura 6.20: Gráficos com valores de variações de velocidades ( $V_c$ ) e alturas da corrente hiperpical ( $H_c$ ) ao longo da distância do canal para os ensaios Q1, Q2, V1 e V2.	79
Figura 6.21: “A” - Variações das velocidades de avanço das correntes simuladas na segunda etapa ao longo da distância do canal. “B” - Variações das espessuras das correntes simuladas na segunda etapa ao longo da distância do canal.	80
Figura 6.22: Distâncias atingidas pelas correntes simuladas na segunda etapa em função do tempo.	80
Figura 6.23: Gráficos com valores de variações de velocidades ( $V_c$ ) e alturas da corrente hiperpical ( $H_c$ ) ao longo da distância do canal para os ensaios G1, G2, G3, G4 e G5 e para o ensaio de referência (C4).	85
Figura 6.24: A - Variações das velocidades de avanço das correntes simuladas na terceira etapa ao longo da distância do canal; B - Variações das espessuras das correntes simuladas na terceira etapa ao longo da distância do canal.	86
Figura 6.25: Distâncias atingidas pelas correntes simuladas na terceira etapa em função do tempo.	87
Figura 6.26: Esquema ilustrando os espaços ocupados pelas partículas e a distância entre os centros das partículas.	88
Figura 6.27: Distância entre os centros das partículas ( $L_p$ ) em função de seu tamanho ( $D_{50}$ ).	89
Figura 6.28: Imagens dos ensaios utilizadas para determinar a distância média entre partículas.	92
Figura 6.29: A: Relação entre a distância média entre partículas ( $L_p$ ) e a distância percorrida pela corrente hiperpical ( $L$ ). B: Relação entre a distância média entre partículas ( $L_p$ ) e a massa específica da mistura da corrente ( $\rho_c$ ), ambas para as diferentes massas específicas de fluido ambiente testadas na primeira etapa.	93
Figura 6.30 A: Relação entre a expansão sofrida pela corrente ( $E$ ) e a distância percorrida pela corrente hiperpical ( $L$ ). B: Relação entre expansão sofrida pela corrente ( $E$ ) e a massa específica da mistura da corrente ( $\rho_c$ ), ambas para as diferentes massas específicas de fluido ambiente testadas na primeira etapa.	93
Figura 6.31: Gráficos com valores de variações de velocidades ( $V_c$ ) e alturas da corrente hiperpical ( $H_c$ ) ao longo da distância do canal para os ensaios E1, E2 e E3.	97
Figura 6.32: Imagens do final de cada um dos ensaios da quarta etapa (E1, E2 e E3). Pode-se observar claramente a presença do corante em cada experimento.	97
Figura 6.33: “A” - Variações das velocidades de avanço das correntes simuladas na quarta etapa ao longo da distância do canal; “B” - Variações das espessuras das correntes simuladas na quarta etapa ao longo da distância do canal.	98

- Figura 6.34: Distâncias atingidas pelas correntes simuladas na quarta etapa em função do tempo. 99
- Figura 6.35: Imagens obtidas durante os ensaios da terceira etapa à esquerda e esquema ilustrativo do processo de substituição de fluido intersticial e formação da corrente hipopical à direita. 100
- Figura 7.1: Relação adimensional entre o número de Reynolds relativo à espessura da corrente ( $\pi_3$ ) e as razões de vazões medidas e calculadas ( $\pi_1$ ). Os dados dos ensaios estão discriminados em função do tratamento: (1010 à 1030) massa específica do fluido ambiente empregada nos ensaios da primeira etapa, (G) ensaios com diferentes granulometrias utilizadas nos da terceira etapa, (Q e V) as vazões e velocidades de injeção empregadas nos ensaios da segunda etapa e (E) como sendo os ensaios com utilização de corante para visualização do escape de fluido. 104
- Figura 7.2: Relação adimensional entre o número de Richardson inicial ( $\pi_6$ ) e as razões entre vazões medidas e calculadas ( $\pi_1$ ). Os dados dos ensaios estão discriminados em função do tratamento: (1010 à 1030) massa específica do fluido ambiente empregada nos ensaios da primeira etapa, (G) ensaios com diferentes granulometrias utilizadas nos da terceira etapa, (Q e V) as vazões e velocidades de injeção empregadas nos ensaios da segunda etapa e (E) como sendo os ensaios com utilização de corante para visualização do escape de fluido. 105
- Figura 7.3: Relação adimensional entre o número de Arquimedes ( $\pi_8$ ) e as razões entre as vazões medidas e calculadas ( $\pi_1$ ). Os dados dos ensaios estão discriminados em função do tratamento, sendo: (1010 à 1030) massa específica do fluido ambiente empregada nos ensaios da primeira etapa, (G) ensaios com diferentes granulometrias utilizadas nos da terceira etapa, (Q e V) as vazões e velocidades de injeção empregadas nos ensaios da segunda etapa e (E) como sendo os ensaios com utilização de corante para visualização do escape de fluido. 106
- Figura 7.4: Relação adimensional entre o número de Keulegan ( $\pi_9$ ) e o número de Reynolds do grão ( $\pi_2$ ). Os dados dos ensaios estão discriminados em função do tratamento, sendo: (1010 à 1030) massa específica do fluido ambiente empregada nos ensaios da primeira etapa, (G) ensaios com diferentes granulometrias utilizadas nos da terceira etapa, (Q e V) as vazões e velocidades de injeção empregadas nos ensaios da segunda etapa e (E) como sendo os ensaios com utilização de corante para visualização do escape de fluido. 106
- Figura 7.5: Relação adimensional entre o número de Stokes avaliado para a espessura da corrente ( $\pi_{10}$ ) e o número de Richardson relativo à espessura da corrente ( $\pi_4$ ). Os dados dos ensaios estão discriminados em função do tratamento, sendo: (1010 à 1030) massa específica do fluido ambiente empregada nos ensaios da primeira etapa, (G) ensaios com diferentes granulometrias utilizadas nos da terceira etapa, (Q e V) as vazões e velocidades de injeção empregadas nos ensaios da segunda etapa e (E) como sendo os ensaios com utilização de corante para visualização do escape de fluido. 107
- Figura 7.6: Relação adimensional entre o parâmetro que relaciona a vazão com a viscosidade ( $\pi_7$ ) e a razão entre a velocidade de queda da partícula e velocidade da corrente ( $\pi_5$ ). Os dados dos ensaios estão discriminados em função do tratamento, sendo: (1010 à 1030) massa específica do fluido ambiente empregada nos ensaios da primeira etapa, (Q e V) as vazões e velocidades de injeção empregadas nos ensaios da segunda etapa e (E) como sendo os ensaios com utilização de corante para visualização do escape de fluido. 108
- Figura 7.7: Relação adimensional entre o número de Keulegan ( $\pi_9$ ) e o parâmetro que relaciona vazão e viscosidade ( $\pi_7$ ). Os dados dos ensaios estão discriminados em função do tratamento, sendo: (1010 à 1030) massa específica do fluido ambiente empregada nos ensaios da primeira etapa, (G) ensaios com diferentes granulometrias utilizadas nos da terceira etapa, (Q e V) as vazões e velocidades de injeção

empregadas nos ensaios da segunda etapa e (E) como sendo os ensaios com utilização de corante para visualização do escape de fluido. 109

Figura 7.8: Relação adimensional entre o número de Stokes avaliado para a espessura da corrente ( $\pi_{10}$ ) e o número de Richardson inicial ( $\pi_6$ ). Os dados dos ensaios estão discriminados em função do tratamento, sendo: (1010 à 1030) massa específica do fluido ambiente empregada nos ensaios da primeira etapa, (G) ensaios com diferentes granulometrias utilizadas nos da terceira etapa, (Q e V) as vazões e velocidades de injeção empregadas nos ensaios da segunda etapa e (E) como sendo os ensaios com utilização de corante para visualização do escape de fluido. 109

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1: Condições experimentais das simulações apresentadas por Mulder e Alexander (2002).	24
Tabela 4.2: Faixas granulométricas adequadas para a simulação de correntes de densidade não conservativas (Manica, 2002).	32
Tabela 5.1: Plano de ensaios da primeira etapa do estudo. Massas específicas do ambiente ( $\rho_a$ ) e da corrente ( $\rho_c$ ).	48
Tabela 5.2: Plano de ensaios da segunda etapa. Massas específicas do fluido ambiente ( $\rho_a$ ) e da corrente ( $\rho_c$ ) e as vazões (Q) e velocidades de injeção ( $V^*$ ) testadas.	49
Tabela 5.3: Diferentes faixas granulométricas testadas, massa específica do ambiente, massa específica da corrente e o tipo de corrente gerado. D = diâmetro dos grãos.	50
Tabela 5.4: Massas específicas ensaiadas e tipos de correntes formadas.	51
Tabela 6.1: Dados gerais do fluido ambiente utilizado nos ensaios da primeira etapa.	54
Tabela 6.2: Dados gerais do fluido da corrente simulada nos ensaios da primeira etapa.	54
Tabela 6.3: Dados gerais da corrente simulada nos ensaios da primeira etapa.	55
Tabela 6.4: Dados obtidos pelas análises dos vídeos dos ensaios da primeira etapa.	58
Tabela 6.5: Dados do material depositado dentro do canal.	62
Tabela 6.6: Dados gerais do fluido ambiente utilizado nos ensaios da segunda etapa.	75
Tabela 6.7: Dados gerais da mistura das correntes simuladas nos ensaios da segunda etapa.	75
Tabela 6.8: Dados gerais das correntes simuladas nos ensaios da segunda etapa.	76
Tabela 6.9: Dados obtidos pelas análises dos vídeos dos ensaios da segunda etapa.	77
Tabela 6.10: Dados gerais do fluido ambiente utilizado nos ensaios da terceira etapa.	82
Tabela 6.11: Dados gerais dos fluidos das correntes simuladas nos ensaios da terceira etapa.	83
Tabela 6.12: Dados gerais das correntes simuladas nos ensaios da terceira etapa.	83
Tabela 6.13: Dados obtidos pelas análises dos vídeos dos ensaios da terceira etapa.	84
Tabela 6.14: Dados de cálculo para determinação de distância média entre os centros de partículas.	89
Tabela 6.16: Valores de distância entre partículas calculados para os ensaios da Etapa 1 para o tempo de avanço da corrente de 20 s. Para todos os dados apresentados abaixo, foram considerados os valores únicos de $D_{50} = 5,50 \times 10^{-5}$ m e $V_p = 6,97 \times 10^{-13}$ m <sup>3</sup> .	91
Tabela 6.17: Dados gerais do fluido ambiente utilizado nos ensaios da quarta etapa.	95
Tabela 6.18: Dados gerais dos fluidos das correntes simuladas nos ensaios da quarta etapa.	95
Tabela 6.19: Dados gerais das correntes simuladas nos ensaios da quarta etapa.	95
Tabela 6.20: Dados obtidos a partir da análise dos vídeos dos ensaios da quarta etapa.	96
Tabela 7.1: Valores obtidos para os parâmetros adimensionais calculados com as equações apresentadas acima sendo os ensaios C1 à C16 os realizados na primeira etapa, os ensaios G1 à G5 os realizados na.	103

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $C_v$  – concentração volumétrica [%]
- $g$  – aceleração da gravidade [ $9,806 \text{ m.s}^{-2}$ ]
- $g'$  – aceleração da gravidade reduzida =  $[(\rho_c - \rho_a)/\rho_a] \times g$  [ $\text{m.s}^{-2}$ ]
- $H_c$  – altura média da corrente hiperpicnal [m]
- $H_p$  – espessura média da corrente hipopicnal [m]
- $L$  – distância atingida pela corrente hiperpicnal [m]
- $m_c$  – massa de carvão adicionada a mistura [kg]
- $m_d$  – massa de carvão depositada no canal [kg]
- $P_0$  – ponto de intumescimento da corrente [m]
- $Q_i$  – vazão determinada a partir do tempo de injeção [ $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ]
- $V_i$  – velocidade de injeção determinada a partir do tempo de injeção [ $\text{m.s}^{-1}$ ]
- $W_s$  – velocidade de queda de partícula [ $\text{m.s}^{-1}$ ]
- $t_i$  – tempo de duração da injeção [min]
- $Fr_i$  – número de Froude referente à injeção
- $Re_i$  – número de Reynolds referente à injeção
- $Ri_i$  – número de Richardson referente à injeção
- $Fr_c$  – número de Froude determinado pela análise dos vídeos
- $Re_c$  – número de Reynolds determinado pela análise dos vídeos
- $Ri_c$  – número de Richardson determinado pela análise dos vídeos
- $S$  – salinidade da mistura [ $\text{g.l}^{-1}$ ]
- $V_c$  – velocidade média da corrente hiperpicnal [ $\text{m.s}^{-1}$ ]
- $V_p$  – velocidade média da corrente hipopicnal [ $\text{m.s}^{-1}$ ]
- $T_a$  – temperatura do fluido ambiente [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $T_c$  – temperatura do fluido da corrente [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $\mu$  – viscosidade dinâmica da água pura [ $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ]
- $\mu_c$  – viscosidade dinâmica da mistura da corrente [ $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ]
- $\nu_c$  – viscosidade cinemática da mistura da corrente [ $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ]
- $\rho$  – massa específica da água pura [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]
- $\rho_a$  – massa específica do fluido ambiente [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]
- $\rho_c$  – massa específica do fluido da corrente [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]
- $\rho_s$  – massa específica do sedimento [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]
- $\Delta\rho$  – diferença de densidade entre o fluido ambiente e o fluido da corrente =  $(\rho_c - \rho_a)/\rho_a$
- $D_{50}$  - Diâmetro característico do material empregado nos ensaios [ $\mu\text{m}$ ]

# 1 INTRODUÇÃO

As correntes de densidade são consideradas como as principais formas de transporte e deposição de material em meio subaquoso, como o mar. São elas as responsáveis pelas formações de deltas, cânions submarinos e depósitos em águas profundas. Essas correntes de densidade são oriundas da rede fluvial e é através delas que os sedimentos abastecem as grandes bacias oceânicas. O mecanismo de deslocamento destes fluxos é condicionado pela diferença de densidade entre a corrente ( $\rho_c$ ) e o fluido ambiente ( $\rho_a$ ).

As correntes de densidade são classificadas em função do contraste de densidade entre o fluido que constitui a corrente e a densidade do fluido ambiente (corpo receptor). Uma corrente é dita hipopical quando sua densidade é menor que a densidade do fluido ambiente ( $\rho_c < \rho_a$ ). Quando as densidades do fluido em escoamento e do fluido ambiente são iguais ( $\rho_c = \rho_a$ ), a corrente é classificada como homopical. Quando a corrente tiver densidade maior que o fluido ambiente ( $\rho_c > \rho_a$ ), será classificada como hiperpical (Figura 1). Por fim, a corrente de densidade também poderá ser classificada como mesopical, caso haja uma estratificação do fluido ambiente ( $\rho_{a1} > \rho_c > \rho_{a2}$ ) (Bates, 1953).

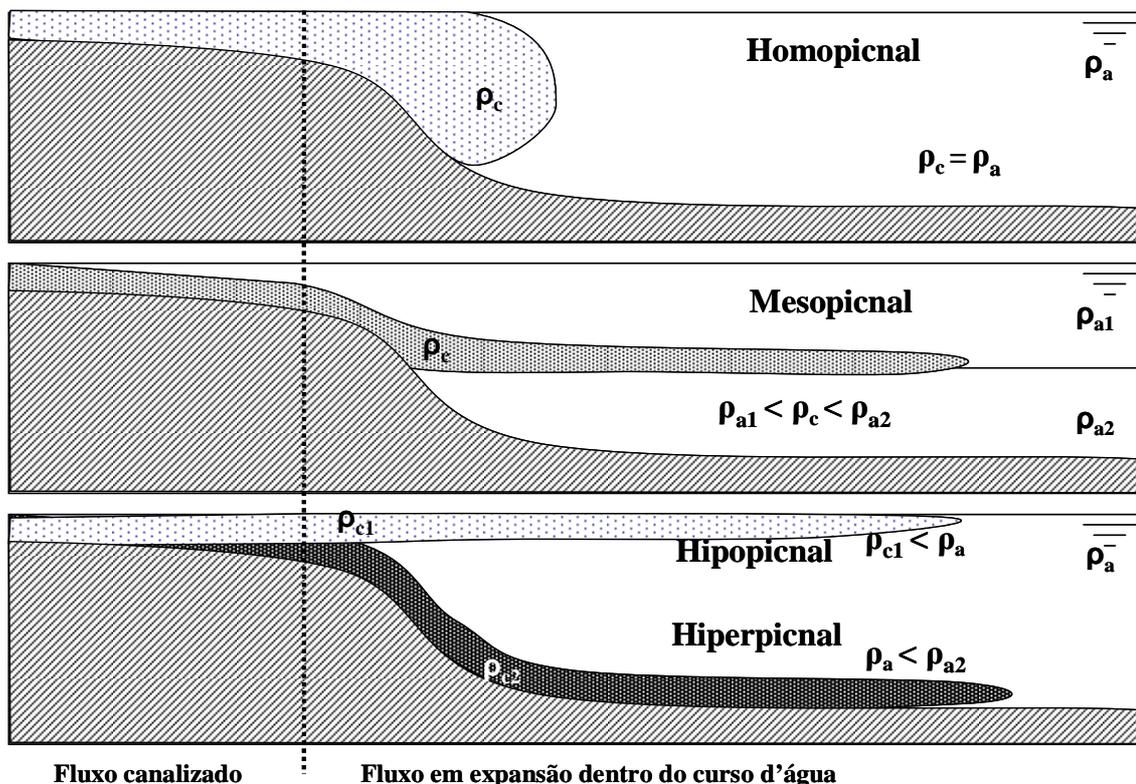


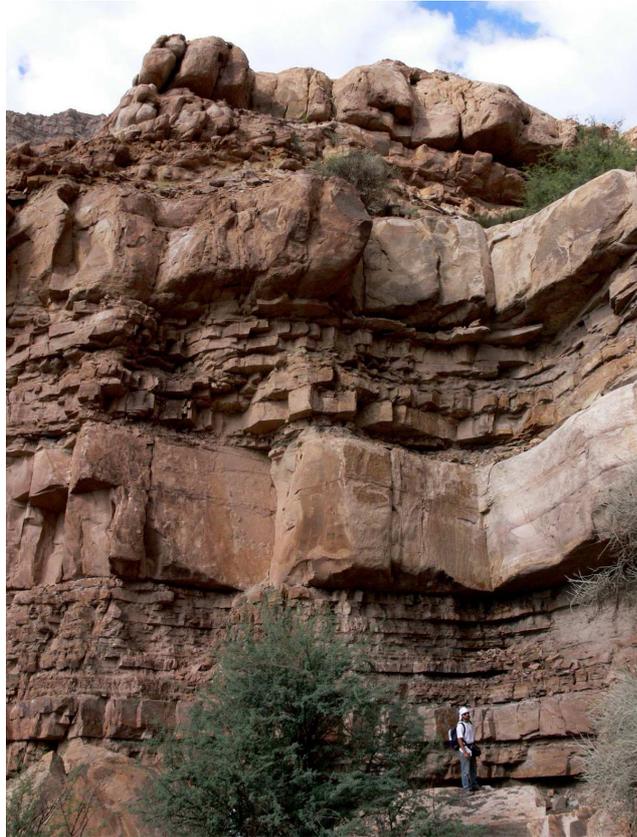
Figura 1.1: Tipos de correntes de densidade, sendo:  $\rho_c$ , a densidade da corrente;  $\rho_a$ , a densidade do fluido ambiente;  $\rho_{c1}$  e  $\rho_{c2}$ , as densidades da corrente hipopical e hiperpical, respectivamente; e  $\rho_{a1}$  e  $\rho_{a2}$ , as densidades de estratificação do fluido ambiente. Adaptado de Mulder e Alexander (2001).

Os depósitos gerados pela ação das correntes de densidade no meio marinho são também de grande importância. Estas correntes carregam, juntamente com o sedimento, materiais orgânicos, que, depositando-se e encontrando condições favoráveis de temperatura e pressão, podem gerar compostos orgânicos de interesse comercial. As correntes hiperpicnais são consideradas como geradoras de depósitos sedimentares, espessos e de boa porosidade, que, quando selados por material mais fino, podem se constituir em bons reservatórios para o acúmulo de hidrocarbonetos.

O selamento dos depósitos porosos é feito pela deposição de materiais muito finos, sendo estes carregados pelas correntes hipopicnais. Este selamento é fundamental para evitar a migração do material orgânico para outras camadas de depósito (Figuras 1.2 e 1.3). Na figura 1.2, é possível visualizar camadas bastante espessas de depósitos, geralmente formados por material de maior granulometria, que são resultado da deposição de correntes de alta densidade, do tipo hiperpicnal. Entre as camadas espessas de material de maior granulometria, nota-se a presença de depósitos mais finos, que aparecem nitidamente bem divididos. Estas camadas mais finas foram possivelmente geradas pela deposição de material muito fino transportado pelas correntes de baixa densidade, as chamadas correntes hipopicnais. A figura 1.3 apresenta um detalhe do depósito, onde também existem camadas mais espessas, formadas por material de maior granulometria, e camadas intercaladas nas quais há deposição de material mais fino, sendo estas últimas denominadas pelos geólogos de folhelho. O folhelho aparece na figura 1.3 e é facilmente identificado pela coloração mais escura, a qual pode resultar da presença de material orgânico aderido à argila.

A compreensão dos mecanismos de geração e transporte das correntes de densidade no fundo do mar é extremamente importante. A vinculação entre os perfis de velocidades e de concentração de sedimentos com os padrões arquiteturais dos depósitos gerados por estes tipos de escoamento permite uma maior segurança na interpretação dos registros deposicionais naturais (afloramentos, perfis sísmicos etc.), auxiliando na determinação dos parâmetros que definem as características dos reservatórios de óleo.

No Brasil, desde 1999, estão sendo executados projetos de pesquisa entre a PETROBRÁS e algumas universidades, com o intuito de subsidiar as pesquisas sobre correntes de densidade, ampliando, assim, os conhecimentos nesta área. Um destes núcleos de pesquisa foi criado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Trata-se do Núcleo de Estudos em Correntes de Densidade (NECOD), situado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH). No NECOD, vários trabalhos vêm sendo realizados, procurando, através da simulação física de correntes de densidade, gerar elementos para subsidiar as operações e as explorações dos reservatórios de hidrocarbonetos.



**Figura 1.2: Afloramento de depósito de turbidito marinho observado em saída de campo ao Cerro Bola (Argentina, março de 2008). Podem-se observar depósitos espessos de areias, intercalados com depósitos mais finos de areias e folhelhos. Fotografia de Leonardo Torres da Silva.**



**Figura 1.3: Detalhe do afloramento de depósito de turbidito marinho mostrado na Figura 1.2, em que se nota areia, nas cores mais claras, e os folhelhos, com coloração mais escura. (Fonte: Saída de campo em Cerro Bola, na Argentina, em março de 2008; fotografia de Leonardo Torres da Silva.)**

## 2 JUSTIFICATIVA

Mesmo com tanto empenho de diferentes pesquisadores que atuam em diferentes áreas, ainda existem lacunas a serem preenchidas no que tange à modelagem das correntes de turbidez que se desenvolvem em ambientes salinos. Boa parte dos trabalhos que já foram publicados referem-se às estruturas dos depósitos sedimentares e aos processos de sua formação: em bacias oceânicas, em deltas de rios, em afloramentos rochosos, entre outros. No entanto, com respeito propriamente ao estudo da mecânica do escoamento e das forças hidrodinâmicas envolvidas no processo de formação destes depósitos, pouco tem sido publicado, indicando que esta área precisa ser fortemente explorada. De fato, no que diz respeito à simulação física de correntes de densidade, poucos trabalhos foram publicados relatando simulações de correntes em ambiente salino, sendo a maior parte dos trabalhos publicados relatando resultados de simulações com o emprego de correntes formadas por soluções salinas e que se desenvolvem em um meio composto por água doce, ou, ainda, de simulações de correntes compostas por mistura de água e sedimentos e que se desenvolvem em ambiente com água doce.

As dificuldades no estudo dos aspectos vinculados às características hidrodinâmicas dos fluxos exigem os registros detalhados das correntes, levando-nos à necessidade de obter dados de eventos que ocorrem na natureza, os quais são bastante complicados de serem adquiridos. Outra forma de estudar o fenômeno, é através da realização de experimentos em modelos de escala reduzida, que são feitos em laboratório, sob condições controladas. Para a realização das simulações em laboratório, torna-se necessário manter uma estrutura experimental bastante complexa para a simulação e registro do fenômeno.

No NECOD, existe uma estrutura experimental bem instrumentada, onde vários experimentos vêm sendo realizados, buscando simular os fluxos turbidíticos e seus depósitos (estrutura, textura e padrões arquiteturais). Contudo, o entendimento dos processos de formação destas estruturas deposicionais depende fortemente da compreensão e da identificação das estruturas do escoamento que geram estes depósitos. A simulação das correntes de densidade em ambientes salinos é de extrema importância para que se consiga relacionar os resultados que estão sendo obtidos nas simulações em ambientes não salinos com aquilo que ocorre na natureza, ou seja, nos ambientes sedimentares marinhos.

É neste contexto que se insere esta proposta de dissertação: implantar meios para avaliar parâmetros cinéticos e dinâmicos das correntes de turbidez que se desenvolvem em ambiente salino, com diferentes contrastes de densidade entre corrente e fluido ambiente, de

forma a auxiliar na compreensão do fenômeno, através da modelagem física do processo, gerando dados que melhor representem os fenômenos naturais.

### 3 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é investigar as condições necessárias para a geração de correntes hiperpicnais sob diferentes contrastes de densidades entre a corrente e a salinidade do corpo receptor.

Para caracterizar e registrar as diferentes condições a serem testadas, este estudo tem como objetivos secundários:

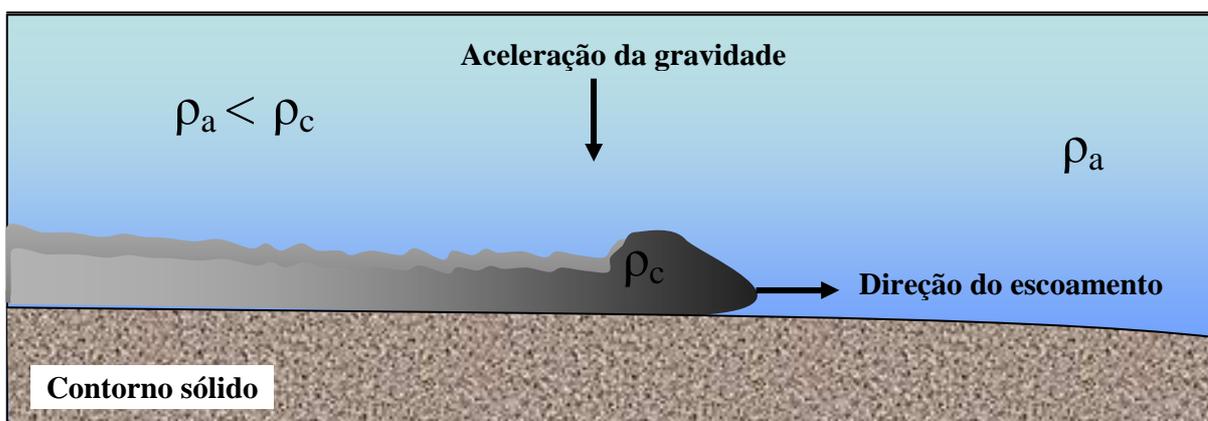
- ✓ desenvolver uma metodologia operacional para as simulações;
- ✓ desenvolver um método de análise para caracterizar as diferentes correntes geradas e identificar seu tipo (hiperpicnal e/ou hipopicnal);
- ✓ identificar o melhor parâmetro que permita individualizar as correntes em função de seu tipo (hiperpicnal e/ou hipopicnal);
- ✓ desenvolver uma nomenclatura que permita identificar as diferentes fases de evolução e formação das correntes;
- ✓ desenvolver técnica que permita visualizar a entrada de fluido ambiente na corrente e a saída do fluido intersticial da corrente;

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 CORRENTES DE DENSIDADE

A expressão corrente de densidade refere-se ao fluxo gerado devido à ação da gravidade atuando sobre fluidos com densidades diferentes. A diferença de densidade entre os fluidos pode ser gerada: (1) pela diferença de temperatura entre eles, como no caso do movimento de massas de ar atmosférico; (2) pela presença de substâncias dissolvidas, como no caso de uma solução salina penetrando em um reservatório de água doce; ou, então, (3) pela presença de sólidos em suspensão em um dos fluidos (Simpson, 1997).

O mecanismo de geração destas correntes está centralizado na diferença entre a densidade do fluido da corrente e a densidade do fluido ambiente. Esta diferença de densidade, que pode ser muito pequena, é responsável pela geração de forças de empuxo diferentes entre o meio e a corrente, fazendo com que o fluido de maior densidade movimente-se em direção ao de menor densidade. A figura 4.1 apresenta um esboço de uma corrente de densidade em um meio fluido, deslocando-se sobre um contorno sólido com pequena declividade, na qual a geometria da corrente está bastante simplificada e não mostra sua forte tridimensionalidade.



**Figura 4.1: Esquema ilustrativo de uma corrente de densidade.**

As correntes de densidade desenvolvem-se em diversos fenômenos naturais, tais como, por exemplo: avanço de frentes frias e de brisas marinhas; avalanches de neve; fluxos de rochas ou de lama; vazamentos de gases densos; despejo de resíduos industriais. Devido à grande quantidade de fenômenos a elas relacionados, as correntes de densidade são motivo de pesquisas e estudos em diversas áreas da ciência, como a Meteorologia, a Geologia, a Mecânica de Fluidos e a Engenharia Hidráulica (Simpson, 1997).

Sob o ponto de vista da geologia e da sedimentologia, o interesse pelo estudo de correntes de densidade está centralizado naquelas que envolvem a presença de material

granular (sedimentos) e, portanto, nos fenômenos de sedimentação. Estas correntes são, normalmente, chamadas de fluxos gravitacionais de sedimentos.

## **4.2 FLUXOS GRAVITACIONAIS DE SEDIMENTOS**

Quando ocorre o movimento de sedimentos (em massa ou em grãos) gerado pela ação da gravidade, este fluxo é chamado de fluxo gravitacional de sedimentos. A atuação da aceleração da gravidade sobre as partículas ou agregados de sedimentos envolve uma vasta gama de processos, que mobilizam o material desde as encostas até o fundo oceânico. A aceleração gravitacional faz com que os sedimentos sejam deslocados, sendo que o sentido do deslocamento é do ponto de maior energia, ou seja, da parte elevada do depósito, para o de menor energia, isto é, a região mais abaixo.

Existem muitos nomes atribuídos aos diferentes tipos de fluxos gravitacionais de sedimentos, sendo que alguns trabalhos já foram publicados justamente questionando este assunto. A nomenclatura utilizada é bastante confusa e, para um mesmo processo, podem ser encontrados diferentes tipos de nomes. Basicamente, na classificação apresentada aqui, os fluxos são agrupados quanto ao fluido ambiente em que ocorrem – ar ou água – e quanto às concentrações de sedimentos que os compõem.

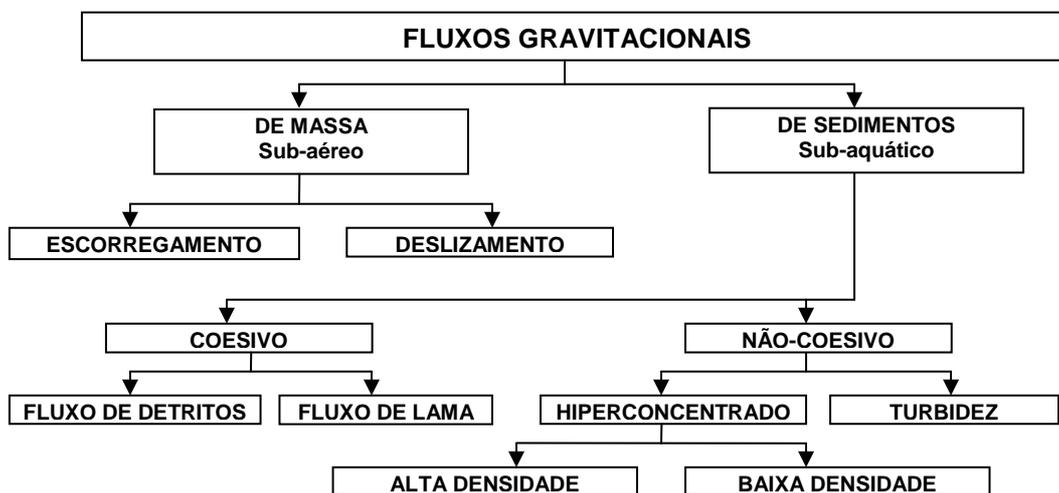
Os fluxos gravitacionais podem ser divididos em: (a) fluxos de massa, nos quais a gravidade é o único agente responsável pelo movimento dos sedimentos, sem a presença de água; e (b) fluxos de sedimentos, nos quais ocorre um transporte de uma mistura de sedimentos, em diferentes concentrações, juntamente com a água. Para os fluxos de massa, o fluido ambiente é o ar atmosférico, enquanto que, para os fluxos de sedimentos, o fluido ambiente é a água.

Um exemplo de fluxo de massa seria o escorregamento de areia de uma duna de praia, provocado por uma instabilização do arranjo dos grãos depositados. Os grãos irão se deslocar da parte mais alta para a parte mais baixa e serão depositados quando a força de peso, gerada pela ação gravitacional, for maior que as forças envolvidas no transporte e na sustentação dos grãos. A velocidade deste deslocamento dependerá de quão íngreme for a superfície inclinada.

Um exemplo do fluxo gravitacional de sedimentos pode ser dado pela entrada de um rio no mar, em que a água que escoia na calha do rio, com uma determinada velocidade e concentração de sedimentos, ao se encontrar com o corpo de água parada – no caso, o mar –, forma um fluxo de sedimentos, no qual o empuxo é a responsável pela manutenção do deslocamento, devido à diferença de massas específicas entre a água oriunda do rio e a água

do mar. Este tipo de fluxo de sedimentos tem a capacidade de avançar centenas de quilômetros costa adentro, dependendo das concentrações de sedimentos.

A figura 4.2 apresenta um esquema de classificação dos fluxos gravitacionais proposta por Mulder e Alexander (2001), onde se notam dois grandes grupos: fluxos de massa e fluxos de sedimentos; com suas subdivisões.



**Figura 4.2: Fluxograma da divisão dos tipos de fluxos gravitacionais (adaptado de Mulder e Alexander, 2001).**

Dentro dos fluxos gravitacionais de massa, encontram-se os escorregamentos e deslizamentos, que se caracterizam pela movimentação de uma grande quantidade de sedimentos instantaneamente, os quais diferem pela deformação da organização interna dos sedimentos, sendo que a deformação interna é alta para os escorregamentos e baixa para os deslizamentos (Middleton e Hampton, 1973).

Os fluxos gravitacionais de sedimentos, por sua vez, podem ser subdivididos em fluxos gravitacionais de sedimentos coesivos e fluxos gravitacionais de sedimentos não-coesivos, classificação que depende da concentração de material coesivo presente na mistura.

Nos fluxos gravitacionais de sedimentos coesivos, a mistura, geralmente formada por sedimentos muito finos (argilas), faz com que o fluxo seja mais resistente à incorporação de fluido ambiente. A coesão entre as partículas induz uma alta viscosidade (Perret *et al.*, 1995, *apud* Mulder e Alexander, 2001), gerando uma matriz de suporte de grãos pelo escoamento (Lowe, 1982). Este tipo de escoamento possui alta capacidade de transporte, tendo competência para carregar desde partículas de areia até grandes blocos de rochas. Nos fluxos gravitacionais coesivos estão incorporados os fluxos de detritos e fluxos de lama.

Os fluxos de lama podem conter até 5% em volume de frações de sedimentos com tamanho de seixo, mas frações maiores de sedimentos também podem estar em transporte.

Nos fluxos de lama, a razão entre argila e areia é maior do que 1 (argila/areia > 1). Quando a relação entre argila e areia for menor que 1 (argila/areia < 1), o escoamento é classificado como fluxo de detritos (Mulder e Alexander, 2001).

Os fluxos gravitacionais de sedimentos não-coesivos podem ser subdivididos em correntes de densidade hiperconcentrada e correntes de turbidez (classificação proposta por Mulder e Alexander, 2001).

Em função do grau de diluição da corrente, as correntes de densidade hiperconcentradas podem ser classificadas em correntes de alta e de baixa densidade. Uma corrente de densidade hiperconcentrada de baixa densidade deve possuir características de um fluido Newtoniano, bem como permitir o desenvolvimento de estruturas turbulentas em sua parte superior, ao mesmo tempo que, em sua parte inferior, as partículas devem poder se depositar sobre o fundo, ou seja, a mistura não deve oferecer resistência à queda das partículas. Caso estas situações não ocorram simultaneamente, teremos caracterizada uma corrente de densidade hiperconcentrada de alta densidade.

O último tipo de correntes de densidade a ser abordado são as correntes de turbidez, que se formam na transferência do escoamento de um rio para uma bacia receptora de sedimentos, como, por exemplo, o mar. Esse tipo de corrente é alimentado pelas partículas transportadas pelo rio durante prolongadas horas ou até mesmo meses. Este tipo de corrente também pode ser desenvolvida em lagos, onde uma pequena concentração de sedimentos é suficiente para gerar uma diferença de densidade e o deslocamento da corrente.

A figura 4.3 detalha os diferentes tipos de fluxos gravitacionais (detritos, hiperconcentrados, concentrados e turbidíticos), relacionando-os aos mecanismos de suporte de grãos dominantes, aos perfis de velocidades representativos e às estruturas deposicionais geradas. Nota-se que os fluxos mais coesivos – fluxos de detritos e fluxos hiperconcentrados – possuem capacidade para transportar clastos e grandes blocos de rochas, devido ao mecanismo de transporte de grãos, também denominado matriz coesiva.

À medida que a corrente é diluída, vão se alterando os mecanismos de transporte de grãos e os tipos de depósitos gerados pelas correntes. Para os fluxos concentrados e fluxos concentrados de transição, o perfil de velocidades é bipartido e apresenta uma maior velocidade de deslocamento junto ao fundo. Os depósitos formados obedecem à sequência deposicional proposta por Lowe (1982), onde, na base do depósito, estão depositados os materiais de maior massa e tamanho, e, conforme se aproxima da superfície, o tamanho das partículas vai diminuindo, até que se chegue ao topo, que é formado por material muito fino (argilas). Os fluxos turbidíticos apresentam um perfil com velocidades mais elevadas junto ao fundo e, na forma da corrente, percebe-se nitidamente a presença de uma cabeça bem

desenvolvida, seguida de um corpo mais deprimido. Na corrente de turbidez quase-permanente, não é notada a presença de uma cabeça e o perfil de velocidades apresenta velocidades mais elevadas na meia altura da corrente. Os fluxos turbidíticos geram depósitos que seguem a sequência de deposição proposta por Bouma, em que as camadas são nitidamente bem definidas, sendo a base composta por material mais grosseiro, e o topo, por material muito fino. Assim, as correntes de turbidez desenvolvem depósitos bem espessos, cujo topo é formado por material fino.

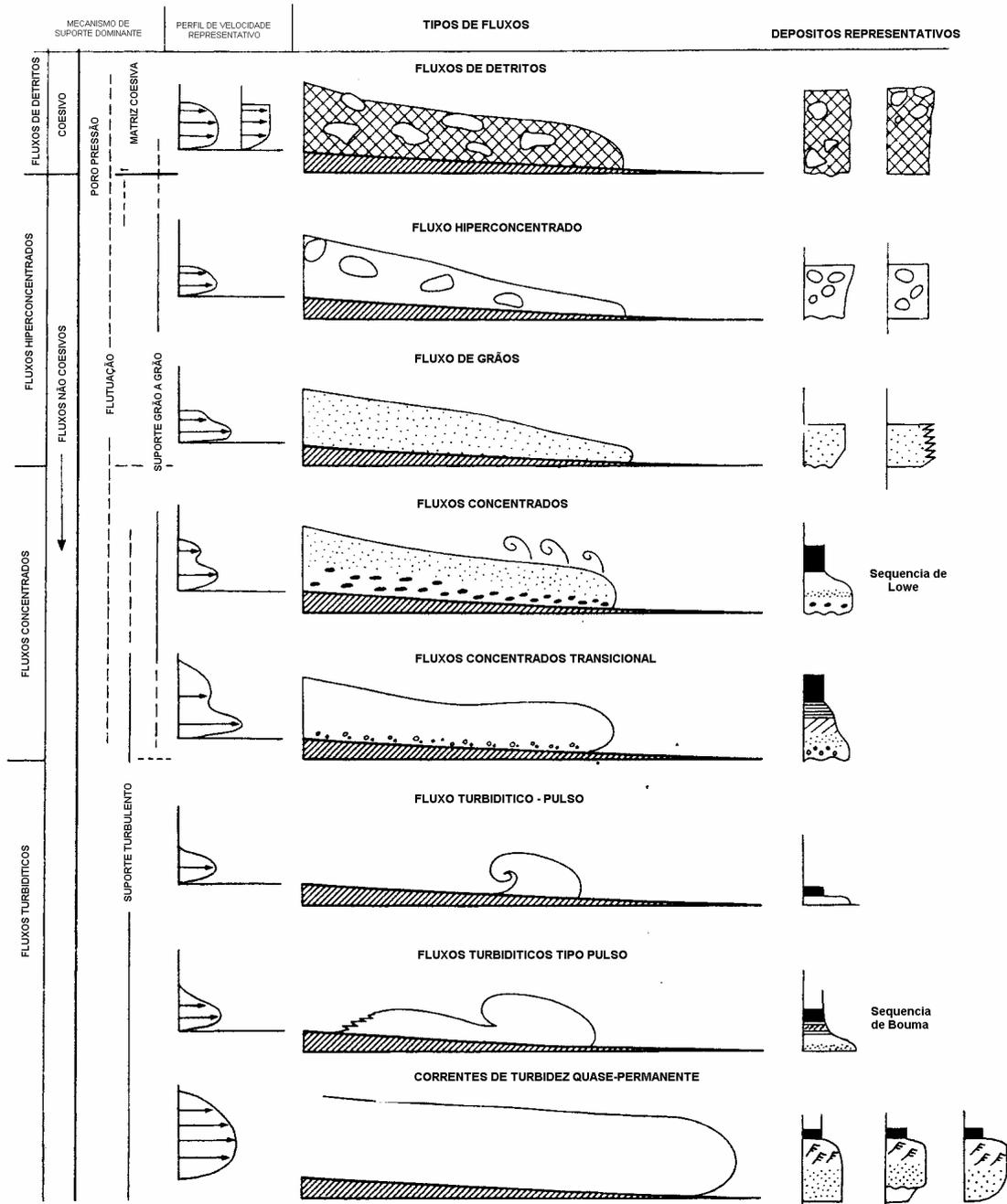


Figura 4.3: Esquema de classificação de fluxos gravitacionais proposto por Mulder e Alexander (2001).

### **4.3 PROCESSO DE FORMAÇÃO E MECANISMOS DE IGNIÇÃO DAS CORRENTES DE DENSIDADE COM SEDIMENTOS**

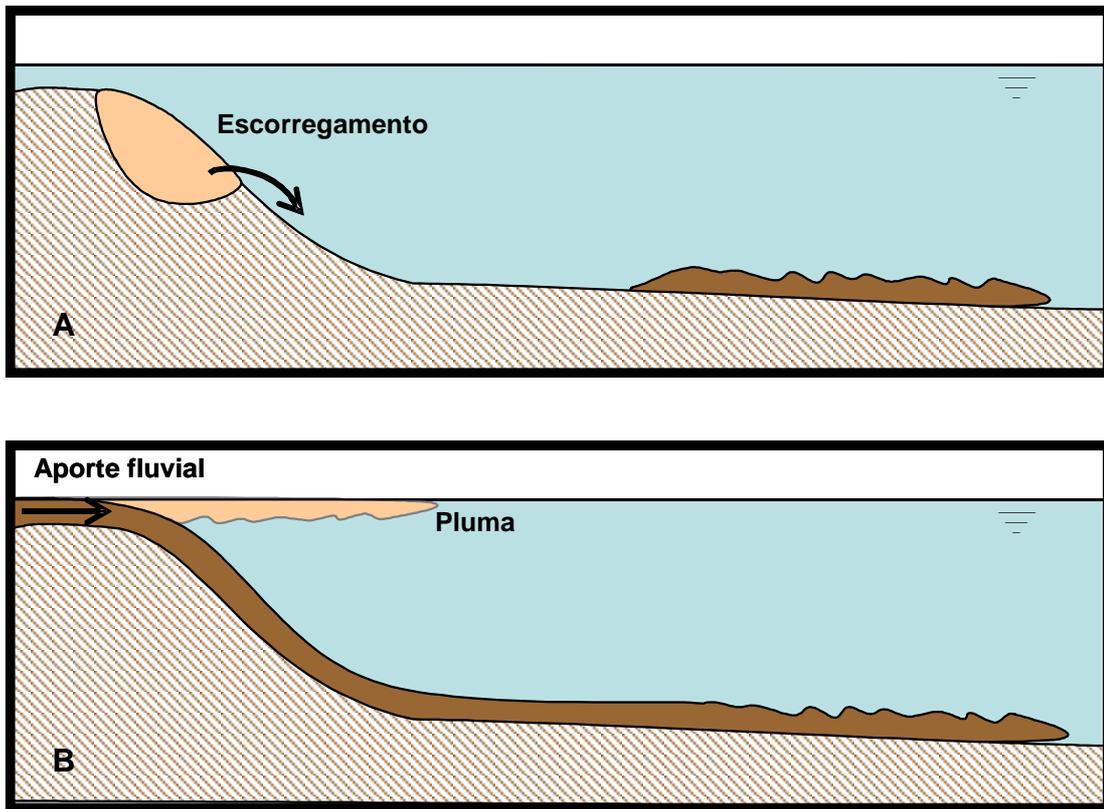
Os fluxos de detritos e as correntes de densidade hiperconcentradas formam-se através da liquefação do material granular, processo este que ocorre quando a pressão interna resistiva do material granular é anulada pela pressão exercida pela água nos poros, ocorrendo então a fluidificação do substrato e o seu escorregamento. A liquefação também é a principal formadora de fluxos de detritos em condições subaéreas, através do mesmo mecanismo de acionamento, em que a presença de água aumenta a pressão interna do maciço, reduzindo a pressão entre os grãos de sedimentos e agregados e causando a instabilização e colapso do maciço (Iverson, 1997).

Os escoamentos de detritos possuem uma capacidade de se deslocar com grande velocidade e por uma grande distância (Simm e Kidd, 1991, *apud* Gee *et al.*, 1999). Quando o escoamento de detritos ocorre no fundo do mar, a corrente desenvolve uma alta velocidade, mas tem pouca capacidade erosiva, pois, entre a corrente e o fundo, forma-se uma camada de água (filme lubrificante), que reduz o cisalhamento entre a corrente e a superfície (Mohrig *et al.*, 1998; Mohrig *et al.*, 1999).

As correntes de turbidez de meio sub-aquoso formam-se em corpos d'água onde os rios deságuam, tais como lagos, lagoas, reservatórios artificiais, barragens e no mar. O encontro da água em movimento, oriunda da rede fluvial, com a água “parada”, que está em um reservatório ou no mar, dá origem às correntes de turbidez, nas quais o fluido da corrente, juntamente com os sedimentos em suspensão, deslocam-se por diferença de densidade.

Como já foi dito na introdução do presente trabalho, as correntes de turbidez podem ser ditas: hipopicnal, quando sua densidade é menor que a do fluido ambiente ( $\rho_c < \rho_a$ ); homopicnais, quando as densidades do escoamento e do fluido ambiente são iguais ( $\rho_c = \rho_a$ ); e hiperpicnais, quando a densidade da corrente for maior que a do fluido ambiente ( $\rho_c > \rho_a$ ). No caso do mar, devido à salinidade e à diferença de temperatura, uma maior concentração de sedimentos é necessária para a formação de uma corrente de densidade hiperpicnal, ou seja, na faixa de 36 a 44 kg/m<sup>3</sup> de sedimentos suspensos (Mulder e Syvitski, 1995, 1996, *apud* Mulder e Alexander, 2001).

Quanto ao tempo de duração, as correntes de turbidez classificam-se em: corrente de turbidez quase-permanente (*quasi-steady*) e corrente de turbidez por pulso (*surge-like* e *surge*). Nas correntes de turbidez por pulso, os fluxos são como picos de muito pequena duração (Figura 4.4A), sendo o abastecimento com sedimentos encerrado de forma bastante abrupta.



**Figura 4.4: Ilustração sobre o tempo de duração das correntes. Corrente por pulso (A) e corrente quase-permanente (B). (Fonte: Modificada de Mutti *et al.*, 1999.)**

Os escoamentos por pulsos são de curta duração e se caracterizam, também, por apresentarem uma cabeça separada do restante do corpo da corrente. A velocidade de deslocamento da cabeça é muito alta e deixa para trás um corpo, que é formado apenas por uma nuvem de sedimentos muito diluída. Estes eventos são de ocorrência bastante rara, necessitando de condições climatológicas específicas, como eventos extremos, com chuvas de alta intensidade (Mulder e Alexander, 2001).

Já quando o abastecimento de sedimentos prolonga-se por mais tempo, diz-se que o fluxo é quase-permanente (Figura 4.4B). Estas são as correntes que ocorrem na maior parte dos rios que entram em um corpo receptor (lago, reservatório ou oceano), e nelas se percebe a formação de um corpo após a passagem da cabeça (Mulder e Alexander, 2001).

#### **4.4 TRANSFORMAÇÃO DE FLUXO E MECANISMOS DE TRANSPORTE**

Um fluxo pode sofrer diversas alterações ao longo de seu percurso. Podem ocorrer alterações na concentração de sedimentos, pela adição de fluido ou de partículas, bem como alterações quanto à forma de deslocamento e de transporte de partículas. Estas alterações

podem ser causadas pela interação entre o escoamento e o fluido ambiente, bem como pela ação da geometria do terreno onde a corrente escoar (Mulder e Alexander, 2001).

À medida que a corrente avança pelo fluido ambiente, pode ocorrer a incorporação deste fluido e, conseqüentemente, a diluição da corrente. Com a diluição da corrente, ocorrem alterações dos mecanismos de transporte de sedimentos, diminuindo o choque entre as partículas e, também, causando a diminuição da competência do escoamento em transportar maiores faixas granulométricas. Passam a predominar os mecanismos de transporte acionados pela turbulência do escoamento, de tal forma que apenas o material de pequena granulometria e densidade consegue ser sustentado pelo escoamento. Sendo assim, com a diluição da corrente pela incorporação de fluido ambiente, uma corrente de turbidez hiperpicnal pode ser transformada em homopicnal ou hipopicnal (Mulder e Alexander, 2001).

Já uma pequena incorporação de sedimentos, retirados do leito, pode aumentar a concentração de sedimentos e, conseqüentemente, alterar a velocidade e os mecanismos de transporte do fluxo.

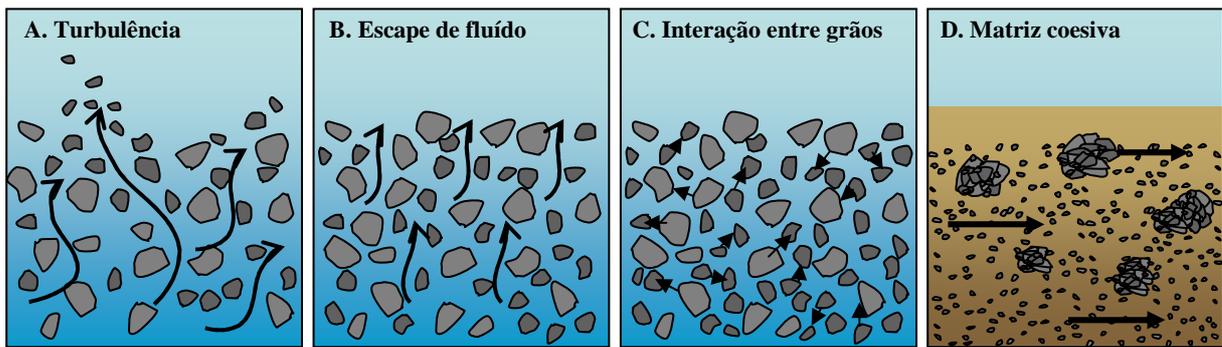
A capacidade de transporte das correntes de densidade depende muito da quantidade de água e de sedimentos presente na mistura, bem como da coesividade do material dissolvido. Está também relacionada aos mecanismos de suporte de grãos, que são (Middleton e Hampton, 1973):

**Turbulência:** associada à velocidade do escoamento, que varia continuamente em qualquer ponto e direção, em torno de um valor médio, provocando um movimento não organizado nos sedimentos (Figura 4.5A).

**Escape de fluido:** a elevada concentração de grãos na corrente pode inibir a deposição, fazendo com que a água presente na mistura seja forçada a sair de dentro do corpo da corrente. Desta forma, se estabelece uma competição entre a movimentação da água presente no espaço intersticial, tentando ascender, e os grãos, que tentam cair sobre o fundo, retardando a sedimentação das partículas (Figura 4.5B).

**Interação entre grãos:** os grãos são mantidos em suspensão pelas forças de interação entre eles, pela colisão ou pelas forças viscosas do meio fluido. A força de interação é proporcional à tensão de cisalhamento transmitida entre os grãos, contrapondo-se à tendência de os grãos caírem sobre o fundo (Figura 4.5C).

**Matriz coesiva:** uma mistura de material argiloso e fluido intersticial suporta o peso dos clastos e forma também um filme, que lubrifica as irregularidades na superfície do grão, reduzindo o atrito e permitindo que o fluxo de detritos movimente-se no meio da matriz coesiva por grandes distâncias (Figura 4.5D).



**Figura 4.5 : Mecanismos de transporte e sustentação de grãos (Modificado de Middleton e Hampton, 1973).**

O fluxo de detritos também pode sofrer transformação com o seu deslocamento, mas essa transformação não é ainda bem compreendida. Neste fluxo, os grandes blocos de material que estão sendo transportados podem, ao longo de sua trajetória, ser fracionados, e este processo pode se repetir até que se tenham apenas partículas pequenas. Middleton e Hampton (1973) sustentaram que uma corrente de detritos poderia ser transformada em uma corrente de turbidez, mas que, para isso ocorrer, seria necessária a incorporação de uma grande quantidade de água.

Caso ocorra a incorporação de fluido ambiente, o fluxo de detritos pode ser transformado em corrente de densidade hiperconcentrada de alta densidade ou baixa densidade. Através da transformação de fluxo, uma corrente de detritos pode também ser transformada em um fluxo não-coesivo, sem adição de fluido ou sedimentos, desde que tenha velocidade elevada o suficiente (Fischer, 1983), da mesma forma que um escoamento não-coesivo pode ser transformado em fluxo de detritos através da desaceleração do fluxo (Middleton e Southard, 1984, *apud* Mulder e Alexander, 2001).

Segundo Fisher (1983), as transformações de fluxo que podem ocorrer são as que seguem:

**transformações de corpo:** ocorrem quando o escoamento é alterado entre turbulento e laminar, sem adicionar ou retirar fluido do corpo da corrente (Figura 4.6a);

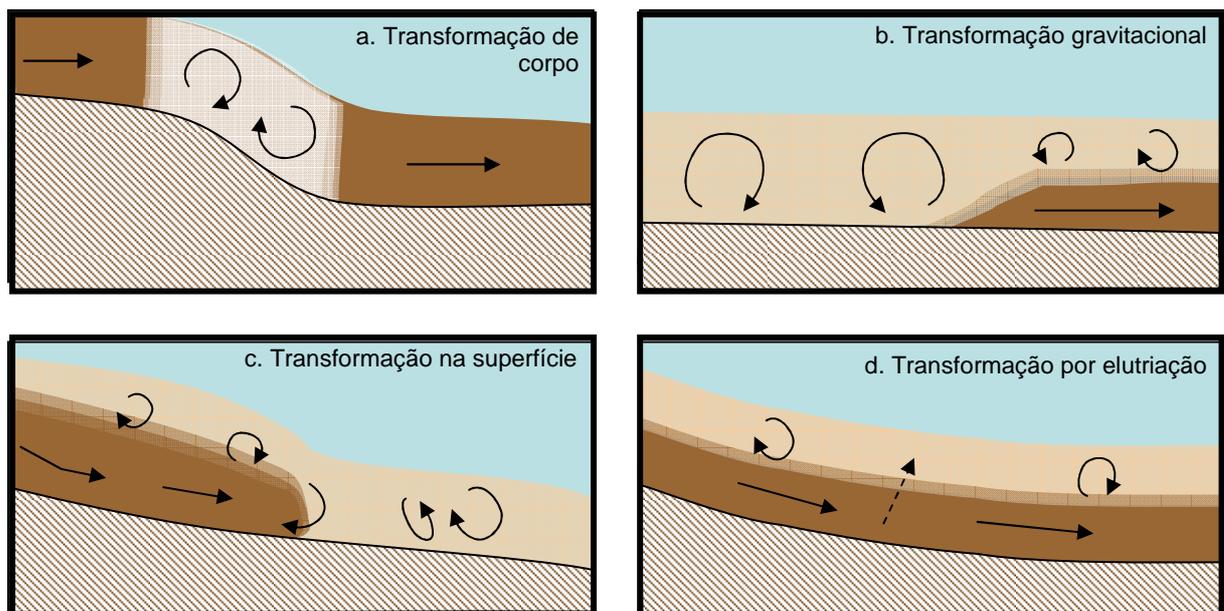
**transformações gravitacionais:** ocorrem quando o escoamento turbulento deposita, gravitacionalmente, parte de seu material, desenvolvendo, junto ao fundo, uma região altamente concentrada, que se desloca de forma laminar e mais concentrada, enquanto a parte superior do escoamento mantém-se turbulenta (Figura 4.6b);

**transformações de superfície:** ocorrem quando o fluido ambiente é incorporado, por mistura, à camada superior da corrente, devido ao cisalhamento na interface corrente-fluido ambiente, ou quando o fluido ambiente entra pela superfície frontal inferior da corrente, formando o seu nariz (Figura 4.6c);

**transformações de elutrição:** ocorrem pelo movimento ascendente do fluido intersticial, o qual carrega partículas finas, que saem da região mais densa, junto ao fundo, produzindo, assim, uma camada mais diluída e turbulenta acima desta camada mais densa (Figuras 4.6d, e 4.7).

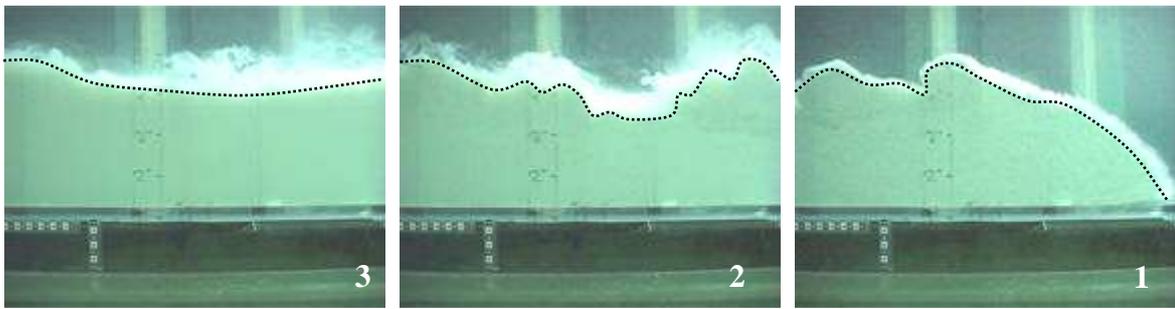
As transformações de fluxo propostas por Fisher (1983) foram concebidas na época em que eram bastante recentes as descobertas a respeito de estruturas turbulentas próximas à parede. Portanto, nesta classificação, a nomenclatura laminar e turbulenta refere-se ao fato de o escoamento se deslocar com ou sem a formação de estruturas aparentes de turbulência.

Estudos anteriores, à publicação acima mencionada, revelaram a existência de estruturas turbulentas junto à parede (Eckelmann, 1974; Kreplin e Eckelmann, 1979), nas quais pulsos muito rápidos de aumentos da tensão seriam os responsáveis pela formação de turbulência na região da camada limite, mostrando que, mesmo quando aparentemente o escoamento não desenvolve turbulência, ela está presente nas regiões próximas ao contorno sólido ou a parede.



**Figura 4.6: Tipos de transformação de fluxo. (Adaptado de Fisher, 1983.)**

Na figura 4.7, observa-se a evolução de uma corrente de densidade formada por microesferas de vidro. Na sequência de imagens, pode ser percebida uma camada mais escura na base da corrente, onde a concentração de sedimentos é mais elevada, e uma camada mais clara no topo da corrente, onde a corrente está mais diluída e onde estão ocorrendo as transformações de superfície, através da incorporação de fluido ambiente.



**Figura 4.7:** Sequência de imagens de uma corrente de densidade ao longo de seu deslocamento, mostrando a região diluída (acima da linha pontilhada) e a mais concentrada (abaixo da linha pontilhada). (Fotografias cedidas por Rafael Manica, 2009.)

#### 4.5 DEPÓSITOS GERADOS PELAS CORRENTES

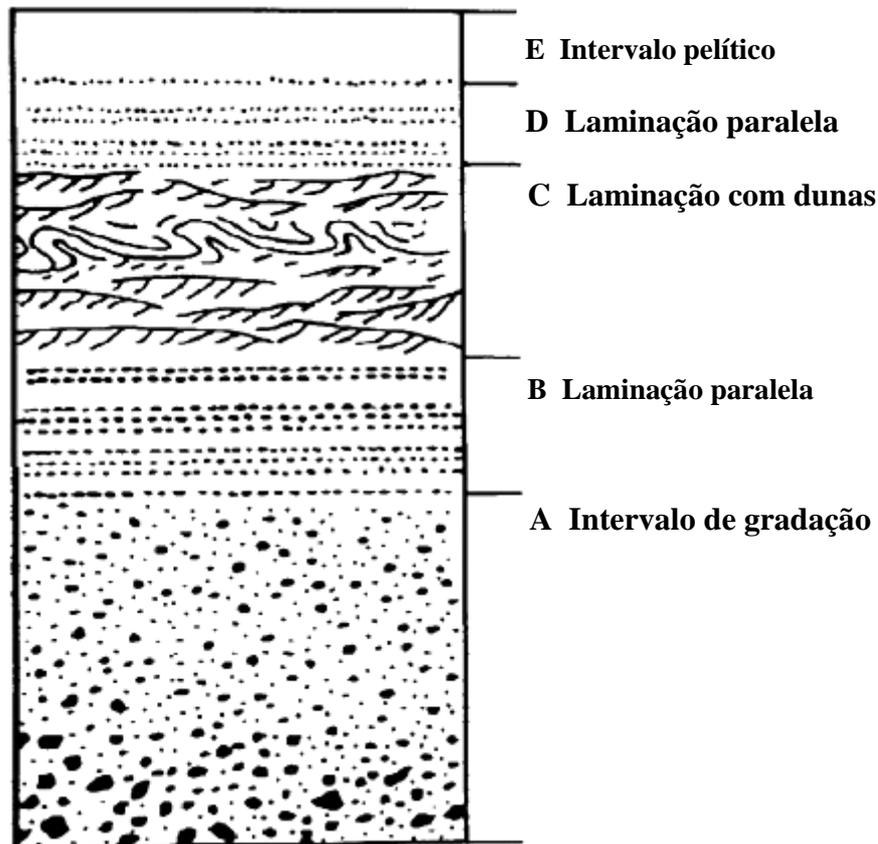
Nas correntes de densidade, dependendo da concentração de material, da faixa granulométrica envolvida (cascalho, areias, siltes e argilas), bem como da aceleração ou desaceleração do fluxo, podem-se desenvolver, basicamente, 3 tipos de depósitos: depósitos com gradação normal, depósitos com gradação inversa e depósitos maciços. Esta nomenclatura está vinculada às formas de empilhamento dos grãos e, nela, são levadas em conta a granulometria do material depositado e as facies internas ao depósito, como, por exemplo, dunas.

Na figura 4.8, está representada a descrição da sequência de Bouma, nome dado a um depósito clássico gerado por correntes de turbidez. Verifica-se que ocorre uma diminuição do tamanho dos grãos depositados quando se observa o depósito em direção a sua superfície. Também podem ser visualizadas diferentes facies internas, que são os padrões e a arquitetura da deposição dos grãos.

Um depósito com gradação normal é caracterizado por um ordenamento de deposição de grãos que segue o modelo proposto por Bouma (1962), no qual o material de maior granulometria deposita-se primeiro e ocorre uma redução gradativa do tamanho do material depositado. O depósito com gradação inversa apresenta uma sequência de Bouma invertida, sendo caracterizado pela presença de material mais fino na base do depósito e de material de granulometria mais grossa em sua parte mais superficial (Kneller, 1995). Quando o fluxo se desenvolve com menor concentração de sedimentos, pode ocorrer a formação de estruturas internas como ondulações, dunas e anti-dunas (Lowe, 1982). Os depósitos maciços são gerados pela deposição de correntes de detritos, onde a corrente perde rapidamente velocidade e a deposição ocorre por congelamento do fluxo sem a formação de estruturas internas.

Quanto à diferenciação entre as camadas, o depósito é dito incipiente, quando a diferença entre as granulometrias do material é pouco perceptível, e é dito abrupto, quando a

mudança da granulometria do material depositado é acentuada. O depósito será chamado de estratificado, quando se percebe claramente a diferença granulométrica do material depositado, como que disposto em camadas.



**Figura 4.8: Descrição de uma sequência completa de Bouma: depósito de turbidito. (Adaptado de Bouma, 1962.)**

O depósito formado pelas correntes de turbidez tem sua espessura dependente da duração e da concentração do escoamento. Com relação às estruturas deposicionais, o depósito de uma corrente de turbidez quase-permanente é semelhante àquele formado pela corrente de densidade por pulsos. Devido à maior duração do evento, uma quantidade muito grande de sedimentos pode ser depositada, fazendo com que os depósitos formados sejam espessos. Quando a velocidade do fluxo for baixa, podem ser desenvolvidas formas de ondulações e quando a concentração de sedimentos diminuir, juntamente com o decréscimo da velocidade, podem surgir depósitos com laminação cruzada.

Na figura 4.9, apresenta-se a sequência deposicional proposta por Lowe (1982), em que o depósito ilustrado foi gerado pela deposição de um fluxo de alta densidade seguido de outro de baixa densidade. Pode-se perceber a diferença na espessura dos pacotes deposicionais, a mudança dos tamanhos de grãos depositados, bem como as distintas facies

deposicionais. A figura 4.10 exemplifica, em um afloramento da região de Quebrada de Las Lajas, na Argentina, a presença de laminação paralela e laminação cruzada.

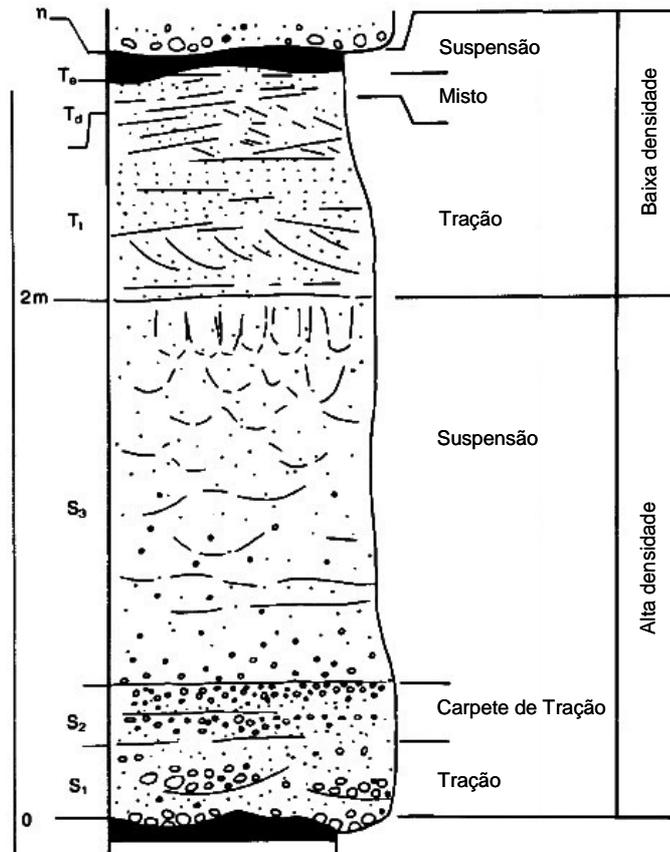


Figura 4.9: Sequência de depósito de uma corrente de alta densidade arenosa seguida de um depósito de corrente de baixa densidade. (Adaptado de Lowe, 1982.)



Figura 4.10: A: Sequência de um depósito com laminação paralela. B: Sequência com laminação cruzada. (Cedida por Leonardo Torres da Silva.)

Já a figura 4.11, apresenta o empilhamento de várias camadas deposicionais geradas por fluxos de turbidez, notando-se a presença de camadas de maior espessura, formadas geralmente por areias, separadas por camadas mais finas de material de menor granulometria, geralmente argilas, silte e areia muito fina.



**Figura 4.11: Imagem de depósitos em Quebrada de Las Lajas, Argentina. (Cedida por Leonardo Torres da Silva).**

Os mecanismos envolvidos na deposição dos sedimentos que compõem os fluxos gravitacionais de sedimentos dependem das concentrações de sedimentos. Segundo Lowe (1982), para cada condição do escoamento, podem ocorrer diferentes mecanismos de deposição, os quais, podem ser:

- sedimentação por tração, em que os grãos interagem entre si e se depositam como carga de leito;
- sedimentação por suspensão, em que os grãos respondem individualmente e se depositam diretamente como carga de suspensão;
- congelamento friccional, em que os grãos interagem através de um contato friccional; e
- congelamento coesivo, em que os grãos interagem com as forças coesivas da matriz de sedimentos.

Tanto a sedimentação por tração quanto a sedimentação por suspensão são próprias de correntes de turbidez de alta e baixa densidade. Já os dois últimos mecanismos (congelamento

friccional e coesivo) são próprios de fluxos de grãos e fluxos coesivos. Estes mecanismos podem ser descritos pelos processos apresentados na figura 4.12.

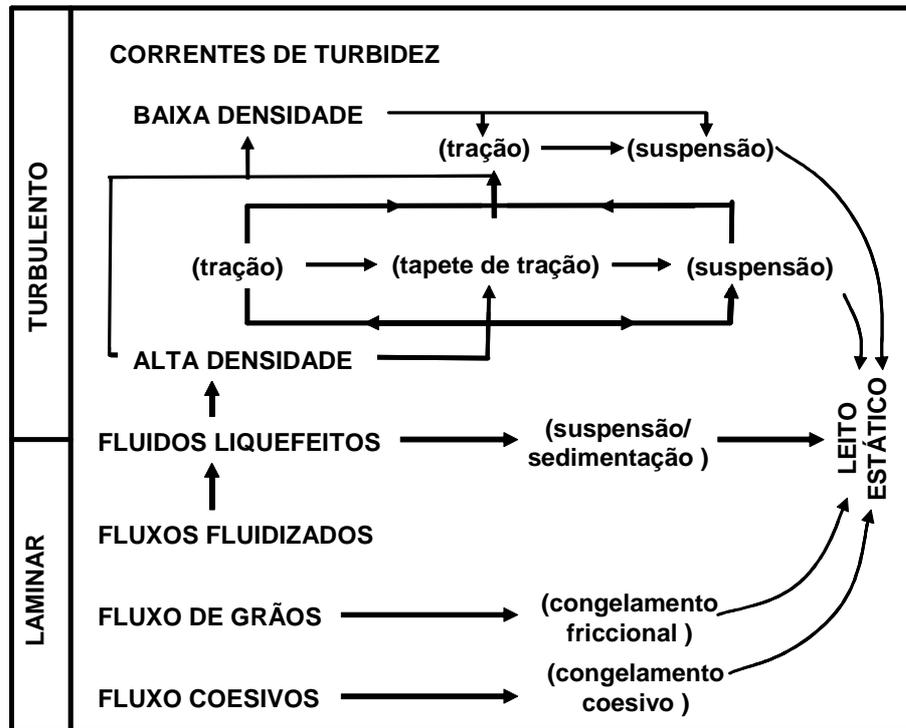


Figura 4.12: Esquema ilustrando os principais mecanismos de deposição dos fluxos gravitacionais de sedimentos. (Adaptado de Lowe, 1982.)

#### 4.6 SIMULAÇÃO DE CORRENTES DE TURBIDEZ NA PRESENÇA DE DIFERENTES CONCENTRAÇÕES E GRANULOMETRIAS

Muitos trabalhos já foram apresentados relatando resultados de simulações físicas de correntes de densidade. No entanto, simulações de correntes de densidade que se desenvolvem em ambientes salinos, com diferentes concentrações de sal e com a utilização de uma ampla escala de distribuição granulométrica de sedimentos, não foram ainda relatadas.

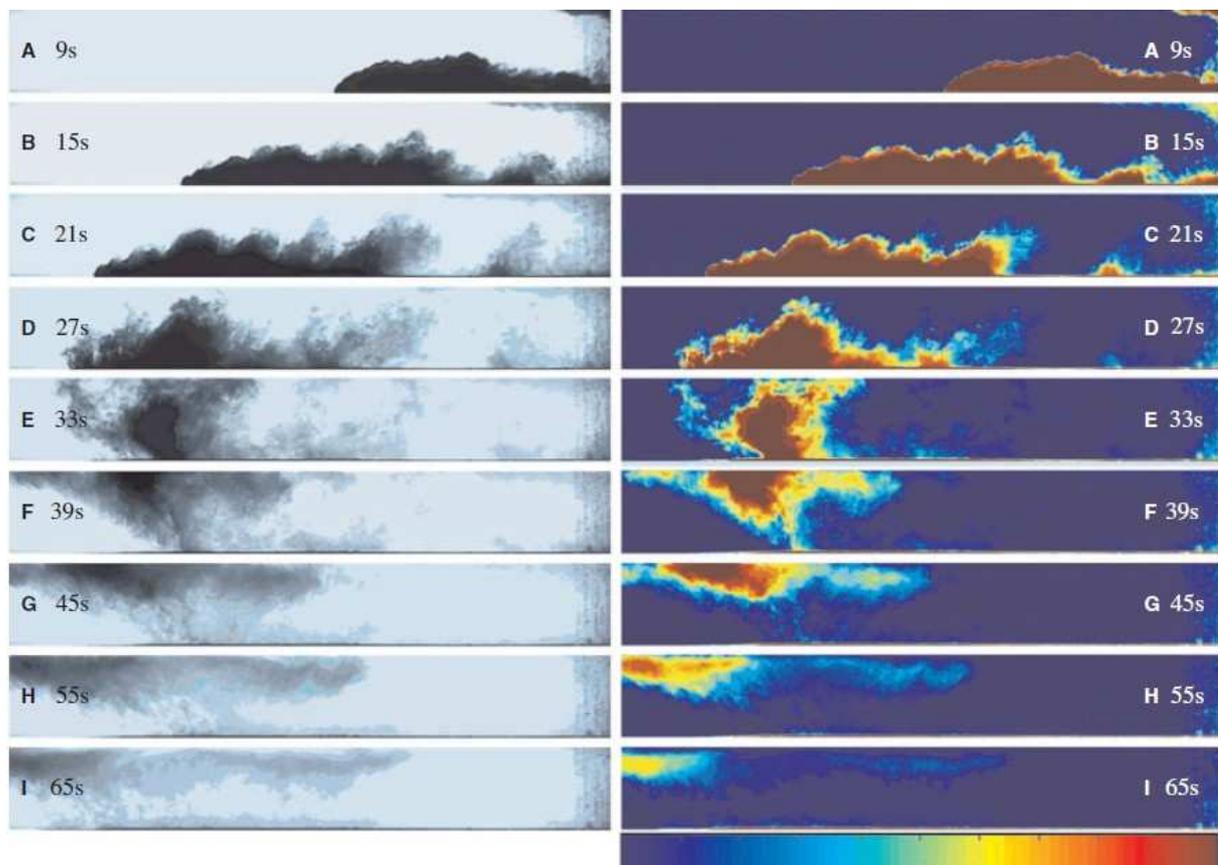
Na maioria dos trabalhos publicados, os autores empregam faixas granulométricas selecionadas e as correntes são simuladas em tanques contendo água doce. Foram selecionados alguns trabalhos com resultados interessantes e que serviram de comparação e referência para o presente estudo. São eles:

- a) GLADSTONE e PRITCHARD (2010).

Os autores realizaram uma série de experimentos para avaliar e parametrizar os depósitos gerados em laboratório com depósitos reais. Nos experimentos, as concentrações de

finos e grossos foram variadas sistematicamente para a avaliação da alteração da velocidade do fluxo, para as alterações no ponto de levantamento da corrente, ou seja, o ponto de formação da corrente hipopical. Nos ensaios, foi registrada a posição do nariz da corrente a cada 3 segundos, para avaliar a evolução do avanço da frente. Também foram simuladas correntes cujo fluido utilizado para mistura era composto por diferentes concentrações de álcool, de forma a favorecer a formação da corrente hipopical.

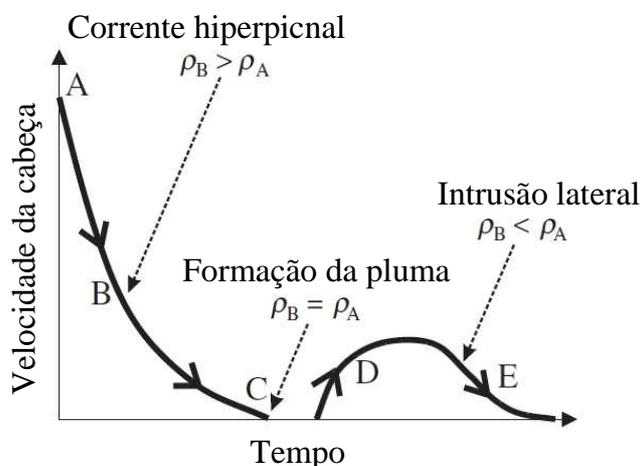
Pelas imagens da evolução de uma corrente simulada em laboratório é possível observar que a corrente lançada propaga-se junto ao fundo e é possível observar uma pluma emergindo ao longo de todo o comprimento da corrente. Esta pluma é sobe carregada de sedimentos e após algum tempo os sedimentos começam a precipitar no fundo do canal. As imagens em colorido foram obtidas através de uma técnica de coloração previamente calibrada sendo que o azul escuro representa uma baixa concentração de sedimentos e o vermelho a elevada concentração de sedimentos (Figura 4.13).



**Figura 4.13: Imagens da evolução de uma corrente simulada sendo a da esquerda a imagem real obtida durante o experimento e a da direita obtida através uma técnica de coloração para detecção da concentração de sedimentos. Na escala de cores o vermelho escuro representa elevada concentração de sedimentos e o azul escuro representa baixa concentração de sedimentos. (Gladstone e Pritchard, 2010).**

Segundo os autores, a corrente possui inicialmente uma densidade maior que o fluido ambiente e ao longo de seu deslocamento ela perde densidade. No momento em que a

densidade da corrente se iguala a densidade do ambiente ocorre a elevação e formação da corrente hipopical, conforme esquema ilustrativo apresentado na figura 4.14.



**Figura 4.14: Evolução horizontal da corrente ao longo do tempo sendo: A o início do experimento; B o início do levantamento da corrente; C o instante em que plumas levantam ao longo do corpo da corrente; D o instante em que a frente da corrente hiperpical para de se deslocar; E as partículas restantes no fluxo sobem para a superfície do fluido ambiente. (Gladstone e Pritchard, 2010).**

O objetivo do trabalho era fazer uma analogia com os resultados dos depósitos produzidos em laboratório com os depósitos naturais. Para tanto, foram utilizados sedimentos grossos e finos (dispersão do tipo bimodal) em diferentes proporções e a utilização de um fluido menos denso na composição das misturas preparadas para as correntes simuladas. Para tanto, foram avaliados o decréscimo da densidade da corrente e a posterior deposição do material ao longo do canal experimental.

Os autores concluíram que o material mais grosso deposita-se inicialmente antes do início da formação das correntes hipopical. O material fino deposita-se posteriormente, através da precipitação. Concluíram também em ensaios com diferentes condições iniciais os depósitos produzidos podem possuir extensão global e geometria bastante semelhantes entre si, o que torna bastante difícil de se conseguir geram um fluxo pai a partir de propriedades de um depósito. Sugerem que uma interrupção ou falha no depósito pode ser um indício de que naquele local houve o levantamento da pluma (chamada de nuvem pelos autores).

b) MULDER e ALEXANDER (2002).

No ano de 2002, Mulder e Alexander apresentaram resultados de experimentos de simulações de correntes de turbidez cujo interesse era avaliar as variações causadas nas correntes em função de alterações de alguns parâmetros de entrada. Os parâmetros variados

foram: a declividade do fundo do canal, a descarga, o tamanho dos sedimentos utilizados e a concentração volumétrica de sedimentos.

Os ensaios foram realizados em um canal experimental com 4.87 m de comprimento, 0,17 m de largura e 0,52 m de profundidade. Utilizou-se como sedimento carboneto de silício (silicon carbide), com  $3220 \text{ kg.m}^{-3}$  de massa específica, e os diâmetros testados foram de 45, 63, 66 e 90  $\mu\text{m}$ , respectivamente. As concentrações de sedimentos foram de 5, 10 e 20  $\text{kg.m}^{-3}$ , e as descargas, de  $3,3 \times 10^{-5}$ ,  $5 \times 10^{-5}$  e  $8,3 \times 10^{-5} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , respectivamente.

Na execução dos experimentos, foi posicionada uma rampa com 1m de comprimento logo após a saída do cano por onde era injetada a mistura, cuja declividade variou entre  $0^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $6^\circ$  e  $9^\circ$ . Os ensaios foram registrados com câmera de vídeo digital, para a posterior verificação das velocidades de avanço das correntes, bem como para a determinação das dimensões das correntes. O material depositado ao longo do canal foi coletado, para análise da distribuição de massa e tamanho médio das partículas. Ao todo, foram simuladas 21 correntes, com diferentes configurações dos parâmetros de entrada. Os dados das correntes simuladas pelos autores estão apresentados na tabela 4.1.

**Tabela 4.1: Condições experimentais das simulações apresentadas por Mulder e Alexander (2002).**

Ensaio	Declive	Vazão ( $\times 10^{-5}$ $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )	$C_v$ (%)	$D_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	V ( $\text{m}.\text{s}^{-1}$ )	$Re_i$	$Fr_i$
1	9	8,33	0,9	45	0,265	5834	4,034
9	9	3,33	0,23	66	0,109	2331	3,227
15	3	5,00	0,45	45	0,159	3502	3,423
17	3	8,33	0,9	45	0,265	5834	4,034
18	3	8,33	0,9	90	0,265	5834	4,034
19	3	8,33	0,9	63	0,265	5834	4,034
20	3	8,33	0,9	66	0,265	5834	4,034
22	3	5,00	0,45	66	0,159	3502	3,423
24	3	5,00	0,45	66	0,159	3502	3,423
25	3	3,33	0,23	66	0,106	2331	3,227
30	6	8,33	0,9	66	0,265	5834	4,034
44	6	5,00	0,45	66	0,159	3502	3,423
45	9	5,00	0,45	66	0,159	3502	3,423
46	0	5,00	0,45	66	0,159	3502	3,423
47	0	3,33	0,23	66	0,106	2331	3,227
49	0	8,33	0,9	66	0,265	5834	4,034
50	0	5,00	0,45	66	0,159	3502	3,423
51	0	3,33	0,23	66	0,106	2331	3,227
52	9	5,00	0,9	45	0,159	3502	3,423
53	9	3,33	0,9	45	0,106	2331	3,227
54	9	5,00	0,45	45	0,156	3502	3,423

Os resultados mostraram que, conforme se afasta do ponto de injeção, para pequenas declividades de fundo, a corrente tem sua espessura diminuída gradativamente, juntamente

com a redução da concentração volumétrica e da velocidade de deslocamento de frente (Figura 4.15). Os escoamentos com descargas maiores e, conseqüentemente, maiores velocidades de injeção, mantêm maiores velocidades além da saída do tubo. Para as declividades maiores, a espessura da corrente segue aumentando conforme se afasta do ponto de injeção (Figura 4.15A). O fato de a espessura da corrente se expandir nos experimentos com maiores declividades, ao invés de diminuir, como naqueles com declividades mais baixas, poderia ser explicado pelo número de Reynolds, que é mais elevado nos escoamentos gerados nas declividades maiores (Figura 4.17).

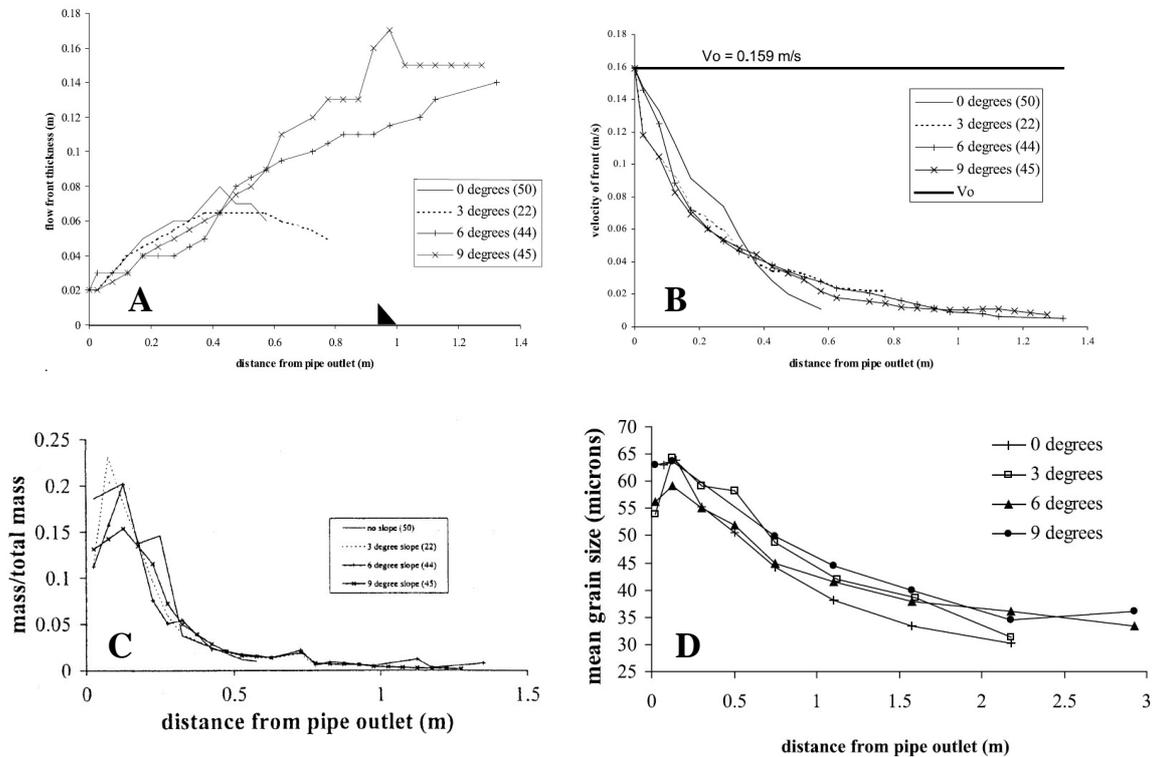
Pode ser notado que, nas áreas próximas à saída do tubo de injeção, é bastante difícil distinguir as espessuras dos escoamentos (Figuras 4.15A e 4.16A), mas os valores de velocidades oscilam bastante, mostrando uma certa distinção entre os parâmetros simulados (Figura 4.15B e 4.16B). Os dados mostram também que o tamanho do grão não influencia na espessura e velocidade da corrente na região mais proximal, mas que passa a apresentar maior influência sobre essas duas características ao se afastar da saída do tubo (Figura 4.16A e 4.16B).

Segundo os autores, a máxima deposição de material ocorre quando o escoamento desacelera rapidamente. A distribuição de massa depositada ao longo do canal depende do ângulo de declividade do fundo. Para ângulos de inclinação da rampa menores, as quantidades de material depositadas na região proximal foram maiores, enquanto que, para os ângulos maiores, houve material depositado mais distante da saída de água do tubo, talvez por conta da maior energia da corrente (maiores valores de Reynolds) (Figura 4.15C). Foi possível notar também que, com o aumento na concentração inicial de sedimentos, os depósitos formados foram semelhantes, porém com maior quantidade de material depositado ao longo do canal.

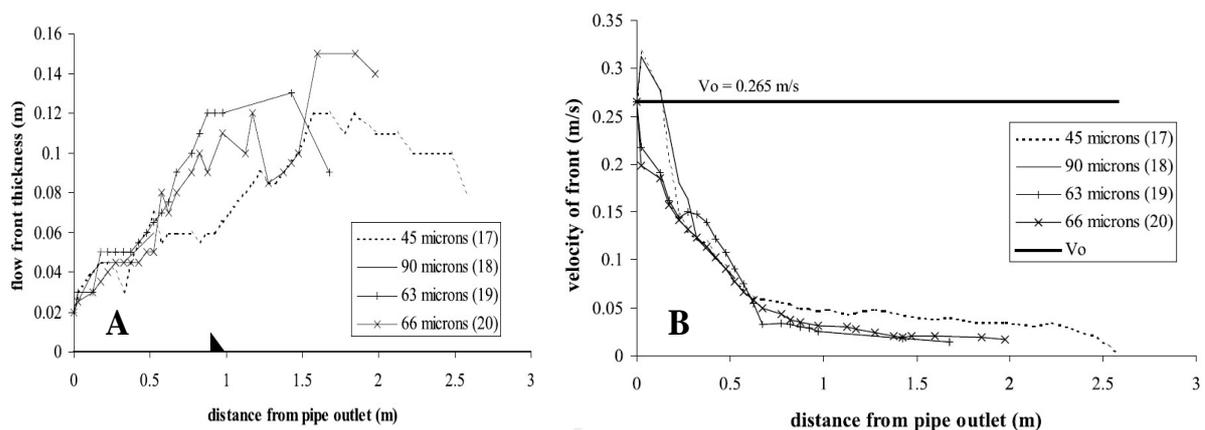
Nos experimentos com diferentes tamanhos de grãos, os picos de espessura de depósito foram muito semelhantes, mas a amplitude dependeu do tamanho dos grãos. A corrente com sedimentos mais finos foi a que apresentou o pico de massa mais longe da saída do tubo. O diâmetro médio das partículas depositadas ao longo do canal diminuiu com o aumento da distância (Figura 4.15C).

Neste estudo, os autores concluíram que a espessura da corrente varia em função da distância, da declividade do canal, da vazão de injeção, do tamanho de grão e da seleção de grãos. A distância atingida pela corrente depende da proporção de finos presentes na corrente em função do tamanho médio de grãos. A velocidade de avanço da corrente depende da vazão de injeção, da concentração de sedimentos e da relação entre tamanho de grão e seleção. A variação da massa depositada (espessura de depósito) ao longo da distância depende da

declividade do fundo, sendo que a máxima massa depositada por unidade de área é inversamente proporcional à distância.



**Figura 4.15: (A) Variação da espessura da corrente ao longo da distância; (B) variação da velocidade de avanço da corrente ao longo da distância; (C) variação da massa de material depositada ao longo da distância; e (D) variação do tamanho médio das partículas ao longo da distância para diferentes declividades de fundo. (Fonte: Mulder e Alexander, 2002.)**



**Figura 4.16: (A) Variação da espessura da corrente; (B) variação da velocidade de avanço da corrente ao longo da distância para diferentes declividades. (Fonte: Mulder e Alexander, 2002.)**

A variação na concentração inicial de sedimentos resulta em depósitos com geometrias similares, mas com diferentes espessuras, sendo que, quanto maior a concentração de material utilizado na composição da corrente, mais espesso o depósito formado. As partículas

depositam-se gradativamente ao longo da distância, sendo que esta distância varia em função de uma melhor eficiência turbulenta para transportar as partículas, a qual está relacionada ao número de Reynolds, de modo que maiores velocidades aumentam a capacidade de alcance das correntes.

c) GLADSTONE, PHILLIPS e SPARKS (1998).

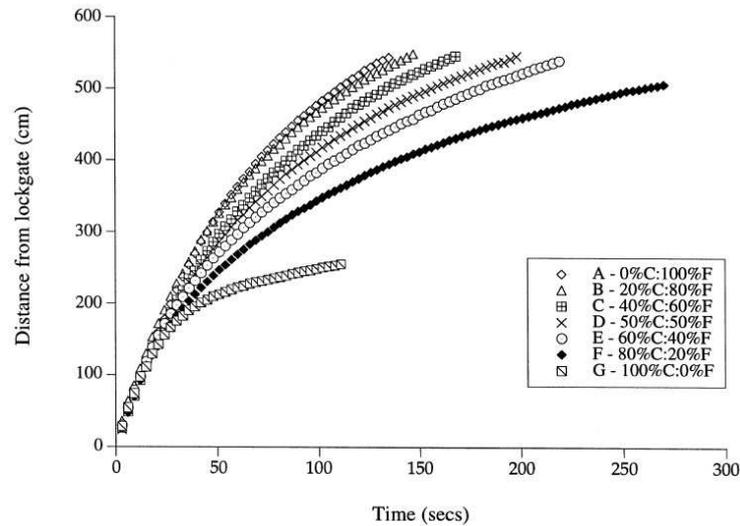
Trabalho semelhante ao estudo realizado por Mulder e Alexander (2002) foi publicado por Gladstone *et al.* (1998). Eles realizaram, primeiramente, sete experimentos, nos quais foi mantido fixo o volume de material utilizado e foram variadas as proporções de dois diferentes tamanhos de partículas de esferas de carboneto de silício (silicon carbide), que eram de 25  $\mu\text{m}$  e 69  $\mu\text{m}$ , nas proporções 0-100; 20-80; 40-60; 50-50; 60-40; 80-20 e 100-0 %. Destes sete experimentos, no primeiro foi utilizado apenas material fino (25  $\mu\text{m}$  de diâmetro); em cinco deles, foram empregadas diferentes quantidades de material fino e grosso; finalmente, no último, foi usado unicamente material grosso (69  $\mu\text{m}$ ).

Além destes, foram ainda realizados outros três experimentos, cuja composição granulométrica foi de cinco faixas igualmente distribuídas (17, 37, 63 e 105  $\mu\text{m}$ ), sendo o primeiro – que foi chamado de corrente de referência – com concentração de 20 % em massa; o segundo, com concentração de 33 %, sendo o excesso composto por material fino, com diâmetro de 17  $\mu\text{m}$ ; e o terceiro, composto por um excesso de material grosso de diâmetro igual a 105  $\mu\text{m}$ .

Os experimentos foram conduzidos em um canal experimental com 5,5 m de comprimento, 0,2 m de largura e 0,4 m de profundidade. O sistema de injeção utilizado foi do tipo pulso, em que o fluxo era liberado através da abertura de uma comporta montada dentro do canal experimental. Após a liberação da mistura, foram registradas as posições da frente a cada três segundos, permitindo a determinação de sua velocidade de avanço. Com um cilindro amostrador de 54.13  $\text{cm}^2$  de área, foram coletadas amostras dos depósitos em intervalos de 25 cm. A massa de material era dividida pela área do cilindro, para que fosse determinada a espessura de depósito ao longo do tanque. As amostras coletadas também foram processadas por um contador de partículas (Electrozone Particle Counter).

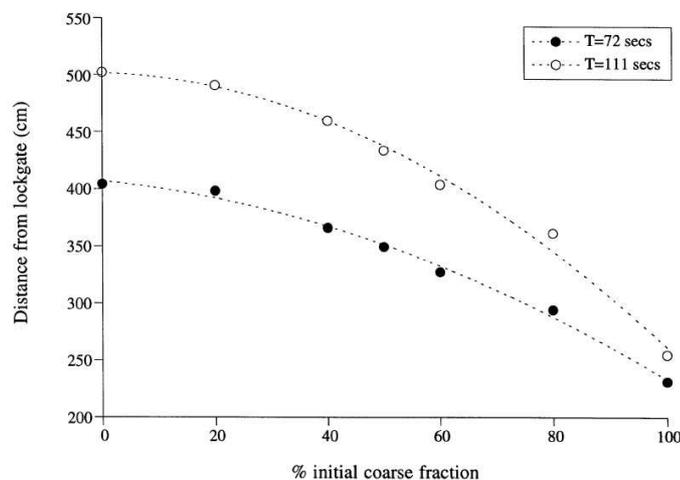
Os resultados dos experimentos simulados mostraram que as correntes com maiores quantidades de material fino atingem maiores distâncias em menor espaço de tempo (Figura 4.17 e 4.18). As correntes com maiores concentrações de material grosso perdem rapidamente a densidade, devido à alta velocidade de sedimentação das partículas, enquanto que as correntes com maior concentração de finos conseguem manter a densidade por maior tempo.

Pode-se notar também, pela figura 4.17, que uma pequena adição de material grosso não causou tanta diferença no comportamento da corrente (ensaio B: 20 % grossos e 80 % finos), mas uma pequena adição de finos à corrente formada por material grosso causou grande diferença no comportamento da corrente (ensaio F: 80 % grossos e 20 % finos).

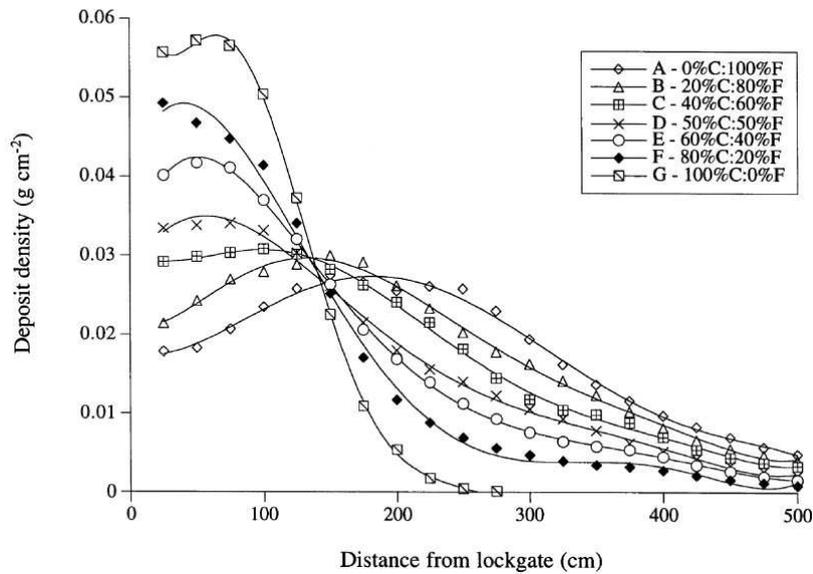


**Figura 4.17: Distância percorrida pelas correntes em função do tempo. (Fonte: Gladstone *et al.*, 1998.)**

Os depósitos formados também apresentaram diferenças marcantes causadas pela constituição da corrente (Figura 4.19). Conforme pode ser observado na figura, a corrente composta exclusivamente por material grosso gerou um depósito com máxima espessura observada antes dos 100 cm de distância. Conforme aumentou a concentração de material, de diâmetro fino, essa máxima espessura foi deslocada para maiores distâncias, sendo que a máxima distância foi atingida pela corrente formada unicamente por material fino.

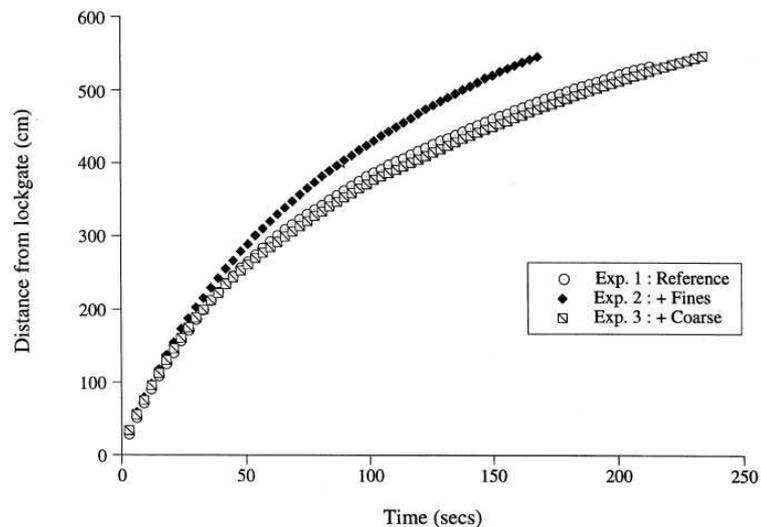


**Figura 4.18: Distância percorrida pelas correntes em função da concentração inicial de material grosso. Valores registrados para dois instantes do experimento: 72 s após o início e 111 s após o início. O material grosso tinha diâmetro de 69  $\mu$ m. (Fonte: Gladstone *et al.*, 1998.)**



**Figura 4.19: Variação da densidade do depósito ao longo do canal.**  
(Fonte: Gladstone *et al.*, 1998.)

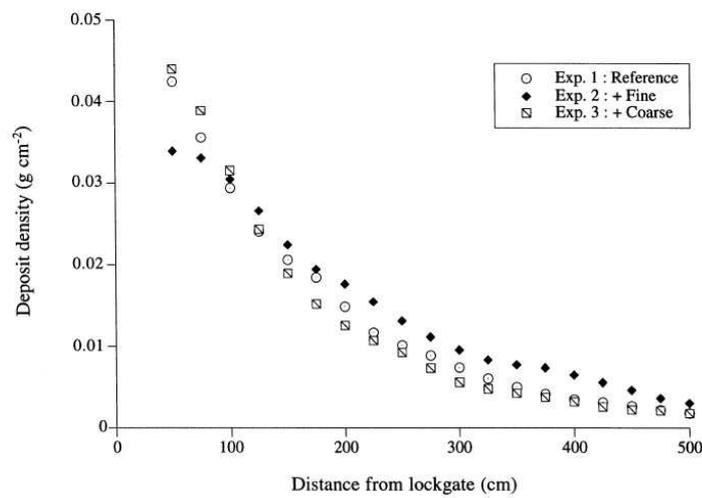
Para os três experimentos, quais sejam, a corrente de referência, o experimento com excesso de material fino, e aquele com excesso de material grosso, pode-se observar que o comportamento da corrente com excesso de material grosso foi semelhante ao da corrente de referência, com relação à máxima distância atingida e ao tempo despendido para atingir esta distância. A corrente com excesso de material fino conseguiu atingir uma distância maior em um menor intervalo de tempo (Figura 4.20).



**Figura 4.20: Distância percorrida pelas correntes em função do tempo de ensaio. Experimento 1: de referência; Experimento 2: com adição de finos; e Experimento 3: com adição de material grosso.** (Fonte: Gladstone *et al.*, 1998.)

Os resultados da distância atingida pela corrente em função do tempo mostraram comportamento semelhante aos apresentados nas figuras 4.17 e 4.19, em que a corrente com

maior quantidade de material fino atingiu maiores distâncias para um mesmo intervalo de tempo (Figura 4.20). Deve-se ressaltar que, nos primeiros sete experimentos, as misturas eram compostas por dois tamanhos diferentes de grãos. Já para estes últimos resultados, foram utilizadas misturas compostas por cinco tamanhos de grãos. Para a densidade de depósito formado, o comportamento também foi semelhante ao da primeira etapa, em que a corrente com material mais grosso teve seu pico mais próximo da saída de fluxo, enquanto que a corrente com material mais fino gerou um depósito mais espesso para as maiores distâncias no canal (Figura 4.21).



**Figura 4.21: Variação da densidade de depósito ao longo do canal. Experimento 1: de referência; Experimento 2: com adição de finos; e Experimento 3: com adição de material grosso. (Fonte: Gladstone *et al.*, 1998.)**

#### 4.7 TRABALHOS ANTERIORES REALIZADOS NO NECOD

Ao longo dos anos, as simulações físicas realizadas no NECOD foram sendo aperfeiçoadas, com o intuito de chegar cada vez mais próximo do que se imagina ser os fenômenos que ocorrem na natureza. Este aperfeiçoamento foi concebido pelo trabalho de alunos de graduação e pós-graduação, juntamente com os professores e colaboradores de diferentes áreas.

Os projetos para construção de canais experimentais, os ensaios para escolha de material sólido a ser utilizado, os experimentos realizados para desenvolvimento de metodologias experimentais, todos são resultados de trabalhos de alunos e bolsistas que passaram pelo NECOD.

Para ilustrar parte dos trabalhos realizados neste Núcleo de Estudos, será feito um breve resumo de alguns estudos que serviram de ponto de partida para este trabalho.

Fabian (2002), utilizando um canal unidirecional de pequeno porte, realizou uma sequência de experimentos simulando correntes conservativas. Ao longo de testes preliminares, determinou alguns parâmetros referentes à corrente em função da mistura salina utilizada. Foram controlados o volume de mistura e a massa específica das correntes. Através de análise visual dos vídeos do experimento (os ensaios foram registrados com câmera filmadora digital, para que fossem determinados parâmetros característicos das correntes simuladas), foram medidas a velocidade e a altura das correntes. Partindo dos dados obtidos no canal de pequeno porte, foram realizados novos experimentos, empregando um canal bidimensional de médio porte.

Com o trabalho, o autor concluiu que, com um acréscimo de 1 % na massa específica da mistura da corrente, a velocidade desta teria um acréscimo de 25 %. Concluiu também que, quanto maior for o volume de mistura injetado dentro do canal, maior será a distância alcançada pelas correntes. Pela análise das velocidades de deslocamento das correntes, o autor observou uma frequência de variação da velocidade em torno da velocidade média, sendo que esta oscilação poderia estar relacionada com a frequência de desprendimento de vórtices na interface superior da corrente.

Como o interesse do Núcleo de pesquisas estava nas simulações de correntes do tipo não conservativas, ou seja, correntes em que a massa específica varia ao longo do seu deslocamento, foram necessários testes com diferentes materiais para que fosse selecionado o tipo de sedimento mais adequado para simular, em escala, as correntes de densidade. Uma série de experimentos foi realizada, inicialmente no canal de pequeno porte, para avaliar diferentes tipos de sedimentos (Manica, 2002), sob o ponto de vista das características hidráulicas e deposicionais dos fluxos gerados. Após a seleção do material que melhor se adequaria, foram também determinadas as características físicas do material.

Neste trabalho (Manica, 2002), foram, inicialmente, simuladas correntes em um canal de pequeno porte, para avaliar as influências das vazões e dos volumes de misturas nas características geométricas e dinâmicas das correntes, bem como nos depósitos formados. De forma semelhante, também foram avaliadas as características geométricas e dinâmicas das correntes em um canal tridimensional com geometria simplificada.

Com os resultados, concluiu-se que a vazão influencia diretamente na velocidade de avanço, na altura da corrente e na distribuição granulométrica dos depósitos, enquanto que a quantidade total de material injetado influencia na magnitude destes parâmetros. Com relação aos sedimentos testados, a areia, o calcário e o carvão foram os materiais que apresentaram as melhores simulações das correntes de densidade não conservativas (Tabela 4.2).

**Tabela 4.2: Faixas granulométricas adequadas para a simulação de correntes de densidade não conservativas (Manica, 2002).**

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

Outro trabalho, desenvolvido no NECOD por Brito (2005), buscou avaliar a influência da escala de simulação nos depósitos gerados por correntes de densidade. Neste trabalho, foram feitas comparações entre os resultados obtidos em um canal de pequeno porte e em outro de grande porte. Foram também comparadas as características geométricas das correntes ensaiadas com as características das correntes de densidade conservativas simuladas por Fabian (2002).

Nas comparações entre os fluxos conservativos e não-conservativos, as correntes não-conservativas apresentaram variações de velocidade mais acentuadas ao longo de sua trajetória. Apresentaram, também – porém em menor grau –, variações quanto à altura média da cabeça da corrente (Figura 4.22).

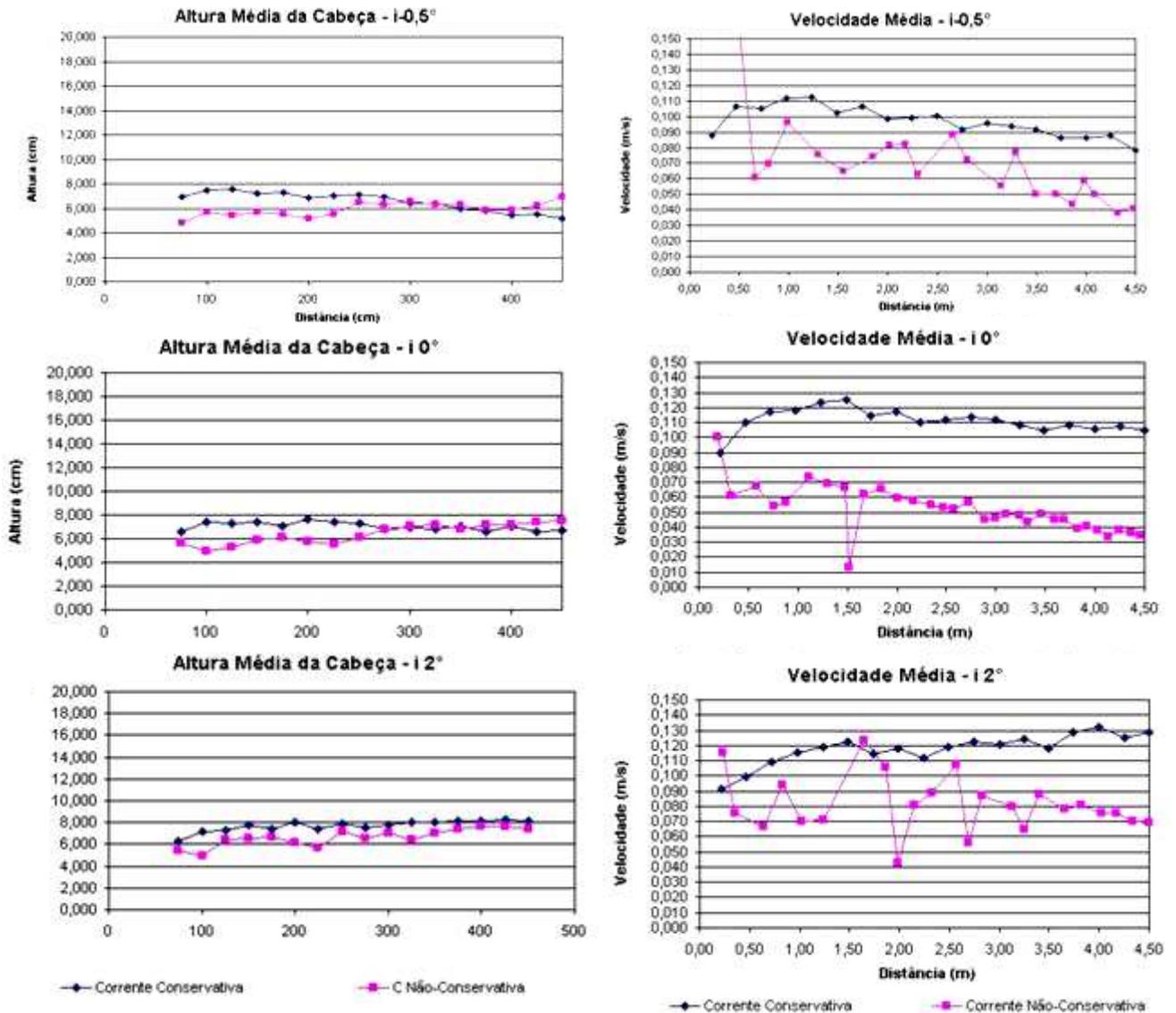
A comparação entre os depósitos gerados nos canais de pequeno e grande porte mostrou muita similaridade (Figura 4.23). Com base na comparação entre os dados dos ensaios das correntes não-conservativas realizadas no canal de pequeno porte e no canal de grande porte, o autor concluiu que parâmetros como número de Froude Densimétrico, massa específica do sedimento e forma de injeção da corrente devem ser mantidas iguais para que o fator de escala não altere os resultados.

Puhl (2007) testou uma série de parâmetros adimensionais, visando estabelecer tendências e generalizar os dados experimentais gerados pelo NECOD. Alguns destes parâmetros serão apresentados e aplicados a este estudo no item 6.5.

Dücker (2007) realizou experimentos onde foram variadas as concentrações de carvão e de sal ou bentonita, de forma a manter a massa específica das misturas em  $1010 \text{ kg.m}^{-3}$ . Foram avaliadas as alterações na altura da cabeça e na altura da corrente e também as alterações nas velocidades das correntes em função das concentrações de carvão e sal/bentonita (figura 4.24). Comparações foram feitas para os depósitos gerados para as diferentes misturas de materiais utilizados.

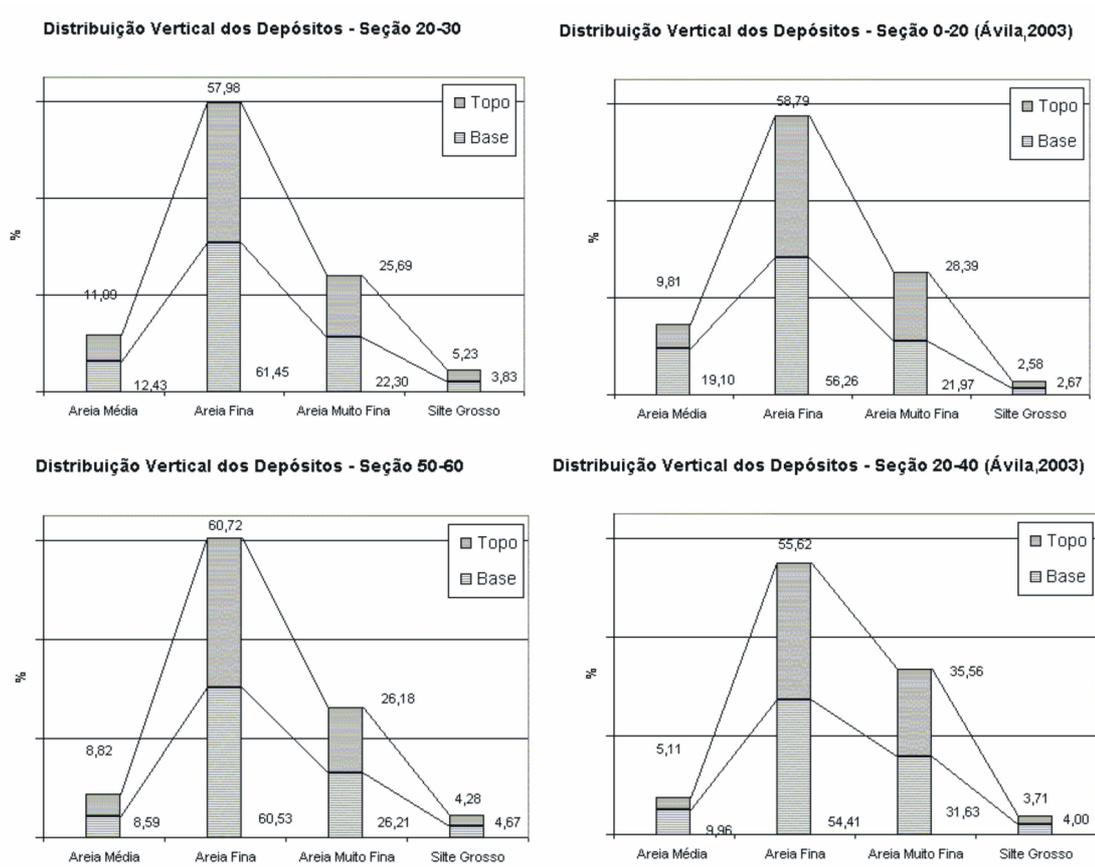
O autor concluiu que as diferentes concentrações de carvão e diferentes proporções de sal e bentonita geram diferenças morfológicas e dinâmicas. Observou que, com o aumento da concentração de material fino, ocorre uma diminuição nas dimensões da corrente. Para as

características dinâmicas, foi observado que o aumento da concentração de carvão faz com que seja maior a desaceleração sofrida pelas correntes, cuja causa é a perda de densidade sofrida pelo fluxo.

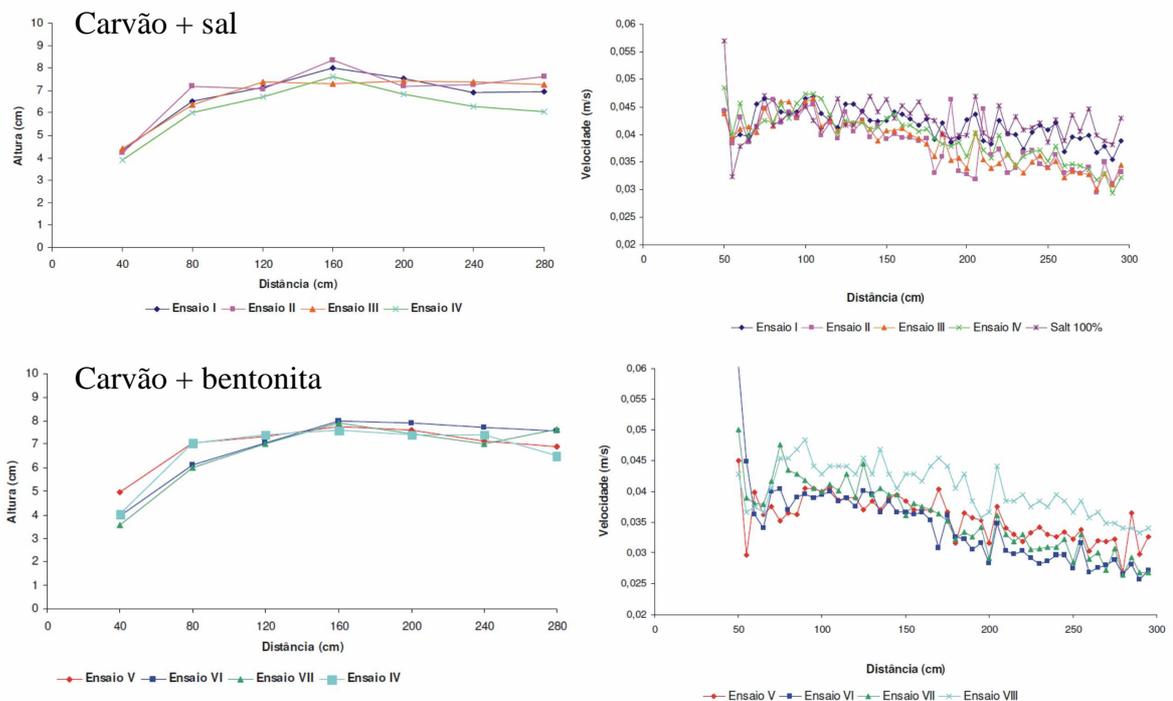


**Figura 4.22: Comparação das velocidades médias e alturas das cabeças das correntes conservativas e não-conservativas para as diferentes declividades testadas. (Fonte: Brito, 2005.)**

Existe uma relação positiva entre a presença de material fino e a desaceleração da corrente: quanto mais material fino está presente na corrente, menor é a desaceleração da corrente, devido ao fato de que o material fino possui uma menor velocidade de queda. As correntes formadas por carvão e sal foram as que mantiveram as maiores velocidades de deslocamento ao longo do canal. Os depósitos formados pelas correntes foram bastante semelhantes, embora se possa observar que, nas correntes compostas por carvão e sal, os materiais de maior diâmetro foram transportados por maiores distâncias.



**Figura 4.23: Comparação entre os depósitos gerados no grande canal, à esquerda, e os depósitos gerados no pequeno canal, à direita. (Fonte: Brito, 2005.)**



**Figura 4.24: Comparações entre altura média da cabeça, à direita, e variações das velocidades das correntes, à esquerda, para as diferentes misturas de carvão e sal/bentonita. (Fonte: Dücker, 2007.)**

O último trabalho a ser citado consiste em estudo de correntes de alta densidade realizado por Manica (2009). Atualmente existem muitas divergências quanto à classificação das correntes de alta densidade. Manica (2009) avaliou fluxos concentrados com diferentes proporções de material coesivo, para propor uma classificação de fluxos de alta densidade em função de suas propriedades reológicas, sua concentração de material coesivo e quanto aos depósitos formados. Para as simulações, foram utilizados dois materiais distintos: microesferas de vidro (ballotini) e caolin, em diferentes concentrações e diferentes proporções para ambos os materiais.

Foram criados três grupos distintos em relação ao material que compunha as correntes: não-coesivos, misto e coesivo. As concentrações de sedimentos empregadas foram: 2,5; 5; 10; 15; 20; 25; e 30 por cento em volume. Para a concentração de 20 %, foram empregadas diferentes proporções de ballotini e caolin: 0:100, 10:90, 75:25, 50:50, 25:75, 90:10, 0:100. Com os resultados deste trabalho, o autor apresentou uma proposta para a classificação das correntes de turbidez de alta densidade em função do percentual de argila e da concentração volumétrica (Figura 4.25).

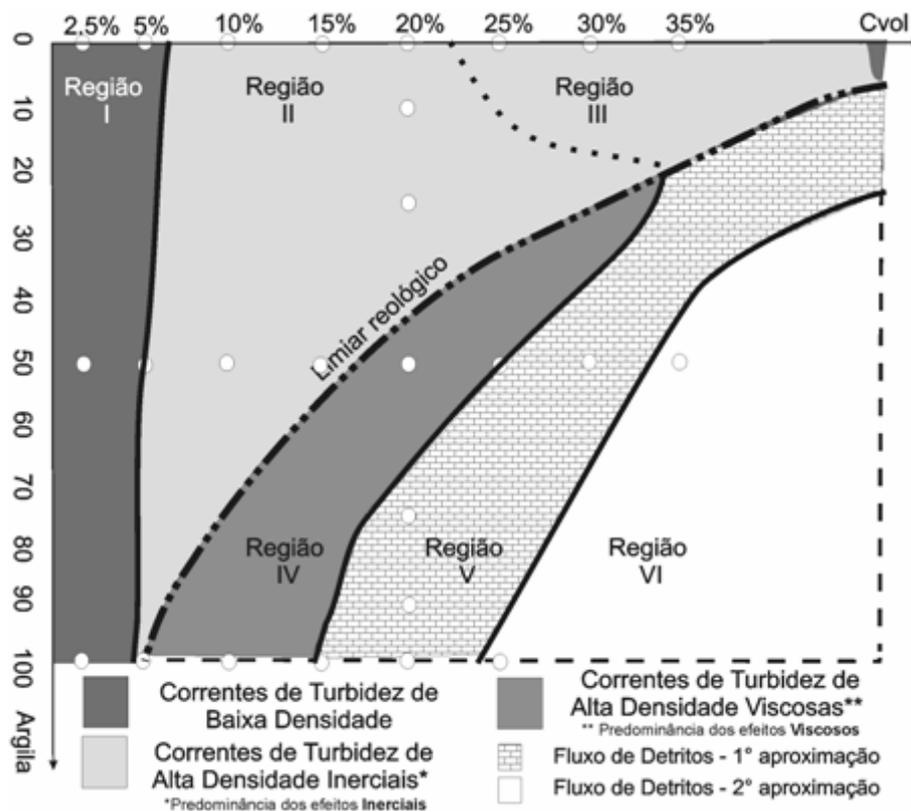


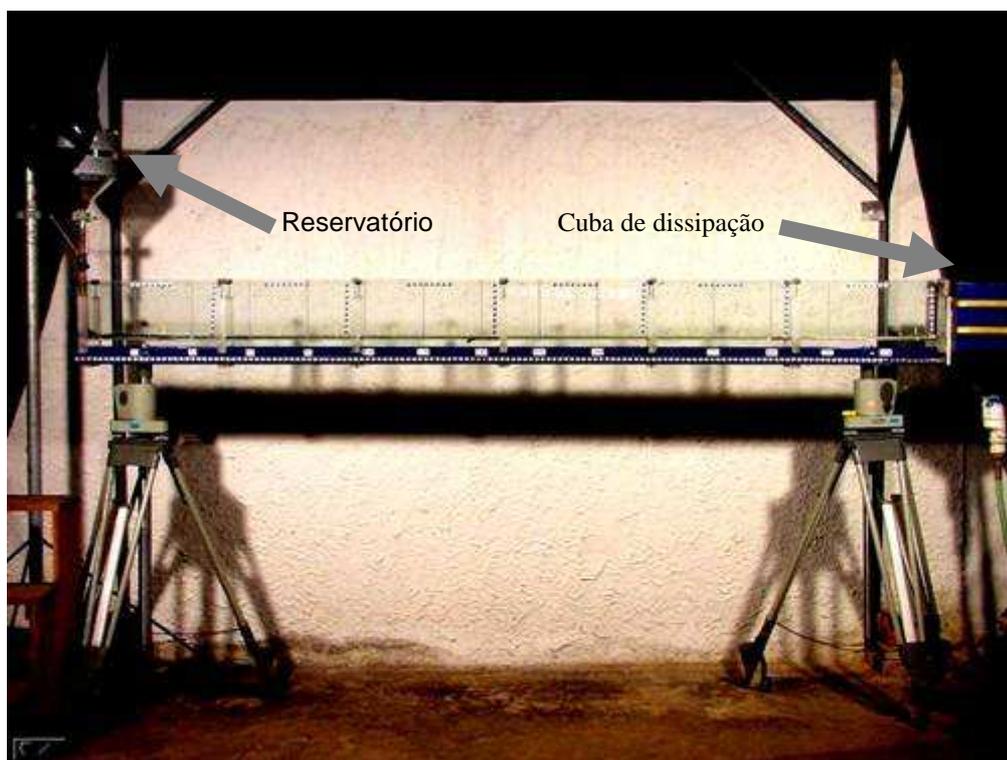
Figura 4.25: Classificação das correntes de turbidez de alta densidade proposta por Manica (2009). (Fonte: Manica, 2009.)

## 5 MATERIAIS E METODOLOGIA

### 5.1 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados em Canal Unidirecional de Pequeno Porte (CUPP), com 300 cm de comprimento, 14,5 cm de largura e 20 cm de altura. O canal foi construído em vidro e policarbonato, permitindo assim uma boa visualização dos experimentos, e está montado sobre dois apoios do tipo tripé, que permitem o ajuste da declividade.

O sistema de alimentação é constituído por um reservatório cilíndrico com terminação de forma cônica (funil), com capacidade para 10 L. Na canalização de saída do reservatório, existe um registro, que permite ajustar a vazão injetada, em seguida, tem-se 40 cm de cano de PVC e um difusor, o qual distribui a vazão de forma homogênea em toda a largura do canal. À jusante do canal, há uma cuba de dissipação construída em metal, por onde é feito o seu esvaziamento (Figura 5.1).



**Figura 5.1: Canal Unidirecional de Pequeno Porte (CUPP) utilizado para a realização dos experimentos.**

Um sistema de iluminação indireta foi concebido de forma a propiciar um melhor contraste da corrente com o fluido ambiente e, assim, favorecer a visualização dos ensaios. Para tanto, na parede posterior do canal, foi colado um filme plástico de cor branca, fazendo com que a luz incidisse sobre o canal de forma difusa. Em calhas plásticas de 3 m de comprimento e 20 cm de altura, com o interior revestido com papel alumínio, foram colocadas duas lâmpadas fluorescentes de 1,5 m de comprimento.

## 5.2 EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS

Vários equipamentos e instrumentos foram utilizados no preparo dos ensaios, na coleta e no registro das características hidráulicas, morfológicas e sedimentológicas das correntes geradas, os quais passam a serem descritos brevemente.

### 5.2.1 Sistema de mistura

Para todos os ensaios, foram preparadas misturas salinas em diferentes concentrações, as quais constituíam o fluido ambiente disposto dentro do canal experimental. Para que as misturas ficassem homogêneas, com o sal totalmente diluído, foi utilizado um sistema de recirculação. Uma bomba simples de máquina de lavar foi conectada a duas mangueiras, uma em cada extremidade do canal, sendo que a mangueira de entrada captava água da cuba de dissipação, enquanto que a mangueira da saída injetava a água na parte mais a montante do canal experimental, fazendo com que a água circulasse dentro do canal. A bomba era acionada por um período de trinta a sessenta minutos, até que todo o fluido ambiente estivesse homogêneo. O tempo que a bomba permanecia ligada dependia da quantidade de sal a ser dissolvida.

### 5.2.2 Câmeras filmadoras

Em todos os experimentos, foram utilizadas duas câmeras filmadoras da marca SONY. As duas obtinham imagens simultâneas das correntes, porém em ângulos diferentes. As duas câmeras possuem uma taxa de aquisição de 29,97 frames/segundo, zoom ótico de 25 X, sistema digital de gravação em fitas de 8 mm e resolução de 8 Megapixel (720 x 480). Os modelos são DCR-TRV110 e DCR-TRV120 (Figura 5.2).

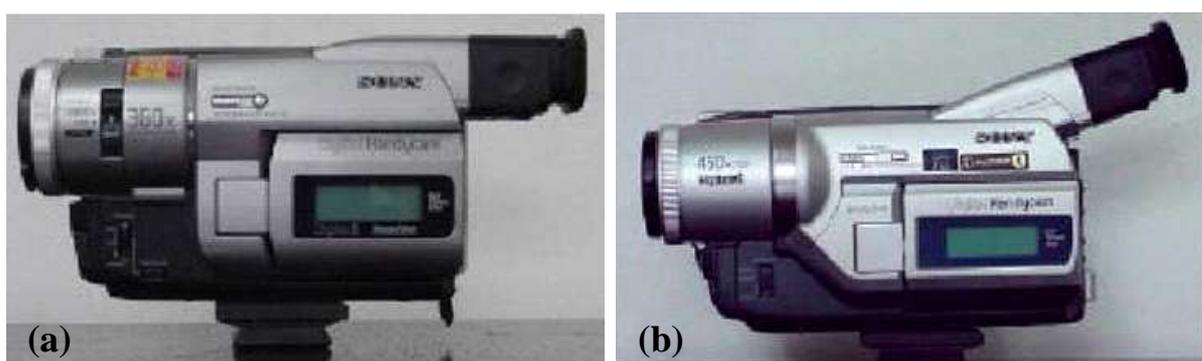


Figura 5.2: (a) Filmadora DCR-TRV 110 e (b) DCR-TRV 120.

### 5.2.3 Cronômetro

Para medir o tempo de esvaziamento do reservatório e posterior determinação da vazão média, foi utilizado um cronômetro digital. O cronômetro também foi utilizado em

alguns testes adicionais para calibração da vazão e variação da concentração de sedimentos injetada durante os experimentos.

#### **5.2.4 Densímetro e Termômetro**

A composição do fluido ambiente era obtida pela adição de sal à água que era colocada dentro do canal. O sal era adicionado e dissolvido lentamente até que se obtivesse a densidade necessária. Durante a dissolução de sal ao fluido ambiente, a densidade da mistura era medida com a utilização de um densímetro do tipo flutuante com escala de leitura entre 1,000 à 1,050.

O termômetro à álcool da Incoterm modelo L-054/07 com escala de leitura entre -10 à 110°C, era utilizado para determinar as temperaturas do fluido ambiente e do fluido da corrente.

Através dos valores de temperatura e de concentração volumétrica, é possível determinar a viscosidade cinemática da água da mistura, dentre outras grandezas dela dependentes. Os valores de densidade e de viscosidade da água pura foram obtidos através de tabelas, com a utilização da temperatura da água.

#### **5.2.5 Balança**

A balança da marca Marte, modelo AS5500C e precisão de 0,1g foi utilizada em diversas etapas dos experimentos. A primeira delas foi a preparação dos ensaios, momento no qual eram pesadas as quantidades de carvão a serem adicionadas na mistura. A balança também foi uma ferramenta importante para a avaliação das espessuras de depósito. Todo o material que se depositava dentro do canal era coletado, colocado dentro de copos de Beaker e, posteriormente, seco em estufa. Após seco, era determinado o peso do material que ficava depositado ao longo do fundo do canal, sendo assim determinadas as espessuras dos depósitos gerados.

#### **5.2.6 Estufa**

O material que ficava retido no canal, após cada ensaio, era coletado e colocado dentro de copos de Beakers, os quais eram colocados na estufa, para que fosse removido o restante da água. O processo de secagem do material coletado demorava até dois dias. A balança utilizada era da indústria FANEM, modelo 311 CG.

### 5.2.7 Analisador de Partículas

Para analisar o material depositado no canal, foi utilizado um analisador de partículas a laser modelo Cilas 1180 (Figura 5.3). Este equipamento foi utilizado para a análise granulométrica de todas as amostras coletadas nos experimentos da primeira etapa. Ao todo, foram analisadas quase duzentas amostras, gerando-se as curvas de distribuições granulométricas e também fotografias das partículas do material que foi utilizado nos ensaios.



**Figura 5.3: Imagem do laboratório de análises granulométricas onde está instalado o Analisador de Partículas a Laser.**

Para a análise do material com este equipamento, deve-se, inicialmente, colocar uma pequena quantidade de material em uma cuba com água. A umidade da amostra não afeta o resultado, podendo ser utilizadas amostras secas ou mesmo saturadas em água, de tal forma que se pode dispensar a secagem prévia da amostra. Após ser colocada a amostra na cuba do equipamento, o material é homogeneizado através de um agitador mecânico.

No caso de amostras com alto teor de argila, material muito fino ou material muito coesivo, pode-se utilizar o ultra-som para fragmentar os agregados. Após a homogeneização, a amostra é conduzida por uma bomba até a seção de medição do aparelho. A medição é realizada através da incidência de um feixe de raio laser sobre as partículas de sedimento, sendo o tamanho medido em função da refração ou desvio provocado por elas. A tecnologia do aparelho permite distinguir partículas com tamanhos variando entre 0,04 e 2500  $\mu\text{m}$ .

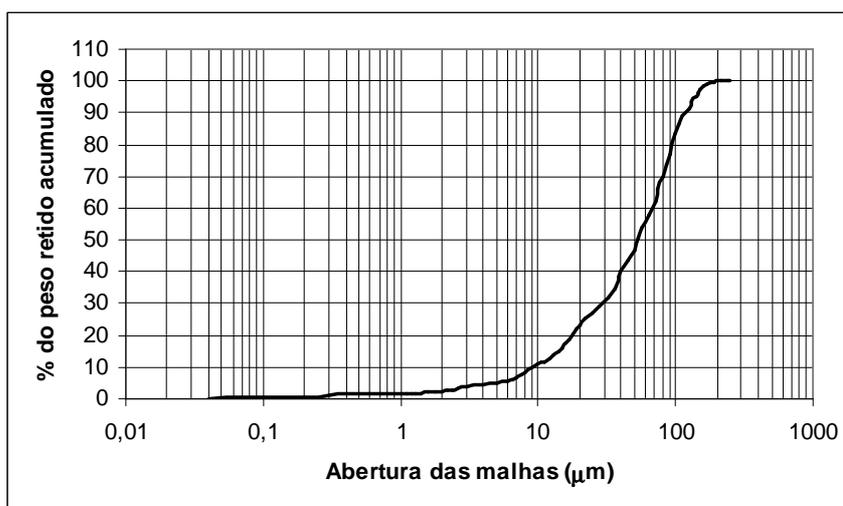
### 5.2.8 Microcomputador

A tabulação dos dados e a análise dos vídeos e dos arquivos gerados pelo analisador de partículas foram feitas em um Microcomputador. Os vídeos dos registros dos ensaios

foram capturados por um microcomputador dotado de uma placa de aquisição de vídeo e as imagens tratadas possuíam uma resolução de 720 x 480 pixels.

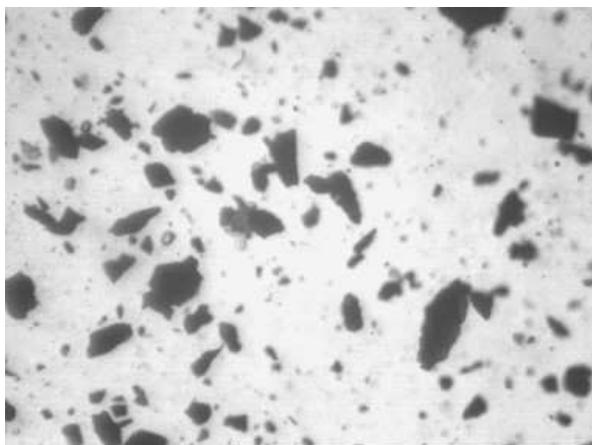
### 5.3 SEDIMENTO EMPREGADO

Nos ensaios, foi utilizado o Carvão Mineral 205, do tipo Cardiff, adquirido junto à empresa Rio Deserto S.A., de Criciúma, Santa Catarina. Com base na distribuição granulométrica obtida pela análise do material (Figura 5.4), pode-se estabelecer os valores característicos, que são:  $D_{10}=10\ \mu\text{m}$ ;  $D_{50}=55\ \mu\text{m}$ ;  $D_{90}=160\ \mu\text{m}$ .



**Figura 5.4:** Curva de distribuição granulométrica do material utilizado como sedimento nos ensaios experimentais.

A massa específica do material é de  $1190\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  e sua forma é classificada como semi-angular e semi-arredondada (Figura 5.5). A velocidade de queda do tamanho médio das partículas é de  $0,001\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (Manica, 2002).



**Figura 5.5:** Imagem do carvão 205 utilizado nos experimentos. Imagem obtida pelo Analisador de Partículas a Laser.

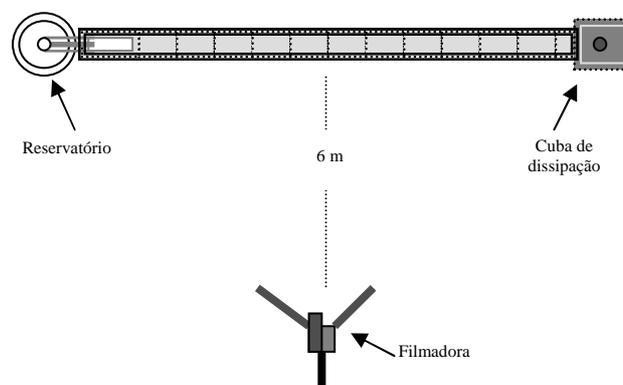
## 5.4 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

### 5.4.1 Preparo dos ensaios

Os ensaios começavam a ser preparados com a colocação de água dentro do canal experimental, o que era feito com a utilização de uma mangueira comum de jardim. Neste mesmo momento eram armazenados, em um balde, aproximadamente, 10 litros de água para o preparo da mistura para a corrente. O armazenamento prévio da água da mistura tinha o propósito de evitar grandes variações térmicas entre mistura e fluido ambiente, uma vez que, com o passar das horas, a água armazenada nas tubulações acabava aquecendo, tendo como consequência uma variação térmica de no mínimo  $3^{\circ}\text{C}$  entre a água do reservatório e a água do canal.

Após o canal estar cheio com água, o que correspondia a uma lâmina de água de 18 cm, era iniciado o processo de mistura de sal para a composição da densidade do fluido ambiente, a qual variou de 1010 a  $1030\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Nesta fase, era acrescentado sal na água até que se obtivesse a concentração e a massa específica necessárias. Para facilitar a diluição do sal, foi utilizada uma bomba, que fazia circular a água dentro do canal, até que todo o sal fosse dissolvido e a mistura estivesse totalmente homogênea. O processo de diluição de sal, para alguns experimentos, demorou mais de uma hora para ser finalizado. Este tempo dependia da quantidade de sal a ser acrescentada. Durante o processo de adição de sal, a densidade da água era constantemente controlada com o densímetro.

Após a etapa de preparação do fluido ambiente, era feito o posicionamento da câmera de vídeo. A câmera registrava o desenvolvimento da corrente dentro do canal e estava sempre posicionada a, aproximadamente, 6 m do canal (Figura 5.6). Para garantir que a posição da câmera filmadora seria sempre a mesma, foram feitas marcas com tinta spray no chão. A câmera era colocada sempre a uma mesma altura do chão, para que se tivesse o mesmo ângulo de visão para todos os ensaios.



**Figura 5.6:** Esquema do posicionamento da câmera filmadora. A escala da distância entre a câmera filmadora e o canal experimental está distorcida.

#### 5.4.2 Preparo da mistura

Após o posicionamento da câmera de vídeo, era preparada a mistura de água e carvão a ser injetada no escoamento. Inicialmente, era medida a temperatura da água que estava previamente armazenada no balde com capacidade de 10 litros. Para que se calculasse a quantidade de sedimento a ser adicionada à água que compunha o fluido da corrente, era necessário saber a temperatura em que a água se encontrava, pois a massa específica da mistura varia com a temperatura da água e com a quantidade de sedimento adicionada. Sabendo-se a temperatura da água, era possível calcular a quantidade de sedimentos a ser misturada através da seguinte expressão (1):

$$\rho_c = \rho + [\rho_s - \rho] \times C_V \quad (5.1)$$

Sendo:

$\rho_c$  = massa específica da mistura desejada ( $\text{kg.m}^{-3}$ );

$\rho$  = massa específica da água a uma determinada temperatura ( $\text{kg.m}^{-3}$ );

$\rho_s$  = massa específica do carvão, igual a  $1190 \text{ kg.m}^{-3}$ ;

$C_V$  = concentração volumétrica (%).

O material era pesado e depois colocado em um balde graduado com capacidade de 10 litros. Era acrescentada água até completar o volume de 5 litros de mistura. A mistura era então colocada no reservatório, que fazia a alimentação sólida, apenas instantes antes do início do ensaio.

A viscosidade dinâmica das misturas de água e sedimento foi determinada através de duas leis distintas, expressas em função da concentração volumétrica, conforme consta em Coussot, 1997:

- Para  $2\% < C_V < 10\%$ :

$$\mu_c = \mu(1 + 2,5\phi + 7,6\phi^2) \quad (5.2)$$

- Para  $C_V > 10\%$ :

$$\mu_c = \mu \left[ 1 + \frac{0,75}{\frac{\phi_m}{\phi} - 1} \right]^2 \quad (5.3)$$

Sendo:

$\mu_c$  = viscosidade dinâmica da mistura água + sedimentos ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ );

$$\phi = \frac{C_v}{100};$$

$\phi_m = 0,605$ ;

$\mu$  = viscosidade dinâmica da água pura à uma determinada temperatura ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

A determinação da viscosidade cinemática da mistura de água e sedimentos é obtida pela expressão:

$$v_c = \frac{\mu_c}{\rho_c} \quad (5.4)$$

Sendo:

$v_c$  = viscosidade cinemática da mistura da água + sedimentos ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ );

$\rho_c$  = massa específica da mistura de água + sedimentos ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

### 5.4.3 Desenvolvimento dos ensaios

Alguns instantes antes de começar o ensaio propriamente dito, era ligada a câmera filmadora. A saída do reservatório era fechada com um tampão do tipo rolha. A rolha era removida apenas quando do início do ensaio, liberando a água para a formação da corrente. O ensaio começava a valer a partir do momento em que era removido o tampão do fundo do reservatório de alimentação sólida e, nesse momento, era também disparado o cronômetro.

O cronômetro era parado quando todo o volume de água do reservatório era esgotado. O controle da vazão era obtido por um registro situado logo abaixo da saída do reservatório, embora este registro plástico do tipo esfera permitisse apenas um ajuste bastante simples e pouco preciso da vazão.

Durante todo o tempo de ensaio, era mantida fixa a posição da câmera filmadora. Através de uma claquete, na qual eram inscritas as características dos ensaios, as sequências de imagens obtidas eram identificadas para posterior tratamento. As informações mostradas na claquete eram:

- Nome do ensaio: C1, C2, C3,....;
- Massa específica do ambiente ( $\rho_a$ ): 1010, 1015, 1020, 1025 e 1030  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;
- Massa específica da mistura ( $\rho_c$ ): 1005, 1010  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,....;
- Temperatura do fluido ambiente;

- Temperatura do fluido da corrente;
- Data

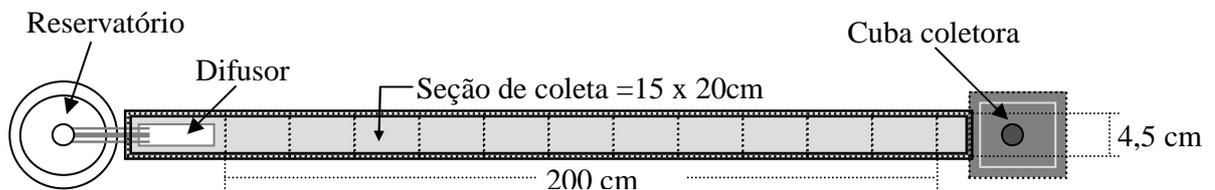
A filmagem era interrompida quando a corrente terminava de percorrer todo o comprimento do canal. Os ensaios mais longos tiveram uma duração inferior a cinco minutos.

Após o final do ensaio, a água ficava parada por no mínimo seis horas, para que todo o material que estivesse em suspensão pudesse se depositar no fundo do canal. Depois era iniciado o processo de esvaziamento do canal, que era feito muito lentamente, demorando cerca de um dia para que fosse concluído. Em seguida, iniciava-se o processo de secagem do depósito, que era acelerado com o uso de dois holofotes, que o aqueciam. Para os ensaios com maiores concentrações de sedimentos, a secagem para coleta demorou mais de três dias.

#### 5.4.4 Tratamento dos dados coletados

##### 5.4.4.1 Análise dos depósitos

Após a secagem do depósito, procedia-se à coleta do material retido dentro do canal. Para a coleta, foi feita uma marcação no canal, que permitia fatiar o depósito em partes iguais. A coleta era iniciada pelo material depositado mais a jusante da saída do difusor, por ser o material mais fino e, conseqüentemente, estar mais seco. Ao todo, existiam onze seções de amostragem, sendo que, de cada seção, era coletado todo o material depositado. As dimensões das seções, bem como a ordem de coleta, pode ser observada na figura 5.7.

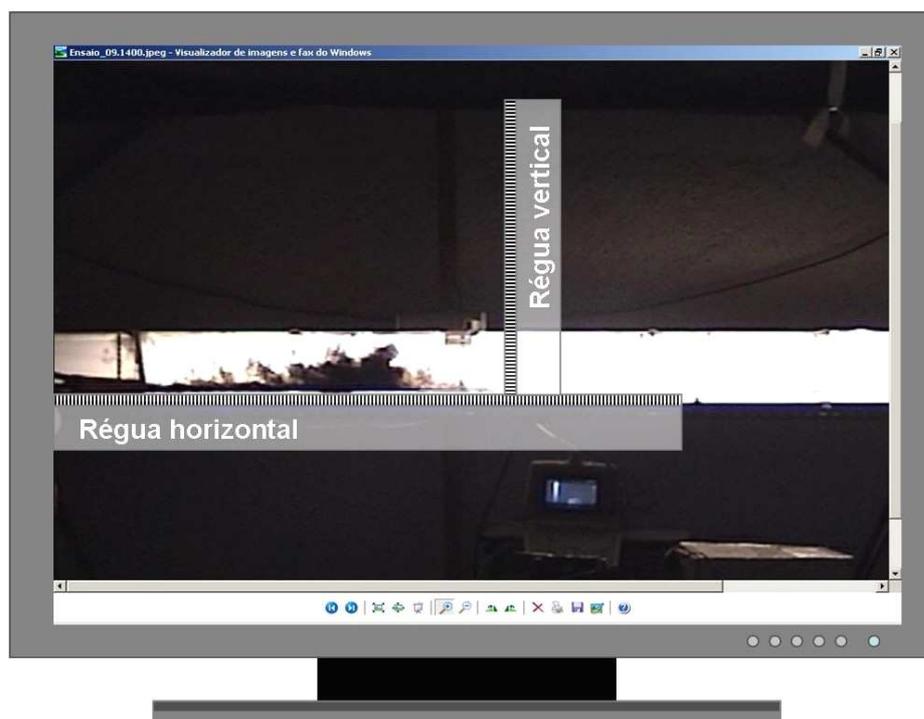


**Figura 5.7: Esquema ilustrando as seções de coleta do depósito; vista superior do canal experimental.**

##### 5.4.4.2 Análise dos vídeos

Os filmes eram gravados em formato digital, em fitas de 8mm. Através do aplicativo Adobe Premier<sup>®</sup>, eram capturados os trechos das fitas que seriam analisados. Com um outro aplicativo gratuito, o VirtualDub<sup>®</sup>, os trechos de vídeos salvos eram transformados em sequências de imagens, quadro a quadro. As imagens eram visualizadas individualmente com o Visualizador de Imagens do Windows.

Em um monitor de tela plana (LCD), foram instaladas duas régua graduadas, as quais foram utilizadas para a determinação do avanço horizontal da corrente e a variação das alturas das correntes hiperpicnal e hipopicnal (Figura 5.8). As régua utilizadas, graduadas em centímetros, possuíam uma precisão de 0,001 m (1 mm).



**Figura 5.8: Ilustração do posicionamento das régua para medida da velocidade de avanço da cabeça e determinação das alturas das correntes hiperpicnal e hipopicnal.**

A conversão das medidas feitas a partir do vídeo para a escala de simulação (canal) foi realizada através de escalas de referência, coladas no canal experimental, que serviram para transformar as dimensões medidas com a régua fixada no monitor para uma escala real, em metros e centímetros.

A análise dos vídeos permitiu a determinação das alturas das cabeças das correntes ao longo de seu deslocamento, das variações da velocidade das cabeças das correntes, das distâncias máximas percorridas pelas correntes hiperpicnais, dos pontos de intumescimento e dos pontos de surgimento das correntes hipopicnais (Figura 5.9).

Para este estudo, foi denominado como ponto de intumescimento a região da corrente onde era iniciado o processo de expansão. O ponto de intumescimento compreendia um determinado comprimento da corrente, esse comprimento variava muito diretamente com a concentração de sedimentos utilizada. As correntes com baixa concentração volumétrica de sedimentos desenvolveram uma maior faixa de expansão da corrente enquanto que as com concentrações mais elevadas apresentaram uma faixa mais curta de expansão.

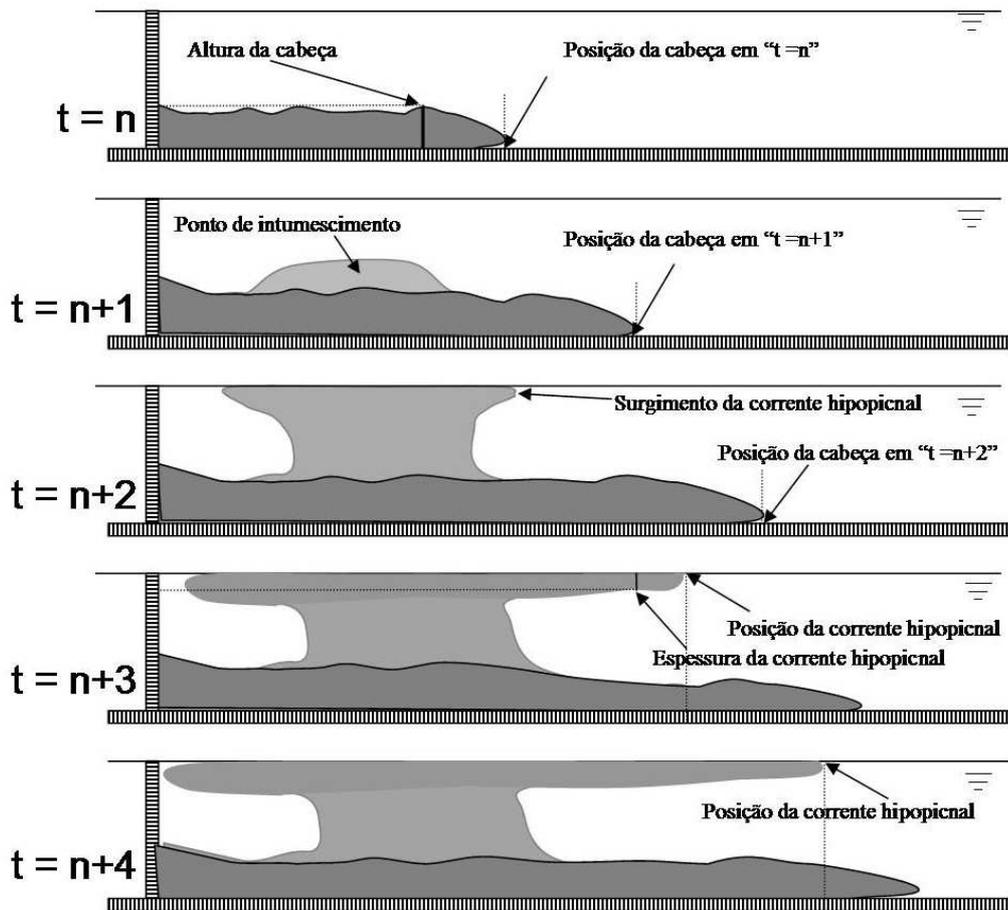


Figura 5.9: Esquema ilustrando a evolução da corrente e os pontos observados durante as análises dos vídeos.

### 5.5 PLANO DE ENSAIOS

Os ensaios que compõem este estudo foram divididos em quatro etapas. Na primeira etapa, foram variadas as concentrações de sedimentos das correntes e as concentrações de sal no fluido ambiente. O objetivo, desta primeira etapa de ensaios, foi identificar quais as concentrações mínimas de sedimentos necessárias para gerar correntes do tipo hiperpical, para as diferentes massas específicas de fluido ambiente utilizadas.

Como os resultados mostraram que era possível gerar uma corrente hiperpical mesmo injetando uma mistura com massa específica menor que a do fluido ambiente (corpo receptor), foram formuladas algumas hipóteses que poderiam explicar o ocorrido.

A primeira hipótese estava relacionada com a vazão e a velocidade de injeção, ou seja, a corrente poderia estar sendo injetada na forma de jato. Outra hipótese, estava relacionada com a quantidade de partículas em suspensão, de tal modo que, quanto maior o número de partículas em suspensão, maior seria a capacidade de manter a integridade da corrente, o que

explicaria como correntes com densidade menor que a do ambiente conseguiram se manter hiperpicnais.

A última hipótese previa que a água presente na mistura da corrente poderia estar sendo perdida para o ambiente e, desta forma, a concentração da corrente estaria sendo alterada ao longo de seu deslocamento. Com base nos resultados da primeira etapa de experimentos e nas hipóteses levantadas, foram desenvolvidas as etapas subsequentes.

Na segunda etapa, foram ensaiadas duas vazões e duas velocidades de injeção, com o intuito de testar a influência da injeção no tipo de corrente formada. A formação da corrente hiperpicnal poderia estar relacionada com a vazão ou com a velocidade de injeção.

Para os experimentos da terceira etapa, separou-se o carvão 205 em cinco frações distintas. Nesta etapa, as concentrações volumétricas de sedimentos e, também, a massa específica do fluido ambiente foram mantidas constantes nos experimentos.

Por fim, na quarta etapa, foi investigado o escape de fluido intersticial das correntes geradas. Uma das hipóteses para explicar o observado na primeira etapa era a alteração da concentração da corrente ao longo de seu deslocamento: a corrente poderia estar perdendo fluido intersticial para o fluido ambiente, causando, assim, um aumento da concentração de sedimentos da corrente e, conseqüentemente, um aumento de sua massa específica.

#### 5.5.1 **Plano de ensaios da primeira etapa:** variações de concentrações de sedimentos e variações de massas específicas do ambiente.

Na primeira etapa, foi realizado um total de dezesseis ensaios, variando a concentração salina no fluido ambiente (corpo receptor) e a concentração de sedimentos presente nas correntes. O fluido ambiente era composto por uma mistura de água e sal, enquanto que a corrente era composta por mistura de água e carvão.

Durante os ensaios, foram realizadas filmagens da evolução das correntes. As filmagens permitiram a determinação das velocidades de avanço e da altura da cabeça da corrente simulada, bem como a determinação dos pontos de intumescimento e das distâncias em que surgiram as correntes hipopicnais. Também foram registrados os tempos de duração das injeções, para que se calculasse as vazões de injeção e as velocidades médias das correntes.

Foram também analisados os depósitos gerados pelas correntes: o material depositado foi coletado, seco em estufa e, posteriormente, pesado. Também foram feitas as

determinações dos tamanhos das partículas. Ao final de cada ensaio, foi determinada a distância máxima que a corrente hiperpicnal alcançou.

**Tabela 5.1: Plano de ensaios da primeira etapa do estudo. Massas específicas do ambiente ( $\rho_a$ ) e da corrente ( $\rho_c$ ).**

<b>Ensaio</b>	$\rho_a$ kg.m <sup>-3</sup>	$\rho_c$ kg.m <sup>-3</sup>
C1	1010	1002
C2	1010	1005
C3	1010	1007
C4	1010	1012
C5	1010	1016
C6	1010	1021
C7	1010	1026
C8	1015	1010
C9	1015	1015
C10	1015	1017
C11	1015	1021
C12	1015	1026
C13	1020	1015
C14	1020	1020
C15	1025	1020
C16	1030	1025

### 5.5.2 Plano de ensaios da segunda etapa: influência da vazão e da velocidade de injeção no tipo de corrente formada.

Na segunda etapa, foram testadas duas vazões diferentes e duas velocidades de injeção diferentes. Para alterar a velocidade de injeção, foi reduzida a altura de saída do difusor.

A motivação para esta etapa de ensaios surgiu com os resultados da etapa anterior. Como pode ser observado na tabela 5.1, mesmo com massas específicas da corrente menores que a massa específica do corpo receptor, foi possível criar correntes do tipo hiperpicnal. Com estes resultados, surgiu a hipótese de que a corrente poderia estar sendo lançada com uma vazão muito alta e, por isso, as correntes do tipo hiperpicnal conseguiam se deslocar por maiores distâncias e também ocorreria um retardo na formação das plumas hipopicnais.

Para verificar esta hipótese, foram realizados quatro experimentos. Nos dois primeiros, para uma mesma massa específica do corpo receptor e uma mesma massa específica da corrente, foram empregadas duas vazões, uma mais baixa e outra mais alta. Nos dois outros experimentos, também com as mesmas massas específicas de corpo receptor e de corrente, foram feitas alterações na altura da área efetiva do bocal do difusor.

Os ensaios foram registrados com câmera de vídeo e, posteriormente, foram avaliadas as geometrias das correntes geradas. Foram registrados, com um cronômetro, os tempos de duração da injeção das correntes, o que permitiu a determinação da vazão média e da velocidade de injeção dos fluxos gerados.

O cálculo da vazão média de injeção e da velocidade média da corrente foi realizado através das seguintes expressões:

$$Q = \frac{\text{Volume}_{\text{injetado}}}{\text{tempo}} \quad (5.5)$$

$$V = \frac{Q}{A_{\text{bocal}}} \quad (5.6)$$

Sendo:

$Q$  – vazão média de injeção [ $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ ] no caso 5 litros [l];

$\text{Volume}_{\text{injetado}}$  – volume total de mistura injetado, no caso, 5 litros [l];

$\text{tempo}$  – tempo necessário para esvaziamento do reservatório [min];

$V$  – velocidade média da corrente [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ];

$A_{\text{bocal}}$  – área da saída do bocal do difusor [ $\text{m}^2$ ].

As massas específicas do fluido ambiente e da mistura de sedimentos utilizados, bem como as vazões e as velocidades de injeção, estão apresentadas na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2: Plano de ensaios da segunda etapa. Massas específicas do fluido ambiente ( $\rho_a$ ) e da corrente ( $\rho_c$ ) e as vazões ( $Q$ ) e velocidades de injeção ( $V^*$ ) testadas.**

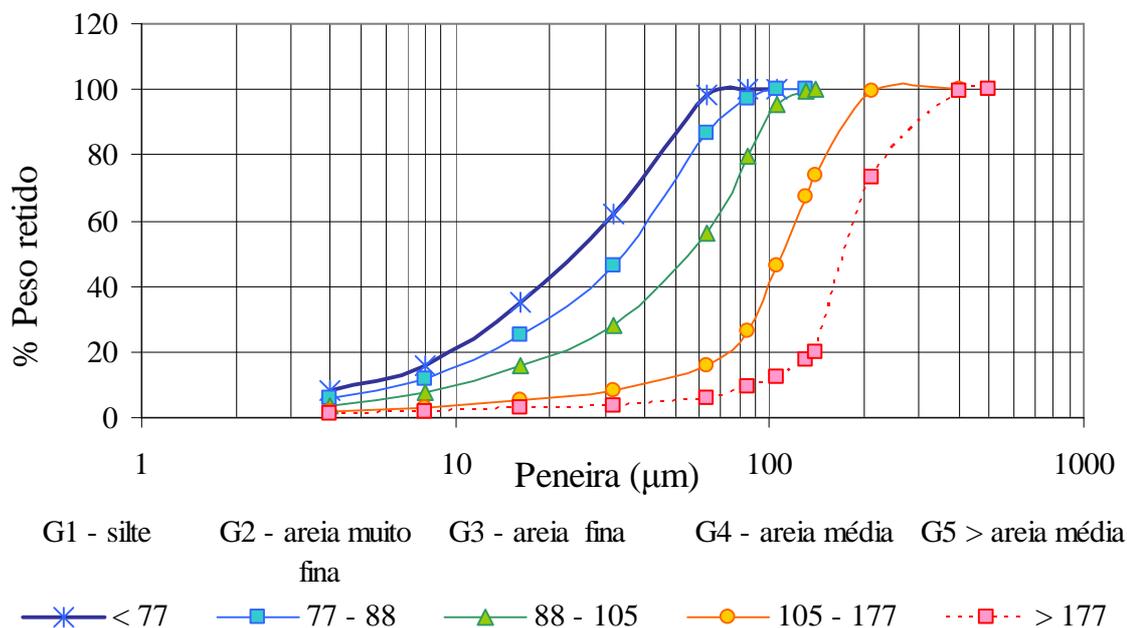
Ensaio	$\rho_a$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\rho_c$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$Q$ $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$	$V^*$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Q1	1012	1005	6,82	0,067
Q2	1012	1005	9,68	0,095
V1	1022	1015	4,84	0,048
V2	1022	1015	4,55	0,090

\*Velocidade com que a corrente sai do difusor.

### 5.5.3 Plano de ensaios da terceira etapa: influência da granulometria na formação das correntes hiperpicnais.

Foram testados, separadamente, os efeitos da granulometria do material no tipo de corrente gerado. O material foi dividido em diferentes faixas granulométricas, que são: G1: grãos com diâmetros menores que a peneira com 77  $\mu\text{m}$ ; G2: grãos com diâmetro entre as peneiras com 77 e 88  $\mu\text{m}$ ; G3: grãos com diâmetro entre as peneiras com 88 e 105  $\mu\text{m}$ ; G4:

grãos entre as peneiras com 105 e 177  $\mu\text{m}$  e G5: grãos com diâmetro maior que a peneira com 177  $\mu\text{m}$ . As curvas granulométricas destes materiais são apresentadas na figura 5.10.



**Figura 5.10: Curva granulométrica dos sedimentos utilizados na terceira etapa.**

As massas específicas do fluido ambiente e da mistura injetada foram mantidas iguais para todos os ensaios realizados nesta etapa. O interesse era avaliar qual tipo de corrente seria formada com as diferentes faixas granulométricas de material utilizado.

Os experimentos foram registrados com câmeras filmadoras e as imagens foram, posteriormente, avaliadas para a determinação das velocidades de avanço e da altura da cabeça da corrente hiperpícnal, bem como para a determinação do ponto de surgimento da corrente hipopícnal. Foram também medidos os tempos totais de injeção das correntes para o cálculo da vazão e da velocidade média de injeção das correntes.

As massas específicas do fluido ambiente e da corrente injetada, empregada em cada um dos cinco ensaios, bem como os tamanhos dos sedimentos empregados e seus respectivos valores de  $D_{50}$  estão apresentados na tabela 5.3.

**Tabela 5.3: Diferentes faixas granulométricas testadas, massa específica do ambiente, massa específica da corrente e o tipo de corrente gerado.  $D$  = diâmetro dos grãos.**

Ensaio	Faixas Granulométricas ( $\mu\text{m}$ )	$D_{50}$	$\rho_a$	$\rho_c$
		$\mu\text{m}$	$\text{kg.m}^{-3}$	$\text{kg.m}^{-3}$
G1	$D < 77 \mu\text{m}$	22,04	1010	1010
G2	$77 \mu\text{m} < D < 88 \mu\text{m}$	32,15	1010	1010
G3	$88 \mu\text{m} < D < 105 \mu\text{m}$	51,05	1010	1010
G4	$105 \mu\text{m} < D < 177 \mu\text{m}$	104,95	1010	1010
G5	$177 \mu\text{m} < D$	202,95	1010	1010

#### 5.5.4 Plano de ensaios da quarta etapa: escape de fluido intersticial.

A partir da observação dos resultados da primeira etapa, apresentados na tabela 5.1, foi levantada a hipótese de que, ao longo do deslocamento da corrente dentro do canal experimental, poderia estar ocorrendo uma alteração da concentração da corrente, devido à perda de fluido intersticial para dentro do fluido ambiente.

Para que se pudesse testar se realmente havia escape de fluido da corrente, foi utilizado um corante para pigmentar a água que compunha a mistura da corrente, permitindo, desta forma, a visualização de seu escape. Foram testadas três combinações: corrente mais densa que o ambiente, corrente com a mesma densidade do ambiente e corrente menos densa que o ambiente. Para a composição da mistura das correntes, foi utilizado o carvão mineral 205. As massas específicas testadas e os tipos de correntes geradas estão apresentadas na tabela 5.4.

Para a composição do fluido ambiente, foi utilizado apenas sal, enquanto que, para as correntes, foram feitas misturas de água, pigmento solúvel em água e o carvão mineral 205, do tipo Cardiff. Os ensaios foram filmados com duas câmeras de vídeo, sendo uma delas com o mesmo posicionamento empregado nos outros ensaios, e uma câmera acessória, que serviu para filmar a corrente justamente nos pontos onde era evidenciado o escape de fluido intersticial. Foram também registrados os tempos de duração da injeção das correntes e, posteriormente, calculadas a vazão e a velocidade média.

**Tabela 5.4: Massas específicas ensaiadas e tipos de correntes formadas.**

<b>Ensaio</b>	<b><math>\rho_a</math> kg.m<sup>-3</sup></b>	<b><math>\rho_c</math> kg.m<sup>-3</sup></b>
E1	1025	1020
E2	1010	1010
E3	1000	1010

Os pontos de escape de fluido intersticial eram facilmente identificados, devido à forte pigmentação do fluido. Mesmo a uma distância de aproximadamente 6 metros do canal, era possível visualizar o fluido pigmentado saindo de dentro do corpo da corrente. Para os trechos onde era visualizada a saída do fluido pigmentado de dentro do corpo da corrente, foram realizados registros mais detalhados, utilizando-se o zoom da câmera filmadora acessória.

### 5.5.5 Obtenção dos parâmetros adimensionais relativos à injeção da corrente

A comparação dos resultados obtidos, para as etapas experimentais realizadas, será feita pela relação direta entre as grandezas levantadas durante os ensaios e também através da relação entre parâmetros adimensionais calculados. Uma das grandezas avaliadas são referentes às condições iniciais das injeções das correntes, cujos parâmetros associados serão listados abaixo:

- Velocidade de injeção [ $V_i$ ]

$$V_i = \frac{Q_i}{h \times l} ; \quad (5.7)$$

- Número de Reynolds relativo à injeção [ $Re_i$ ]

$$Re = \frac{V_i \times h}{\nu_c} ; \quad (5.8)$$

- Número de Richardson relativo à injeção [ $Ri_i$ ]

$$Ri_i = \frac{g' \times h}{V^2} ; \quad (5.9)$$

- Número de Froude relativo à injeção [ $Fr_i$ ]

$$Fr_i = \frac{V}{\sqrt{g' \times h}} . \quad (5.10)$$

Sendo:

- $Q_i$  = vazão média de injeção calculada a partir do tempo de esvaziamento do reservatório [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ];
- $V_i$  = Velocidade média de injeção calculada a partir da vazão de injeção e da área da seção transversal da saída do difusor [ $m \cdot s^{-1}$ ];
- $h$  = altura da saída do difusor [m];
- $l$  = largura da saída do difusor [m];
- $\nu_c$  = viscosidade cinemática da mistura preparada para a corrente [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ];
- $g'$  = aceleração da gravidade reduzida [ $m \cdot s^{-2}$ ].

## 6 RESULTADOS

Os resultados serão apresentados separadamente, segundo cada uma das etapas de experimentos realizados. Para cada etapa, serão apresentadas tabelas com dados gerais dos ensaios, imagens do desenvolvimento das correntes obtidas pelas análises dos vídeos, gráficos das análises granulométricas dos depósitos formados pelas correntes, gráficos com relações entre velocidades de deslocamento das correntes e espessura de depósitos, velocidades de avanço das correntes hiperpicnais e hipopicnais, entre outros.

Por fim, serão apresentadas algumas análises dos dados, procurando expressá-los segundo algumas relações adimensionais que permitiram agrupar os dados gerados por este estudo.

### **6.1 RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA: variações de concentrações de sedimentos e variações de massas específicas do fluido ambiente.**

#### **6.1.1 Características gerais das correntes simuladas**

As massas específicas do fluido ambiente simulados variaram de  $1010 \text{ kg.m}^{-3}$  a  $1030 \text{ kg.m}^{-3}$ , o que corresponde a concentrações em peso de 22 a  $60 \text{ g.l}^{-1}$  de sal, e as temperaturas ambientes variaram entre 21 e  $27^\circ \text{ C}$  (Tabela 6.1). Para cada massa específica de fluido ambiente, foram testadas diferentes concentrações de sedimentos na mistura, até que se conseguisse a concentração mínima de sedimentos capaz de formar uma corrente do tipo hiperpicnal.

As massas específicas das correntes simuladas variaram de  $1002$  a  $1025 \text{ kg.m}^{-3}$ , que correspondem a concentrações em peso de 29 a  $178 \text{ g.l}^{-1}$ . As temperaturas das correntes simuladas variaram entre 21 e  $27^\circ \text{ C}$  e, juntamente com o sedimento adicionado à mistura, geraram valores de viscosidades cinemáticas entre  $1,04 \times 10^{-6}$  e  $2,07 \times 10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$  (Tabela 6.2).

Os tempos mínimos de injeção da corrente variaram entre 68 e 72 segundos, e os tempos máximos, entre 152 e 176 segundos. As vazões de injeção variaram entre  $7,576 \times 10^{-5}$  e  $2,841 \times 10^{-5} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , e as velocidades, entre 0,0448 e  $0,0168 \text{ m.s}^{-1}$ . Com os valores de vazão de injeção foram calculados os parâmetros adimensionais relativos a injeção: Reynolds [ $Re_i$ ], Richardson [ $Ri_i$ ] e Froude [ $Fr_i$ ]. Os valores de Reynolds para a injeção da corrente variaram entre 107 e 698, os valores de Richardson entre 0,45 e 7,74 e os valores de Froude, entre 0,36 e 1,49 (Tabela 6.3).

**Tabela 6.1: Dados gerais do fluido ambiente utilizado nos ensaios da primeira etapa.**

Ensaio	Dados do fluido ambiente				
	T <sub>a</sub> °C	ρ kg.m <sup>-3</sup>	μ kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>	ρ <sub>a</sub> kg.m <sup>-3</sup>	S g.l <sup>-1</sup>
C1	25,00	997,13	8,910E-04	1010,00	23,54
C2	21,00	998,08	9,790E-04	1010,00	21,82
C3	24,00	997,38	9,110E-04	1010,00	23,09
C4	23,00	997,62	9,330E-04	1010,00	22,65
C5	27,00	996,59	8,520E-04	1010,00	24,52
C6	26,00	996,86	8,710E-04	1010,00	24,03
C7	26,00	996,86	8,710E-04	1010,00	24,03
C8	26,00	996,86	8,710E-04	1015,00	33,17
C9	23,00	997,62	9,330E-04	1015,00	31,80
C10	24,00	997,38	9,110E-04	1015,00	32,23
C11	25,00	997,13	8,910E-04	1015,00	32,68
C12	26,00	996,86	8,710E-04	1015,00	33,17
C13	24,00	997,38	9,110E-04	1020,00	41,38
C14	23,00	997,62	9,330E-04	1020,00	40,95
C15	22,00	997,86	9,550E-04	1025,00	49,67
C16	21,00	998,08	9,790E-04	1030,00	58,43

Sendo: T<sub>a</sub>, a temperatura do fluido ambiente; ρ, a massa específica da água; μ, a viscosidade dinâmica da água; ρ<sub>a</sub>, a massa específica do fluido ambiente; e S, a salinidade do fluido ambiente. Para melhor visualização dos resultados vide tabela em AnexosC.

**Tabela 6.2: Dados gerais do fluido da corrente simulada nos ensaios da primeira etapa.**

Ensaio	Dados da mistura da corrente (valores iniciais)							
	T <sub>c</sub> °C	ρ kg.m <sup>-3</sup>	μ kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>	ρ <sub>c</sub> kg.m <sup>-3</sup>	C <sub>v</sub> %	m <sub>c</sub> kg	μ <sub>c</sub> kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>	ν <sub>c</sub> m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
C1	26,00	996,86	8,710E-04	1001,60	2,44	0,145	9,281E-04	9,266E-07
C2	21,00	998,08	9,790E-04	1005,00	3,59	0,214	1,076E-03	1,071E-06
C3	24,00	997,38	9,110E-04	1006,93	4,93	0,294	1,040E-03	1,033E-06
C4	24,00	997,38	9,110E-04	1011,77	7,43	0,443	1,119E-03	1,106E-06
C5	27,00	996,59	8,520E-04	1015,93	9,95	0,592	1,128E-03	1,110E-06
C6	25,00	997,13	8,910E-04	1021,25	12,44	0,741	1,271E-03	1,244E-06
C7	26,00	996,86	8,710E-04	1025,88	14,95	0,890	1,352E-03	1,318E-06
C8	26,00	996,86	8,710E-04	1010,00	6,77	0,403	1,049E-03	1,038E-06
C9	24,00	997,38	9,110E-04	1015,00	9,10	0,542	1,176E-03	1,158E-06
C10	23,00	997,62	9,330E-04	1016,83	9,93	0,592	1,235E-03	1,214E-06
C11	25,00	997,13	8,910E-04	1021,25	12,44	0,741	1,271E-03	1,244E-06
C12	25,00	997,13	8,910E-04	1026,10	14,94	0,890	1,383E-03	1,348E-06
C13	24,00	997,38	9,110E-04	1015,00	9,10	0,542	1,176E-03	1,158E-06
C14	23,00	997,62	9,330E-04	1020,00	11,57	0,689	1,293E-03	1,268E-06
C15	25,00	997,13	8,910E-04	1020,00	11,80	0,702	1,244E-03	1,220E-06
C16	21,00	998,08	9,790E-04	1025,00	13,95	0,831	1,469E-03	1,433E-06

Sendo: T<sub>c</sub>, a temperatura do fluido da corrente; ρ, a massa específica da água; μ, a viscosidade dinâmica da água; ρ<sub>c</sub>, a massa específica do fluido da corrente; C<sub>v</sub>, a concentração volumétrica de sedimentos; m<sub>c</sub>, a massa de sedimentos adicionada à mistura, em kg; μ<sub>c</sub>, a viscosidade dinâmica do fluido da corrente; e ν<sub>c</sub>, a viscosidade cinemática do fluido da corrente. Para melhor visualização dos resultados vide tabela em Anexos.

**Tabela 6.3: Dados gerais da corrente simulada nos ensaios da primeira etapa.**

Ensaio	$\Delta\rho \times 100$	Dados das correntes simuladas – Parâmetros da injeção								
		$g'$ m.s <sup>-2</sup>	$t_i$ min:seg	$Q_i$ m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	$V_i$ m.s <sup>-1</sup>	$Re_i$	$Ri_i$	$Fr_i$	$D_{50}$ m	$W_s$ m.s <sup>-1</sup>
C1	-0,8320	0,0816	2:50	2,941E-05	0,0174	356,65	5,12	0,44	5,50E-05	3,30E-04
C2	-0,4950	0,0485	1:08	7,353E-05	0,0435	771,40	0,49	1,43	5,50E-05	3,01E-04
C3	-0,3042	0,0298	2:43	3,067E-05	0,0181	333,65	1,72	0,76	5,50E-05	3,23E-04
C4	0,1754	0,0172	2:44	3,049E-05	0,0180	309,86	1,01	1,00	5,50E-05	3,15E-04
C5	0,5873	0,0576	2:56	2,841E-05	0,0168	287,49	3,88	0,51	5,50E-05	3,45E-04
C6	1,1139	0,1092	2:36	3,205E-05	0,0190	289,46	5,78	0,42	5,50E-05	3,37E-04
C7	1,5722	0,1542	2:32	3,289E-05	0,0195	280,35	7,74	0,36	5,50E-05	3,37E-04
C8	-0,4926	0,0483	1:10	7,143E-05	0,0422	772,95	0,51	1,39	5,50E-05	3,26E-04
C9	0,0000	0,0000	1:12	6,944E-05	0,0411	673,68	0,00	-	5,50E-05	3,05E-04
C10	0,1805	0,0177	2:40	3,125E-05	0,0185	289,16	0,98	1,01	5,50E-05	3,12E-04
C11	0,6158	0,0604	2:44	3,049E-05	0,0180	275,34	3,53	0,53	5,50E-05	3,19E-04
C12	1,0936	0,1072	2:32	3,289E-05	0,0195	274,16	5,38	0,43	5,50E-05	3,26E-04
C13	-0,4902	0,0481	1:09	7,246E-05	0,0429	702,97	0,50	1,42	5,50E-05	3,02E-04
C14	0,0000	0,0000	1:12	6,944E-05	0,0411	615,34	0,00	-	5,50E-05	2,95E-04
C15	-0,4878	0,0478	1:06	7,576E-05	0,0448	697,87	0,45	1,49	5,50E-05	2,78E-04
C16	-0,4854	0,0476	1:08	7,353E-05	0,0435	576,57	0,48	1,45	5,50E-05	2,62E-04

Sendo:  $\Delta\rho$ , a relação entre as massas específicas da corrente e do fluido ambiente;  $g'$ , o valor de gravidade reduzida;  $t_i$ , o tempo total de injeção;  $Q_i$  e  $V_i$ , as vazões e as velocidades de injeção calculadas a partir do tempo de injeção;  $Re_i$ ,  $Ri_i$  e  $Fr_i$ , parâmetros adimensionais da injeção da corrente;  $D_{50}$ , o diâmetro característico do material utilizado para a composição da corrente; e  $W_s$ , o valor para a velocidade de queda da partícula pela lei de Rubey. Para melhor visualização dos resultados vide tabela em Anexos.

### 6.1.2 Imagens da evolução das correntes

A análise das imagens da evolução das correntes registradas pela câmera filmadora permitiu a determinação dos parâmetros que caracterizam suas geometrias e seus padrões cinemáticos. De fato, através da análise dos vídeos dos ensaios, foram determinadas as alturas da cabeça da corrente ao longo do seu deslocamento, bem como as variações de velocidade da cabeça da corrente e a distância máxima por ela percorrida.

Os vídeos foram primeiramente transformados em sequências de imagens, com o programa VirtualDub, e, em seguida, as imagens geradas foram abertas no Visualizador de Imagens do Windows, para que fosse determinada a geometria da corrente. Os passos das análises dos vídeos estão detalhadamente descritos no capítulo 5.4.4.2.

Pelas sequências de imagens apresentadas nas figuras 6.1 e 6.2, pode-se observar que, quando a massa específica do fluido ambiente é maior que a massa específica do fluido na corrente, ocorre uma expansão da corrente logo nos primeiros quinze segundos dos ensaios. Para as correntes nas quais a massa específica do fluido ambiente é menor que a massa específica da corrente, observa-se um achatamento da corrente nos primeiros segundos. Quanto mais densa a corrente em relação ao fluido ambiente, maior é o achatamento sofrido por ela, e isso pode estar relacionado a forças de empuxo agindo sobre a corrente.

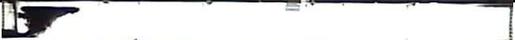
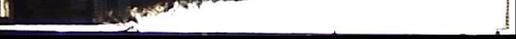
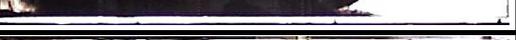
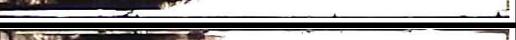
Ensaio	$\Delta\rho \times 100$	Desenvolvimento da corrente		
		15 s	50s	100s
C1	-0,832			
C2	-0,495			
C8	-0,493			
C13	-0,490			
C15	-0,488			
C16	-0,485			
C3	-0,304			
C9	0,000			
C14	0,000			
C4	0,175			
C10	0,180			
C5	0,587			
C11	0,616			
C12	1,094			
C6	1,114			
C7	1,572			

Figura 6.1: Imagens dos vídeos dos ensaios da primeira etapa. Transformações das correntes ao longo do tempo. Correntes classificadas de acordo com valores de  $\Delta\rho$  crescentes ( $\Delta\rho = (\rho_c - \rho_a) / \rho_a$ ). Imagens obtidas pelos registros cinematográficos dos ensaios.

Na figura 6.1, observa-se que, para as correntes nas quais a massa específica é maior que o fluido ambiente, ou seja, aquelas em que são maiores os valores de  $\Delta\rho$  (“C5”, “C6”, “C7”, “C10”, “C11”, “C12”), a corrente permanece por mais tempo junto ao fundo e mais afastado do difusor ocorre o ponto de intumescimento (imagem de 50 segundos após o início da injeção da corrente). Para as demais correntes, percebe-se que não existe um ponto de intumescimento mais pronunciado, sendo possível notar que, ao longo de toda a corrente, ocorre a ascensão de partículas.

Outra observação com relação à sequência de imagens apresentada nas figuras 6.1 é a forma da corrente hipopical do ensaio “C1”, que desenvolve uma maior velocidade de deslocamento da corrente hipopical, atingindo maior distância percorrida pela pluma após 100 segundos do início do ensaio, mesmo que tenha a menor velocidade de injeção (tabela 6.3). A possível explicação para a forma da corrente no ensaio “C1” é o grande contraste de densidade entre a corrente e o fluido ambiente, ou seja, o fluido da corrente possui uma densidade muito inferior à densidade do fluido ambiente, o que faz com que ele flutue.

Através das análises dos vídeos, observa-se que o ponto de intumescimento das correntes está relacionado com a diferença de densidade entre o corpo receptor e a corrente (Tabela 6.4). Quando a corrente é menos densa que o ambiente, o ponto de intumescimento começa próximo ao difusor, e ocorre ao longo de quase toda a corrente, como uma expansão generalizada desta.

À medida que aumentam os valores de  $\Delta\rho$ , ou seja, à medida que a densidade da corrente passa a se igualar ou ultrapassar a densidade do fluido ambiente, o ponto de intumescimento desloca-se para jusante e ele se desenvolve de forma bastante pontual, sem alastrar-se muito ao longo do comprimento da corrente (Tabela 6.5 e Figura 6.2).

O contraste de densidade também influenciou a velocidade média da corrente hipopical (pluma): para os menores valores de  $\Delta\rho$ , as correntes desenvolveram maiores velocidades e, conforme o contraste diminui ou a corrente torna-se mais densa que o fluido ambiente, as velocidades da pluma tornam-se menores (Figura 6.3A e 6.3B). As mesmas comparações feitas para as velocidades das correntes hiperpicais não apresentaram relações significativas, demonstrando que elas independem da concentração da corrente (Figura 6.4A e 6.4B).

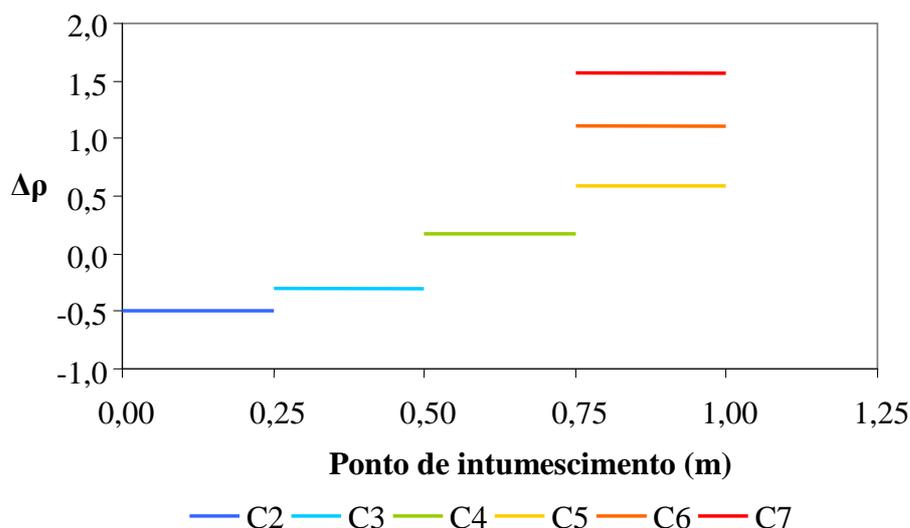
Pela comparação entre as distâncias atingidas pelas correntes hiperpicais e os valores de  $\Delta\rho$ , é possível notar que, com o aumento dos valores de  $\Delta\rho$ , ocorre também um aumento na distância percorrida pelas correntes (Figura 6.5A). Quando comparamos as distâncias atingidas pelas correntes com a massa específica das misturas das correntes, nota-se que o aumento da massa das correntes acarreta o aumento da distância percorrida, para as correntes

simuladas em ambientes com mesmo valor de massa específica (Figura 6.5B). A quantidade de material presente na mistura influencia positivamente na distância atingida pela corrente, pois ambos os parâmetros,  $\Delta\rho$  e  $\rho_c$ , são dependentes da massa de sedimentos adicionada na mistura.

**Tabela 6.4: Dados obtidos pelas análises dos vídeos dos ensaios da primeira etapa.**

Ensaio	Análise dos vídeos						Adimensionais dos vídeos		
	$H_c$ m	$V_c$ $m.s^{-1}$	$H_p$ m	$V_p$ $m.s^{-1}$	$P_0$ m	L (m)	$Re_c$	$Ri_c$	$Fr_c$
C1	0,0444	0,0128	0,0302	0,0184	-	0,00	516,14	18,81	0,231
C2	0,0646	0,0070	0,0157	0,0145	0 a 0,25	0,40	551,60	32,77	0,175
C3	0,1152	0,0060	0,0184	0,0117	0,25 a 0,50	0,30	733,51	63,54	0,125
C4	0,1097	0,0051	0,0431	0,0089	0,50 a 0,75	0,30	962,10	18,75	0,231
C5	0,0553	0,0122	0,0555	0,0076	0,75 a 1,00	0,50	616,18	19,00	0,229
C6	0,0224	0,0092	0,0489	0,0087	0,75 a 1,00	0,98	187,90	21,86	0,214
C7	0,0190	0,0141	0,0477	0,0082	0,75 a 1,00	1,75	228,66	11,47	0,295
C8	0,0286	0,0179	0,0232	0,0129	0,25 a 0,50	0,90	509,42	3,77	0,515
C9	0,0180	0,0175	0,0375	0,0105	0,50 a 0,75	1,46	282,97	-	-
C10	0,0118	0,0076	0,0417	0,0101	0,50 a 0,75	1,22	86,22	2,67	0,612
C11	0,0139	0,0097	0,0250	0,0080	0,50 a 1,00	1,84	126,00	6,39	0,396
C12	0,0132	0,0097	0,0393	0,0062	0,25 a 0,50	1,93	109,48	11,52	0,295
C13	0,0150	0,0198	0,0347	0,0128	0,50 a 1,00	1,20	280,17	1,70	0,766
C14	0,0176	0,0173	0,0197	0,0167	0,25 a 0,50	1,78	280,39	-	-
C15	0,0114	0,0171	0,0261	0,0132	0,25 a 0,50	1,90	169,21	1,76	0,755
C16	0,0140	0,0168	0,0333	0,0123	0,50 a 1,00	1,70	172,09	2,18	0,678

Sendo:  $H_c$ , a altura média da corrente hiperpicnal;  $V_c$ , a velocidade média da corrente hiperpicnal;  $H_p$ , a espessura média da corrente hipopical (pluma);  $V_p$ , a velocidade média de avanço da corrente hipopical (pluma);  $P_0$ , faixa de distância do canal onde se iniciou o ponto de intumescimento; L, à distância percorrida pela corrente hiperpicnal;  $Re_c$ ,  $Ri_c$  e  $Fr_c$ , parâmetros adimensionais para as correntes hiperpicnais simuladas, calculados a partir das medidas obtidas pela análise dos vídeos. Para melhor visualização dos resultados vide tabela em Anexos.



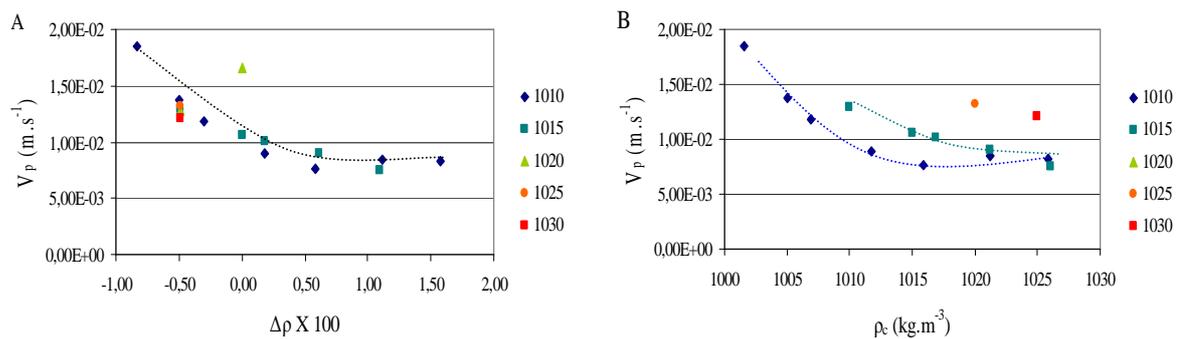
**Figura 6.2: Distância de ocorrência do ponto de intumescimento em função dos valores de  $\Delta\rho$ .**

No entanto, quando se comparam as distâncias atingidas pelas correntes hiperpicnais com as diferentes massas específicas de ambiente testadas, observa-se que, para uma mesma

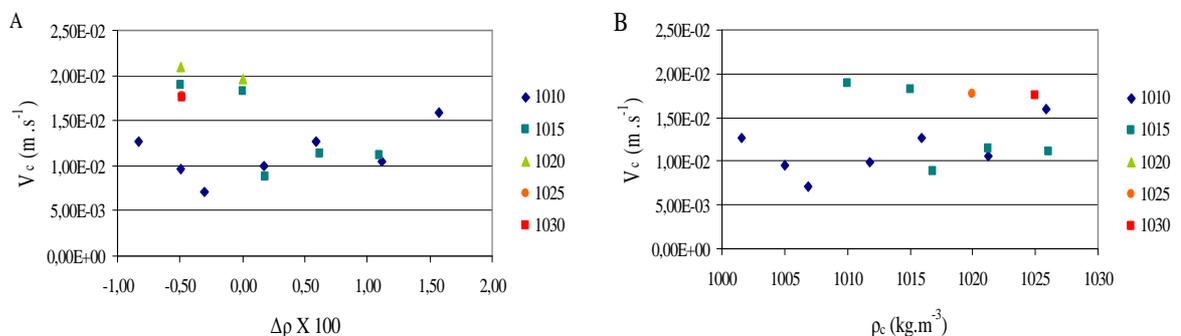
massa específica de corrente, as correntes simuladas nos ambientes mais densos atingem maiores distâncias.

A explicação mais provável para justificar o aumento da distância percorrida pelas correntes simuladas em ambientes mais densos é a incorporação de fluido ambiente no corpo da corrente, ou seja: durante o deslocamento da corrente hiperpicnal, parte da água que está contida no corpo da corrente é substituída pela água salina que está presente no fluido ambiente. A quantidade de sedimentos adicionada na mistura e a salinidade do meio influenciaram as máximas distâncias atingidas pelas correntes hiperpicnais.

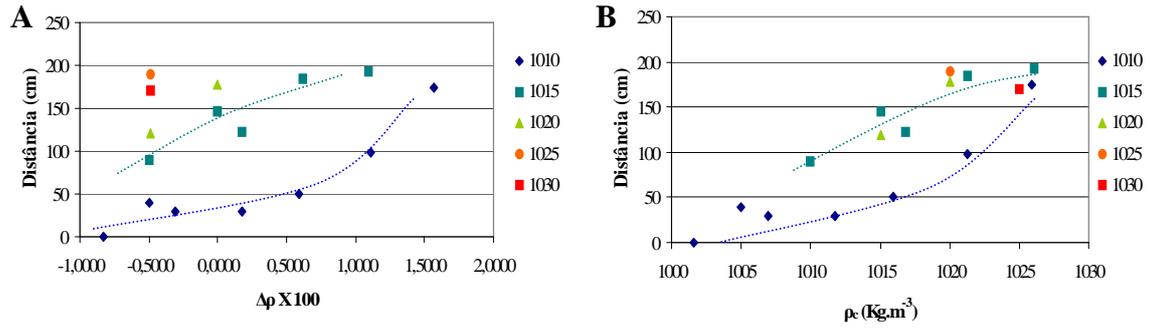
Pelos gráficos de velocidade e altura da cabeça da corrente hiperpicnal, observa-se que, com o decréscimo da velocidade da corrente, ocorre um aumento da altura da cabeça. Já quando ocorre uma pequena aceleração da corrente, a altura da cabeça torna-se menor (Figura 6.6: “C2”, “C4”, “C5” e “C6”). Comparando-se os gráficos da velocidade de avanço e da altura da cabeça da corrente hiperpicnal, pode-se perceber que o momento em que a corrente hiperpicnal pára de se deslocar geralmente coincide com o momento de sua máxima expansão (Figura 6.6: “C3” e “C4”).



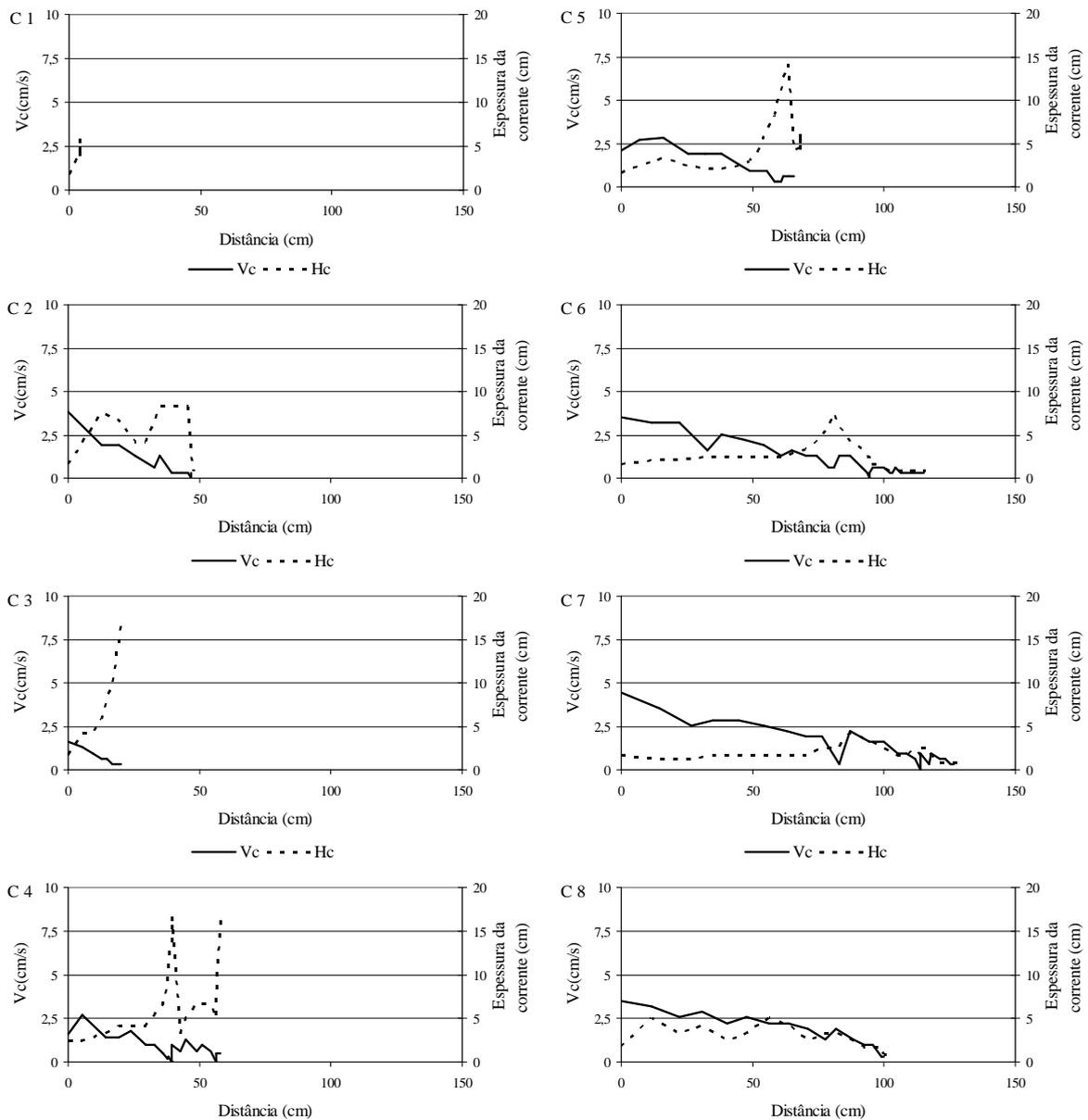
**Figura 6.3: A: Relações entre a velocidade da pluma ( $V_p$ ) e valores de  $\Delta\rho \times 100$  para as diferentes massas específicas de ambiente. B: Relação entre a velocidade da pluma ( $V_p$ ) e a massa específica da mistura ( $\rho_c$ ) para as diferentes massas específicas de ambiente.**



**Figura 6.4: Relações entre a velocidade da corrente hiperpicnal ( $V_c$ ) e valores de  $\Delta\rho \times 100$  para as diferentes massas específicas de ambiente. B: Relação entre a velocidade da corrente hiperpicnal ( $V_c$ ) e a massa específica da mistura ( $\rho_c$ ) para as diferentes massas específicas de ambiente.**

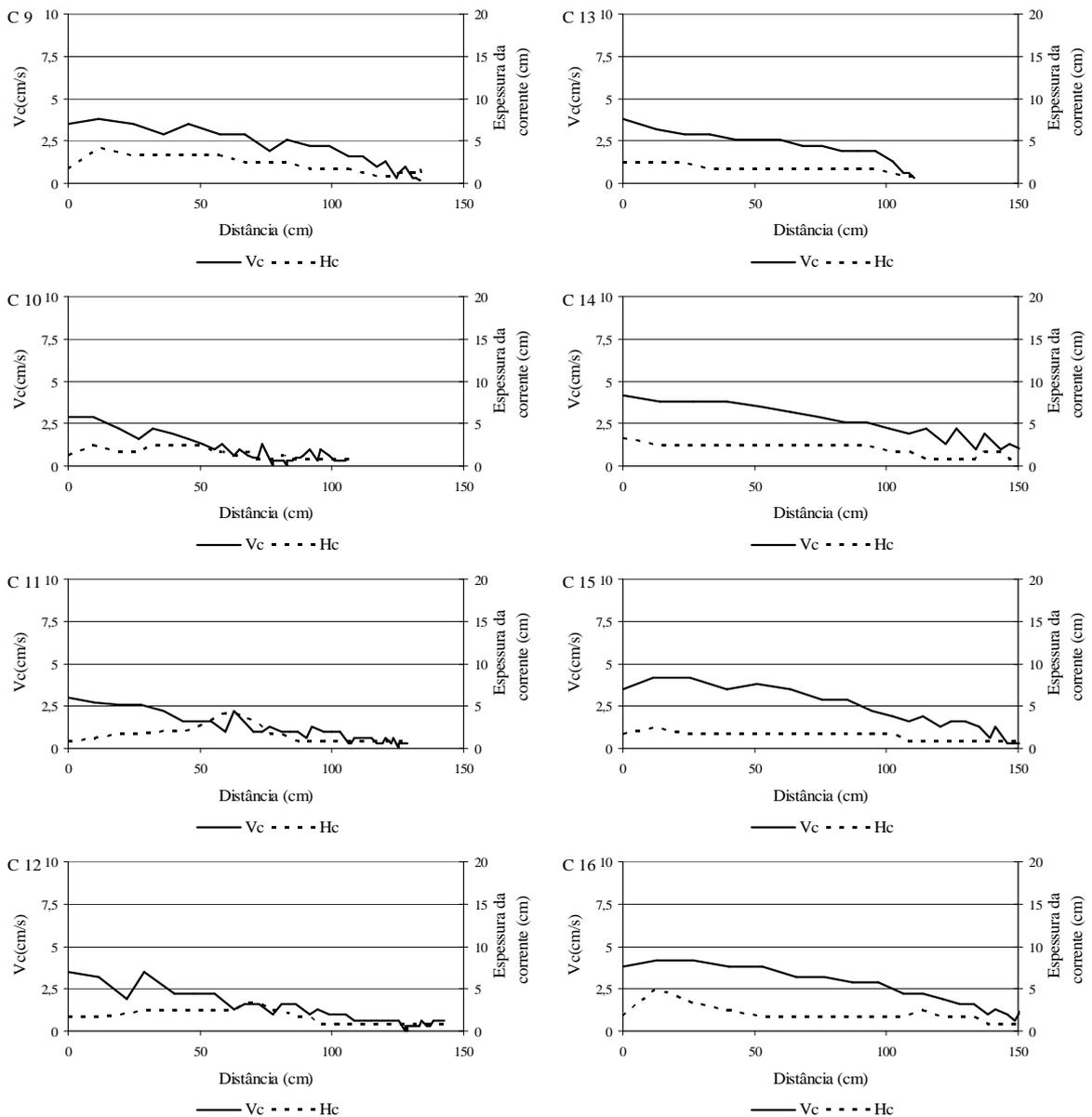


**Figura 6.5: A: Relações entre a distância atingida pela corrente hiperpical e valores de  $\Delta\rho \times 100$  para as diferentes massas específicas de ambiente. B: Relação entre a distância atingida pela corrente hiperpical ( $V_c$ ) e a massa específica da mistura ( $\rho_c$ ) para as diferentes massas específicas de ambiente.**



**Figura 6.6: Gráficos com valores de variações de velocidades ( $V_c$ ) e alturas da corrente hiperpical ( $H_c$ ) ao longo da distância do canal para os ensaios C1 até C8.**

Com o aumento da massa específica da corrente, as alturas da parte frontal da corrente deixaram de se expandir (região próxima à cabeça), ficando a expansão mais centrada nas regiões que seriam o corpo e a cauda da corrente. Para as correntes com maiores concentrações, o decréscimo da espessura da corrente coincide com o decréscimo da velocidade (Figura 6.6: “C7” e “C8”, e Figura 6.7).



**Figura 6.7: Gráficos com valores de variações de velocidades ( $V_c$ ) e alturas da corrente hiperpical ( $H_c$ ) ao longo da distância do canal para os ensaios C9 até C16.**

### 6.1.3 Análises dos depósitos gerados pelas correntes

Após o final de cada ensaio, lentamente era drenada toda a água contida no canal e, por fim, o depósito era seco, com o auxílio de holofotes. Todo o material depositado no fundo do canal era coletado e se procedia, então, à análise descrita no capítulo 5.4.4.2. Constatou-se, assim, que o aumento da massa específica da corrente implica o aumento da quantidade de carvão adicionada à mistura e, conseqüentemente, o aumento da quantidade de material retido (Tabela 6.5).

**Tabela 6.5: Dados do material depositado dentro do canal.**

Ensaio	Dados do Depósito			L m
	m <sub>c</sub> kg	m <sub>d</sub> kg	% retido	
C1	0,145	0,064	43,98	0,00
C2	0,214	0,170	79,81	0,40
C3	0,294	0,148	50,36	0,30
C4	0,443	0,230	51,92	0,30
C5	0,592	0,353	59,64	0,50
C6	0,741	0,568	76,70	0,98
C7	0,890	0,727	81,67	1,75
C8	0,403	0,358	88,84	0,90
C9	0,542	0,458	84,47	1,46
C10	0,592	0,489	82,73	1,22
C11	0,741	0,720	97,18	1,84
C12	0,890	0,747	83,92	1,93
C13	0,542	0,467	86,14	1,20
C14	0,689	0,667	96,75	1,78
C15	0,702	0,603	85,82	1,90
C16	0,831	0,799	96,10	1,70

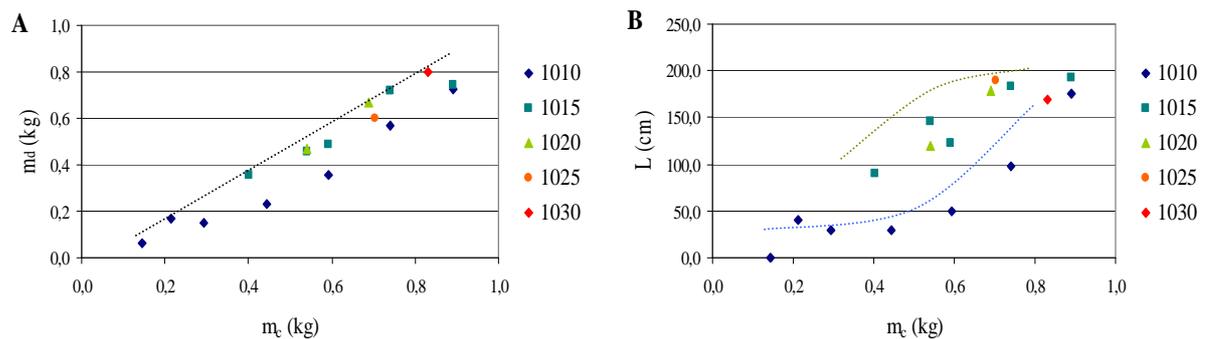
Sendo: m<sub>c</sub>, a massa de material adicionada na mistura (kg); m<sub>d</sub>, a massa total depositada dentro do canal (kg); % retido, valor calculado com base na relação entre o material depositado e a massa de material adicionada à mistura; e L, a máxima distância percorrida pela corrente hiperpicnal (m).

A relação entre a quantidade de material adicionada à mistura e a quantidade de material depositado no canal obedece a uma tendência de crescimento com o aumento da massa de sedimentos adicionada à mistura. O ajuste de uma tendência linear de crescimento demonstra que, aproximadamente, 85 % do material fica retido dentro do canal (Figura 6.8 “A”), sendo que o restante é perdido para a cuba de dissipação ou pela pluma que acaba sendo drenada.

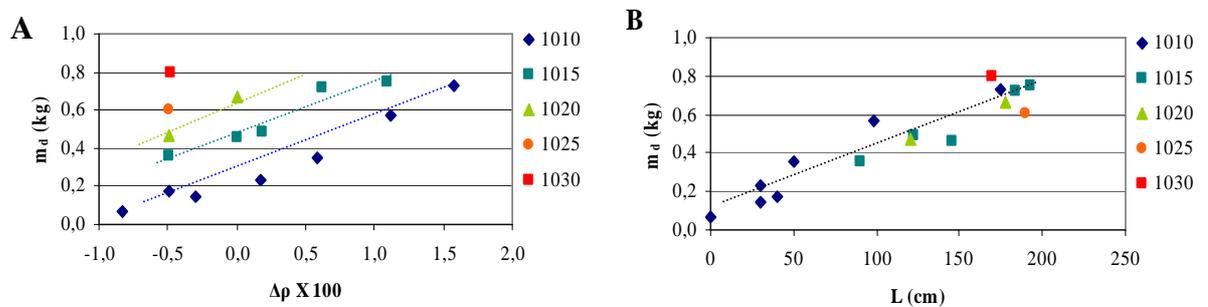
A distância máxima percorrida pela corrente hiperpicnal também mostrou estar relacionada à massa de sedimentos adicionada à mistura e também à salinidade do ambiente. Pela figura 6.8 “B”, nota-se a existência de duas tendências mais marcantes, sendo uma delas para as correntes que se desenvolvem em um ambiente com 1010 kg.m<sup>-3</sup> de massa específica, e a outra, para os demais experimentos. A possível explicação seria o maior aumento na densidade da corrente sofrido pelas correntes simuladas em ambientes mais densos, uma vez que o fluido intersticial, água pura, é substituído por água salgada, e então correntes com

mesma massa de carvão adicionada a mistura porém simuladas em ambientes mais densos, conseguiram atingir maiores distâncias.

A quantidade de massa depositada no canal não demonstrou estar relacionada diretamente ao valor de  $\Delta\rho$  mas sim à quantidade de sedimentos adicionada a mistura preparada para as correntes. A quantidade de material depositada também está diretamente relacionada com a máxima distância percorrida pela corrente, ou, em outras palavras, quanto maior a quantidade de sedimentos contida na corrente, maior serão a massa depositada e a distância atingida pela corrente hiperpical (Figura 6.9 “B”).



**Figura 6.8: A: relações entre as massas de carvão adicionadas ( $m_c$ ) à mistura e a respectiva massa depositada no fundo do canal ( $m_d$ ); B: relação entre a massa de carvão adicionada à mistura ( $m_c$ ) e a distância percorrida pela corrente hiperpical ( $L$ ), sendo ambas as relações para as diferentes massas específicas de fluido ambiente.**

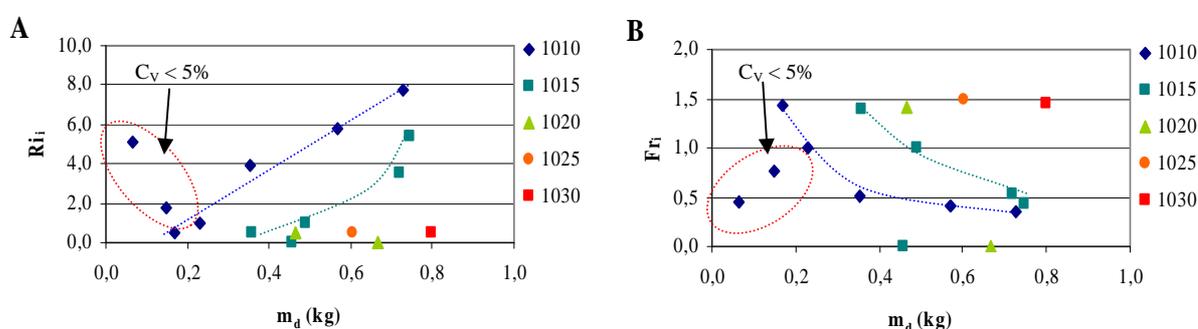


**Figura 6.9: A: relações entre massa de carvão depositada ( $m_d$ ) e diferença entre as massas específicas da corrente e fluido ambiente ( $\Delta\rho \times 100$ ); B: relação entre a massa depositada ( $m_d$ ) e a máxima distância percorrida pela corrente hiperpical ( $L$ ), sendo ambas as relações para as diferentes massas específicas de fluido ambiente.**

Os parâmetros número de Richardson e número de Froude referentes à injeção da corrente mostraram relacionar-se com a quantidade de material depositado. Para os valores mais elevados de Richardson, a energia potencial é mais preponderante que a energia cinética e, portanto, as correntes demoram mais tempo para sofrer estratificação e, conseqüentemente, conseguem atingir maiores distâncias (Figura 6.10 “A”). De forma semelhante, para os

valores mais baixos de número de Froude, as forças gravitacionais são preponderantes sobre as forças de inércia e, portanto, as correntes atingiram maiores distâncias (Figura 6.10 “B”).

Conforme a corrente avança no canal, ocorre uma redução gradativa na velocidade de deslocamento e, conseqüentemente, uma redução da capacidade de transportar material em suspensão. Esta relação é nitidamente demonstrada pela seqüência de gráficos apresentados nas figuras 6.11 e 6.12, em que o decréscimo da velocidade apresenta uma relação bastante acentuada com o decréscimo da quantidade de material depositada ao longo do canal. O decréscimo da velocidade diminui a capacidade do escoamento em transportar os sedimentos, havendo uma redução com relação à quantidade de material que está sendo transportada e também com o tamanho das partículas (Figuras 6.11 e 6.12).



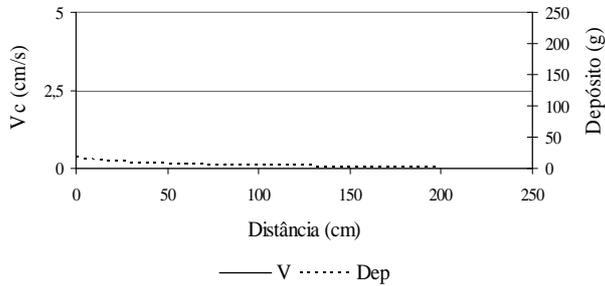
**Figura 6.10: A: relações entre o número de Richardson da injeção (Rii) e a massa de carvão depositada (md) e B: relação entre o número de Froude da injeção (Fri) e a massa de carvão depositada (md), sendo ambas as relações para as diferentes massas específicas de fluido ambiente.**

A perda de energia ao longo do deslocamento da corrente faz com que as partículas mais pesadas e, conseqüentemente, de maior tamanho, sejam depositadas primeiro, restando apenas as partículas mais leves e menores sendo transportadas na corrente.

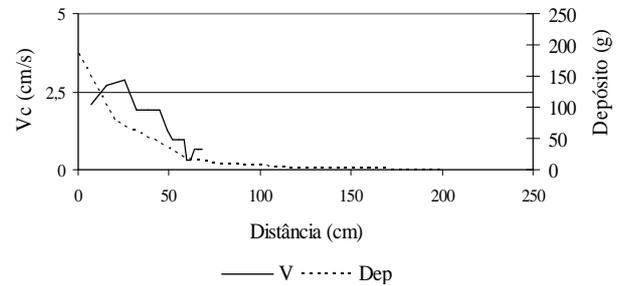
Com base nas figuras 6.11 e 6.12, pela relação obtida entre o decréscimo da velocidade e da massa de material depositada ao longo do canal, e comparando com as análises granulométricas feitas do material depositado ao longo do canal (Figuras 6.13 e 6.14), percebe-se que o material com tamanho de areia muito fina está presente no material transportado pela corrente hiperpicnal. O material com diâmetro de silte grosso ou mais fino que este é depositado pela pluma hipopicnal. Pode-se notar também que as frações menores – silte médio, silte fino, silte muito fino e argila – aparecem nas amostras em proporções crescentes no canal, no sentido montante-jusante, podendo este material estar sendo transportado em maiores quantidades pela pluma da corrente hipopicnal (Figuras 6.13 e 6.14).

As figuras 6.13 e 6.14 apresentam as distribuições granulométricas do material depositados em cada uma das faixas de análise do depósito.

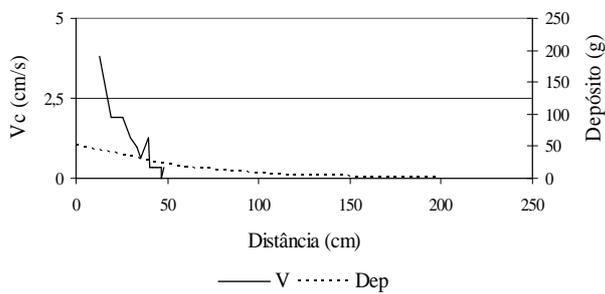
C 1



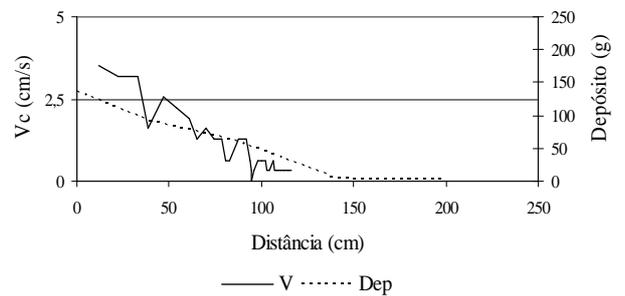
C 5



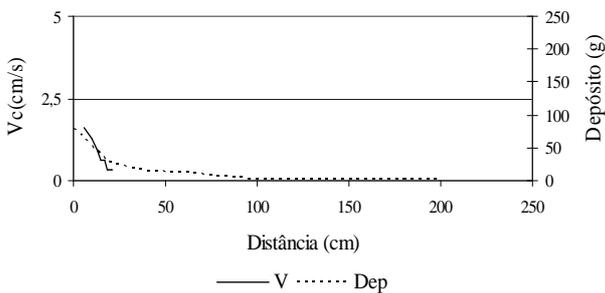
C 2



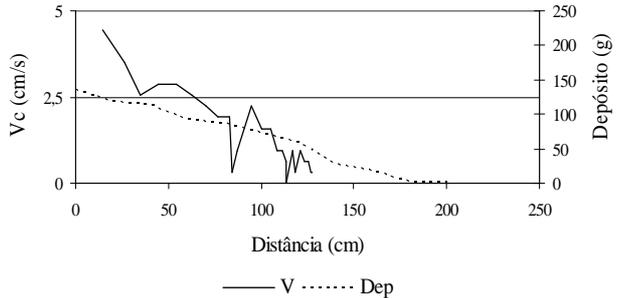
C 6



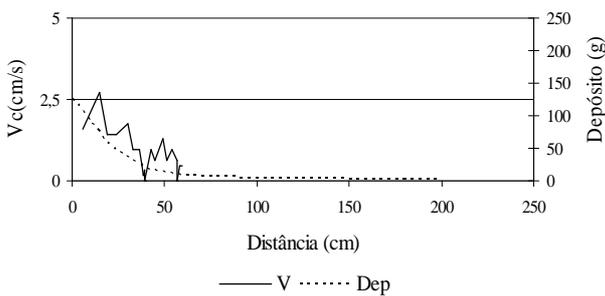
C 3



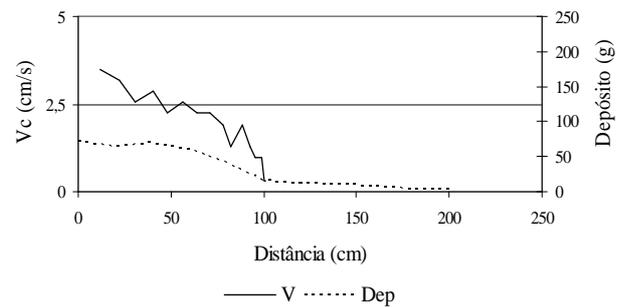
C 7



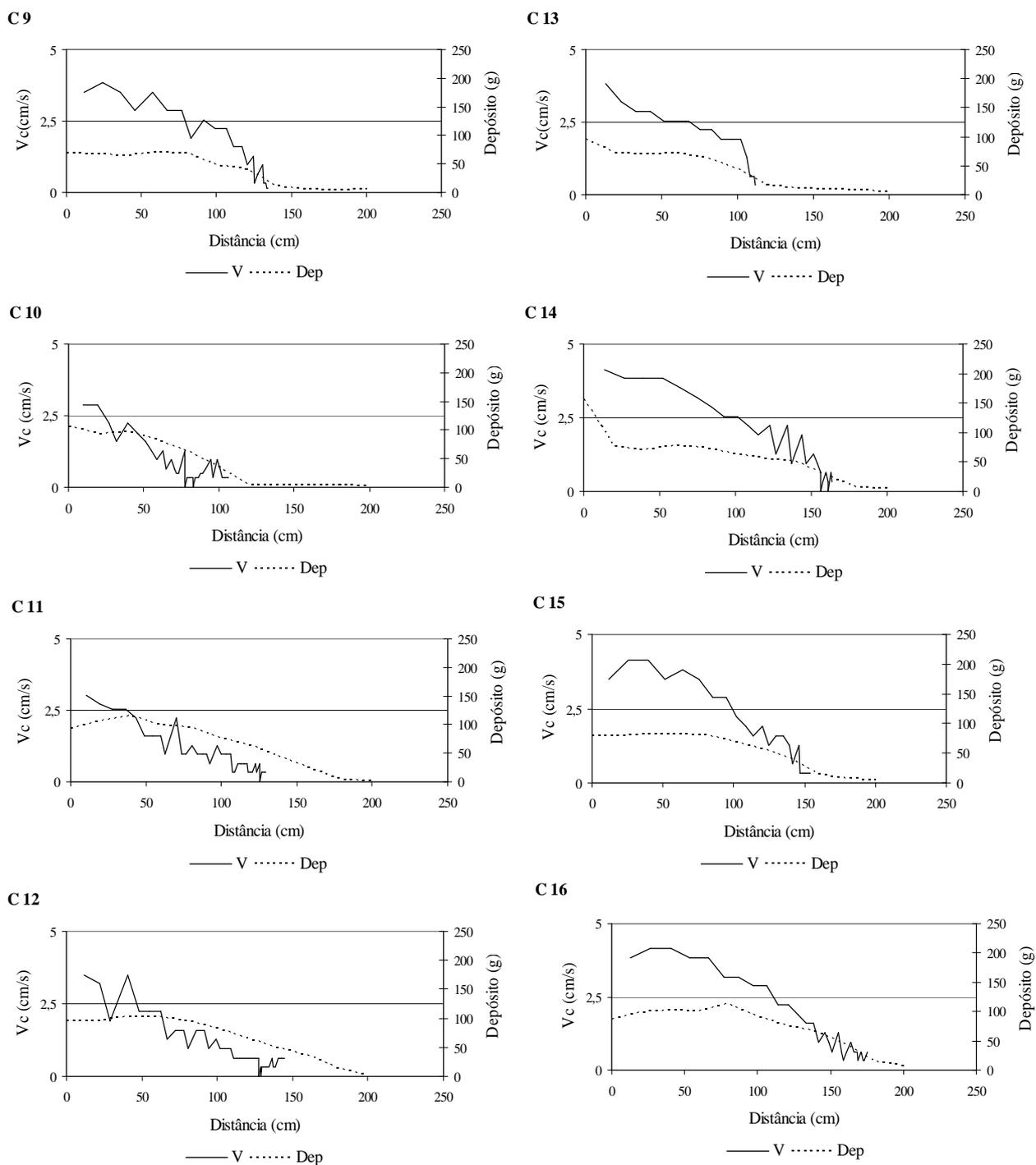
C 4



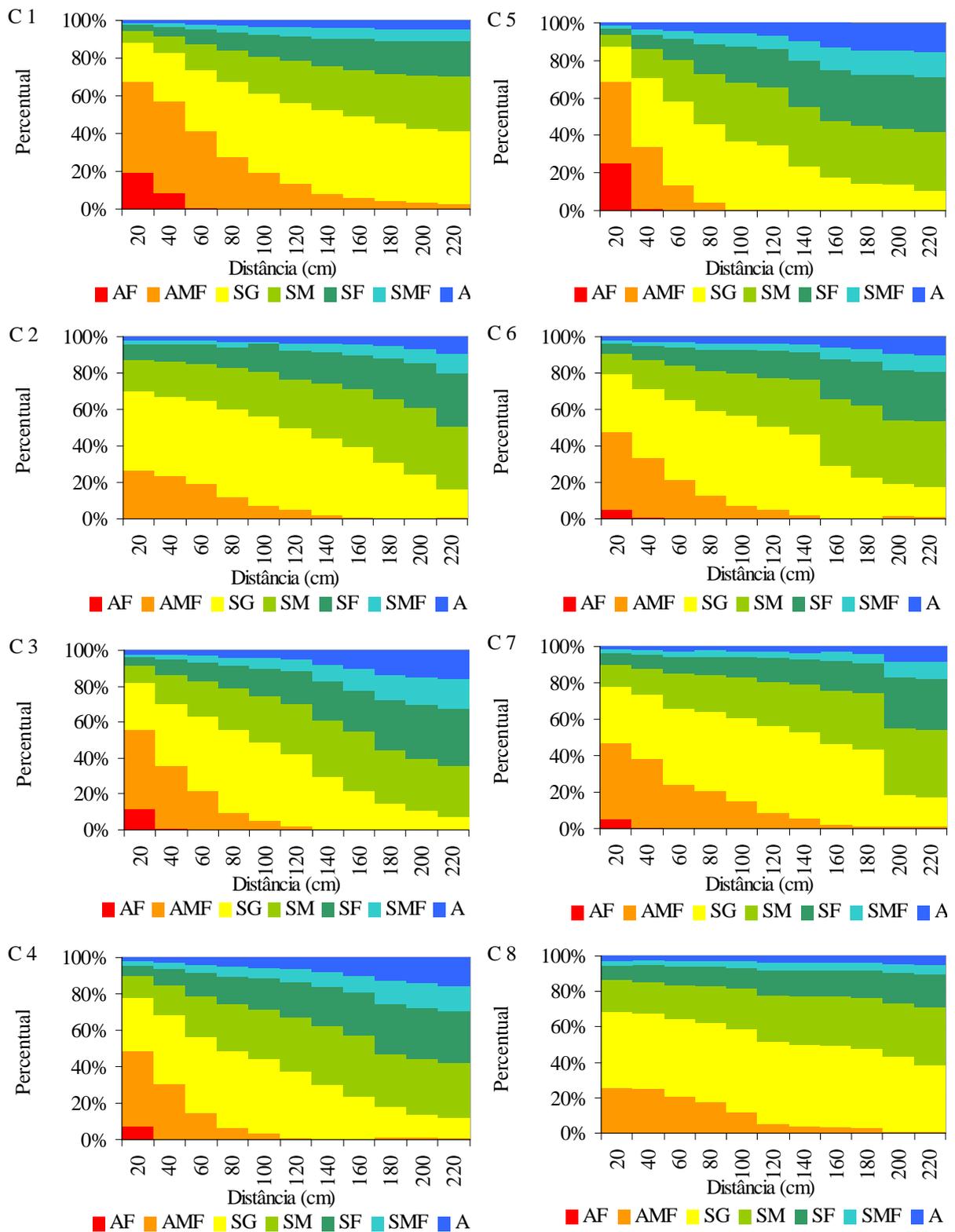
C 8



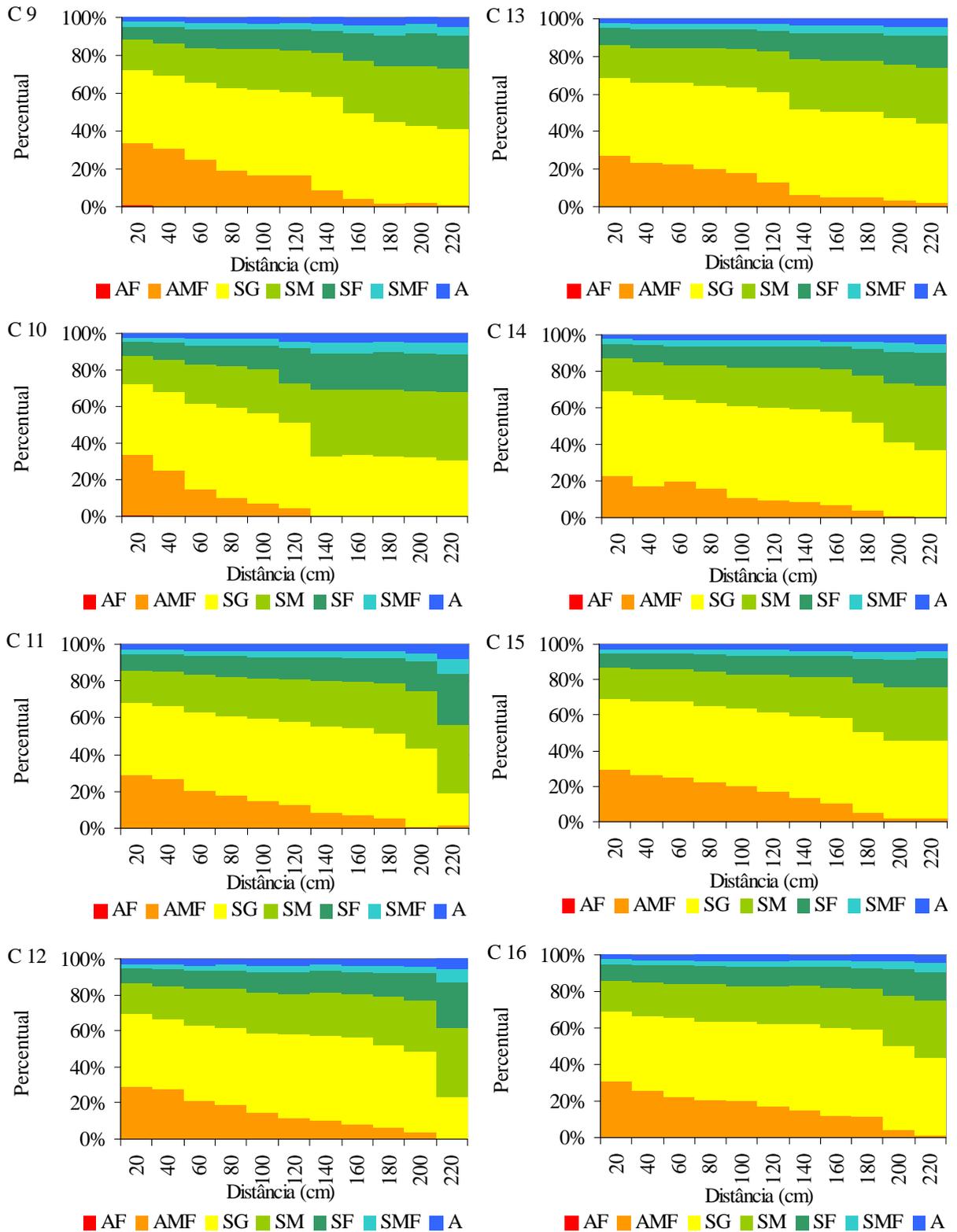
**Figura 6.11: Variações da velocidade de deslocamento (V) e da espessura do depósito (Dep) em função da distância para os ensaios C1 até C8.**



**Figura 6.12: Variações da velocidade de deslocamento ( $V_c$ ) e da espessura do depósito (Dep) em função da distância para os ensaios C9 até C16.**



**Figura 6.13: Distribuição granulométrica do material depositado ao longo do canal para os ensaios C1 até C8. Material dividido por faixa, sendo: areia fina (AF); areia muito fina (AMF); silte grosso (SG); silte médio (SM); silte fino (SF); silte muito fino (SMF); e argila (A).**



**Figura 6.14: Distribuição granulométrica do material depositado ao longo do canal para os ensaios C9 até C16. Material dividido por faixa, sendo: areia fina (AF); areia muito fina (AMF); silte grosso (SG); silte médio (SM); silte fino (SF); silte muito fino (SMF); e argila (A).**

#### **6.1.4 Comparação com outro trabalho semelhante**

Neste capítulo, serão apresentadas algumas comparações com resultados de outros trabalhos publicados anteriormente. As formas de expressar os resultados serão semelhantes àquelas empregadas nos trabalhos apresentados na revisão bibliográfica (Capítulo 4.6).

No presente estudo, verificou-se que as velocidades de avanço da frente das correntes dependem diretamente da concentração destas, ou seja, as correntes com menores concentrações de sedimentos tiveram uma redução bastante abrupta da velocidade, enquanto que as correntes com maiores concentrações mantiveram as velocidades elevadas por maiores distâncias (Figura 6.15).

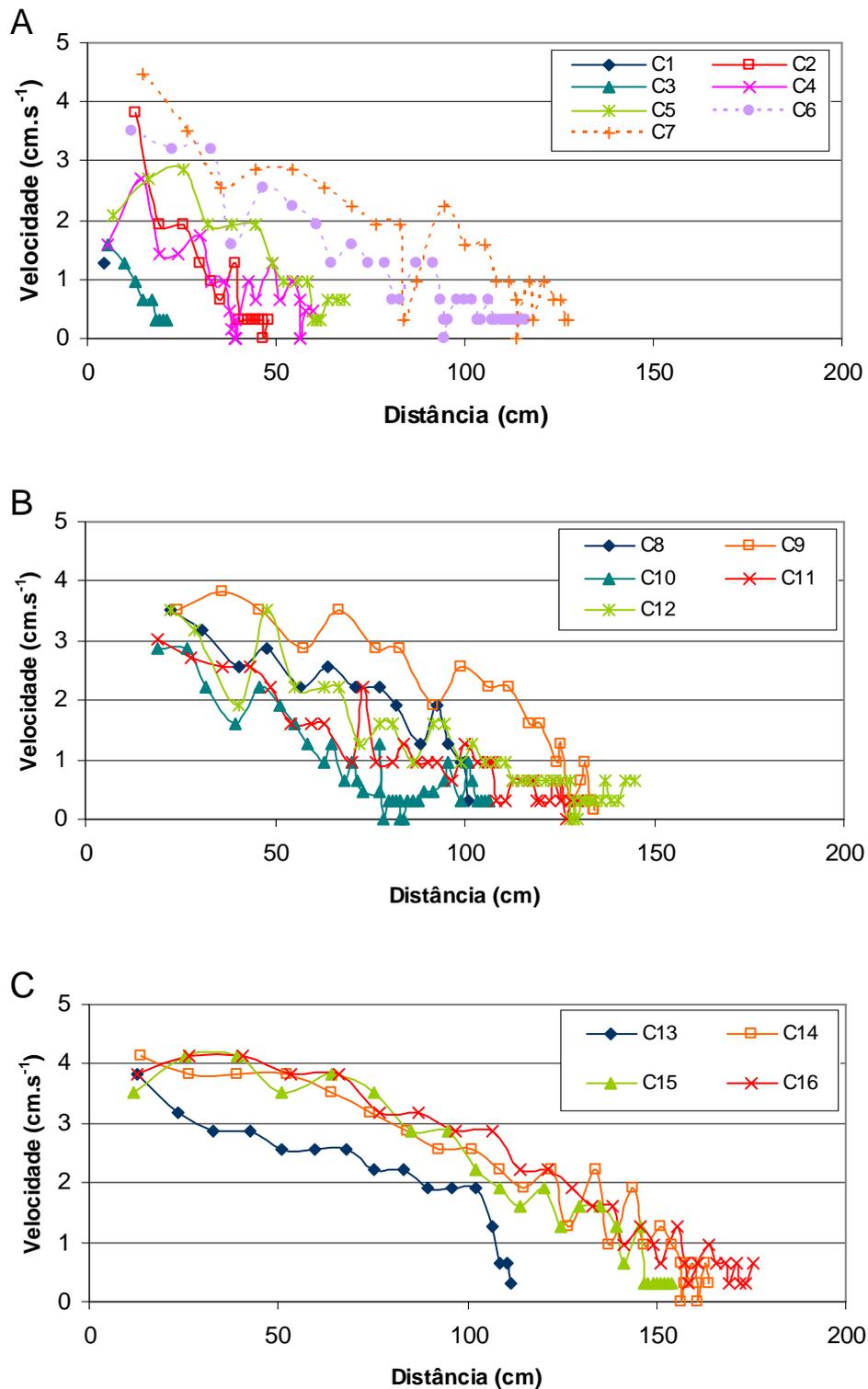
Quanto às espessuras, as correntes com menores concentrações de sedimentos expandiram-se, enquanto que as correntes com maiores concentrações mantiveram suas espessuras menores por maiores distâncias (Figura 6.16), o que se explica pelo fato de que as correntes com maiores concentrações de sedimentos oferecem maior resistência à incorporação de fluido ambiente. Já no trabalho de Mulder e Alexander (2002), a espessura da corrente dependeu da inclinação da rampa, que fazia com que o número de Reynolds ficasse mais elevado (Figura 4.15 A).

Nas correntes de baixa concentração (Figura 6.16 A: C1, C2, C3, C4 e C5), são bastante perceptíveis a diferença entre as espessuras das correntes e os pontos onde elas começaram a sofrer expansão e formar o ponto de intumescimento, sendo que o aumento da concentração desloca para jusante o ponto de máxima expansão. Já nas demais correntes, a espessura ao longo de seu deslocamento variou pouco, dificultando a diferenciação entre elas (Figura 6.16 A, C6 e C7; e 6.16 B e 6.16 C).

Ao longo do deslocamento da corrente dentro do canal, ocorre uma redução da capacidade de transporte das partículas que estão no corpo da corrente. Esta redução pode ter como causas diversos fatores, entre eles a redução da velocidade de deslocamento da corrente. A redução da capacidade de transporte por parte do fluxo está não apenas relacionada à quantidade de material transportado, mas também ao tamanho das partículas capazes de serem transportadas, ou seja, as partículas de maior diâmetro, por apresentarem uma maior massa, são as primeiras a serem depositadas e, sendo assim, as partículas menores conseguem ser transportadas por maiores distâncias.

Na figura 6.17, são apresentadas as variações do tamanho do grão ( $D_{50}$ ) depositado ao longo do canal, sendo que, para as correntes que foram simuladas no ambiente com a menor concentração salina (Figura 6.17 A), a diferença é mais acentuada do que nos demais experimentos, em que as correntes foram simuladas nos ambientes com maiores concentrações salinas (Figura 6.17 B e 6.17 C). As correntes que foram simuladas no

ambiente com a menor concentração salina apresentam também as menores velocidades e, portanto, este pode ser o principal motivo para o decréscimo mais pronunciado do tamanho das partículas ao longo da distância.



**Figura 6.15:** Variações das velocidades de avanço das correntes simuladas na primeira etapa ao longo da distância do canal, sendo: “A”, as correntes simuladas em ambiente com massa específica de 1010 kg.m<sup>-3</sup>; “B”, as correntes simuladas em ambiente com massa específica de 1015 Kg.m<sup>-3</sup>; e “C”, as correntes simuladas em ambientes com 1020 kg.m<sup>-3</sup> (C13 e C14), 1025 kg.m<sup>-3</sup> (C15) e 1030 kg.m<sup>-3</sup> (C16).

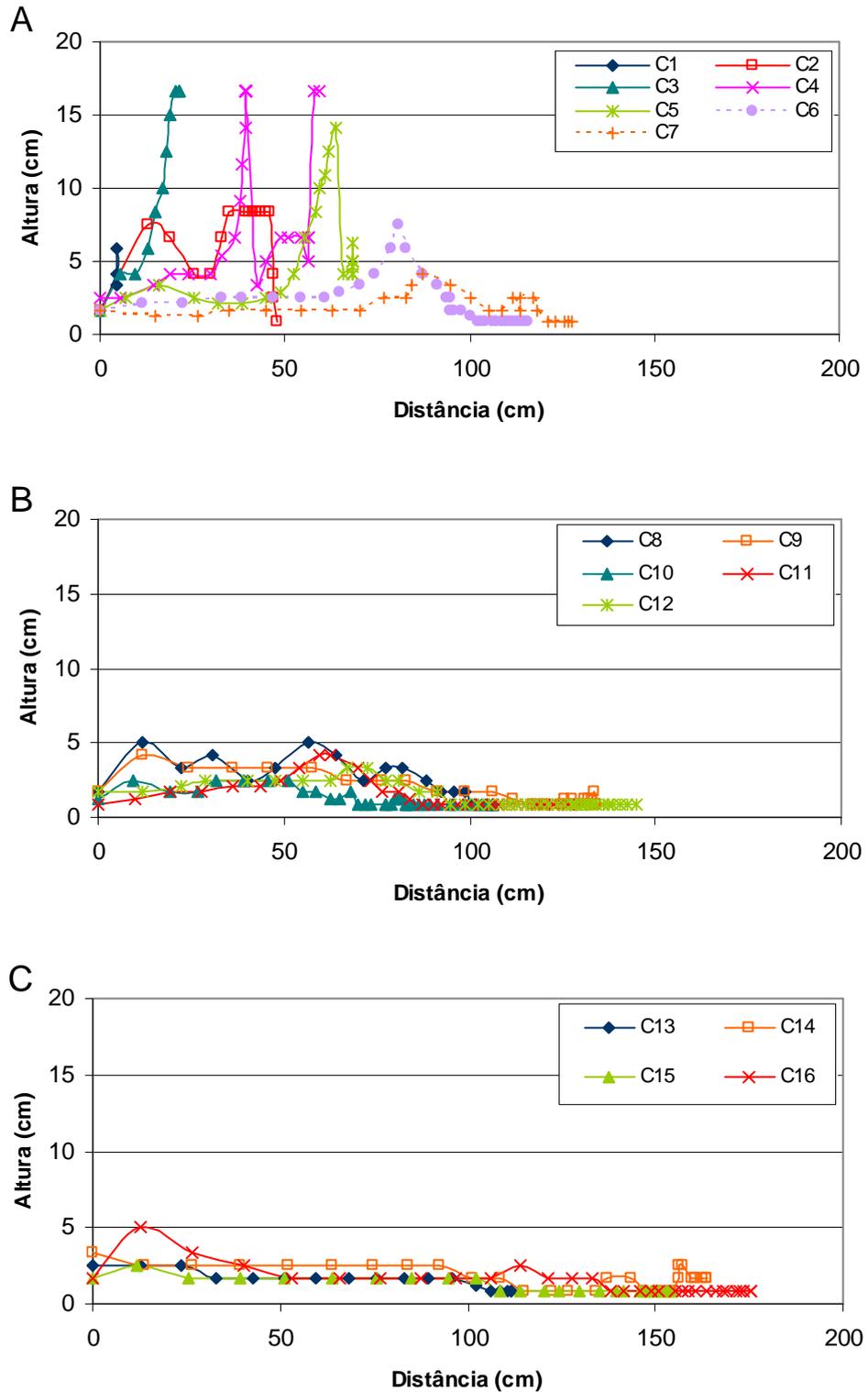
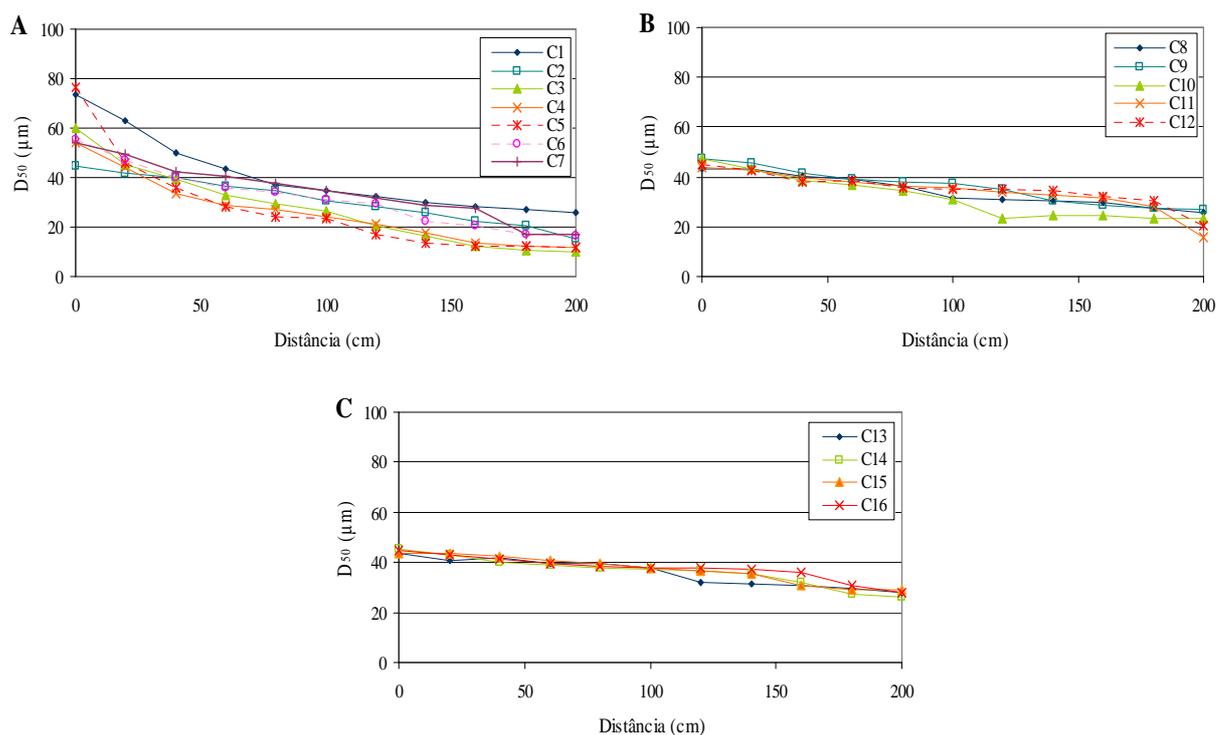


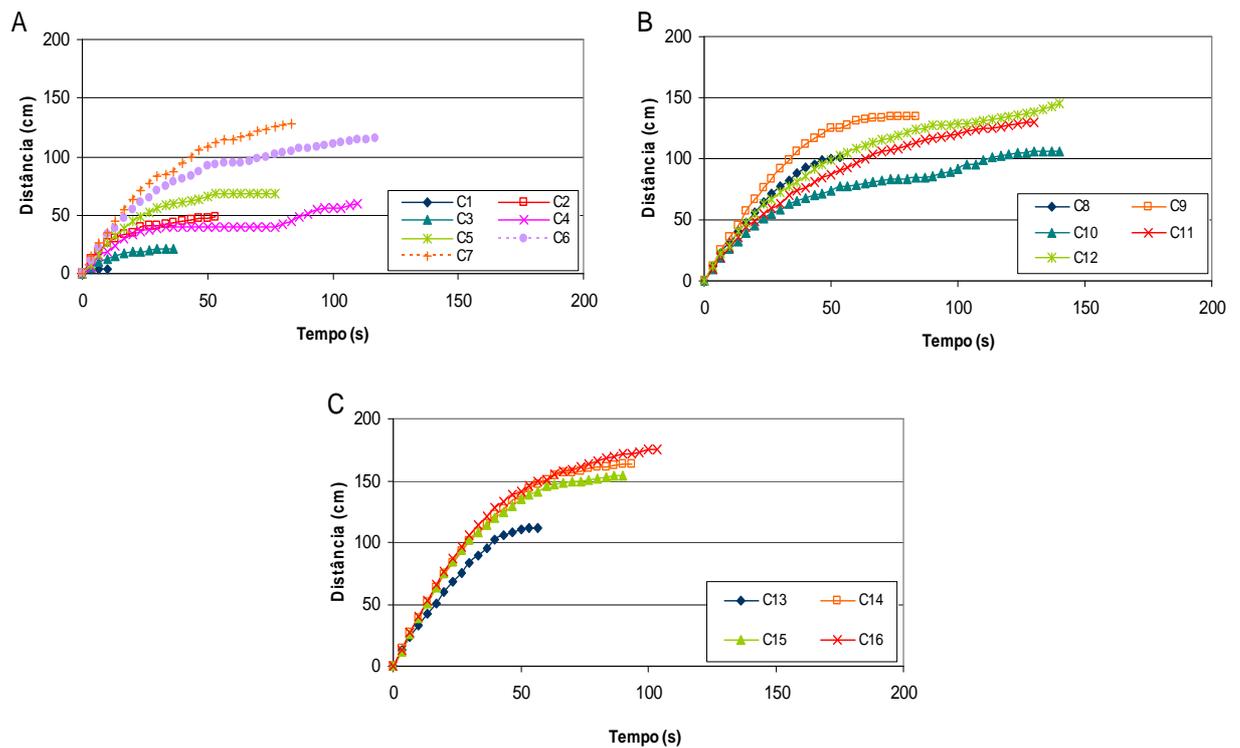
Figura 6.16: Variações das espessuras das correntes simuladas na primeira etapa ao longo da distância do canal, sendo: “A”, as correntes simuladas em ambiente com massa específica de  $1010 \text{ kg.m}^{-3}$ ; “B”, as correntes simuladas em ambiente com massa específica de  $1015 \text{ kg.m}^{-3}$ ; e “C”, as correntes simuladas em ambientes com  $1020 \text{ kg.m}^{-3}$  (C13 e C14),  $1025 \text{ kg.m}^{-3}$  (C15) e  $1030 \text{ kg.m}^{-3}$  (C16).

As máximas distâncias atingidas pelas correntes simuladas também demonstraram relação com as concentrações de sedimentos utilizadas. As correntes com menores concentrações de sedimentos não atingiram grandes distâncias, chegando ao máximo de 0,75 m (Figura 6.18 A, C1 a C5). As correntes mais concentradas, como já foi apresentado nos dados acima, por possuírem maior capacidade de manter sua integridade, conseguiram atingir maiores distâncias, chegando a percorrer mais de 1,0 m e, algumas, 1,5 m. As correntes com maior contraste de densidade positivo ( $\Delta\rho \times 100 > 1$ , correntes que possuem a densidade maior que a densidade do fluido ambiente) foram as que conseguiram se deslocar por mais tempo, mas não foram as que atingiram as maiores distâncias (Figura 6.18 B, C10, C11 e C12).

No trabalho de Gladstone *et al.* (1998), as distâncias máximas atingidas e o tempo despendido para o alcance destas distâncias também dependeram da concentração de partículas, sendo que as correntes com maior concentração de material fino foram as que desenvolveram maiores velocidades e alcançaram as maiores distâncias (Figura 4.17).



**Figura 6.17: Variações do tamanho das partículas ( $D_{50}$ ) das correntes simuladas na primeira etapa ao longo da distância do canal, sendo: “A”, as correntes simuladas em ambiente com massa específica de  $1010 \text{ kg.m}^{-3}$ ; “B”, as correntes simuladas em ambiente com massa específica de  $1015 \text{ kg.m}^{-3}$ ; e “C”, as correntes simuladas em ambientes com  $1020 \text{ kg.m}^{-3}$  (C13 e C14),  $1025 \text{ kg.m}^{-3}$  (C15) e  $1030 \text{ kg.m}^{-3}$  (C16).**



**Figura 6.18: Distâncias atingidas pelas correntes simuladas na primeira etapa em função do tempo, sendo: “A”, as correntes simuladas em ambiente com massa específica de  $1010 \text{ kg.m}^{-3}$ ; “B”, as correntes simuladas em ambiente com massa específica de  $1015 \text{ kg.m}^{-3}$ ; e “C”, as correntes simuladas em ambientes com  $1020 \text{ kg.m}^{-3}$  (C13 e C14),  $1025 \text{ kg.m}^{-3}$  (C15) e  $1030 \text{ kg.m}^{-3}$  (C16).**

### 6.1.5 Conclusões parciais

A análise das imagens obtidas através das filmagens dos ensaios foi uma ferramenta bastante importante para a avaliação das características dinâmicas e morfológicas das correntes. Através das imagens, foi possível visualizar as alterações causadas na forma e nas velocidades de avanço das correntes para as diferentes concentrações de sedimentos utilizadas. O aumento na concentração da corrente acarretou um aumento da distância por ela percorrida, o desenvolvimento de maiores velocidades de avanço e uma redução da espessura da corrente. Já as correntes com menores concentrações desenvolveram maiores espessuras, menores velocidades de avanço e menores distâncias percorridas pela corrente hiperpical; apresentaram, porém, maiores velocidades de deslocamento da pluma, possivelmente devido ao maior contraste de densidade entre as correntes e o fluido ambiente.

Com relação aos depósitos gerados pelas correntes, foi verificada uma forte relação direta entre a espessura do depósito e a velocidade de avanço da frente, mostrando que a quantidade de material transportada pela corrente é dependente da velocidade. Em contrapartida, a apresentação dos dados mostrou evidências de que as correntes com maiores

quantidades de sedimentos conseguiram atingir maiores distâncias e que estas maiores distâncias não dependeram das velocidades de injeção das correntes.

Com relação às concentrações das correntes e aos contrastes de densidade entre elas e o fluido ambiente, os dados permitiram concluir que é possível gerar correntes do tipo hiperpicnal mesmo quando a massa específica da corrente é menor que a massa específica do fluido ambiente.

As causas capazes de explicar o fato ocorrido, ou seja, como é possível uma mistura menos densa que o fluido ambiente comportar-se como se fosse mais densa, serão investigadas nas três etapas subsequentes deste estudo. As hipóteses inicialmente levantadas referem-se aos seguintes aspectos:

- O tamanho e a concentração de partículas seriam responsáveis pela manutenção das correntes próximo ao fundo, ou seja, partículas maiores e também o maior número de partículas em suspensão auxiliariam no desenvolvimento das correntes hiperpicnais;
- A velocidade de injeção e a vazão poderiam ser elevadas, fazendo com que a corrente seja injetada de forma a favorecer o seu deslocamento próximo ao fundo;
- A corrente, ao entrar no corpo receptor, estaria perdendo água do fluido intersticial para o ambiente e, conseqüentemente, estaria alterando a sua massa específica.

A expressão dos dados deste estudo, seguindo a forma de apresentação dos autores Gladstone *et al.* (1998), mostrou bastante similaridade de comportamento, mas os motivos para a expressão de alguns comportamentos específicos dos resultados podem não ser os mesmos apresentados pelos outros autores, como, por exemplo, no caso das espessuras das correntes.

No trabalho de Mulder e Alexander (2002), a expansão da corrente foi atribuída a valores elevados de número de Reynolds. Para os dados do presente estudo, a expansão da corrente está mais relacionada ao contraste de densidades. As altas distâncias alcançadas pelas correntes dos experimentos de Gladstone *et al.* (1998) foram atribuídas às quantidades de material fino presente nas correntes. Já para o presente estudo, as maiores distâncias estão relacionadas com menores contrastes de densidade ou com correntes com densidade maior que o fluido ambiente.

## 6.2 RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA: influência da vazão e da velocidade de injeção no tipo de corrente formada.

Com base nos dados apresentados na etapa anterior, foram desenvolvidas as etapas seguintes. Para esta etapa, foi testada a influência da vazão e da velocidade de injeção na forma e na dinâmica da corrente formada. Para possibilitar esta avaliação, foram testadas duas aberturas diferentes do registro, as quais, conseqüentemente, alteraram a vazão de injeção da corrente (Q1 e Q2), e também foram feitas alterações na área de saída do difusor. A área efetiva de saída do difusor teve a altura total igual a um terço da altura real (0,66 cm) para o primeiro teste (V1) e, na segunda velocidade testada (V2), a altura efetiva foi igual a dois terços da altura real (1,33 cm).

**Tabela 6.6: Dados gerais do fluido ambiente utilizado nos ensaios da segunda etapa.**

Ensaio	Dados do fluido ambiente				
	T <sub>a</sub> °C	ρ kg.m <sup>-3</sup>	μ kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>	ρ <sub>a</sub> kg.m <sup>-3</sup>	S g.l <sup>-1</sup>
Q1	14,00	999,33	1,170E-03	1012,00	23,22
Q2					
V1				1022,00	41,54
V2					

Sendo: T<sub>a</sub>, a temperatura do fluido ambiente; ρ, a massa específica da água; μ, a viscosidade dinâmica da água; ρ<sub>a</sub>, a massa específica do fluido ambiente; e S, a salinidade do fluido ambiente. Para melhor visualização dos resultados vide tabela em Anexos.

**Tabela 6.7: Dados gerais da mistura das correntes simuladas nos ensaios da segunda etapa.**

Ensaio	Dados da mistura da corrente (valores iniciais)							
	T <sub>c</sub> °C	ρ kg.m <sup>-3</sup>	μ kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>	ρ <sub>c</sub> kg.m <sup>-3</sup>	C <sub>v</sub> %	m <sub>c</sub> kg	μ <sub>c</sub> kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>	ν <sub>c</sub> m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
Q1	14,00	999,33	1,170E-03	1015,00	2,96	0,176	1,264E-03	1,258E-06
Q2								
V1					8,18	0,487	1,469E-03	1,447E-06
V2								

Sendo: T<sub>c</sub>, a temperatura do fluido da corrente; ρ, a massa específica da água; μ, a viscosidade dinâmica da água; ρ<sub>c</sub>, a massa específica do fluido da corrente; C<sub>v</sub>, a concentração volumétrica de sedimentos; m<sub>c</sub>, a massa de sedimentos adicionada a mistura, em kg; μ<sub>c</sub>, a viscosidade dinâmica do fluido da corrente; e ν, a viscosidade cinemática do fluido da corrente. Para melhor visualização dos resultados vide tabela em Anexos.

Para todos os quatro experimentos desta etapa, as temperaturas dos fluidos ambientes foram as mesmas, ou seja, 14° C . As massas específicas de fluido ambiente simuladas foram de 1012 kg.m<sup>-3</sup> e 1022 kg.m<sup>-3</sup>, que correspondem a concentrações em peso de 22,22 e 41,54 g.l<sup>-1</sup> de sal (Tabela 6.6).

As temperaturas das correntes simuladas foram as mesmas do fluido ambiente (14°C) e, juntamente com o sedimento adicionado à mistura, geraram valores de viscosidades cinemáticas de  $1,26 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  e  $1,47 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  (Tabela 6.7). Os tempos de injeção das correntes foram de 44 e 31 segundos, para os testes com diferentes vazões, e de 62 e 66 segundos, para os testes com as duas velocidades. As vazões de injeção variaram entre  $1,14 \times 10^{-4}$  e  $8,06 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  para os testes com diferentes vazões. As velocidades testadas foram de 0,1373 e 0,0640  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Os valores de Reynolds para a injeção das correntes variaram entre 589 e 1440, e os valores de Froude, entre 1,80 e 3,84 (Tabela 6.8).

**Tabela 6.8: Dados gerais das correntes simuladas nos ensaios da segunda etapa.**

Ensaio	$\Delta\rho \times 100$	$g'$	Dados da corrente simulada					Velocidade de queda		
			$t_i$ min:seg	$Q_i$ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$V_i$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$Re_i$	$Ri_i$	$Fr_i$	$D_{50}$ m	$W_s$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Q1	-0,6917	0,0678	0:44	1,14E-04	0,0672	1014,94	0,29	1,87	5,50E-05	2,33E-04
Q2			0:31	1,61E-04	0,0954	1440,56	0,14	2,66		
V1	-0,6849	0,0672	1:02	8,06E-05	0,1373	626,27	0,07	3,84		
V2			1:06	7,58E-05	0,0640	588,31	0,31	1,79		

Sendo:  $\Delta\rho$ , a relação entre as massas específicas da corrente e do fluido ambiente;  $g'$ , o valor de gravidade reduzida;  $t_i$ , o tempo total de injeção;  $Q_i$  e  $V_i$ , as vazões e as velocidades de injeção, calculadas a partir do tempo de injeção;  $Re_i$ ,  $Ri_i$  e  $Fr_i$ , parâmetros adimensionais da injeção da corrente;  $D_{50}$ , o diâmetro característico do material utilizado para a composição da corrente; e  $W_s$ , o valor para a velocidade de queda da partícula, pela lei de Rubey. Para melhor visualização dos resultados vide tabela em Anexos.

Conforme os dados apresentados, nos testes de vazão, uma maior abertura do registro resultou na redução do tempo total necessário para o esvaziamento do reservatório e também aumentou a descarga ( $Q_i$ ) e a velocidade de injeção ( $V_i$ ). Nos experimentos com alterações da área da seção transversal do difusor, por sua vez, houve pequenas alterações no tempo total necessário para o esvaziamento do reservatório. Para a menor área de saída do difusor, o tempo total necessário para o esvaziamento do reservatório foi menor, a velocidade de injeção foi elevada e o número de Reynolds também ficou elevado.

### 6.2.1 Imagens da evolução dos correntes

Quanto às imagens do desenvolvimento das correntes, pode-se observar que, para um aumento de, aproximadamente, 40 % da vazão, houve um aumento da velocidade de deslocamento da corrente (comparação entre as imagens de Q1 e Q2). Comparando-se as duas velocidades de injeção, um aumento de quase 100 % na velocidade de injeção aumentou a velocidade de propagação da corrente e também retardou o surgimento da pluma (corrente hipocinial) (Figura 6.19).

Para os parâmetros determinados a partir das imagens dos vídeos, pode-se observar que, nos testes com duas vazões diferentes (Q1 e Q2), o valor médio de espessura da cabeça ( $H_c$ ) foi o mesmo; porém, o valor de velocidade média de deslocamento da frente ( $V_c$ ) foi o dobro para a maior vazão (Q2). Nos testes com diferentes velocidades de injeção, os valores de espessura média de corrente e a velocidade média de avanço da frente foram bastante diferentes. Quanto aos parâmetros adimensionais calculados a partir das dimensões das correntes, observa-se que os valores do número de Reynolds, nos testes com diferentes vazões, aumentaram bastante com relação aos valores obtidos na primeira etapa, passando o escoamento de regime laminar para escoamento de transição. Já os escoamentos com diferentes velocidades de injeção continuaram dentro da faixa de laminar (Tabela 6.9).

**Tabela 6.9: Dados obtidos pelas análises dos vídeos dos ensaios da segunda etapa.**

Ensaio	Análise de vídeos					Adimensionais dos vídeos		
	$H_c$ m	$V_c$ $m.s^{-1}$	$H_p$ m	$V_p$ $m.s^{-1}$	$P_0$ m	$Re_c$	$Ri_c$	$Fr_c$
Q1	0,1705	0,0087	0,0548	0,0173	0,00 a 0,25	1725,30	58,97	0,130
Q2	0,1830	0,0174	0,0569	0,0232	0,00 a 0,25	3613,00	14,84	0,260
V1	0,0836	0,0194	0,0627	0,0107	0,00 a 0,50	1228,63	11,61	0,293
V2	0,1215	0,0154	0,0428	0,0162	0,00 a 0,25	1372,06	27,45	0,191

Sendo:  $H_c$ , a altura média da corrente hiperpicnal;  $V_c$ , a velocidade média da corrente hiperpicnal;  $H_p$ , a espessura média da corrente hipopical (pluma);  $V_p$ , a velocidade média de avanço da corrente hipopical (pluma);  $P_0$ , a faixa onde iniciou o ponto de intumescimento;  $Re_c$ ,  $Ri_c$  e  $Fr_c$ , parâmetros adimensionais para as correntes hiperpicnais simuladas, calculados a partir das medidas obtidas pela análise dos vídeos. Para melhor visualização dos resultados vide tabela em Anexos.

Pelas comparação das imagens apresentadas na figura 6.19, é possível observar que a velocidade de avanço da frente da corrente exerce influência na espessura da corrente, o decréscimo da velocidade acarreta no aumento da espessura, semelhante ao ocorrido com os ensaios da primeira etapa. No entanto, para o ensaio no qual foi utilizada uma maior velocidade de injeção (V1) foi observado que a corrente desenvolveu uma velocidade elevada por uma maior distância além do ponto de injeção e a pluma formou-se apenas no final do canal (Figura 6.20).

Nos ensaios com diferentes vazões, observa-se que o aumento da vazão prolongou, por uma pequena distância, a capacidade de alcance da corrente hiperpicnal, ou seja, no ensaio Q1, a corrente atingiu 40cm, enquanto que, no Q2, a distância chegou a 60cm. A velocidade inicial da corrente simulada no ensaio Q2 também foi maior e atingiu o mesmo valor que no ensaio V1.

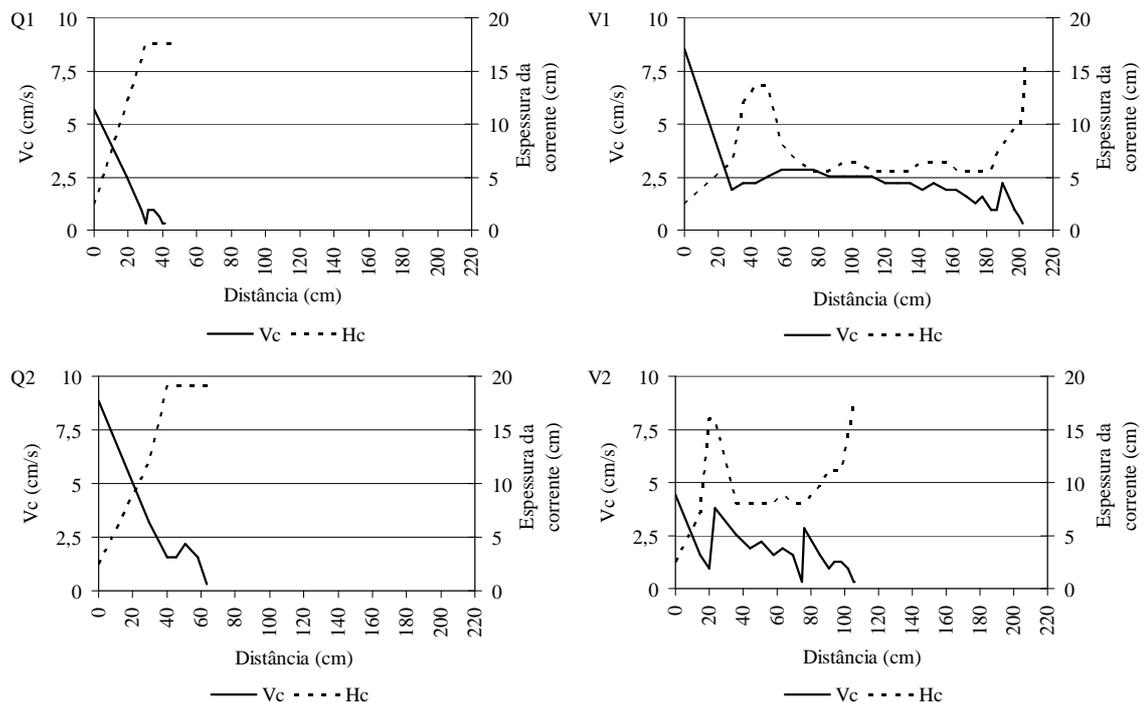
	$\rho_a$	$\rho_c$	Ensaio	Desenvolvimento da corrente		
	kg.m <sup>-3</sup>			15 s	50s	100s
Etapa 2	1010	1005	C2* <sup>1</sup>			
	1012	1005	Q1			
			Q2			
	1020	1015	C13* <sup>2</sup>			
	1022	1015	V1			
			V2			
Etapa 3	1010	1010	C4* <sup>3</sup>			
	1010	1010	G1			
			G2			
			G3			
			G4			
			G5			
Etapa 4	1025	1020	E1			
	1010	1010	E2			
	1000	1010	E3			

**Figura 6.19: Imagens dos vídeos dos ensaios da segunda, terceira e quarta etapas. Transformações das correntes ao longo da distância percorrida no canal. Imagens obtidas pelos registros cinematográficos dos ensaios.**

\*<sup>1</sup> Este ensaio foi utilizado como base para comparação com os ensaios Q1 e Q2 devido à semelhança nos valores de massa específica de fluido ambiente e corrente.

\*<sup>2</sup> Este ensaio foi utilizado como base para comparação com os ensaios V1 e V2 devido à semelhança nos valores de massa específica de fluido ambiente e corrente.

\*<sup>3</sup> Este ensaio foi utilizado como base para comparação com os ensaios G1, G2, G3, G4 e G5 devido à semelhança nos valores de massa específica de fluido ambiente e corrente.



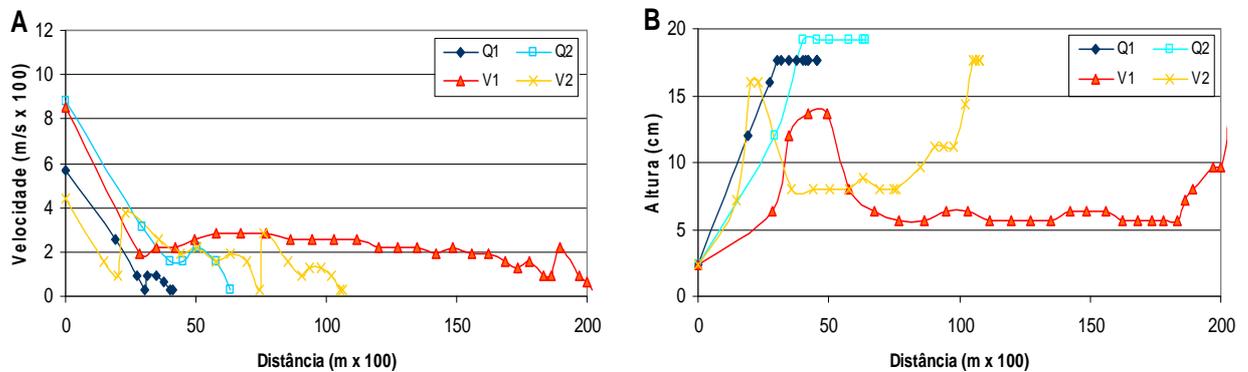
**Figura 6.20:** Gráficos com valores de variações de velocidades ( $V_c$ ) e alturas da corrente hiperpicnal ( $H_c$ ) ao longo da distância do canal para os ensaios Q1, Q2, V1 e V2.

## 6.2.2 Comparação com trabalho semelhante

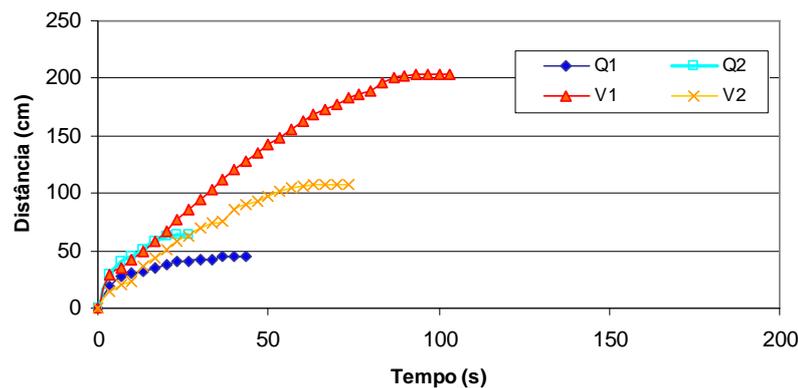
A comparação entre as variações das velocidades de avanço das correntes mostra que a velocidade dependeu da vazão. Para os ensaios V1 e V2, a diferença na área do difusor fez com que ocorresse uma mudança significativa nas velocidades de avanço das frentes (Figura 6.21 A). Para o trabalho de Mulder e Alexander (2001), os valores elevados de Reynolds contribuíram para manter elevadas as velocidades de deslocamento da frente por maiores distâncias (Figura 4.13 B); para o presente experimento os elevados valores de Reynolds antecipou a formação da corrente hipopical (Figura 6.21 A, ensaios Q1 e Q2).

Com relação aos valores de espessura da corrente, observa-se que as correntes com maiores velocidades mantiveram por mais tempo uma menor espessura. Já as correntes Q1 e Q2, devido ao elevado número de Reynolds, expandiram rapidamente ao entrar no canal (Figura 6.21 B). A corrente do ensaio V1 foi a que atingiu a maior distância percorrida, enquanto que a corrente Q2, mesmo tendo desenvolvido uma maior velocidade média de deslocamento, não percorreu longa distância. Dois fatores podem ter favorecido para que as correntes Q1 e Q2 não atingissem grandes distâncias: a elevada turbulência durante a injeção, evidenciada pelos valores mais altos de número de Reynolds; ou, a menor concentração de sedimentos adicionada a mistura

preparada para a corrente, que por sua vez pode ter acarretado em uma rápida perda de densidade da corrente e, conseqüentemente, perda de velocidade e capacidade de alcance (Figura 6.22).



**Figura 6.21: “A” - Variações das velocidades de avanço das correntes simuladas na segunda etapa ao longo da distância do canal. “B” - Variações das espessuras das correntes simuladas na segunda etapa ao longo da distância do canal.**



**Figura 6.22: Distâncias atingidas pelas correntes simuladas na segunda etapa em função do tempo.**

### 6.2.3 Conclusões parciais

A dúvida anterior, à execução desta etapa, era de que a corrente poderia estar sendo injetada com uma vazão e/ou uma velocidade muito elevada, sendo que isso favoreceria o deslocamento da corrente próximo ao fundo por uma maior distância. Os valores dos parâmetros adimensionais das correntes simuladas, nesta etapa, foram bastante alterados quando comparados com os dados da primeira etapa. Pela observação dos dados apresentados acima, pode-se concluir que, com o aumento da vazão, ocorre uma melhor mistura e maior turbulência, o que faz com que a corrente tenha sua espessura expandida rapidamente. O elevado número de Reynolds auxiliou

na formação da pluma hipopical e as distâncias percorridas pelas correntes Q1 e Q2 foram baixas.

A comparação das imagens obtidas pelos vídeos dos ensaios mostrou pouca diferença entre Q1 e Q2 com relação ao ensaio C2 (imagens de referência), sendo que a diferença mais marcante foi a maior velocidade da pluma. O aumento da vazão não foi capaz de manter por mais tempo a corrente junto ao fundo, mas sim aumentar a velocidade de avanço da frente da pluma. Com relação às imagens dos ensaios V1 e V2, comparadas com o ensaio C13 (imagens de referência), percebe-se que o aumento da velocidade de injeção foi capaz de aumentar consideravelmente a distância ao longo da qual a corrente permanece junto ao fundo e, também, de aumentar a velocidade de deslocamento da frente. No ensaio V1, no qual foi utilizada a maior velocidade de injeção, a pluma não chegou a se formar dentro do canal. Estas alterações foram possíveis porque o aumento da velocidade foi bastante significativo, sendo três vezes maior que a velocidade de injeção do ensaio de referência (ensaio C13).

A comparação dos dados deste trabalho, com trabalhos publicados anteriormente, mostra que os escoamentos com elevados valores de Reynolds têm sua espessura de corrente aumentada rapidamente ao longo do seu deslocamento, de forma semelhante ao ocorrido no trabalho de Mulder e Alexander (2002). No entanto, as elevadas distâncias percorridas pelas correntes simuladas, nesta segunda etapa, estão mais relacionadas com a velocidade de injeção da corrente, enquanto que, no trabalho de Gladstone *et al.* (1998), estavam relacionadas à quantidade de material fino presente na mistura da corrente.

Nos ensaios com alteração da velocidade de injeção, também ocorreram alterações nos valores dos parâmetros adimensionais das correntes simuladas, principalmente, quanto ao número de Reynolds da injeção ( $Re_i$ ). No ensaio V1, em que foi utilizada a menor área da seção transversal da saída do difusor, houve uma grande alteração da velocidade de avanço da corrente hiperpical e também não houve a formação de pluma até o final do canal. A velocidade de injeção mostrou influenciar as distâncias máximas atingidas pelas correntes hiperpicais e também a distância em que ocorre a formação da corrente hipopical.

### 6.3 TERCEIRA ETAPA: influência da granulometria na formação das correntes hiperpicnais.

Para esta etapa, foram separadas cinco faixas do carvão 205, conforme a descrição do capítulo 5.5.3. Foram realizados, ao todo, cinco experimentos, sendo que cada um deles com uma diferente faixa granulométrica de material. O interesse era avaliar o comportamento da corrente nas diferentes faixas granulométricas e comparar com os resultados obtidos na primeira etapa.

As massas específicas do fluido ambiente e do fluido da corrente utilizadas nos cinco experimentos foram de  $1010 \text{ kg.m}^{-3}$  para ambos (Tabelas 6.10 e 6.11). Este valor de massa específica foi escolhido com base na evolução das correntes simuladas na primeira etapa, optando-se por uma concentração não muito elevada de sedimentos nas correntes, uma vez que o interesse era conseguir formar as correntes hiperpicnal e hipopicnal dentro do canal. As temperaturas para corrente e fluido ambiente foram de  $18^\circ \text{C}$ , sendo a salinidade utilizada de  $20,73 \text{ g.l}^{-1}$ , e a concentração de sedimentos, de  $70,10 \text{ g.l}^{-1}$  de carvão. Os valores de viscosidades cinemáticas foram de  $1,23 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  para as misturas de fluido da corrente (Tabela 6.11).

**Tabela 6.10: Dados gerais do fluido ambiente utilizado nos ensaios da terceira etapa.**

Ensaio	Dados do fluido ambiente				
	$T_a$ °C	$\rho$ kg.m <sup>-3</sup>	$\mu$ kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>	$\rho_a$ kg.m <sup>-3</sup>	S g.l <sup>-1</sup>
G1					
G2					
G3	18,00	998,68	1,054E-03	1010,00	20,73
G4					
G5					

Sendo:  $T_a$ , a temperatura do fluido ambiente;  $\rho$ , a massa específica da água;  $\mu$ , a viscosidade dinâmica da água;  $\rho_a$ , a massa específica do fluido ambiente; e S, a salinidade do fluido ambiente. Para melhor visualização dos resultados vide tabela em Anexos.

Como as massas específicas do fluido ambiente e da corrente são idênticas, os parâmetros que dependem destes valores não podem ser calculados, tais como  $\Delta\rho \times 100$ ,  $g'$ , o número de Richardson e o de Froude. Os valores de Reynolds foram baixos, variando entre 675 e 866 (Tabela 6.12). Os valores de  $D_{50}$  das faixas granulométricas utilizadas foram de 22, 32, 51, 105 e 203  $\mu\text{m}$ , os demais valores de  $D_{10}$  e  $D_{90}$  estão apresentados na tabela 6.12, juntamente com os valores calculados para a velocidade de queda para cada um dos ensaios respectivamente..

**Tabela 6.11: Dados gerais dos fluidos das correntes simuladas nos ensaios da terceira etapa.**

Ensaio	Dados da mistura da corrente (valores iniciais)							
	T <sub>c</sub> °C	ρ kg.m <sup>-3</sup>	μ kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>	ρ <sub>c</sub> kg.m <sup>-3</sup>	C <sub>v</sub> %	m <sub>c</sub> kg	μ <sub>c</sub> kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>	ν <sub>c</sub> m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
G1								
G2								
G3	18,00	998,68	1,054E-03	1010,00	5,89	0,35	1,237E-03	1,225E-06
G4								
G5								

Sendo: T<sub>c</sub>, a temperatura do fluido da corrente; ρ, a massa específica da água pura; μ, a viscosidade dinâmica da água; ρ<sub>c</sub>, a massa específica do fluido da corrente; C<sub>v</sub>, a concentração volumétrica de sedimentos; m<sub>c</sub>, a massa de sedimentos adicionada à mistura, em kg; μ<sub>c</sub>, a viscosidade dinâmica do fluido da corrente; e ν<sub>c</sub>, a viscosidade cinemática do fluido da corrente. Para melhor visualização dos resultados vide tabela em Anexos.

**Tabela 6.12: Dados gerais das correntes simuladas nos ensaios da terceira etapa.**

Ensaio	Dados da corrente simulada				Velocidade de queda			
	t <sub>i</sub> min:seg	Q <sub>i</sub> m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	V <sub>i</sub> m.s <sup>-1</sup>	Re <sub>i</sub>	D <sub>10</sub> m	D <sub>50</sub> m	D <sub>90</sub> m	W <sub>s</sub> m.s <sup>-1</sup>
G1	1:08	7,353E-05	0,0435	674,65	2,27E-06	2,20E-05	4,83E-05	2,79E-04
G2	1:06	7,576E-05	0,0448	695,09	4,72E-06	3,22E-05	6,54E-05	5,47E-04
G3	0:53	9,434E-05	0,0558	865,58	7,28E-06	5,11E-05	9,20E-04	7,13E-04
G4	0:54	9,259E-05	0,0548	849,55	2,18E-05	1,05E-04	1,60E-04	1,01E-03
G5	0:55	9,091E-05	0,0538	834,11	8,19E-05	2,03E-04	3,12E-04	2,79E-03

Sendo: Δρ x 100, a relação entre as massas específicas da corrente e do fluido ambiente; g', o valor de gravidade reduzida; t<sub>i</sub>, o tempo total de injeção; Q<sub>i</sub> e V<sub>i</sub>, as vazões e velocidades de injeção, calculadas a partir do tempo de injeção; Re<sub>i</sub>, R<sub>ii</sub> e Fri, parâmetros adimensionais da injeção da corrente; D<sub>50</sub>, o diâmetro característico do material utilizado para a composição da corrente; W<sub>s</sub>, o valor para a velocidade de queda da partícula, pela lei de Rubey. Para melhor visualização dos resultados vide tabela em Anexos.

### 6.3.1 Imagens da evolução das correntes

Quanto à análise dos vídeos dos ensaios da terceira etapa, algo bastante interessante foi observado quanto ao comportamento das correntes para as diferentes granulometrias empregadas. Nessa situação, foi observado que, o material de menor diâmetro formou correntes do tipo hiperpicnal, enquanto que o material de maior diâmetro formou uma corrente hipopicnal (Figura 6.19 – G5). A explicação para tal fato ainda é desconhecida, mas uma possível causa seria a maior proximidade e a colisão entre partículas nas misturas com material de menor diâmetro.

No caso do experimento em que foi utilizado o menor diâmetro médio de partículas (ensaio G1), os grãos são mantidos unidos pelas forças de interação entre eles, pela colisão ou até mesmo pelas forças viscosas do fluido sendo exercidas sobre os grãos, sendo que a espessura da corrente foi a menor em comparação com as outras desta etapa (Tabela 6.13).

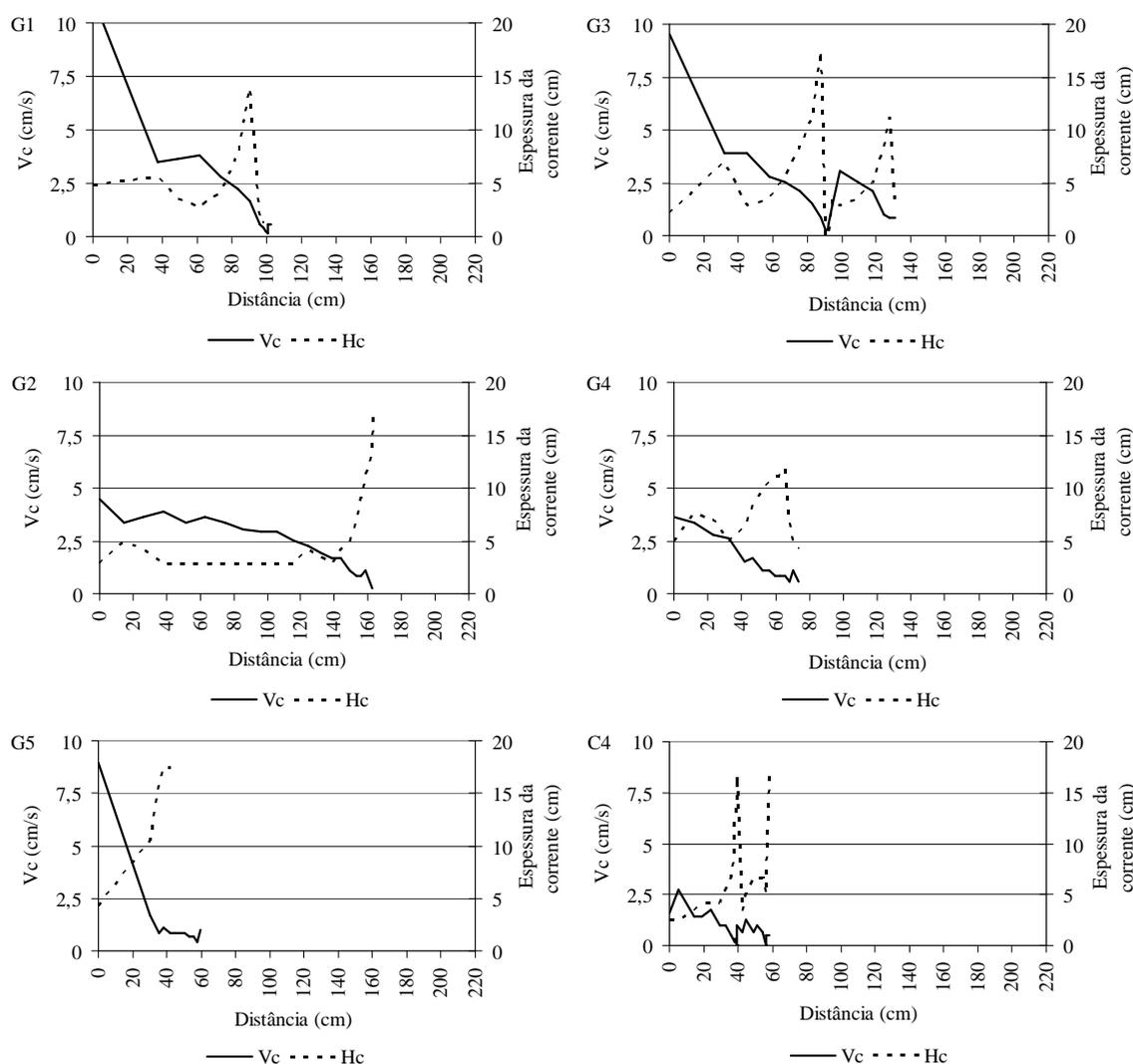
A força de interação é proporcional à tensão de cisalhamento, transmitida entre os grãos, que se contrapõe à tendência dos grãos de se afastarem. No experimento em que foram utilizados os sedimento mais grossos, ou seja, com maiores tamanhos médios de grãos (ensaio G5), a maior distância entre os grãos não produzia uma interação efetiva, permitindo, assim, uma rápida expansão da corrente, e fazendo com que os grãos fossem carregados juntamente com o fluido que ascendia dentro do canal (Tabela 6.13). Nas imagens da corrente G5 (Figura 6.19 – G5), é interessante notar que, mesmo com as partículas de grande diâmetro, como é o caso do material utilizado para este ensaio, foi formada uma corrente hipopical. Pelos dados obtidos na primeira etapa de experimentos, acreditava-se que apenas partículas de menor diâmetro eram transportadas pela pluma.

**Tabela 6.13: Dados obtidos pelas análises dos vídeos dos ensaios da terceira etapa.**

Ensaio	Análise de vídeos					Adimensionais dos vídeos		
	H <sub>c</sub> m	V <sub>c</sub> m.s <sup>-1</sup>	H <sub>p</sub> m	V <sub>p</sub> m.s <sup>-1</sup>	P <sub>0</sub> m	Re <sub>c</sub>	Ri <sub>c</sub>	Fr <sub>c</sub>
G1	0,0508	0,0168	0,0586	0,0182	0,25 a 0,50	814,65	-	-
G2	0,0546	0,0234	0,0672	0,0090	0,50 a 1,00	1185,93	-	-
G3	0,0552	0,0179	0,0516	0,0188	0,25 a 0,50	1236,50	-	-
G4	0,0808	0,0146	0,0416	0,0150	0,25 a 0,50	1132,95	-	-
G5	0,1540	0,0089	0,0249	0,0303	0,25 a 0,50	1400,32	-	-

Sendo: H<sub>c</sub>, a altura média da corrente hiperpical; V<sub>c</sub>, a velocidade média da corrente hiperpical; H<sub>p</sub>, a espessura média da corrente hipopical (pluma); V<sub>p</sub>, a velocidade média de avanço da corrente hipopical (pluma); P<sub>0</sub>, a faixa onde iniciou o ponto de intumescimento; Re<sub>c</sub>, Ri<sub>c</sub> e Fr<sub>c</sub>, parâmetros adimensionais para as correntes hiperpicais simuladas, calculados a partir das medidas obtidas pela análise dos vídeos. Para melhor visualização dos resultados vide tabela em Anexos.

Nos ensaios desta etapa, foi observado comportamento semelhante ao das etapas anteriores, no que diz respeito à relação entre velocidade de deslocamento da frente e valores de espessura da corrente (Figura 6.23). À medida que a corrente perde velocidade, ocorre uma expansão da corrente. As correntes dos ensaios G1 e G2 foram as que apresentaram as menores espessuras, enquanto que a corrente do ensaio G5 expandiu-se instantes após sua entrada no fluido ambiente. A corrente G4 foi a que apresentou maior semelhança anatômica com a corrente de referência (C4), a qual foi simulada na primeira etapa com condições iniciais semelhantes ( $\rho_a$ ,  $\rho_c$ ,  $Q_i$  e  $V_i$ ), apesar de possuírem valores de distribuição granulométrica bastante diferentes, sendo que, o D50 do ensaio C4 era de 45  $\mu\text{m}$  enquanto que o do ensaio G4 era 105  $\mu\text{m}$  (Figura 6.23).



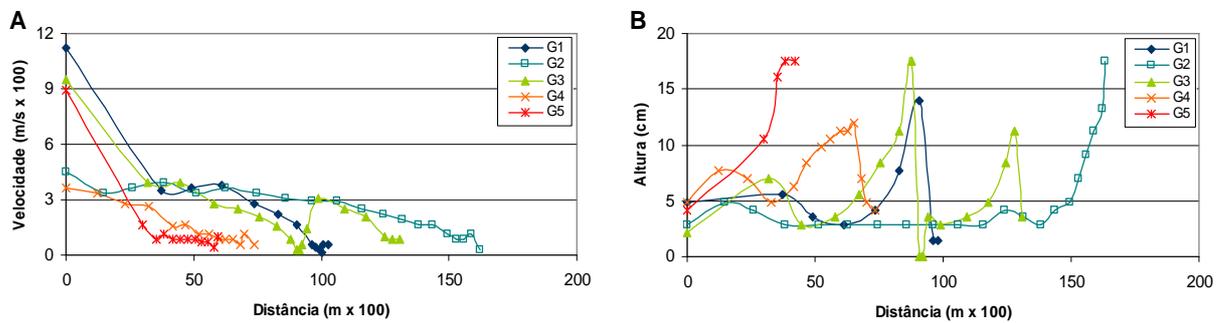
**Figura 6.23: Gráficos com valores de variações de velocidades ( $V_c$ ) e alturas da corrente hiperpicnal ( $H_c$ ) ao longo da distância do canal para os ensaios G1, G2, G3, G4 e G5 e para o ensaio de referência (C4).**

### 6.3.2 Comparação com outro trabalho semelhante

As velocidades de avanço da frente da corrente mostraram-se dependentes do tamanho das partículas presentes na mistura. A corrente formada pelo material de maior diâmetro foi a que apresentou as menores velocidades de avanço devido a rápida deposição dos sedimentos (Figura 6.24 A – G5). A velocidade de avanço da frente foi maior para as correntes formadas pelas menores partículas (Figura 6.24 A – G1 e G2). Com relação às espessuras das correntes, as mais rápidas expansões foram atingidas pelas correntes compostas por partículas de maior diâmetro (Figura 6.24 B – G4 e G5). A corrente G2 foi a que conseguiu manter por uma distância maior a

sua pequena espessura, expandindo-se quando a velocidade da corrente decresceu (Figura 6.24 B).

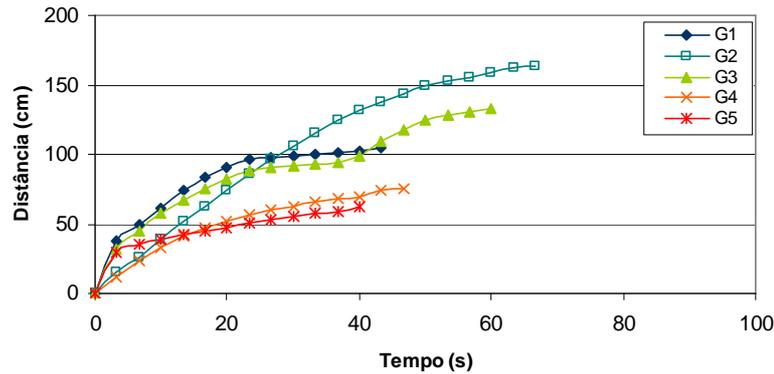
Esta etapa do estudo foi a que apresentou resultados mais semelhantes com o trabalho publicado por Gladstone *et al.* (1998). As máximas distâncias alcançadas pelas correntes, em função do tempo de ensaio, foram atingidas pelas correntes compostas por material de menor diâmetro. A corrente hiperpical, composta apenas por partículas grossas, não avançou por longa distância, como pode ser visto na figura 6.25, provavelmente porque o número de partículas era baixo e porque a corrente formou uma pluma logo no início do ensaio.



**Figura 6.24: A - Variações das velocidades de avanço das correntes simuladas na terceira etapa ao longo da distância do canal; B - Variações das espessuras das correntes simuladas na terceira etapa ao longo da distância do canal.**

No trabalho publicado por Gladstone *et al.*(1998), a corrente formada apenas por material grosso também percorreu uma menor distância, mas o motivo para o ocorrido foi a elevada taxa de sedimentação do material. As correntes simuladas por Gladstone *et al.* (1998) não utilizaram um ambiente salino; portanto, as partículas mais pesadas terminaram sedimentando-se rapidamente.

Neste estudo, nas correntes compostas por material de maior diâmetro, o ambiente salino, juntamente com o baixo número de partículas em suspensão, provocou a ascensão das partículas, sendo estas transportadas pela pluma. Já as correntes compostas por material fino, mesmo com a salinidade do ambiente, conseguiram manter a sua forma por maiores distâncias, sendo um dos possíveis motivos o número elevado de partículas transportadas em suspensão.



**Figura 6.25: Distâncias atingidas pelas correntes simuladas na terceira etapa em função do tempo.**

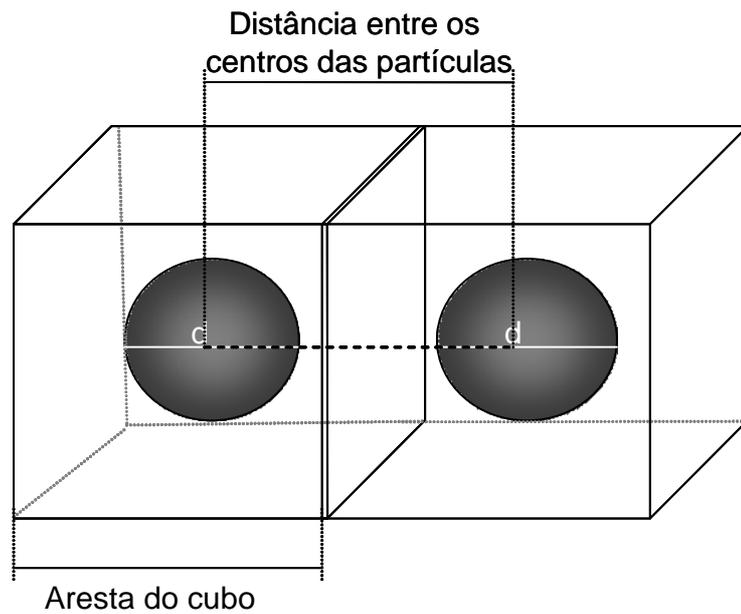
Para tentar elucidar qual seria o número de partículas em suspensão, foi feito um cálculo bastante simplificado, para determinar um número médio de partículas, bem como a distância média entre as partículas. Para este cálculo, considerou-se que todas as partículas presentes na mistura são do mesmo tamanho e possuem uma forma esférica. O cálculo utilizado é expresso por:

$$N = \frac{VT}{V_p}, \quad (6.1)$$

sendo:

- $N$  – número total de partículas presentes na mistura;
- $VT$  – o volume total de sedimentos presente na mistura ( $m^3$ ); e
- $V_p$  – o volume de uma partícula, calculado pela fórmula de volume da esfera ( $m^3$ ).

Supondo-se que todas as partículas estão uniformemente distribuídas dentro da mistura, pode-se então aproximar o volume disponível para cada uma delas como sendo um cubo a elas circunscrito. A aresta do cubo ocupado por uma única partícula equivale ao valor da distância entre os centros de duas partículas justapostas, conforme esquema ilustrativo apresentado na figura abaixo (Figura 6.26).



**Figura 6.26: Esquema ilustrando os espaços ocupados pelas partículas e a distância entre os centros das partículas.**

A partir do número de partículas, pode-se determinar a distância média entre os centros das partículas, a partir da expressão:

$$L_p = \sqrt[3]{\frac{V}{N}} \quad (6.2)$$

Sendo:

- $L_p$  – a distância entre os centros das partículas [m];
- $V$  – o volume total de mistura [m<sup>3</sup>]; e
- $N$  – o número de total de partículas [m<sup>3</sup>].

Para ilustrar os valores obtidos com o cálculo apresentado acima, foi determinada a distância entre partículas para as faixas granulométricas utilizadas nesta etapa do estudo. Para o cálculo, foi considerado um volume de mistura igual a 5 litros (0,005 m<sup>3</sup>) e uma concentração de partículas igual a 5,89 % em volume, que correspondem aos valores utilizados para os ensaios da terceira etapa, na qual foram variados os tamanhos dos grãos utilizados na composição das correntes. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.14, abaixo.

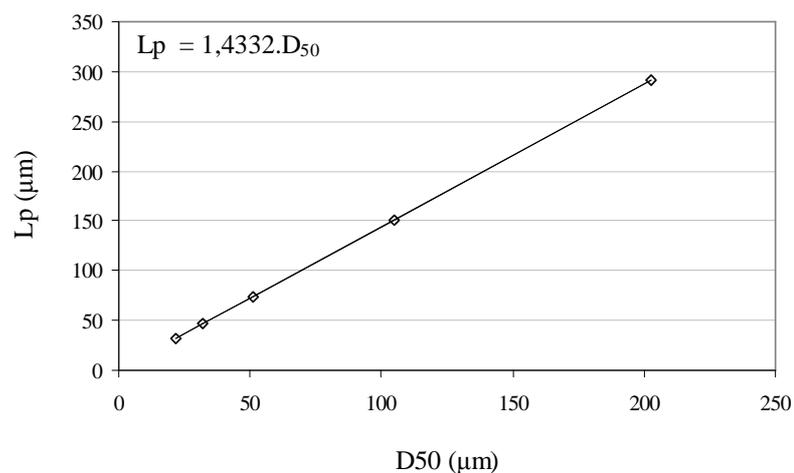
**Tabela 6.14: Dados de cálculo para determinação de distância média entre os centros de partículas.**

Ensaio	D <sub>50</sub> m	V m <sup>3</sup>	VT=CV m <sup>3</sup>	V <sub>p</sub> =πD <sup>2</sup> /4 m <sup>3</sup>	N=VT/VP	L <sub>p</sub> m
G1	2,20E-05			4,48E-14	6,57E+09	9,13E-05
G2	3,22E-05			1,39E-13	2,12E+09	1,33E-04
G3	5,11E-05	0,005	2,95E-04	5,57E-13	5,29E+08	2,11E-04
G4	1,05E-04			4,84E-12	6,08E+07	4,35E-04
G5	2,03E-04			3,50E-11	8,41E+06	8,41E-04

Sendo: D<sub>50</sub>, o diâmetro de partícula utilizado para a base do cálculo; V<sub>p</sub>, o volume ocupado por uma partícula; VT, o volume total ocupado pelas partículas; N, o número total de partículas; V, o volume total de mistura; e LP, a distância entre os centros das partículas.

Conforme os resultados apresentados na tabela 6.14, e através da representação destes dados no gráfico apresentado na figura 6.27, pode-se observar que, quanto menor o tamanho das partículas, menor é a distância entre elas, ou seja, necessita-se de um número maior de partículas para manter uma mesma concentração volumétrica. Este, provavelmente, é o motivo pelo qual houve a formação de uma corrente hiperpicnal, no ensaio G1, e da pluma, no ensaio G5.

A maior proximidade entre as partículas aumenta a capacidade da corrente de manter por um maior tempo a integridade da corrente hiperpicnal, devido à interação entre os grãos e também devido às forças viscosas proporcionadas pela ação do fluido agindo sobre e entre as superfícies das partículas. No ensaio G5, a distância entre as partículas era grande, e pode-se supor que tanto as colisões entre elas quanto as forças viscosas foram pouco efetivas para manter a integridade da corrente, ou seja: ao entrar no canal, a corrente sofreu expansão e transformou-se em pluma, sem conseguir formar uma corrente hiperpicnal.



**Figura 6.27: Distância entre os centros das partículas (L<sub>p</sub>) em função de seu tamanho (D<sub>50</sub>).**

Partindo dos valores da expansão sofrida pela corrente em um determinado instante do ensaio, utilizou-se a equação (8) para obter um valor aproximado da distância entre partículas, como forma de tentar explicar por que alguns ensaios formaram correntes do tipo hiperpicnal, e outros, apenas a pluma hipopicnal, sendo feitas as seguintes considerações:

- a) A descarga é constante, ou seja, não existe variação na vazão escoada ao longo de todo o esvaziamento do reservatório;
- b) A descarga sólida é constante, ou seja, não existe variação de quantidade e de tamanho de partículas ao longo do período de esvaziamento do reservatório;
- c) O tamanho de partículas presentes na mistura é uniforme, ou seja, a mistura é composta por partículas de mesmo tamanho e, neste caso, foi considerado o valor de D50.

O instante do ensaio avaliado foi o relativo ao vigésimo segundo após o início da descarga. Para este instante, foi determinada a quantidade de mistura que já havia sido injetada dentro do canal experimental através da equação:

$$\%t_i = \frac{t}{t_i} \quad (6.3)$$

Sendo:

- $\%t_i$  – o tempo relativo do ensaio, correspondente ao instante de interesse;
- $t$  – o instante em que se deseja determinar a distância entre partículas (para este caso 20s);
- $t_i$  – o tempo total de esvaziamento do reservatório [s].

Para determinar o volume total de sedimentos injetado no canal até o instante de interesse (20s), basta multiplicar o volume total de sedimentos presente na mistura pelo valor de tempo relativo calculado.

$$VT(t) = VT \times \%t_i \quad (6.4)$$

Sendo:

- $VT(t)$  - o volume de sedimentos injetado até o instante t [m3].

Depois de determinado o volume de sedimentos injetado, é calculado o número total de partículas (N) através da equação (7).

Para determinar o volume ocupado pela mistura após a injeção, foram selecionadas imagens do ensaio referentes ao instante de interesse (no caso, 20 s) (Tabela 6.15). Para cada imagem, foi determinada, inicialmente, a área ocupada pela mistura dentro do canal e, depois, sabendo-se a largura do canal, foi determinado o volume ocupado pela mistura. Para a determinação da área, foi utilizado o aplicativo Image Tool<sup>®</sup>, que possui uma ferramenta que permite delimitar uma área da figura em pixels. Para saber a área correspondente em m<sup>2</sup>, é necessário que se tenha uma referência vertical e outra horizontal, ambas em metros, para converter a área de pixels<sup>2</sup> para m<sup>2</sup>. Para as imagens analisadas, os valores de referência utilizados foram a profundidade do canal ( $h_{\text{canal}} = 0,2 \text{ m}$ ) e o comprimento útil do canal ( $L_{\text{canal}} = 2,5 \text{ m}$ ). As distâncias calculadas para cada ensaio estão apresentadas na tabela 6.16.

A relação expressa pela equação (11) procura estimar a expansão sofrida pela mistura ao sair do reservatório e entrar no canal, após 20 s de início do ensaio.

$$E = \frac{Lp_{(20s)}}{Lp} \quad (6.5)$$

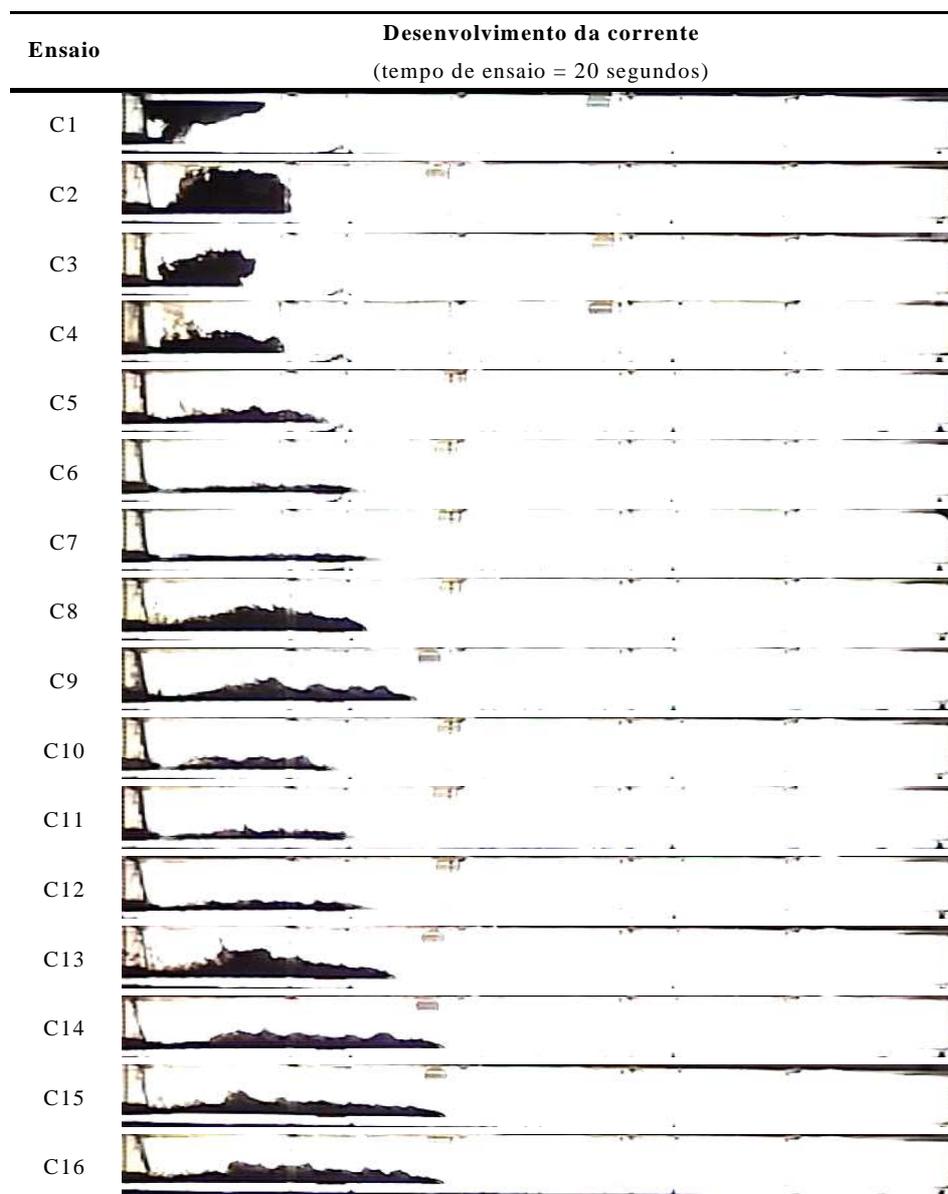
Sendo:

- $E$  – a expansão sofrida pela mistura dentro do canal experimental;
- $Lp_{(20s)}$  – a distância média entre as partículas para o instante igual a vinte segundos após o início do ensaio [m]; e
- $Lp$  – a distância média entre as partículas presentes na mistura antes da entrada no canal [m].

**Tabela 6.16: Valores de distância entre partículas calculados para os ensaios da Etapa 1 para o tempo de avanço da corrente de 20 s. Para todos os dados apresentados abaixo, foram considerados os valores únicos de  $D_{50} = 5,50 \times 10^{-5} \text{ m}$  e  $V_p = 6,97 \times 10^{-13} \text{ m}^3$ .**

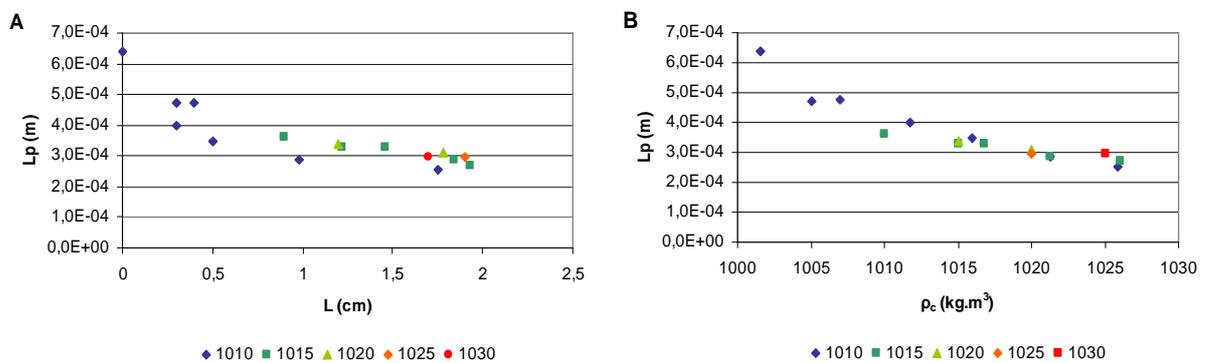
Ensaio	ti s	%rel ti	mc kg	Vc m <sup>3</sup>	VT/20s m <sup>3</sup>	N/20s	$h_{\text{canal}}$ pixel	$L_{\text{canal}}$ pixel	A pixel <sup>2</sup>	A m <sup>2</sup>	V/20s m <sup>3</sup>	L m	Lp/20s m	E
C1	170	0,118	0,1453	1,22E-04	1,44E-05	2,06E+07	48	650	2139	3,43E-02	4,97E-03	3,06E-04	6,22E-04	2,04
C2	68	0,294	0,2136	1,79E-04	5,28E-05	7,58E+07	47	626	3046	5,18E-02	7,51E-03	2,69E-04	4,63E-04	1,72
C3	163	0,123	0,2937	2,47E-04	3,03E-05	4,34E+07	47	629	1771	3,00E-02	4,34E-03	2,42E-04	4,64E-04	1,92
C4	164	0,122	0,4426	3,72E-04	4,54E-05	6,51E+07	46	636	1513	2,59E-02	3,75E-03	2,11E-04	3,86E-04	1,83
C5	176	0,114	0,5925	4,97E-04	5,66E-05	8,12E+07	46	616	1267	2,24E-02	3,24E-03	1,91E-04	3,42E-04	1,79
C6	156	0,128	0,7409	6,22E-04	7,98E-05	1,15E+08	46	627	973	1,69E-02	2,45E-03	1,78E-04	2,77E-04	1,56
C7	152	0,132	0,8901	7,47E-04	9,84E-05	1,41E+08	46	622	836	1,46E-02	2,12E-03	1,67E-04	2,47E-04	1,48
C8	70	0,286	0,4031	3,38E-04	9,68E-05	1,39E+08	46	639	2378	4,05E-02	5,87E-03	2,17E-04	3,48E-04	1,60
C9	72	0,278	0,5419	4,55E-04	1,26E-04	1,82E+08	45	611	2232	4,06E-02	5,89E-03	1,97E-04	3,19E-04	1,62
C10	160	0,125	0,5916	4,97E-04	6,21E-05	8,92E+07	46	623	1169	2,04E-02	2,96E-03	1,91E-04	3,21E-04	1,68
C11	164	0,122	0,7409	6,22E-04	7,59E-05	1,09E+08	46	613	947	1,68E-02	2,43E-03	1,78E-04	2,82E-04	1,59
C12	152	0,132	0,8899	7,47E-04	9,84E-05	1,41E+08	47	625	1069	1,82E-02	2,64E-03	1,67E-04	2,65E-04	1,59
C13	69	0,290	0,5419	4,55E-04	1,32E-04	1,89E+08	46	619	2624	4,61E-02	6,68E-03	1,97E-04	3,28E-04	1,66
C14	72	0,278	0,6892	5,79E-04	1,61E-04	2,31E+08	47	632	2625	4,42E-02	6,41E-03	1,82E-04	3,03E-04	1,66
C15	66	0,303	0,7025	5,90E-04	1,79E-04	2,57E+08	47	637	2524	4,22E-02	6,11E-03	1,81E-04	2,88E-04	1,59
C16	68	0,294	0,8310	6,98E-04	2,05E-04	2,95E+08	46	623	2746	4,79E-02	6,95E-03	1,71E-04	2,87E-04	1,68

Pela observação das imagens apresentadas na Figura 6.28, é possível notar que algumas correntes expandiram-se mais do que outras, principalmente as referentes aos ensaios C1, C2 e C3. Os valores de distância média entre partículas foram comparados com as distâncias máximas atingidas pelas correntes hiperpicnais e com os valores de massa específica da mistura. Nota-se que as correntes que atingiram as maiores distâncias foram as que apresentaram uma menor distância média entre partículas aos vinte segundos de ensaio (Figura 6.29A). A distância média entre partículas também está relacionada com a massa específica da mistura, sendo que, quanto maior a massa específica, menor a distância entre as partículas (Figura 6.29B).

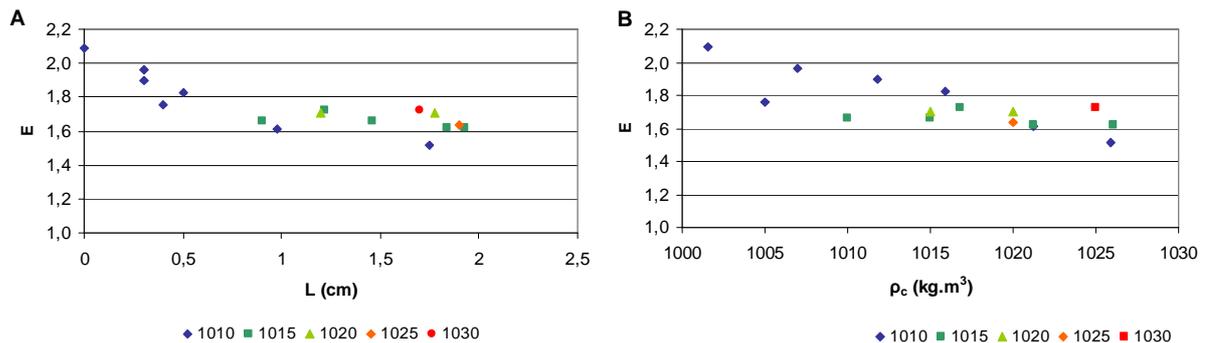


**Figura 6.28:** Imagens dos ensaios utilizadas para determinar a distância média entre partículas.

Comparando-se a expansão sofrida pela mistura ao entrar no canal experimental com a distância atingida pela corrente hiperpicnal, é possível notar que as maiores distâncias foram obtidas pelas correntes que tiveram uma menor expansão (Figura 6.29 – A). A relação entre a expansão sofrida pelas correntes e os valores de massas específicas das misturas das correntes simuladas mostram que as correntes com maior massa específica expandem menos ao entrar no canal e que, para correntes com valores de massa específica semelhantes, aquelas que encontraram um fluido ambiente mais denso foram as que expandiram menos (Figura 6.29 – B).



**Figura 6.29: A: Relação entre a distância média entre partículas ( $L_p$ ) e a distância percorrida pela corrente hiperpicnal ( $L$ ). B: Relação entre a distância média entre partículas ( $L_p$ ) e a massa específica da mistura da corrente ( $\rho_c$ ), ambas para as diferentes massas específicas de fluido ambiente testadas na primeira etapa.**



**Figura 6.30 A: Relação entre a expansão sofrida pela corrente ( $E$ ) e a distância percorrida pela corrente hiperpicnal ( $L$ ). B: Relação entre expansão sofrida pela corrente ( $E$ ) e a massa específica da mistura da corrente ( $\rho_c$ ), ambas para as diferentes massas específicas de fluido ambiente testadas na primeira etapa.**

A expansão da corrente está relacionada com a concentração de sedimentos presente na mistura e também com a salinidade do ambiente. A concentração de sedimentos influencia no

número de partículas em suspensão e, conseqüentemente, na distância média entre partículas. A salinidade do ambiente é a responsável pela alteração na densidade da corrente, fazendo com que ela aumente, pois o fluido ambiente é incorporado à corrente durante a sua expansão e, possivelmente, esta é seja uma explicação para as justificar menores expansões em ambientes com maior salinidade.

### **6.3.3 Conclusões parciais**

O comportamento das correntes para as diferentes granulometrias de material empregadas nos ensaios foi, de certa forma, inesperada. O que se esperava era que as correntes formadas por material fino formariam plumas, e que as correntes compostas por material mais grosso formariam correntes hiperpicnais. Apesar de não ter sido coletado o material depositado pelas correntes simuladas, a observação visual durante os experimentos mostra indícios de que na corrente formada por material grosso o material subiu formando a pluma enquanto que a corrente formada por material fino formou a corrente hiperpicnal. Nesta etapa do estudo, ficou evidente que outros fatores, além das concentrações, vazões, velocidades das correntes e salinidade do ambiente, são responsáveis pela manutenção das correntes junto ao fundo. A partir dos experimentos desta etapa, é evidente que o número de partículas em suspensão auxiliou na manutenção da forma da corrente hiperpicnal, retardando a sua expansão e a formação da pluma hipopicnal.

## **6.4 QUARTA ETAPA: *escape de fluido intersticial***

Na última etapa do presente trabalho, foi observado e detalhado o escape de fluido intersticial das correntes. Para que o escape de fluido do interior da corrente pudesse ser evidenciado, foi dissolvido corante na água utilizada para a composição da corrente. Essa visualização foi de extrema importância para esclarecer o motivo pela qual as misturas, mesmo com menor massa específica que o fluido ambiente, conseguiam formar correntes do tipo hiperpicnal.

As massas específicas do fluido ambiente foram diferentes para cada um dos experimentos desta etapa, sendo o ensaio E3 realizado com água pura, sem adição de sal. No ensaio E1, a massa específica da corrente foi menor que a do fluido ambiente; em E2, as massas específicas de ambiente e corrente foram iguais; e em E3, a massa específica da corrente foi

maior que a massa específica do fluido ambiente. Os dados das misturas de fluido ambiente e fluido da corrente são apresentados nas Tabelas 6.17 e 6.18.

**Tabela 6.17: Dados gerais do fluido ambiente utilizado nos ensaios da quarta etapa.**

Dados do fluido ambiente					
Ensaio	T <sub>a</sub> °C	ρ kg.m <sup>-3</sup>	μ kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>	ρ <sub>a</sub> kg.m <sup>-3</sup>	S g.l <sup>-1</sup>
E1	18,00	998,68	1,054E-03	1025,00	48,20
E2	18,00	998,68	1,054E-03	1010,00	20,73
E3	18,00	998,68	1,054E-03	998,68	0

Sendo: T<sub>a</sub>, a temperatura do fluido ambiente; ρ, a massa específica da água; μ, a viscosidade dinâmica da água; ρ<sub>a</sub>, a massa específica do fluido ambiente; e S, a salinidade do fluido ambiente. Para melhor visualização dos resultados vide tabela em Anexos.

**Tabela 6.18: Dados gerais dos fluidos das correntes simuladas nos ensaios da quarta etapa.**

Dados da mistura da corrente (valores iniciais)								
Ensaio	T <sub>c</sub> °C	ρ kg.m <sup>-3</sup>	μ kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>	ρ <sub>c</sub> kg.m <sup>-3</sup>	CV %	m <sub>c</sub> kg	μ <sub>c</sub> kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>	ν <sub>c</sub> m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
E1	18,00	998,68	1,054E-03	1020,00	11,09	0,66	1,439E-03	1,410E-06
E2	18,00	998,68	1,054E-03	1010,00	5,89	0,35	1,237E-03	1,225E-06
E3	18,00	998,68	1,054E-03	1010,00	5,89	0,35	1,237E-03	1,225E-06

Sendo: T<sub>c</sub>, a temperatura do fluido da corrente; ρ, a massa específica da água pura; μ, a viscosidade dinâmica da água; ρ<sub>c</sub>, a massa específica do fluido da corrente; C<sub>v</sub>, a concentração volumétrica de sedimentos; m<sub>c</sub>, a massa de sedimentos adicionada à mistura, em kg; μ<sub>c</sub>, a viscosidade dinâmica do fluido da corrente; e ν<sub>c</sub>, a viscosidade cinemática do fluido da corrente. Para melhor visualização dos resultados vide tabela em Anexos.

As velocidades de injeção tiveram uma pequena variação o que fez variar de forma pouco significativa os valores do número de Reynolds, sendo que os ensaios E2 e E3 foram os que tiveram os maiores valores ( 791 e 778) e seriam, portanto, um pouco mais turbulentos que o ensaio E1 (595). Os valores de Froude, para os ensaios E1 e E3, foram maiores que 1, e o número de Richardson indica que existe uma baixa estratificação entre corrente e fluido ambiente (Tabela 6.19).

**Tabela 6.19: Dados gerais das correntes simuladas nos ensaios da quarta etapa.**

Ensaio	Δρ X 100	g'	Dados da corrente simulada						Velocidade de queda	
			t <sub>i</sub> min:seg	Q <sub>i</sub> m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	V <sub>i</sub> m.s <sup>-1</sup>	Re <sub>i</sub>	Ri <sub>i</sub>	Fr <sub>i</sub>	D <sub>50</sub> m	W <sub>s</sub> m.s <sup>-1</sup>
E1	-0,4878	0,0478	0,0465	7,463E-05	0,0441	594,55	0,47	1,46	5,50E-05	2,53E-04
E2	0,0000	0,0000	0,0403	8,621E-05	0,0510	790,96	-	-	5,50E-05	2,79E-04
E3	1,1456	0,1123	0,0410	8,475E-05	0,0501	777,56	0,85	1,08	5,50E-05	3,01E-04

Sendo: Δρ, a relação entre as massas específicas da corrente e do fluido ambiente; g', o valor de gravidade reduzida; t<sub>i</sub>, o tempo total de injeção; Q<sub>i</sub> e V<sub>i</sub>, as vazões e velocidades de injeção, calculadas a partir do tempo de injeção; Re<sub>i</sub>, Ri<sub>i</sub> e Fr<sub>i</sub>, parâmetros adimensionais da injeção da corrente; D<sub>50</sub>, o diâmetro característico do material utilizado para a composição da corrente; e W<sub>s</sub>, o valor para a velocidade de queda da partícula, pela lei de Rubey. Para melhor visualização dos resultados vide tabela em Anexos.

### 6.4.1 Imagens da evolução dos correntes

A partir das imagens obtidas pelos vídeos dos ensaios, pode-se observar que, assim como nos experimentos anteriores, o decréscimo da velocidade causou um aumento na espessura da corrente para os ensaios E1 e E2 (Figura 6.30). No entanto, para o ensaio E3, em que se utilizou somente água para o fluido ambiente, não houve expansão da corrente (Figura 6.30 – E3). A corrente simulada em ambiente não salino foi a que apresentou a maior velocidade de deslocamento da frente e a menor espessura (Tabela 6.20). As imagens das evoluções da corrente estão apresentadas na figura 6.19.

**Tabela 6.20: Dados obtidos a partir da análise dos vídeos dos ensaios da quarta etapa.**

Ensaio	Análise de vídeos					Adimensionais dos vídeos		
	Hc m	Vc m.s <sup>-1</sup>	Hp m	Vp m.s <sup>-1</sup>	P <sub>0</sub> m	Rec	Ric	Frc
E1	0,0545	0,0139	0,0630	0,0151	0,25 a 0,50	577,61	10,95	0,302
E2	0,0922	0,0188	0,0671	0,0171	0,25 a 0,50	1508,53	-	-
E3	0,0451	0,0222	0,0000	0,0000	-	839,31	9,22	0,331

Sendo: Hc, a altura média da corrente hiperpicnal; Vc, a velocidade média da corrente hiperpicnal; Hp, a espessura média da corrente hipopicnal (pluma); Vp, a velocidade média de avanço da corrente hipopicnal (pluma); P<sub>0</sub>, a faixa onde iniciou o ponto de intumescimento; Rec, Ric e Frc, parâmetros adimensionais para as correntes hiperpicnais simuladas, calculados a partir das medidas obtidas pela análise dos vídeos. Para melhor visualização dos resultados vide tabela em Anexos.

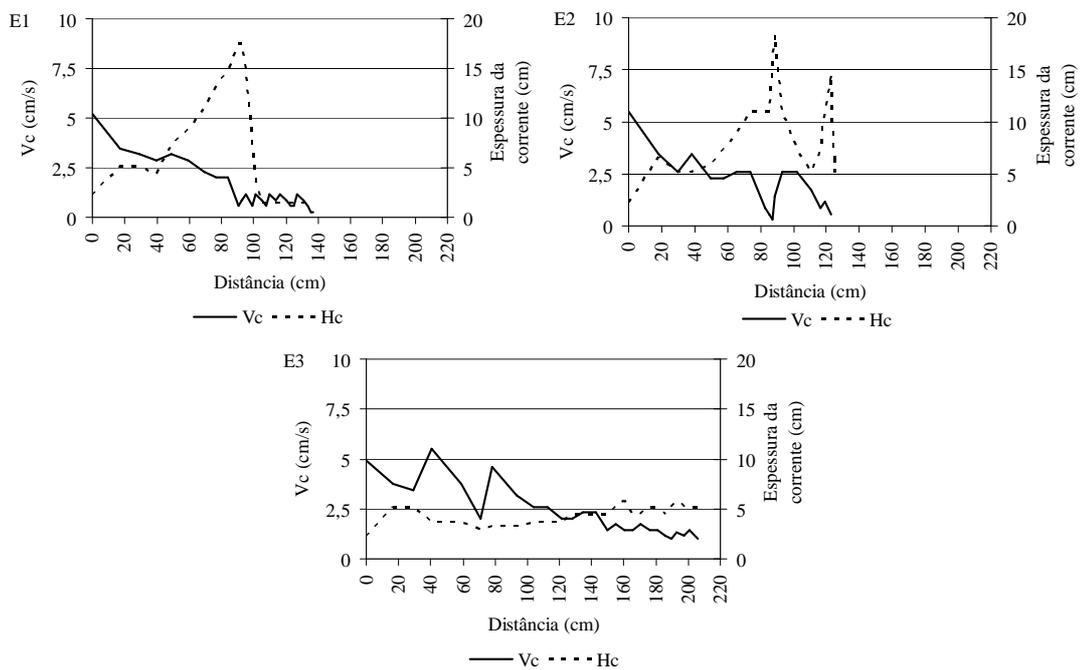
Pelas imagens dos instantes finais de cada um dos três ensaios, pode-se perceber que existe uma camada superior com sedimentos e corante nos ensaios onde foi utilizado ambiente salino (Figura 6.19, “E1” e “E2”, e Figura 6.31, “E1” e “E2”). No ensaio em que o fluido ambiente era composto apenas por água pura, o corante permaneceu junto com a corrente, sem subir até a superfície, não sendo possível visualizar partículas em suspensão (Figura 6.31, “E3”).

A explicação para o ocorrido no ensaio E3 é que a mistura utilizada para a composição da corrente era muito mais densa que a água doce utilizada como fluido ambiente e, sendo assim, não houve estratificação do meio; conseqüentemente, não se verificou a expansão e ascensão de fluido da corrente para o fluido ambiente.

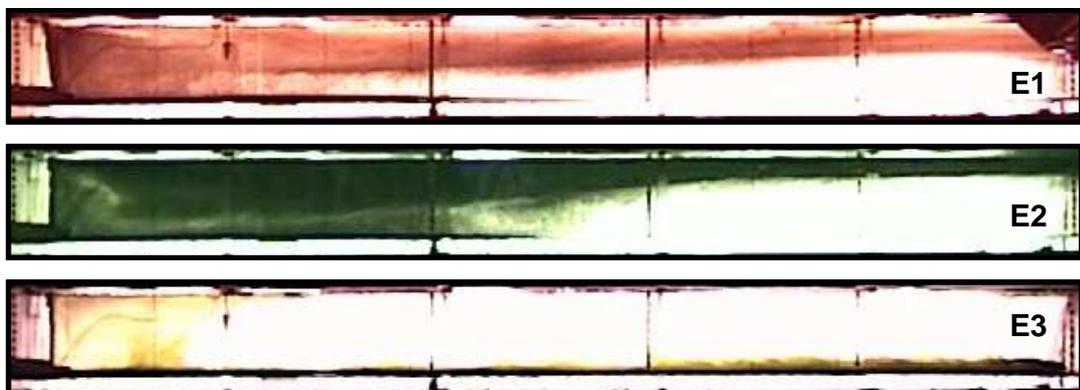
Já nos ensaios E1 e E2, ocorreu uma estratificação do meio e a água com corante, que fazia parte da composição da corrente, foi substituída pela mistura salina; sendo a água com corante menos densa que o fluido ambiente, ocorreu a sua ascensão e permanência próximo à superfície do fluido ambiente.

A distância onde ocorreu a maior expansão da corrente, nos ensaios E1 e E2, coincide com o ponto de decréscimo de velocidade da corrente hiperpicnal, ou seja, a redução da

velocidade da corrente está relacionada com o momento de surgimento da corrente hipopical. Entre os dois primeiros ensaios, a corrente simulada no ensaio E1 foi a que atingiu uma maior distância, enquanto que a simulada no ensaio E2 foi a que desenvolveu maiores velocidades ao longo de seu deslocamento (Figura 6.31, “E1” e “E2”). Comparando-se as três correntes simuladas, a corrente do ensaio E3 foi a que atingiu uma maior distância e a que desenvolveu maiores velocidades ao longo do seu deslocamento (Figura 6.31, “E3”). A figura 6.32 mostra o instante final dos três ensaios desta etapa, as cores foram realçadas através da utilização do aplicativo Microsoft Photo Editor para melhor identificar a presença do corante.



**Figura 6.31: Gráficos com valores de variações de velocidades (Vc) e alturas da corrente hiperpical (Hc) ao longo da distância do canal para os ensaios E1, E2 e E3.**

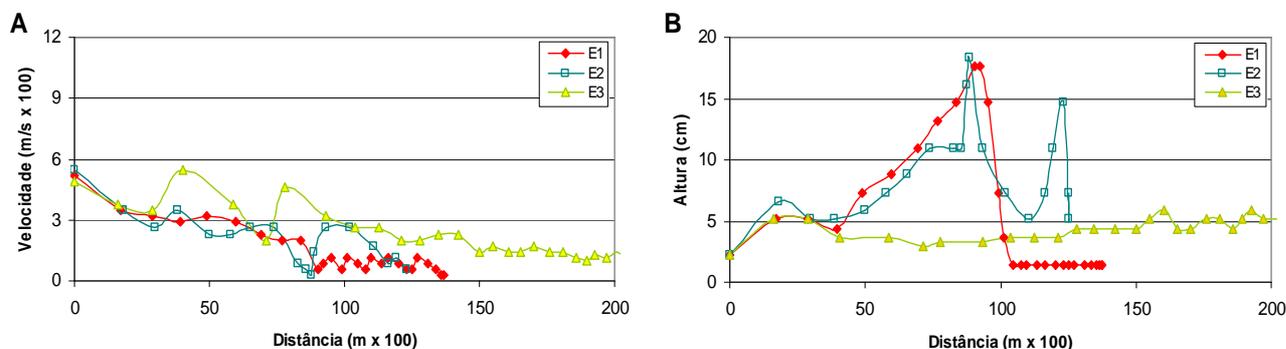


**Figura 6.32: Imagens do final de cada um dos ensaios da quarta etapa (E1, E2 e E3). Pode-se observar claramente a presença do corante em cada experimento.**

## 6.4.2 Comparação com outros trabalhos semelhantes

As maiores velocidades de deslocamento da corrente ao longo da distância foram alcançadas pela corrente simulada em ambiente não salino (Figura 6.33A – E3) e também as menores espessuras de corrente (Figura 6.33B – E3). De forma semelhante às etapas anteriores, o decréscimo na velocidade da corrente acarretou o aumento da espessura da corrente. Nas correntes dos ensaios E1 e E2, as velocidades de avanço da frente e os momentos de expansão ocorreram de forma muito semelhante, mesmo tendo ambas as correntes diferentes concentrações de sedimentos e diferentes valores de  $\Delta\rho$ . Diversamente, no trabalho de Mulder e Alexander (2002), a velocidade de avanço da corrente dependeu da vazão e da concentração de sedimentos; já a expansão da corrente foi em função da declividade do fundo do canal.

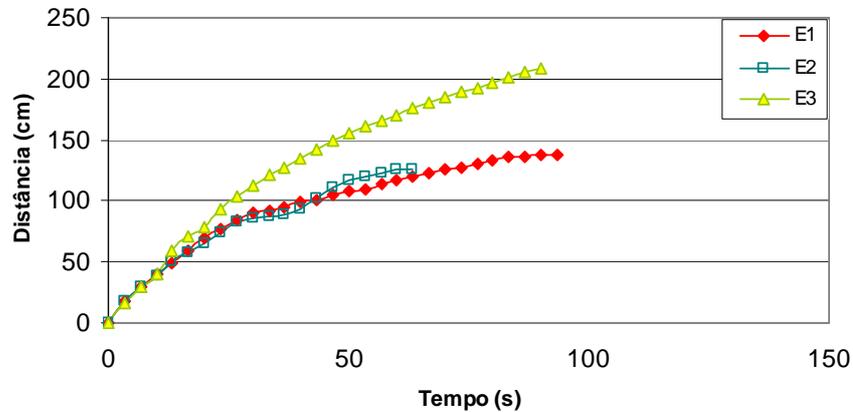
A maior distância foi atingida pela corrente simulada em ambiente não salino, enquanto que as outras duas correntes tiveram o mesmo alcance para o mesmo intervalo de tempo (Figura 6.34). Comparando-se as correntes simuladas nos ensaios E1 e E2, o motivo pelo qual a corrente do primeiro experimento conseguiu deslocar-se por um maior intervalo de tempo foi a elevada concentração de sedimentos da corrente, que era de cerca de 11 % em volume, enquanto que a corrente do segundo experimento possuía uma concentração de apenas 6 % em volume.



**Figura 6.33: “A” - Variações das velocidades de avanço das correntes simuladas na quarta etapa ao longo da distância do canal; “B” - Variações das espessuras das correntes simuladas na quarta etapa ao longo da distância do canal.**

No trabalho de Gladstone *et al.* (1998), as correntes com maior concentração de finos foram as que atingiram maiores distâncias e as que desenvolveram maiores velocidades de avanço da frente. A maior concentração de finos implica um maior número de partículas em

suspensão e, de forma semelhante, as correntes com maior concentração possuem um maior número de partículas em suspensão, e também atingiram maiores distâncias.



**Figura 6.34: Distâncias atingidas pelas correntes simuladas na quarta etapa em função do tempo.**

No trabalho de Dücker (2007), as correntes com maior quantidade de partículas sofreram uma maior desaceleração ao longo de seu deslocamento, em função da rápida perda de densidade. Nos experimentos realizados na quarta etapa do presente estudo, a desaceleração sofrida pelas correntes E1 e E2 foi bastante semelhante; porém, a corrente mais concentrada conseguiu atingir maiores distâncias.

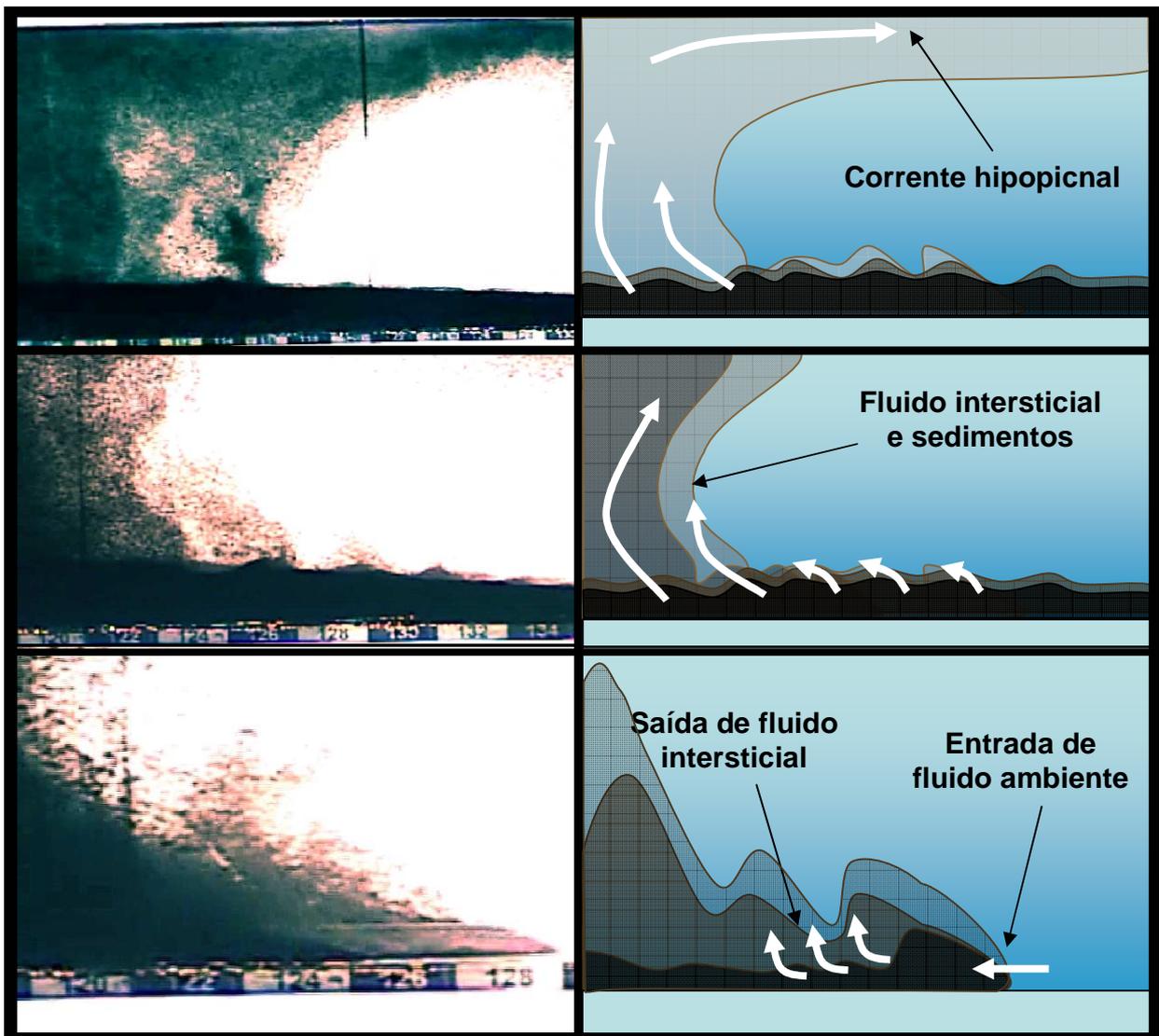
### 6.4.3 Conclusões parciais

Através dos dados apresentados neste item, foram obtidas algumas conclusões importantes a respeito das misturas e suas relações. Sabendo-se que, quimicamente, o sal, depois de completamente dissolvido na água, forma uma mistura homogênea, e que a mistura de carvão com água, uma vez que o carvão é um mineral e não pode ser por esta dissolvido, dá origem a uma mistura heterogênea, pode-se, então, denominar a mistura salina do ambiente de monofásica (água salobra), e a mistura do fluido da corrente (carvão com água) de bifásica.

Considerando-se, então, que a mistura de água e sal é monofásica, e a mistura de água e sedimentos, bifásica, todo o processo de expansão e formação de pluma está embasado simplesmente na diferença de densidade entre as fases. Portanto, temos: a massa específica do sedimento ( $\rho_s$ ) maior que a massa específica do ambiente salino ( $\rho_a$ ) que, por sua vez, é maior que a massa específica da água ( $\rho$ ). No momento em que a mistura de água e sedimentos (bifásica)

entra em contato com a mistura salina (monofásica), inicia-se um processo de separação das fases.

Neste processo, a água presente na mistura da corrente tende a subir, pois é menos densa que a mistura salina, e, durante a sua subida, pode carrear sedimentos que estão em suspensão. Em oposição ao movimento de ascensão da água, os sedimentos em suspensão tendem a depositar-se junto ao fundo. Sendo assim, quanto maior for a concentração de sedimentos, a disputa de subida da água e descida de sedimentos poderá perdurar por mais tempo e estas correntes poderão, desse modo, deslocar-se por maiores distâncias (Figura 6.35).



**Figura 6.35:** Imagens obtidas durante os ensaios da terceira etapa à esquerda e esquema ilustrativo do processo de substituição de fluido intersticial e formação da corrente hipopical à direita.

Quando há maior contraste de densidade entre a corrente e o fluido ambiente, isto é, quando o ambiente é muito mais denso que a corrente, a estratificação da corrente ocorre mais rapidamente, ou seja, mais rápida é a mistura do fluido da corrente com o fluido ambiente, e mais rapidamente a água pura que fazia parte da mistura da corrente irá ser substituída pelo fluido ambiente. Essa substituição de fluidos poderá acarretar em um aumento da densidade da corrente, sendo que nos ambientes mais densos esse aumento de densidade pode ser ainda maior, fazendo com que a corrente consiga se deslocar por uma distância maior.

## 7 PARAMETRIZAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Procurando generalizar os resultados, expressando-os de forma mais geral, foram aplicadas algumas relações entre os parâmetros adimensionais medidos e calculados para todos os experimentos compreendidos neste estudo. Ao todo, foram relacionados os dez grupos adimensionais, os quais foram escolhidos a partir do trabalho de Puhl (2007). Os grupos adimensionais foram calculados à partir das equações apresentadas abaixo, sendo:

$\pi_1$  - Razão entre a vazão média na injeção e a soma das vazões médias do avanço das correntes hiperpicnal e hipopicnal;

$$\pi_1 = \frac{Q_i}{(V_c \times h_c) + (V_p \times h_p)} \quad (7.1)$$

$\pi_2$  - Número de Reynolds da partícula: razão entre as forças de inércia e as forças viscosas;

$$\pi_2 = \frac{V_c \times D_{50}}{\nu_c} = \frac{F_I}{F_V} \quad (7.2)$$

$\pi_3$  - Número de Reynolds relativo à espessura da corrente: razão entre forças de inércia e forças viscosas;

$$\pi_3 = \frac{V_c \times H_c}{\nu_c} = \frac{F_I}{F_V} \quad (7.3)$$

$\pi_4$  - Número de Richardson relativo à espessura da corrente: razão entre forças de empuxo e forças de inércia;

$$\pi_4 = \frac{g \times H_c}{V_c^2} = \frac{F_E}{F_I} \quad (7.4)$$

$\pi_5$  - Razão entre velocidade de queda da partícula e velocidade da corrente;

$$\pi_5 = \frac{W_s}{V_c} \quad (7.5)$$

$\pi_6$  - Número de Richardson inicial: razão entre forças de empuxo e forças de inércia;

$$\pi_6 = \frac{H_c \times g'^{1/5}}{Q_i^{2/5}} = \frac{F_E}{F_I} \quad (7.6)$$

$\pi_7$  - Parâmetro que relaciona a vazão com a viscosidade;

$$\pi_7 = \frac{Q_i \times g'^{1/3}}{V_c^{5/3}} \quad (7.7)$$

$\pi_8$  - Número de Arquimedes: razão entre forças de inércia e empuxo e forças viscosas;

$$\pi_8 = \frac{H_c^3 \times g'}{V_c^2} = \frac{F_I F_E}{F_V} \quad (7.8)$$

$\pi_9$  - Número de Keulegan: razão entre forças de inércia e forças viscosas e de empuxo;

$$\pi_9 = \frac{V_c^3}{V_c \times g'} = \frac{F_I}{F_V F_E} \quad (7.9)$$

$\pi_{10}$  - Número de Stokes avaliado para a espessura da corrente: razão entre forças viscosas e forças de empuxo;

$$\pi_{10} = \frac{V_c \times V_c}{H_c^2 \times g'} = \frac{F_V}{F_E} \quad (7.10)$$

As relações entre os grupos adimensionais calculados auxiliaram a compreender e justificar os comportamentos das correntes simuladas neste estudo. Na comparação da relação das vazões calculadas e medidas com os valores de número de Reynolds relativo à espessura da corrente,

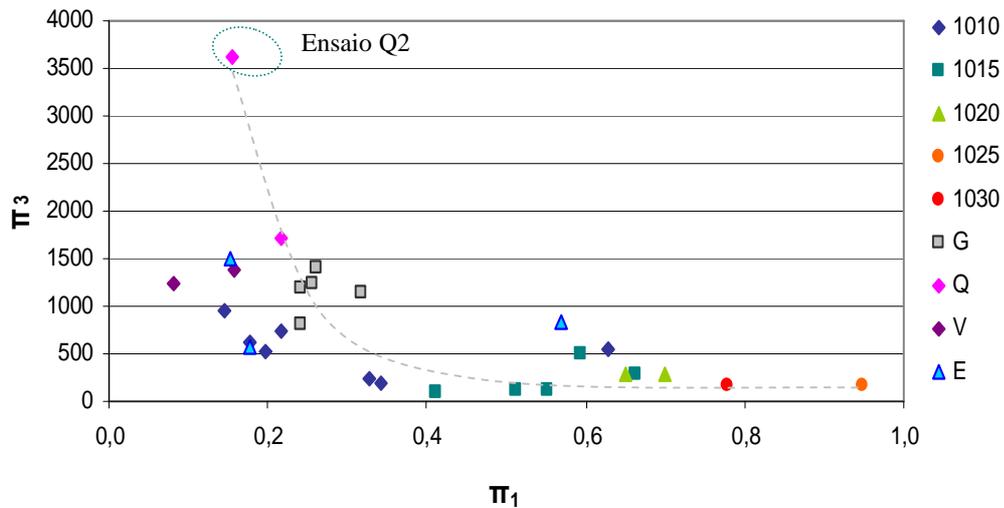
percebe-se que, com o aumento da concentração da corrente, existe uma redução da diferença entre as vazões medida e calculada, e que ocorre uma diminuição nos valores de Reynolds avaliados para a espessura (Tabela 7. 1).

**Tabela 7.1: Valores obtidos para os parâmetros adimensionais calculados com as equações apresentadas acima sendo os ensaios C1 à C16 os realizados na primeira etapa, os ensaios G1 à G5 os realizados na.**

Ensaio	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_3$	$\pi_4$	$\pi_5$	$\pi_6$	$\pi_7$	$\pi_8$	$\pi_9$	$\pi_{10}$
C1	0,1959	0,7570	516,1363	18,8115	2,59E-02	1,4755	1,45E+05	5,01E+06	2,74E+01	1,03E-04
C2	0,6289	0,4912	551,6038	32,7733	3,14E-02	1,5184	2,39E+05	9,97E+06	1,68E+01	5,53E-05
C3	0,2169	0,3772	733,5137	63,5415	4,56E-02	3,3835	9,01E+04	3,42E+07	1,15E+01	2,15E-05
C4	0,1451	0,4935	962,1046	18,7501	3,18E-02	3,0465	6,66E+04	1,74E+07	5,13E+01	5,54E-05
C5	0,1774	0,6317	616,1788	18,9963	2,70E-02	1,9963	9,22E+04	7,21E+06	3,24E+01	8,54E-05
C6	0,3418	0,4655	187,9043	21,8633	3,20E-02	0,8947	1,06E+05	7,72E+05	8,59E+00	2,43E-04
C7	0,3269	0,6651	228,6634	11,4718	2,12E-02	0,8081	1,11E+05	6,00E+05	1,99E+01	3,81E-04
C8	0,5939	1,0028	509,4194	3,7663	1,72E-02	0,6942	2,44E+05	9,77E+05	1,35E+02	5,21E-04
C9	0,6622	0,8671	282,9747	-	1,67E-02	-	-	-	-	-
C10	0,4102	0,4011	86,2220	2,6676	3,53E-02	0,3344	5,89E+04	1,98E+04	3,23E+01	4,35E-03
C11	0,5520	0,5040	125,9970	6,3878	2,80E-02	0,5021	8,31E+04	1,01E+05	1,97E+01	1,24E-03
C12	0,5129	0,4536	109,4829	11,5166	2,94E-02	0,5275	9,50E+04	1,38E+05	9,51E+00	7,93E-04
C13	0,6513	0,9936	280,1733	1,7029	1,44E-02	0,3827	2,06E+05	1,34E+05	1,65E+02	2,10E-03
C14	0,7000	0,8519	280,3941	-	1,50E-02	-	-	-	-	-
C15	0,9472	0,8018	169,2064	1,7561	1,57E-02	0,2811	1,98E+05	5,03E+04	9,64E+01	3,37E-03
C16	0,7784	0,6731	172,0939	2,1769	1,50E-02	0,3444	1,46E+05	6,45E+04	7,91E+01	2,67E-03
Q1	0,2169	0,5931	1725,2991	58,9748	1,83E-02	3,5334	3,16E+05	1,76E+08	2,93E+01	9,83E-06
Q2	0,1556	1,2019	3613,0018	14,8382	9,05E-03	3,1739	4,49E+05	1,94E+08	2,43E+02	1,87E-05
V1	0,0820	0,8266	1228,6339	11,6119	1,07E-02	2,0667	1,77E+05	1,75E+07	1,06E+02	7,01E-05
V2	0,1581	0,6438	1372,0631	27,4481	1,37E-02	3,0384	1,66E+05	5,17E+07	5,00E+01	2,66E-05
G1	0,2407	0,9928	814,6478	-	2,03E-03	-	-	-	-	-
G2	0,2412	1,2047	1185,9282	-	3,56E-03	-	-	-	-	-
G3	0,2558	1,0050	1236,4968	-	1,08E-02	-	-	-	-	-
G4	0,3189	0,7897	1132,9478	-	5,75E-02	-	-	-	-	-
G5	0,2620	0,6017	1400,3158	-	2,69E-01	-	-	-	-	-
E1	0,1776	0,5954	577,6064	10,9496	1,65E-02	1,3001	1,53E+05	3,65E+06	5,28E+01	1,58E-04
E2	0,1522	0,9350	1508,5263	-	1,34E-02	-	-	-	-	-
E3	0,5686	1,0429	839,3070	9,1237	1,29E-02	1,2133	2,91E+05	6,43E+06	9,20E+01	1,31E-04

A vazão calculada a partir da espessura e da velocidade de deslocamento das correntes hiperpicnal e hipopicnal diminui com o aumento da concentração da corrente e do fluido ambiente. As correntes com baixa concentração sofrem uma maior expansão resultado da maior incorporação de fluido ambiente, e o valor resultante do cálculo da vazão é muito maior do que o valor da vazão média na injeção (Figura 7.1).

Os valores de Reynolds avaliados para a espessura da corrente possuem os seus valores elevados para baixas concentrações de correntes, pois elas são menos resistentes às diferenças de densidades e se expandem rapidamente quando entram em contato com o fluido ambiente, uma vez que a separação das fases dá-se de forma muito rápida. Para as correntes que foram injetadas com altas velocidades (dados de V1 e V2), a separação de fases é acelerada pela alta agitação do fluxo no momento de sua injeção (Figura 7.1). O ponto que está afastado dos demais é referente ao ensaio Q2, cujo elevado valor de Reynolds é resultado da elevada vazão utilizada neste ensaio.

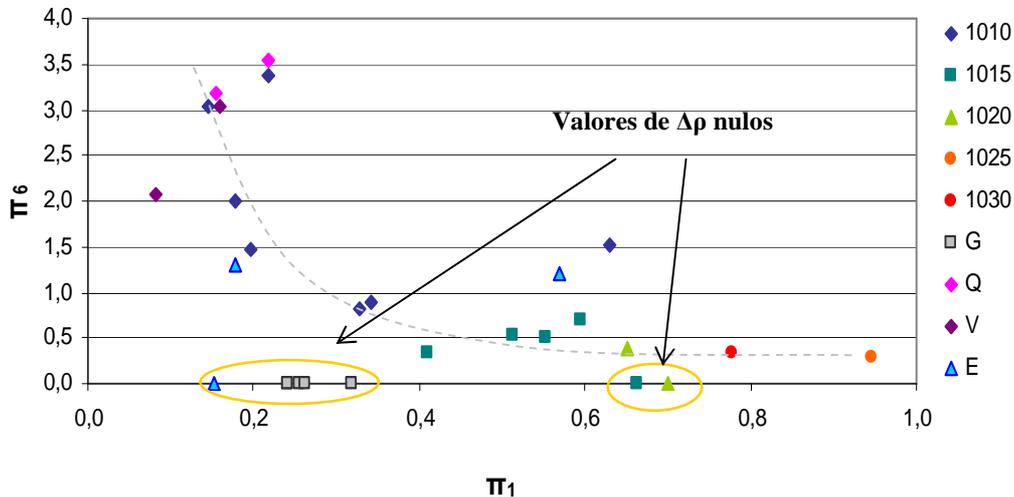


**Figura 7.1: Relação adimensional entre o número de Reynolds relativo à espessura da corrente ( $\pi_3$ ) e as razões de vazões medidas e calculadas ( $\pi_1$ ). Os dados dos ensaios estão discriminados em função do tratamento: (1010 à 1030) massa específica do fluido ambiente empregada nos ensaios da primeira etapa, (G) ensaios com diferentes granulometrias utilizadas nos da terceira etapa, (Q e V) as vazões e velocidades de injeção empregadas nos ensaios da segunda etapa e (E) como sendo os ensaios com utilização de corante para visualização do escape de fluido.**

Comportamento bastante semelhante ao da figura acima foi apresentado pela relação entre o número de Richardson avaliado para a espessura da corrente e a razão entre vazão medida e calculada (Tabela 7. 1). Para as correntes com menores concentrações, os valores de Richardson são maiores, existe uma maior estratificação do meio e a separação das fases ocorre mais rapidamente ( $\rho_s > \rho_a > \rho$ ) a massa específica dos sedimentos incorporados à mistura da corrente é maior que massa específica do fluido ambiente, que por sua vez é maior que a massa específica da água que compõe a mistura da corrente).

No caso dos valores para os ensaios discriminados como Q e V, a elevada vazão (Q) e a alta velocidade de injeção (V) aumentam a velocidade de mistura entre os fluidos da corrente e do ambiente. Para as correntes com maiores concentrações de sedimentos, a velocidade de

mistura é menor e os valores de estratificação do meio também são menores, o que é demonstrado pelos baixos valores de Richardson (Figura 7.2).



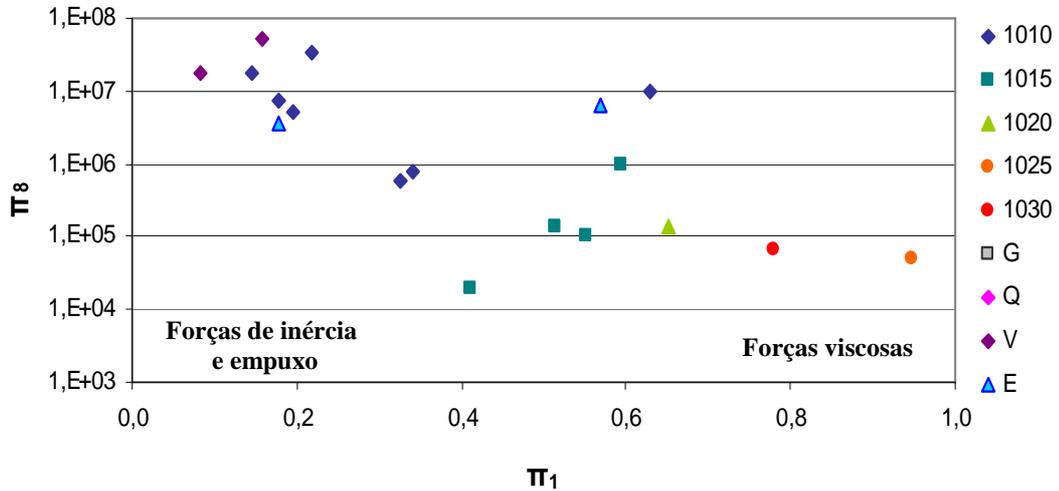
**Figura 7.2: Relação adimensional entre o número de Richardson inicial ( $\pi_6$ ) e as razões entre vazões medidas e calculadas ( $\pi_1$ ). Os dados dos ensaios estão discriminados em função do tratamento: (1010 à 1030) massa específica do fluido ambiente empregada nos ensaios da primeira etapa, (G) ensaios com diferentes granulometrias utilizadas nos da terceira etapa, (Q e V) as vazões e velocidades de injeção empregadas nos ensaios da segunda etapa e (E) como sendo os ensaios com utilização de corante para visualização do escape de fluido.**

Na relação entre o número de Arquimedes calculado ( $\pi_8$ ) e a razão entre as vazões medidas e calculadas ( $\pi_1$ ), as forças de inércia e empuxo são preponderantes sobre as forças viscosas, sendo que tal relação é bastante pronunciada para os altos valores de  $\pi_8$  encontrados nas correntes com menores concentrações de sedimentos (Tabela 7.1).

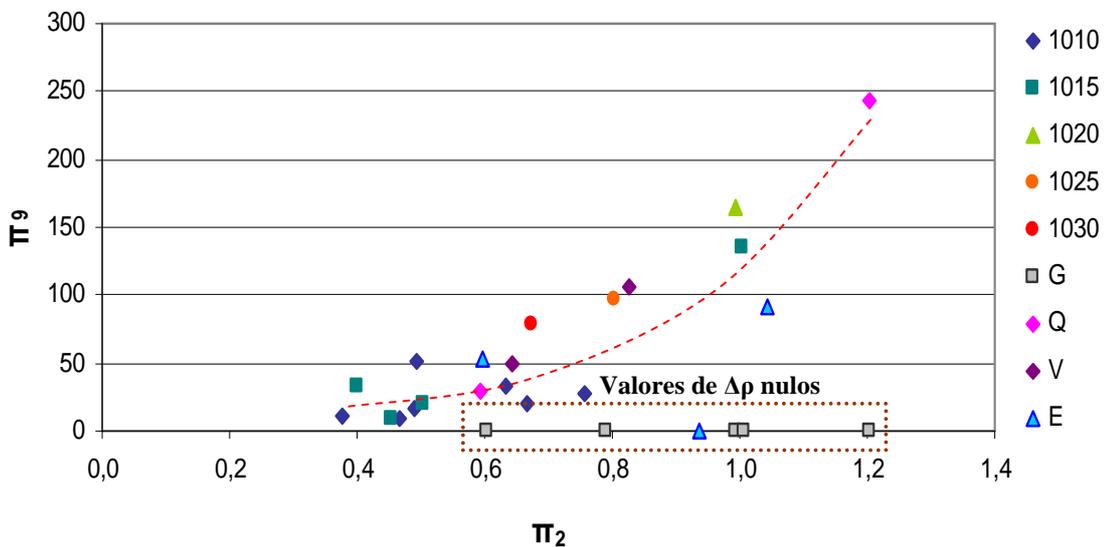
Já nas correntes com maior concentração de sedimentos, as forças viscosas são mais dominantes que as forças de inércia, resultando em baixos valores de  $\pi_8$ . A dominância das forças viscosas que ocorre para as correntes com maiores concentrações é responsável pela maior resistência à mistura e à separação entre as fases, resultando em menores espessuras de corrente. Para as correntes nas quais as forças de empuxo são dominantes, a baixa concentração faz com que as correntes não tenham resistência à separação das fases, resultando em maiores espessuras de corrente (Figura 7.3).

Os dados agrupam-se em uma clara tendência quando se relaciona o número de Reynolds do grão e o número de Keulegan (Figura 7.4). Conforme aumentam os valores de Reynolds do grão, aumenta também o valor de Keulegan, sendo que, para os baixos valores, ocorre o

predomínio de forças de inércia, e para valores mais elevados, o predomínio das forças turbulentas.

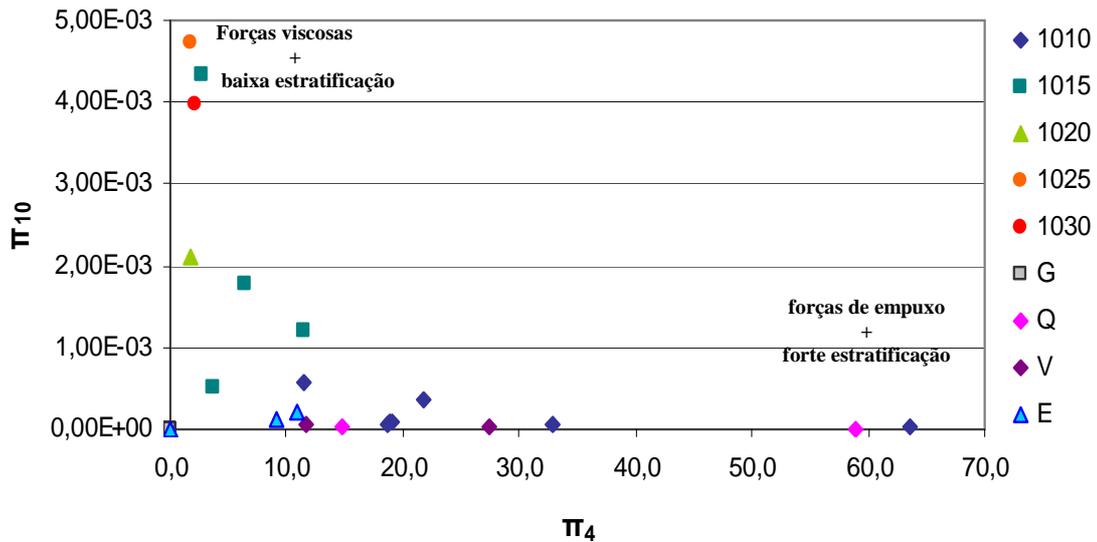


**Figura 7.3: Relação adimensional entre o número de Arquimedes ( $\pi_8$ ) e as razões entre as vazões medidas e calculadas ( $\pi_1$ ). Os dados dos ensaios estão discriminados em função do tratamento, sendo: (1010 à 1030) massa específica do fluido ambiente empregada nos ensaios da primeira etapa, (G) ensaios com diferentes granulometrias utilizadas nos da terceira etapa, (Q e V) as vazões e velocidades de injeção empregadas nos ensaios da segunda etapa e (E) como sendo os ensaios com utilização de corante para visualização do escape de fluido.**



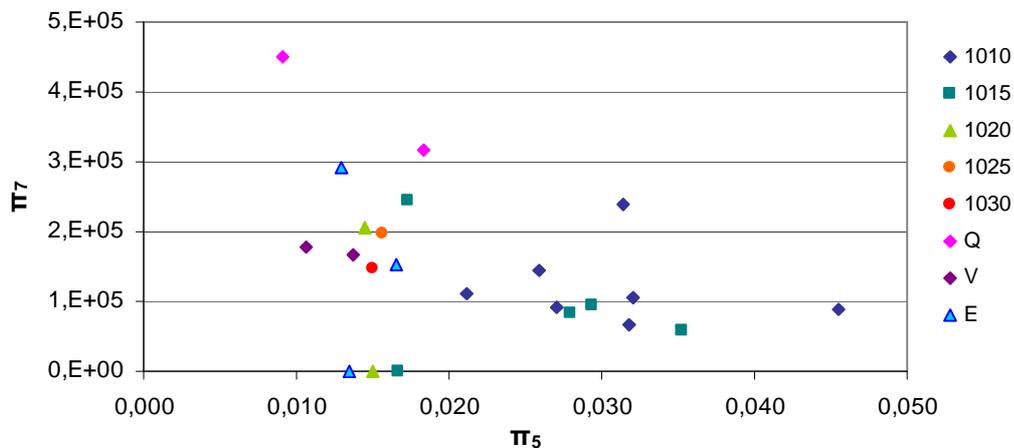
**Figura 7.4: Relação adimensional entre o número de Keulegan ( $\pi_9$ ) e o número de Reynolds do grão ( $\pi_2$ ). Os dados dos ensaios estão discriminados em função do tratamento, sendo: (1010 à 1030) massa específica do fluido ambiente empregada nos ensaios da primeira etapa, (G) ensaios com diferentes granulometrias utilizadas nos da terceira etapa, (Q e V) as vazões e velocidades de injeção empregadas nos ensaios da segunda etapa e (E) como sendo os ensaios com utilização de corante para visualização do escape de fluido.**

A comparação entre o número de Richardson relativo à espessura da corrente e o número de Stokes relativo à espessura da corrente mostrou que os ensaios com mais altas concentrações de sedimentos geraram parâmetros em que predominam elevadas forças viscosas e baixa estratificação. Já os ensaios com baixas concentrações de sedimentos geraram a predominância de forças de empuxo e grande estratificação (Figura 7.5).



**Figura 7.5: Relação adimensional entre o número de Stokes avaliado para a espessura da corrente ( $\pi_{10}$ ) e o número de Richardson relativo à espessura da corrente ( $\pi_4$ ). Os dados dos ensaios estão discriminados em função do tratamento, sendo: (1010 à 1030) massa específica do fluido ambiente empregada nos ensaios da primeira etapa, (G) ensaios com diferentes granulometrias utilizadas nos da terceira etapa, (Q e V) as vazões e velocidades de injeção empregadas nos ensaios da segunda etapa e (E) como sendo os ensaios com utilização de corante para visualização do escape de fluido.**

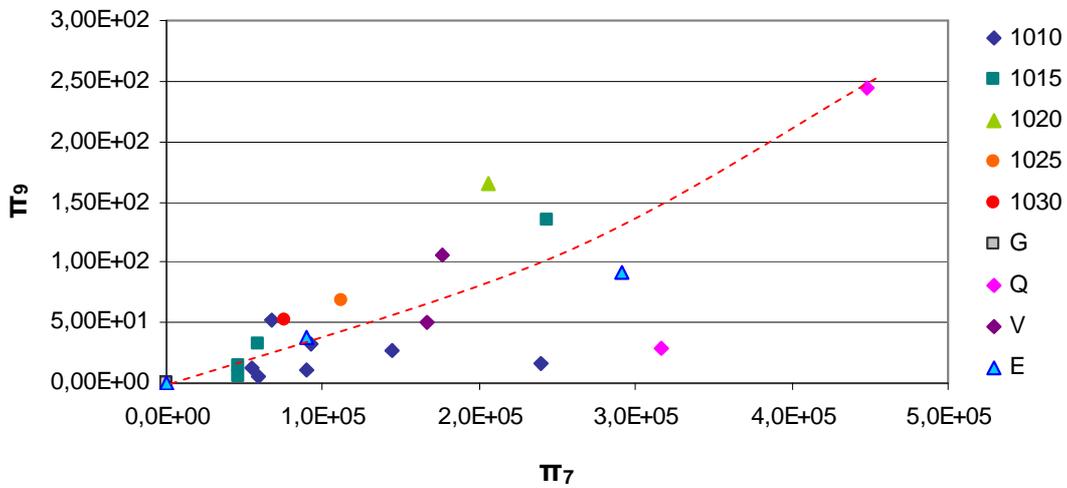
Na relação entre o parâmetro que relaciona vazão com viscosidade e a razão entre a velocidade de queda e a velocidade de deslocamento da corrente é notado que as correntes com maior concentração de sedimentos apresentaram uma acentuada influência da viscosidade que é expressa pelos valores de  $\pi_7$ , no entanto, os ensaios onde foram simuladas maiores vazões (Q) este parâmetro apresentou maiores valores devido a vazão elevada. A concentração das correntes também mostra influência no parâmetro que relaciona a velocidade de queda com a velocidade da corrente, cujas correntes mais concentradas apresentaram menores valores para este parâmetro enquanto que as correntes com baixa concentração de sedimentos produziram valores mais elevados, possivelmente pela menor velocidade de avanço da corrente hiperpical.



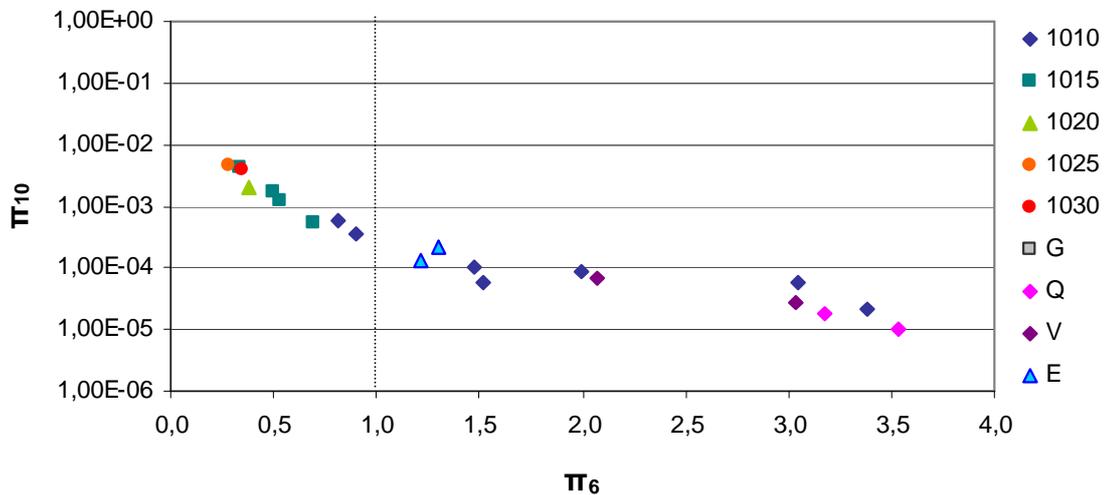
**Figura 7.6: Relação adimensional entre o parâmetro que relaciona a vazão com a viscosidade ( $\pi_7$ ) e a razão entre a velocidade de queda da partícula e velocidade da corrente ( $\pi_5$ ). Os dados dos ensaios estão discriminados em função do tratamento, sendo: (1010 à 1030) massa específica do fluido ambiente empregada nos ensaios da primeira etapa, (Q e V) as vazões e velocidades de injeção empregadas nos ensaios da segunda etapa e (E) como sendo os ensaios com utilização de corante para visualização do escape de fluido.**

Comparando-se o adimensional entre vazão e viscosidade e o número de Keulegan, temos uma tendência muito semelhante à apresentada na relação entre o número de Reynolds do grão e o número de Keulegan, mas ambas as relações não permitem agrupar os dados que possuem valores de  $\Delta\rho$  nulos, que aparecem indicados na figura abaixo. O aumento da viscosidade da mistura causa aumento nos valores do número de Keulegan e também o aumento dos valores da razão entre vazão e viscosidade, no entanto, os valores mais elevados para estes parâmetros foram desenvolvidos pelos ensaios onde foram alteradas as vazões de injeção. Os mais baixos valores para os dois grupos adimensionais foram produzidos pelos ensaios com baixa concentração volumétrica de sedimentos simulados na primeira etapa (1010 e 1015) (Figura 7.7).

A última relação apresentada é entre o número de Stokes avaliado para a espessura da corrente e o número de Richardson inicial (Figura 7.8). Esta relação é muito semelhante à apresentada na figura 7.1, porém os valores de Richardson são de menor magnitude porque é referente ao valor inicial. As altas concentrações de sedimentos empregadas nos ensaios da primeira etapa estão relacionadas à elevada força viscosa e à baixa estratificação e que aparecem como os baixos valores de  $\pi_6$ , e as baixas concentrações de sedimentos e as altas velocidades de vazão e injeção caracterizam-se por apresentar maiores forças de empuxo e estratificação que é expresso pelos valores elevados de número de Richardson inicial (Figura 7.8).



**Figura 7.7: Relação adimensional entre o número de Keulegan ( $\pi_9$ ) e o parâmetro que relaciona vazão e viscosidade ( $\pi_7$ ). Os dados dos ensaios estão discriminados em função do tratamento, sendo: (1010 à 1030) massa específica do fluido ambiente empregada nos ensaios da primeira etapa, (G) ensaios com diferentes granulometrias utilizadas nos da terceira etapa, (Q e V) as vazões e velocidades de injeção empregadas nos ensaios da segunda etapa e (E) como sendo os ensaios com utilização de corante para visualização do escape de fluido.**



**Figura 7.8: Relação adimensional entre o número de Stokes avaliado para a espessura da corrente ( $\pi_{10}$ ) e o número de Richardson inicial ( $\pi_6$ ). Os dados dos ensaios estão discriminados em função do tratamento, sendo: (1010 à 1030) massa específica do fluido ambiente empregada nos ensaios da primeira etapa, (G) ensaios com diferentes granulometrias utilizadas nos da terceira etapa, (Q e V) as vazões e velocidades de injeção empregadas nos ensaios da segunda etapa e (E) como sendo os ensaios com utilização de corante para visualização do escape de fluido.**

### **7.1.1 Conclusões parciais**

Os grupos adimensionais utilizados neste capítulo permitiram agrupar os dados obtidos experimentalmente em diferentes tendências. As tendências apresentadas nas relações entre os grupos poderão servir para extrapolação dos resultados obtidos.

Em linhas gerais, as correntes com baixa concentração e as correntes onde foram testadas diferentes vazões e velocidades de injeção apresentaram tendências semelhantes, ou seja, elas são fortemente estratificadas e possuem a preponderância de forças de inércia e empuxo. Pelos valores de número de Richardson inicial e número de Richardson avaliados para a espessura da corrente, estas correntes apresentaram um comportamento de pluma.

As correntes em que foram utilizadas maiores concentrações volumétricas de sedimentos apresentaram uma baixa estratificação, a predominância de forças viscosas e baixos valores para a relação entre velocidade de queda e velocidade de deslocamento da corrente. Pelos valores de número de Richardson inicial e número de Richardson avaliado para a espessura da corrente, as correntes com elevadas concentrações podem ser consideradas como sendo jatos.

## 8 CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados na primeira etapa, pode-se afirmar que, para que se possa formar uma corrente do tipo hiperpicnal, em uma simulação física com ambiente salino, existe, aparentemente, uma concentração volumétrica mínima de sedimentos necessária, que seria próxima a 7 % em volume para o material sedimentar utilizado, ou uma massa específica de  $1010 \text{ kg.m}^{-3}$ . Com concentrações mais elevadas, mesmo injetando-se uma corrente com massa específica um pouco menor que o fluido ambiente (até  $5 \text{ kg.m}^{-3}$  menor, ou  $\Delta\rho = -0,005$ ), é possível formar correntes do tipo hiperpicnal para as correntes simuladas na primeira etapa. Deve-se ressaltar que os valores de concentrações sugeridos acima são para fluxos de baixa velocidade e baixos números de Reynolds. Para valores acima da faixa avaliada, deverão ser realizados novos testes para determinação de concentração.

A concentração volumétrica de sedimentos demonstrou ser o parâmetro mais sensível para a manutenção das espessuras e velocidades de deslocamento das correntes. Para as correntes com baixas concentrações de sedimentos (CV menor que 7 %), a forte estratificação do meio, evidenciada pelos elevados valores de número de Richardson da injeção ( $Ri_i$ ) e do calculado pelos dados das análises de vídeo ( $Ri_c$ ), reduz o tempo necessário para o surgimento da corrente hipopicnal, pois a corrente expande-se rapidamente ao entrar em contato com o fluido ambiente. Os valores de Richardson também foram elevados nos ensaios com as diferentes vazões (ensaios Q1 e Q2) e, para ambos, a expansão das correntes também foi acelerada.

A hipótese de que o escoamento injetado sob forma de jato poderia estar auxiliando a corrente no seu deslocamento junto ao fundo mostrou que, com vazões mais elevadas que as utilizadas na primeira etapa (vazão quase 5 x maior para o ensaio Q2), ocorreu uma rápida expansão da corrente, antecipando a formação da pluma. O aumento da velocidade de injeção (aumento de quase 5x para o ensaio V1), obtido após alteração da área da seção transversal da saída do difusor, favoreceu o aumento da distância percorrida pela corrente hiperpicnal e retardou a formação da pluma.

Com relação aos experimentos feitos com diferentes faixas granulométricas de carvão, os resultados foram, de certa forma, interessantes, pois o material de maior diâmetro – que, teoricamente, seria mais pesado e se depositaria primeiro – deu origem a plumas hipopicnais. Estes ensaios mostraram que, para a manutenção das espessuras das correntes, é muito importante

o número de partículas em suspensão, pois os ensaios com as menores granulometrias foram os que tiveram as correntes que sofreram menor expansão e se deslocaram por maiores distâncias.

Nos ensaios para a detecção de escape do fluido intersticial, a utilização de corante misturado à água da mistura permitiu a visualização da substituição do líquido do interior da corrente pelo fluido ambiente. Ao sair do interior da corrente, a água com corante, que foi empregada na composição da mistura para a corrente, subiu e ficou posicionada acima da mistura salina usada na composição do fluido ambiente do canal (para os ensaios onde foi utilizado ambiente salino – E1 e E2). Esta etapa foi bastante importante para compreender o que ocorria durante os ensaios, pois foi possível visualizar que ao longo do deslocamento das correntes boa parte da água contida em seu interior era substituída pela água do fluido ambiente, e que, conseqüentemente, elas poderiam atingir massas específicas mais elevadas do que a inicialmente injetada no canal. Esse possível aumento da massa específica da corrente pode ser a explicação para a formação de correntes do tipo hiperpicnal mesmo quando injetada uma mistura de menor massa específica que o fluido ambiente. Na corrente simulada em ambiente não salino, não foi notado nenhum escape de fluido ao longo de seu deslocamento.

A explicação para as correntes com densidades de mistura menores que as densidades de fluido ambiente terem a capacidade de formar correntes hiperpicnais seria, então, dada pelo escape e substituição de fluido intersticial pela água salina, conforme apresentado na última seção do capítulo anterior. As correntes, ao longo de seu deslocamento, estariam passando por um processo de estratificação. Essa estratificação envolve um aumento da espessura da corrente, gerado pela incorporação de fluido ambiente na região da cabeça da corrente, e também uma alteração da densidade da corrente. A alteração da densidade, por sua vez, causa alteração na concentração de sedimentos na corrente ao longo de seu deslocamento.

Com relação às distâncias máximas percorridas pelas correntes hiperpicnais, a partir dos dados obtidos nos ensaios da primeira etapa, pode-se observar que o aumento da concentração de sedimentos nas misturas das correntes conduziu ao aumento das distâncias máximas capazes de serem atingidas pelas correntes hiperpicnais. Já os parâmetros da injeção, como a vazão e as velocidades de injeção, demonstraram influenciar pouco nas distâncias percorridas pelas correntes.

A metodologia operacional desenvolvida e empregada neste estudo permitiu a realização dos ensaios de forma bastante simples e produziu resultados satisfatórios. As maiores dificuldades encontradas foram à obtenção de uma mistura salina homogênea, que exigiu a utilização de uma bomba para homogeneização da mistura, principalmente para as maiores

concentrações de sal. Outra dificuldade encontrada foi para a coleta de amostras dos depósitos gerados pelas correntes, devido ao tempo despendido para secagem do depósito e, para as maiores concentrações de sedimentos exigiu o emprego de um processo de secagem, para que se conseguisse remover todo o material.

O posicionamento da câmera filmadora que registrou os ensaios permitiu uma boa visualização da evolução da corrente, bem como da transformação da corrente hiperpicnal em hipopicnal. No entanto, constatou-se que a elevada distância entre a câmera filmadora e o canal experimental dificultou a análise dos vídeos para determinação das dimensões da corrente e da velocidade de avanço, reduzindo a precisão dos valores gerados.

Com relação aos grupos adimensionais relacionados no capítulo anterior, algumas tendências foram estabelecidas e, estas tendências poderão servir para nortear trabalhos futuros, principalmente na escolha de concentrações de sedimentos e massas específicas a serem empregadas no fluido ambiente. As correntes em que foram utilizadas maiores concentrações volumétricas de sedimentos demonstraram ter maior predominância de forças viscosas e baixa estratificação enquanto que as correntes de baixa concentração demonstraram uma maior predominância de forças de inércia e empuxo, ou seja, as correntes concentradas conseguem incorporar mais rapidamente fluido ambiente à mistura aumentando a densidade enquanto que as correntes de baixas concentrações têm maior resistência a mistura e, portanto, se transformam em rapidamente em plumas com menor incorporação de fluido ambiente. A partir das relações obtidas foi possível também comparar os ensaios das diferentes etapas e notar as semelhanças e diferenças entre os mesmos, como no caso dos ensaios em que foram testadas vazões maiores que, segundo os grupos adimensionais, desenvolveram comportamento semelhante as correntes de baixa concentração, principalmente pelos valores de número de Richardson e número de Arquimedes.

## **9 CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS**

### ***9.1 QUANTO ÀS INSTALAÇÕES UTILIZADAS***

O canal experimental, por ter tamanho bastante reduzido, era de fácil operacionalidade. Ao mesmo tempo, o curto tamanho do canal criou uma certa limitação para o pleno desenvolvimento da corrente, podendo ter ocorrido, em alguns experimentos, efeitos não desejados causados pelo reduzido comprimento e profundidade do canal.

O pavilhão Fluvial, local onde está instalado o canal experimental, passou por uma grande reforma para melhoria das condições de trabalho e realização dos ensaios. Todos os experimentos foram desenvolvidos no ápice das reformas do pavilhão, o que causou uma pequena perda de qualidade no controle de temperatura da água nos experimentos e também dificultou um pouco a captura das imagens com a câmera filmadora.

### ***9.2 QUANTO AOS EQUIPAMENTOS***

As câmeras filmadoras utilizadas foram essenciais para a boa qualidade dos dados adquiridos, no entanto o tratamento das imagens foi um trabalho bastante demorado devido a necessidade que conversão dos arquivos gerados em arquivos de vídeo e posterior conversão em arquivo de imagem. Recomenda-se, no caso de registro dos experimentos, a utilização de câmeras que já gravem os vídeos em formato digital ou que possuam a capacidade de registrar imagens seqüenciais com pequeno intervalo de tempo entre elas.

Com relação a análise de distribuição granulométrica dos depósitos, a utilização do equipamento a laser facilitou muito o processamento das amostras e os resultados obtidos foram de excelente qualidade.

### ***9.3 QUANTO AO PREPARO DOS ENSAIOS***

Como não se tinham informações a respeito de quais concentrações aproximadas seriam capazes de formar as correntes hiperpicnais, foi necessário realizar mais ensaios do que o previsto. Após a descoberta das concentrações aproximadas, o trabalho foi desenvolvido mais rapidamente.

Uma das maiores dificuldades no preparo dos ensaios era manter as temperaturas do fluido ambiente e da mistura o mais semelhantes possível. A mistura de sal no fluido ambiente era um processo um tanto demorado e, por isso, até o momento da realização do experimento, as

temperaturas tinham subido até 4° C pelo aquecimento do pavilhão no período da tarde e também pela utilização de uma bomba para fazer a mistura do sal com a água.

#### ***9.4 QUANTO À ANÁLISE DOS DEPÓSITOS***

Uma das partes mais difíceis de executar foi a análise dos depósitos, pois exigiu um longo tempo para o tratamento e coleta de dados dos experimentos, devido à necessidade de secagem e amostragem do depósito. Eram necessárias algumas horas para esperar sedimentar o material em suspensão, mais um dia para esvaziar lentamente o canal e mais um ou dois dias para secar o depósito.

Por outro lado, o uso do analisador de partículas acelerou bastante o processo de análise do depósito, pois, em apenas alguns minutos, o equipamento fornece a distribuição granulométrica completa do material analisado.

#### ***9.5 QUANTO À ANÁLISE DOS VÍDEOS***

As imagens de vídeo foram de extrema importância para a determinação das velocidades das correntes e de suas alturas, do tipo de correntes formadas e também para avaliar e acompanhar, de forma geral, o desenvolvimento das correntes.

A quantidade de informação gerada com um único vídeo é muito grande, o que dificulta um pouco o trabalho e a aquisição dos dados. O recomendado é utilizar uma câmera com alta qualidade de imagem e que já possua um sistema de aquisição de imagens seqüenciais com pequeno intervalo de tempo entre cada foto.

#### ***9.6 QUANTO AOS EXPERIMENTOS REALIZADOS***

Não houve problemas para a realização dos experimentos. Após estar bem definida a sequência de passos a serem seguidos para a realização dos ensaios, tudo se tornou extremamente simples, ainda que bastante trabalhoso. As maiores dificuldades encontradas foram manter as temperaturas dos fluidos, manter a vazão semelhante para todos os experimentos e uma perfeita mistura do sal adicionado ao fluido ambiente.

Recomenda-se uma busca mais detalhada, utilizando-se equipamentos mais precisos, como sondas para medir perfis de velocidades e de concentração de sedimentos. A utilização de sondas que permitam fazer um levantamento de campos de velocidades permitiria a detecção mais precisa dos processos de escape do fluido intersticial da corrente. A utilização de sondas

capazes de determinar a concentração de sedimentos, por sua vez, permitiria mensurar a quantidade de material que é transportada junto ao fundo, bem como a quantidade de material que é levantada e posta em suspensão juntamente com o fluido intersticial que escapa da corrente.

Recomenda-se também, para dar continuidade a este trabalho, a realização de simulações de correntes com base nas concentrações estabelecidas nos ensaios realizados, para as quais devem ser levantados os campos de velocidades em diferentes pontos das correntes, bem como os perfis de concentração de sedimentos. Também seria recomendado testar concentrações de sedimentos e concentrações de sal no ambiente semelhantes às apresentadas neste estudo porém em um canal com maiores dimensões, para que seja feita uma avaliação da influência da escala nos dados obtidos.

## 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BATES, C.C. (1953) Rational theory of delta formation. AAPG Bull., 32, 2119-2162. Apud MULDER, T. e ALEXANDER, J. (2001). The physical charcter of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. *Sedimentology*, 48, 269-299.

BOUMA, A. H. 1962. Sedimentology of Some Flysh Deposits: A Graphic Approach to Facies Interpretation. Apud KNELLER, B. C. (1995) Beyond the turbidite paradigm: physical models for deposition of turbidites and their implications for reservoir prediction. In: Characterization of Deep Marine Clastic Systems (Eds A.J. Hartley and D.J. Prosser), Geol. Soc. London, Spec. Publ., 94, 31-49.

BRITO, D. U., 2005. Efeito das escalas de simulação sobre os padrões deposicionais de fluxos turbidíticos. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Orientação: Ana Luiza de Oliveira Borges.

COLEMAN, N. L., 1986. Effects of suspended sediment on the open-channel velocity distribution. *Water Resources Research*, vol. 22, n° 10, 1377-1384.

COUSSOT, P. 1997. Mudflow Rheology and Dynamics. *IAHR Monograph Series*. Ed. Taylor & Francis.

DÜCKER, R. E., 2007. Avaliação da capacidade portante de frações finas nas correntes de turbidez. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Orientação: Luiz Emílio de Sá Brito de Almeida

ECKELMANN, H., 1974. The structure of the viscous sublayer and the adjacent wall region in a turbulent channel flow. *J. Fluid Mech.* (1974), vol.65, parte 3, 439-459.

EDWARDS, D. A., 1993. Turbidity Currents: Dynamycs, Deposits and Reversals. Apud KNELLER, B. C., BENNETT, S. J. e McCAFFREY, W. D., (1997). Velocity and turbulence

structure of density currents and internal solitary waves: potential sediment transport and formation of wave ripples in deep water. ELSEVIER. *Sedimentary Geology* 112, 235-350.

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. Orientação: Ana Luiza de Oliveira Borges.

FISHER, R. V., 1983. Flow transformations in sediment gravity flows. *Geology*, 11, 273-274.

GEE, M. J. R., MASSON, D. G., WATTS, A. B. e ALLEN, P. A., 1999. The Saharan debris flow: an insight into the mechanics of long runout submarine debris flows. *Sedimentology*, 46, 317-335.

GLADSTONE, C., PHILLIPS, J.C. e SPARKS, R.S.J., 1998. Experiments on bidisperse, constant-volume gravity currents: propagation and sediment deposition. *Sedimentology*, 45, 833-843.

GRAY, T. E., ALEXANDER, J. e LEEDER, M. R., 2005. Quantifying velocity and turbulence structure in depositing sustained turbidity currents across breaks in slope. *Sedimentology* 52, 467-488.

GUIRRO, A.C., 2005. Simulação física de fluxos gravitacionais de sedimentos: estado da arte e projeto de tese. Exame de qualificação. Programa de Pós-Graduação em Geociências, UFRGS.

HAMPTON, M. A., 1972. The role of subaqueous debris flow in generating turbidity currents. *J. Sed. Petrol.*, 42, 775-793.

IVERSON, R. M., 1997. Physics of debris flows. *Rev. Geophys.*, 35, 245-296.

KNELLER, B. C., 1995. Beyond the turbidite paradigm: physical models for deposition of turbidites and their implications for reservoir prediction. In: *Characterization of Deep Marine Clastic Systems* (Eds A.J. Hartley and D.J. Prosser), Geol. Soc. London, Spec. Publ., 94, 31-49.

KNELLER, B. C., BENNETT, S. J. e McCAFFREY, W. D., 1997. Velocity and turbulence structure of density currents and internal solitary waves: potential sediment transport and formation of wave ripples in deep water. ELSEVIER. *Sedimentary Geology* 112, 235-350.

KREPLIN, H. e ECKELMANN, H., 1979. Propagation of perturbations in the viscous sublayer and adjacent wall region. *J. Fluid Mech.* (1979), vol.95, parte 2, 305-322.

LOWE, D. R. (1982) Sediment gravity flows: II. Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. *J. Sed. Petrol.*, 52, 279-297.

MANICA, R., 2002. Modelagem física de correntes de densidade não conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Orientação: Ana Luiza de Oliveira Borges.

MANICA, R., 2009. Geração de correntes de turbidez de alta densidade : condicionantes hidráulicos e deposicionais. Correntes de turbidez de alta densidade. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Orientação: Ana Luiza de Oliveira Borges.

McCAFFREY, W. D., CHOUX, C. M., BAAS, J. H., HAUGHTON, P. D. W., 2003. Spatio-temporal evolution of velocity structure, concentration and grain size within experimental particulate gravity currents. *ELSEVIER Marine and Petroleum Geology* 20, 851-860.

MIDDLETON, G.V. e HAMPTON, M.A., 1973. Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity flows. In Stanley & Swift, eds., *Marine Sediment Transport and Environmental Management*, 197-218.

MIDDLETON, G. V. e SOUTHARD, J. B., 1984. *Mechanics of sediment transport*. S.E.M.P. Short Course No. 3, 401 pp.

MIDDLETON, G. V., 1993. Sediment deposition from turbidity currents. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 21, 89-114.

MOHRIG, D., WHIPPLE, K. X., HONDZO, M., ELLIS, C. e PARKER, G., 1998. Hydroplaning of subaqueous debris flows. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 110, 387-394.

MOHRIG, D., ELVERHOI, A. e PARKER, G., 1999. Experiments on the relative mobility of muddy subaqueous and subaerial debris flows, and their capacity to remobilize antecedent deposits. *Mar. Geol.*, 154, 117-129.

MULDER, T e SYVITSKI J. P. M., 1995. Turbidity currents generated at river mouth during exceptional discharges to the world oceans. Apud MULDER, T. e ALEXANDER, J. (2001). The physical charcter of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. *Sedimentology*, 48, 269-299.

MULDER, T e SYVITSKI J. P. M., 1996. Climatic and morphologic relationship of river: implications of sea level fluctuations on river load. Apud MULDER, T. e ALEXANDER, J. (2001). The physical charcter of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. *Sedimentology*, 48, 269-299.

MULDER, T. e ALEXANDER, J., 2001. The physical charcter of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. *Sedimentology*, 48, 269-299.

MULDER, T. e ALEXANDER, J., 2002. Experimental quasi-steady density currents. *Marine Geology*, 186, 195-210.

MUTTI, E.; TINTERRI, R.; REMANCHA, E.; MAVILLA, N. ANGELLA, S.; FAVAL, L. 1999. An introduction to the analysys of ancient turbidite basins from an outcrop perspective. Tulsa: AAPG 86p. (AAPG Course Notes, 39).

PERRET, D., LOCAT, J. e LEROUEIL, S., 1995. Strength development with burial in fine-grained sediments from the Saguenay Fjord. Apud MULDER, T. e ALEXANDER, J. (2001). The

physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. *Sedimentology*, 48, 269-299.

PUHL, E., 2007. Parametrização de ensaios de simulação física de correntes de densidade. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Ori. Ana Luiza de Oliveira Borges.

SIMM, R.W. e KIDD, R.B., 1983. Submarine deposits detected by long-range sidescan sonar 1000 kilometres from source. Apud GEE, M. J. R., MASSON, D. G., WATTS, A. B. e ALLEN, P. A. (1999). The Saharan debris flow: an insight into the mechanics of long runout submarine debris flows. *Sedimentology*, 46, 317-335.

SIMPSON, J.E., 1997. Gravity currents in the environment and the laboratory. Apud GUIRRO, A.C., (2005). Simulação física de fluxos gravitacionais de sedimentos: estado da arte e projeto de tese. Exame de qualificação. Programa de Pós-Graduação em Geociências, UFRGS

## **ANEXOS**

**Anexo I: Tabela com dados iniciais das misturas preparadas para composição de fluido ambiente e fluido da corrente para as diferentes etapas experimentais.**

Ensaio	Dados do fluido ambiente					Dados da mistura da corrente (valores iniciais)							
	T <sub>a</sub> °C	ρ kg.m <sup>-3</sup>	μ kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>	ρ <sub>a</sub> kg.m <sup>-3</sup>	S g.l <sup>-1</sup>	T <sub>c</sub> °C	ρ kg.m <sup>-3</sup>	μ kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>	ρ <sub>c</sub> kg.m <sup>-3</sup>	C <sub>V</sub> %	m <sub>c</sub> kg	μ <sub>c</sub> kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>	v <sub>c</sub> m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
C1	25	997,13	8,91E-04	1010	23,54	26	996,86	8,71E-04	1001,6	2,44	0,145	9,28E-04	9,27E-07
C2	21	998,08	9,79E-04	1010	21,82	21	998,08	9,79E-04	1005	3,59	0,214	1,08E-03	1,07E-06
C3	24	997,38	9,11E-04	1010	23,09	24	997,38	9,11E-04	1006,93	4,93	0,294	1,04E-03	1,03E-06
C4	23	997,62	9,33E-04	1010	22,65	24	997,38	9,11E-04	1011,77	7,43	0,443	1,12E-03	1,11E-06
C5	27	996,59	8,52E-04	1010	24,52	27	996,59	8,52E-04	1015,93	9,95	0,592	1,13E-03	1,11E-06
C6	26	996,86	8,71E-04	1010	24,03	25	997,13	8,91E-04	1021,25	12,44	0,741	1,27E-03	1,24E-06
C7	26	996,86	8,71E-04	1010	24,03	26	996,86	8,71E-04	1025,88	14,95	0,89	1,35E-03	1,32E-06
C8	26	996,86	8,71E-04	1015	33,17	26	996,86	8,71E-04	1010	6,77	0,403	1,05E-03	1,04E-06
C9	23	997,62	9,33E-04	1015	31,8	24	997,38	9,11E-04	1015	9,1	0,542	1,18E-03	1,16E-06
C10	24	997,38	9,11E-04	1015	32,23	23	997,62	9,33E-04	1016,83	9,93	0,592	1,24E-03	1,21E-06
C11	25	997,13	8,91E-04	1015	32,68	25	997,13	8,91E-04	1021,25	12,44	0,741	1,27E-03	1,24E-06
C12	26	996,86	8,71E-04	1015	33,17	25	997,13	8,91E-04	1026,1	14,94	0,89	1,38E-03	1,35E-06
C13	24	997,38	9,11E-04	1020	41,38	24	997,38	9,11E-04	1015	9,1	0,542	1,18E-03	1,16E-06
C14	23	997,62	9,33E-04	1020	40,95	23	997,62	9,33E-04	1020	11,57	0,689	1,29E-03	1,27E-06
C15	22	997,86	9,55E-04	1025	49,67	25	997,13	8,91E-04	1020	11,8	0,702	1,24E-03	1,22E-06
C16	21	998,08	9,79E-04	1030	58,43	21	998,08	9,79E-04	1025	13,95	0,831	1,47E-03	1,43E-06
Q1				1012	23,22					2,96	0,176	1,26E-03	1,26E-06
Q2	14	999,33	1,17E-03			14	999,33	1,17E-03	1015				
V1				1022	41,54					8,18	0,487	1,47E-03	1,45E-06
V2													
G1													
G2													
G3	18	998,68	1,05E-03	1010	20,73	18	998,68	1,05E-03	1010	5,89	0,35	1,24E-03	1,23E-06
G4													
G5													
E1	18	998,68	1,05E-03	1025	48,2	18	998,68	1,05E-03	1020	11,09	0,66	1,44E-03	1,41E-06
E2	18	998,68	1,05E-03	1010	20,73	18	998,68	1,05E-03	1010	5,89	0,35	1,24E-03	1,23E-06
E3	18	998,68	1,05E-03	998,68	0	18	998,68	1,05E-03	1010	5,89	0,35	1,24E-03	1,23E-06

**Anexo II: Tabela com parâmetros de injeção das correntes simuladas para as diferentes etapas experimentais.**

Ensaio	$\Delta\rho \times 100$	Dados das correntes simuladas – Parâmetros da injeção								
		$g'$ $m.s^{-2}$	$t_i$ min:seg	$Q_i$ $m^3.s^{-1}$	$V_i$ $m.s^{-1}$	$Re_i$	$Ri_i$	$Fr_i$	$D_{50}$ m	$W_s$ $m.s^{-1}$
C1	-0,8320	0,0816	02:50	2,94E-05	0,0174	356,65	5,12	0,44	5,50E-05	3,30E-04
C2	-0,4950	0,0485	01:08	7,35E-05	0,0435	771,4	0,49	1,43	5,50E-05	3,01E-04
C3	-0,3042	0,0298	02:43	3,07E-05	0,0181	333,65	1,72	0,76	5,50E-05	3,23E-04
C4	0,1754	0,0172	02:44	3,05E-05	0,018	309,86	1,01	1	5,50E-05	3,15E-04
C5	0,5873	0,0576	02:56	2,84E-05	0,0168	287,49	3,88	0,51	5,50E-05	3,45E-04
C6	1,1139	0,1092	02:36	3,21E-05	0,019	289,46	5,78	0,42	5,50E-05	3,37E-04
C7	1,5722	0,1542	02:32	3,29E-05	0,0195	280,35	7,74	0,36	5,50E-05	3,37E-04
C8	-0,4926	0,0483	01:10	7,14E-05	0,0422	772,95	0,51	1,39	5,50E-05	3,26E-04
C9	0,0000	0	01:12	6,94E-05	0,0411	673,68	0	-	5,50E-05	3,05E-04
C10	0,1805	0,0177	02:40	3,13E-05	0,0185	289,16	0,98	1,01	5,50E-05	3,12E-04
C11	0,6158	0,0604	02:44	3,05E-05	0,018	275,34	3,53	0,53	5,50E-05	3,19E-04
C12	1,0936	0,1072	02:32	3,29E-05	0,0195	274,16	5,38	0,43	5,50E-05	3,26E-04
C13	-0,4902	0,0481	01:09	7,25E-05	0,0429	702,97	0,5	1,42	5,50E-05	3,02E-04
C14	0,0000	0	01:12	6,94E-05	0,0411	615,34	0	-	5,50E-05	2,95E-04
C15	-0,4878	0,0478	01:06	7,58E-05	0,0448	697,87	0,45	1,49	5,50E-05	2,78E-04
C16	-0,4854	0,0476	01:08	7,35E-05	0,0435	576,57	0,48	1,45	5,50E-05	2,62E-04
Q1			00:44	1,14E-04	0,0672	1014,94	0,29	1,87		
Q2	-0,6917	0,0678	00:31	1,61E-04	0,0954	1440,56	0,14	2,66	5,50E-05	2,33E-04
V1			01:02	8,06E-05	0,1373	626,27	0,07	3,84		
V2	-0,6849	0,0672	01:06	7,58E-05	0,064	588,31	0,31	1,79		
G1			01:08	7,35E-05	0,0435	674,65	-	-	4,83E-05	2,79E-04
G2			01:06	7,58E-05	0,0448	695,09	-	-	6,54E-05	5,47E-04
G3	0	0	00:53	9,43E-05	0,0558	865,58	-	-	9,20E-04	7,13E-04
G4			00:54	9,26E-05	0,0548	849,55	-	-	1,60E-04	1,01E-03
G5			00:55	9,09E-05	0,0538	834,11	-	-	3,12E-04	2,79E-03
E1	-0,4878	0,0478	0,0465	7,46E-05	0,0441	594,55	0,47	1,46	5,50E-05	2,53E-04
E2	0	0	0,0403	8,62E-05	0,051	790,96	-	-	5,50E-05	2,79E-04
E3	1,1456	0,1123	0,041	8,48E-05	0,0501	777,56	0,85	1,08	5,50E-05	3,01E-04

**Anexo III: Tabela resultados da análise dos vídeos das correntes simuladas para as diferentes etapas experimentais.**

Ensaio	Análise dos vídeos				Adimensionais dos vídeos			
	H <sub>c</sub> m	V <sub>c</sub> m.s <sup>-1</sup>	H <sub>p</sub> m	V <sub>p</sub> m.s <sup>-1</sup>	P <sub>0</sub> m	Re <sub>c</sub>	Ri <sub>c</sub>	Fr <sub>c</sub>
C1	0,0444	0,0128	0,0302	0,0184	-	516,14	18,81	0,231
C2	0,0646	0,007	0,0157	0,0145	0 a 0,25	551,6	32,77	0,175
C3	0,1152	0,006	0,0184	0,0117	0,25 a 0,50	733,51	63,54	0,125
C4	0,1097	0,0051	0,0431	0,0089	0,50 a 0,75	962,1	18,75	0,231
C5	0,0553	0,0122	0,0555	0,0076	0,75 a 1,00	616,18	19	0,229
C6	0,0224	0,0092	0,0489	0,0087	0,75 a 1,00	187,9	21,86	0,214
C7	0,019	0,0141	0,0477	0,0082	0,75 a 1,00	228,66	11,47	0,295
C8	0,0286	0,0179	0,0232	0,0129	0,25 a 0,50	509,42	3,77	0,515
C9	0,018	0,0175	0,0375	0,0105	0,50 a 0,75	282,97	-	-
C10	0,0118	0,0076	0,0417	0,0101	0,50 a 0,75	86,22	2,67	0,612
C11	0,0139	0,0097	0,025	0,008	0,50 a 1,00	126	6,39	0,396
C12	0,0132	0,0097	0,0393	0,0062	0,25 a 0,50	109,48	11,52	0,295
C13	0,015	0,0198	0,0347	0,0128	0,50 a 1,00	280,17	1,7	0,766
C14	0,0176	0,0173	0,0197	0,0167	0,25 a 0,50	280,39	-	-
C15	0,0114	0,0171	0,0261	0,0132	0,25 a 0,50	169,21	1,76	0,755
C16	0,014	0,0168	0,0333	0,0123	0,50 a 1,00	172,09	2,18	0,678
Q1	0,1705	0,0087	0,0548	0,0173	0,00 a 0,25	1725,3	58,97	0,13
Q2	0,183	0,0174	0,0569	0,0232	0,00 a 0,25	3613	14,84	0,26
V1	0,0836	0,0194	0,0627	0,0107	0,00 a 0,50	1228,63	11,61	0,293
V2	0,1215	0,0154	0,0428	0,0162	0,00 a 0,25	1372,06	27,45	0,191
G1	0,0508	0,0168	0,0586	0,0182	0,25 a 0,50	814,65	-	-
G2	0,0546	0,0234	0,0672	0,009	0,50 a 1,00	1185,93	-	-
G3	0,0552	0,0179	0,0516	0,0188	0,25 a 0,50	1236,5	-	-
G4	0,0808	0,0146	0,0416	0,015	0,25 a 0,50	1132,95	-	-
G5	0,154	0,0089	0,0249	0,0303	0,25 a 0,50	1400,32	-	-
E1	0,0545	0,0139	0,063	0,0151	0,25 a 0,50	577,61	10,95	0,302
E2	0,0922	0,0188	0,0671	0,0171	0,25 a 0,50	1508,53	-	-
E3	0,0451	0,0222	0	0	-	839,31	9,22	0,331