

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**Simulação Física de Processos Gravitacionais Subaquosos:  
uma aproximação para o entendimento da sedimentação  
marinha profunda.**

**Antonio Cosme Del Rey**

**ORIENTADOR: Claiton Marlon dos Santos Scherer  
CO-ORIENTADOR: Adriano Roessler Viana**

**BANCA EXAMINADORA: Dr. Luiz Emílio Sá Brito de Almeida  
Dr. Marco Antonio Schreiner Moraes  
Dr. Ana Luiza de Oliveira Borges**

**Tese de Doutorado apresentada como  
requisito para obtenção do Título de Doutor  
em Geociências.**

Porto Alegre – 2006

Del Rey, Antonio Cosme

Simulação Física de Processos Gravitacionais Subaquosos: uma aproximação para o entendimento da sedimentação marinha profunda./ Antonio Cosme Del Rey. – Porto Alegre : UFRGS, 2006. [251 f.] il.

Tese (Doutorado). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2006.

1. Sedimentologia.. 2. Turbiditos. 3. Processos Gravitacionais subaquosos. 4. Geologia Marinha. 5. Correntes de densidade.

---

## **1 Catalogação na Publicação**

Biblioteca Geociências - UFRGS  
Renata Cristina Grun CRB 10/1113

## AGRADECIMENTOS

Por natureza todo ser humano é dependente de seus semelhantes, no meu caso, dada as minhas limitações, esta dependência é ainda maior. Considerando, ainda, o ambicioso desafio a que me propus neste trabalho, seria impossível a sua conclusão sem a generosa colaboração de inúmeras pessoas, que me auxiliaram individualmente e como representantes de instituições.

Inicialmente gostaria de agradecer a minha família, meus pais, Ida e Antonio, meus filhos, Giovanna, Lorena e Ângelo, e minha esposa, Mary pelo incentivo e colaboração que nunca me faltaram.

A Petrobras S/A nas pessoas dos gerentes Carlos Pedroso Jr, Marcelo Lopes de Oliveira, Nery Vicente Milani de Rossi, Walter Fernando Piazza Jr e Marcio Felix Carvalho Bezerra por terem possibilitado a minha liberação parcial de atividades para realização deste estudo. Aos coordenadores da Universidade Petrobras pelo apoio prestado no desenvolvimento de meu trabalho.

Aos colegas da Petrobras que me incentivaram com ricas discussões e críticas a estas pesquisas, em especial, a Paulo Lopes Brandão Paraizo, Marco Antonio Schreiner Moraes, Olinto Gomes de Souza Junior que participaram de uma forma mais próxima em nosso trabalho.

Aos professores do Instituto de Geociências de UFRGS pelo aprendizado que me possibilitaram, em especial aos professores Farid Chemale Jr e Michael Holz.

Aos colegas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, Daniel Ullmann de Brito, Rodrigo Sartor, Richard Eduard Dücker, Valter Nativo dos Santos Vasques e Marco Aurélio pela colaboração imprescindível e pela acolhida que nos ofereceram.

A Rafael Manica, amigo, cujo auxílio e colaboração tornaram possível a nossa empreitada.

Aos amigos e professores Ana Luiza de Oliveira Borges e Rogério Dornelles Maestri que, com sua sabedoria, me ensinaram a compreender o universo da simulação física de correntes de densidade. Em particular, a Maestri, por ter me indicado a linha de pesquisa abordada nesta pesquisa e pela minuciosa correção do texto final.

A Adriano Roessler Viana pela sua paciência na co-orientação e principalmente, na elaboração do texto.

A Claiton Marlon dos Santos Scherer pela atenciosa orientação e pelos trabalhos de campo onde pudemos reaprender as técnicas que foram de grande valor para este trabalho.



## RESUMO

O tema turbiditos tem causado muita controvérsia nos últimos anos. A nosso ver, isto ocorre principalmente devido à diminuição das pesquisas sobre os mecanismos que envolvem a iniciação, o transporte e a deposição deste tipo de rocha. A proposta deste trabalho é avaliar o potencial da simulação física de correntes de turbidez em prever e explicar feições sedimentares em seus depósitos. Foi escolhido como protótipo um sistema turbidítico antigo situado na margem oriental brasileira. A geometria complexa do protótipo foi simplificada para construção do modelo nas instalações do Pavilhão Fluvial do Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Foram desenvolvidos doze ensaios onde as observações realizadas sofisticaram-se a partir dos conhecimentos adquiridos nas etapas anteriores.

Como resultado dos experimentos identificaram-se novos aspectos geométricos e dinâmicos das correntes de densidade não-conservativas e suas conseqüências na sedimentação. Constatou-se um caráter ondulatório no fluxo, que teve sua origem associada à geração de ondas internas às correntes associadas ao desprendimento de vórtices a partir da cabeça da corrente e sua propagação ao longo da porção superior da corrente. Esta dinâmica implica mudanças na taxa de sedimentação ou mesmo erosão pela corrente, associadas a variações da amplitude e freqüência daquelas ondas. Na cabeça da corrente, verificou-se uma distribuição homogênea de sedimento em suspensão desde a base até o topo da corrente. No corpo ela se divide em duas camadas, uma basal com maior concentração de sedimentos e outra, superior marcada pela expansão do fluxo. Nas quebras de declive do modelo, que ocorrem no meio do canal e no ponto em que a corrente perde o confinamento, foram observadas acelerações localizadas no fluxo.

Dentre os parâmetros analisados nos experimentos, constatou-se que a vazão de alimentação tem grande influência nas características dos depósitos. De um modo geral, um aumento da vazão implica um deslocamento do pico deposicional no sentido da corrente e um aumento no conteúdo de frações mais grossas. Constatou-se, nos sedimentos depositados no canal, uma distribuição seqüenciada de formas de leito, que varia entre *ripples* de crista reta e *ripples* lingüóides. Reconheceu-se uma correlação entre a amplitude e o comprimento nestas formas de leito. Identificou-se em todos os casos em que houve o extravasamento da corrente a formação de *ripples* na lateral do canal com cristas lineares que indicam uma direção do fluxo próxima à que ocorre no canal. Foram desenvolvidos depósitos alongados no sentido do fluxo na área onde a corrente perde o confinamento. Observou-se uma grande similaridade entre os depósitos gerados nos experimentos e aqueles identificados em sistemas turbidíticos atuais e do registro geológico, tanto em afloramentos como em dados de subsuperfície.



## ABSTRACT

Over the last decades the turbidite research has been subject of controversy and passionate discussions. In our point of view this occurs mainly due to the scarcity of researches related to the mechanisms that involve initiation, transport and deposition of sediments under the action of turbidity currents. This work aims to evaluate the potential of physical simulation of turbidity currents to predict and explain their sedimentary deposits. In order to achieve this objective, an ancient turbidity system of Western Brazilian Continental Margin was selected as prototype for flume experiments. Its complex geometry was simplified and a model was built in the Fluvial Pavilion of the “Instituto de Pesquisas Hidraulicas da UFRGS”.

The experimental results show new geometrical and dynamical aspects of non-conservative density currents and their influences on the sedimentation. A wavy pattern of the flow was identified. It was originated by the generation of internal waves correlated to vortexes detachment in the upper part of the current head and their propagation along the current. This dynamic process promotes cyclic changes in the current velocity along the flow associated with variations on the frequency and amplitude of the waves inducing changes on the rates of sedimentation/erosion.

The head of the current exhibits, from the top to the base, a homogeneous distribution of suspended sediments. The body is divided into two layers, the lower one more concentrated in sediments. In the upper layer a flow expansion is observed. It was also observed local current acceleration coinciding with abrupt slope decreases, which occur in an intra-channel position and at the mouth of channel.

Among the studied parameters, the initial flow rate was the most influential on the characteristics of the deposits. In a general way, its increase induces a shift of the depositional peak basin ward and promotes an increase in the amount of coarser grains.

A bed form sequence varying from linear to lingoid-type ripples was observed inside the channel. There is cross-correlation between wave length and amplitude of the bed forms. In the over bank deposits, when they occurred, ripples with the similar flow directions of the channel were observed. Unconfined deposits off the channel mouth exhibit an elongated shape following the flow direction. The sedimentary structures generated in the experiment are similar to those that occur both in recent and ancient deposits of natural settings.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Principais processos que atuam em águas profundas.....	6
Figura 2 Blocos diagramas ilustrando a sedimentação proposta por Kuenen & Migliorini (1950) para a formação de corpos turbidíticos de alta densidade dos arenitos Brecciolas e Macigno. A – indicações das dimensões iniciais do modelo. B – fase imediatamente precedente a sedimentação do Arenito Brecciolas onde a sedimentação siliciclástica é baixa. C – elevação do nível do mar em cerca de 30 m com erosão costeira por ondas e do talude por correntes de turbidez. e, deposição dos Arenitos Brecciolas. D – Soerguimento da porção continental e rejuvenescimento do relevo com erosão da plataforma continental e deposição dos Arenitos Macigno. ....	11
Figura 3 Modelo hipotético de organização vertical e lateral de fácies para um lobo turbidítico segundo Bouma(1962). ....	12
Figura 4 Modelo de sistema turbidítico proposto por Normark(1970). ....	13
Figura 5 Modelo hipotético de organização vertical e lateral de fácies para um sistema turbidítico segundo Mutti & Ricci Lucchi (1972). ....	14
Figura 6 Principais tipos de sistemas turbidíticos segundo Mutti (1985).....	15
Figura 7 Esquema mostrando a fácies turbidíticas preconizadas por Mutti et al. (1999) e processos de transporte e sedimentação a elas relacionados.....	16
Figura 8 Modelo da uma corrente de densidade indicando de forma esquemática as linhas de fluxo e suas principais estruturas. ....	19
Figura 9 Fluxos que ocorrem na cabeça de uma corrente de densidade se deslocando sobre uma superfície plana segundo Simpson (1997). ....	20
Figura 10 Processos possíveis de transformações de fluxo em correntes de densidade não conservativas segundo Fischer (1983). ....	26
Figura 11 Variações possíveis no fluxo de correntes de densidade em função do tempo (A) e do deslocamento (B) (Kneller, 1995). ....	27
Figura 12 Situações que produzem fluxo não uniforme (Kneller , 1995). ....	27
Figura 13 Gráfico ilustrando as condições sob as quais ocorrem a não deposição e os tipos de depósitos ao longo de um sistema turbidítico considerando as variações de aceleração a que o fluxo pode estar submetido. (Kneller , 1995).....	28
Figura 14 Esquema mostrando a cabeça e o corpo de uma corrente de gravidade indicando um típico perfil de velocidades (Kneller & Buckee, 2000). ....	29
Figura 15 Classificação de fluxos de densidade mostrando os mecanismos dominantes de suporte de grãos ( Middleton e Hampton, 1976) e a sua reologia (Lowe, 1979). ....	30

Figura 16 Comportamento de vários tipos de fluxos fluidos e plásticos quando deformados por uma tensão. ....	33
Figura 17 Efeito do empacotamento em misturas granulares. ....	35
Figura 18 Terminologia para tipos de fluxos baseada na concentração volumétrica de sedimento medida em porcentagem conforme proposta por Mulder & Alexander (2001). Como a concentração de sedimento por si só não define as condições limites as linhas ponteadas representam estas incertezas.....	37
Figura 19 Gráfico ilustrando Variações de formas de leito em função das características do grão e do fluxo. (Swift & Ludwicck (1976)) .....	43
Figura 20 Esquemas dos elementos dinâmicos para fluxo de detritos (debris flow) e correntes de turbidez segundo Pratson et al (2000).....	46
Figura 21 Aparato utilizado por Kuenen & Migliorini (1950) seleção de materiais. ....	52
Figura 22 Aparato utilizado por Kuenen & Migliorini (1950) para estudo de corrente de turbidez de alta densidade. ....	53
Figura 23 -Canais circulares utilizados por Kuenen(1966).....	54
Figura 24 Esquema do canal utilizado por Middleton (1966a,b, 1967). ....	56
Figura 25 Resultados experimentais de Lutti (1981): a) evolução da corrente durante o fluxo; b) formas de leito identificadas nos depósitos e c) espessura da camada depositada. ....	57
Figura 26 Principais estruturas de fluxo verificadas por Postma et al. (1988).....	58
Figura 27 Depósitos observados por Baas et al (2004). ....	59
Figura 28 – A) Imagem de uma seção sísmica longitudinal ao paleocanion utilizado como protótipo de nosso modelo. B) Mapa em planta onde a topografia do paleocanion é representada através de uma escala de cores onde as porções mais rasas estão em cor amarela e a mais profunda em roxo .....	62
Figura 29 – Esquema mostrando o arranjo experimental as dimensões do modelo utilizado. ....	63
Figura 30 Figura 4.3 – Fotografias das instalações utilizadas. A esquerda detalhe dos reservatórios onde foram realizadas as misturas de carvão com água, as instalações hidráulicas e o sistema de medição e coleta de amostras. A direita detalhe do tanque onde foram realizados os ensaios. ....	64
Figura 31 - A) medidor eletromagnético de vazão; B) agitador da mistura. ....	64
Figura 32 - A) Filmadora modelo DCR-TRV110 e; B) Filmadora modelo DCR-TRV120 .....	65
Figura 33 – À esquerda é apresentado o ecógrafo utilizado nos ensaios. À direita acima temos uma fotografia do arranjo experimental em um canal bidimensional com a sonda linear situada acima. A direita abaixo é apresentada uma imagem da corrente de densidade ecográfica que	

representa o registro da passagem da corrente sob a sonda, permitindo, claramente, a identificação do vórtice na interface, com a incorporação de fluido ambiente à corrente. ....	66
Figura 34 - Anemômetro de filme quente utilizado. ....	67
Figura 35 - Distanciômetro a laser MD250 ADV e mesa de movimentação. ....	68
Figura 36 - Detalhe da ponta linimétrica. ....	69
Figura 37– Laboratório de sedimentologia utilizado para análises granulométricas. ....	69
Figura 38 – Siltômetro utilizado nos ensaios de velocidade de queda de partículas. ....	70
Figura 39 - Histograma da distribuição granulométrica carvão presente na mistura em três amostras coletadas antes liberação da corrente. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira. ....	75
Figura 40 - Uma vista geral do Ensaio de agosto de 2001 e a relação entre a granulometria do depósito e a distância percorrida pela corrente. ....	76
Figura 41 - Relação entre as formas de leito observadas e a variação da espessura (escala em cm) dos depósitos. Os termos ultra-som e espessura indicam o método de medição com ecografia e ponta linimétrica respectivamente. ....	77
Figura 42 - Imagens realizadas com ecógrafo em alguns pontos do depósito. ....	77
Figura 43 - Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas e o comportamento variação granulométrica na vertical e longitudinalmente. Os números nas caixas coloridas indicam as distâncias entre o início da corrente e o ponto de amostragem. ....	78
Figura 44 - Detalhe do depósito em continuação da Figura 43. ....	79
Figura 45 - Detalhe do depósito em continuação da Figura 43. ....	80
Figura 46 - Detalhe do depósito em continuação da Figura 43. ....	80
Figura 47 - Detalhe do depósito na saída do canal. Os retângulos amarelos e os semicírculos indicam as áreas onde foram coletadas as amostras para análise granulométrica. ....	81
Figura 48 - Histograma da distribuição granulométrica de carvão presente na mistura em três amostras coletadas antes da liberação da corrente. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira. ....	82
Figura 49 - Relação entre a velocidade da cabeça da corrente e sua forma. A- Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distância. Fotos indicam a forma da corrente. B – Esquema indicando a variação da forma da cabeça da corrente durante o seu deslocamento. ....	83
Figura 50 - Uma vista geral do Ensaio Manica1 mostrando as relações entre a granulometria do depósito, a variação da espessura e a distância percorrida pela corrente (escala em cm). ....	84

Figura 51 - Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e C) e o comportamento da variação granulométrica(D). B – Seção longitudinal esquemática indicando a forma na vertical das formas de leito. ....	85
Figura 52 - Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C). ....	85
Figura 53 - Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C). ....	86
Figura 54 - Histograma da distribuição granulométrica carvão presente da mistura em três amostras coletadas antes liberação da corrente. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira.....	86
Figura 55 - Relação entre a velocidade da cabeça da corrente e sua forma. A- Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distancia. Fotos indicam a forma da corrente. B – Esquema indicando a variação da forma da cabeça da corrente durante o seu deslocamento. ....	88
Figura 56 - Uma vista geral do Ensaio Manica2 mostrando as relações entre a granulometria do depósito, a variação da espessura e a distância percorrida pela corrente (escala em cm). ....	89
Figura 57 - Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento variação granulométrica(C). ....	89
Figura 58 - Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento variação granulométrica(C). ....	89
Figura 59 - Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento variação granulométrica(C) .....	90
Figura 60 - Histograma da distribuição granulométrica do carvão presente na mistura em três amostras coletadas antes liberação da corrente. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira.....	90
Figura 61 - Relação entre a velocidade da cabeça da corrente e sua forma. A- Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distância. Fotos indicam a forma da corrente. B – Esquema indicando a variação da forma da cabeça da corrente durante o seu deslocamento. ....	91
Figura 62 - Uma vista geral do Ensaio Manica3 mostrando as relações entre a granulometria do depósito, a variação da espessura e a distância percorrida pela corrente (escala em cm). ....	92
Figura 63 - Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C). ....	93
Figura 64 - Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C). ....	94

- Figura 65 - Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C). ..... 94
- Figura 66 – Histograma da distribuição granulométrica carvão presente na mistura em duas amostras coletadas antes liberação da corrente. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira..... 95
- Figura 67 – Relação entre a velocidade da cabeça da corrente e sua forma. A- Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distancia. Fotos indicam a forma da corrente. B – Esquema indicando a variação da forma da cabeça da corrente durante o seu deslocamento ..... 96
- Figura 68– Imagens de ultra-som da corrente. Os tons de cinza mais claros indicam menores densidades na corrente. A primeira imagem a esquerda representa uma seção longitudinal ao fluxo. As subseqüentes são transversais em tempos diversos do fluxo sendo a primeira a esquerda no inicio da ensaio e a última a direita no final. .... 97
- Figura 69 – Uma vista geral do Ensaio Dezembro 01 mostrando as relações entre a granulometria do depósito, a variação da espessura e a distância percorrida pela corrente..... 97
- Figura 70 – A esquerda temos um gráfico indicando a evolução do depósito em função do tempo a 100 cm do ponto de alimentação. A direita uma imagem de ultra-som no mesmo ponto onde está representado o canal antes do ensaio (esquerda) e ao seu final. As linhas coloridas representam o fundo do canal em diversos momentos do ensaio e podem representar a estratificação interna do depósito. .... 98
- Figura 71– Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento variação granulométrica(C). ..... 99
- Figura 72– Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento variação granulométrica(C). ..... 100
- Figura 73 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento variação granulométrica(C). ..... 100
- Figura 74– Histograma da distribuição granulométrica carvão presente na mistura em três amostras coletadas antes liberação da corrente. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira..... 101
- Figura 75– Relação entre a velocidade da cabeça da corrente e sua forma. A- Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distancia. Fotos indicam a forma da corrente. B – Esquema indicando a variação da forma da cabeça da corrente durante o seu deslocamento. .... 102
- Figura 76– Uma vista geral do Ensaio Fevereiro de 2002 Cenpes mostrando as relações entre a granulometria do depósito, a variação da espessura (medição com ponta linimétrica e ultra-som) e a distância percorrida pela corrente (escala em cm)..... 103
- Figura 77– Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C). ..... 103

- Figura 78– Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C). ..... 104
- Figura 79– Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C). ..... 104
- Figura 80– Esquema mostrando a formação de leques laterais de escorregamento sobre os depósitos de correntes de densidade. .... 106
- Figura 81 – Histograma da distribuição granulométrica carvão presente na mistura em três amostras coletadas antes liberação da corrente. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira. .... 107
- Figura 82 – Relação entre a velocidade da cabeça da corrente e sua forma. A- Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distancia. Fotos indicam a forma da corrente. B – Esquema indicando a variação da forma da cabeça da corrente durante o seu deslocamento. .... 108
- Figura 83 – Uma vista geral do Ensaio Fevereiro de 2002 pulso mostrando as relações entre a granulometria do depósito, a variação da espessura (medição com ponta linimétrica e ultra-som) e a distância percorrida pela corrente (escala em cm). .... 109
- Figura 84 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C) no alto estão representadas as amostras de topo e abaixo as da base. .... 110
- Figura 85 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C). .... 110
- Figura 86 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C). .... 111
- Figura 87 – Imagens ilustrando a formação do depósito durante a passagem da corrente de densidade. Explicações no texto. .... 112
- Figura 88 – A esquerda temos um gráfico indicando a evolução do depósito em função do tempo a 100 cm do ponto de alimentação. A direita uma imagem de ultra-som no mesmo ponto onde está representado em linhas coloridas o fundo do canal em diversos momentos do ensaio e sugerindo a estratificação interna do depósito. .... 113
- Figura 89 – Histograma da distribuição granulométrica carvão presente na mistura em três amostras coletadas antes liberação da corrente. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira. .... 114
- Figura 90 – Relação entre a velocidade da cabeça da corrente e sua forma. A- Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distancia. Fotos indicam a forma da corrente. B – Esquema indicando a variação da forma da cabeça da corrente durante o seu deslocamento. .... 115

- Figura 91 – Uma vista geral do Ensaio maio de 2002 Pulso mostrando a variação da espessura (medição com ultra-som) com distância percorrida pela corrente (escala em cm). ..... 116
- Figura 92 - A direita temos um gráfico indicando a evolução do depósito em função do tempo a 100 cm do ponto de alimentação. A esquerda uma imagem de ultra-som no mesmo ponto onde está representado em linhas coloridas o fundo do canal em diversos momentos do ensaio e podem representar a estratificação interna do depósito..... 116
- Figura 93 – Histograma da distribuição granulométrica carvão presente da mistura em quatro amostras coletadas antes liberação da corrente. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira..... 117
- Figura 94 – Imagem de ultra-som da corrente. Os tons de cinza mais claros indicam menores densidades na corrente. A primeira imagem superior representa uma seção longitudinal ao fluxo não interpretada. Na inferior são interpretadas linhas dividindo o fluxo em porções com densidades diferentes (linhas amarelas) em azul é marcado o fundo do canal..... 118
- Figura 95 – Uma vista geral do Ensaio Dezembro 01 mostrando as relações entre a granulometria do depósito, a variação da espessura e a distância percorrida pela corrente (escala em cm). ..... 119
- Figura 96 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C). ..... 121
- Figura 97 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C). ..... 121
- Figura 98 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C). ..... 121
- Figura 99 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C). ..... 122
- Figura 100 – Histograma da distribuição granulométrica carvão presente da mistura em 12 amostras coletadas duas antes e duas após os três primeiros eventos. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira. .... 123
- Figura 101 – Relação entre a velocidade da cabeça da corrente e sua forma. A- Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distancia. Fotos indicam a forma da corrente. B – Esquema indicando a variação da forma da cabeça da corrente durante o seu deslocamento. .... 124
- Figura 102 – Uma vista geral do Ensaio Fevereiro de 2002 pulso mostrando as relações entre a granulometria do depósito, a variação da espessura (medição com ponta linimétrica e ultra-som) e a distância percorrida pela corrente (escala em cm). ..... 125
- Figura 103 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica. (C) amostras de topo, (D) da base (E) extravazamento. .... 125

- Figura 104 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica. (C) amostras de topo, (D) da base (E) extravazamento. .... 126
- Figura 105 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica. (C) amostras de topo, (D) da base (E) extravazamento. .... 126
- Figura 106 – Imagem indicando as características dos depósitos na área não confinada. .... 127
- Figura 107 – Histograma da distribuição granulométrica carvão presente da mistura em 6 amostras coletadas antes e após os três primeiros eventos. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira. .... 128
- Figura 108 – Relação entre a velocidade da cabeça da corrente e sua forma. A- Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distancia. Fotos indicam a forma da corrente. B – Esquema indicando a variação da forma da cabeça da corrente durante o seu deslocamento. .... 129
- Figura 109 – Gráficos apresentando os valores de velocidade de fluxo (U-curva preta) e da altura da camada basal da corrente (H-curva vermelha), com (A) e sem (B) filtro de freqüência. 130
- Figura 110 – Uma vista geral do Ensaio Janeiro de 2003 Pulso mostrando as relações entre a granulometria do depósito, a variação da espessura (medição com ultra-som) e a distância percorrida pela corrente (escala em cm). No gráfico inferior é apresentada a espessura dos sedimentos após o primeiro (azul), o segundo (rosa) e o quarto evento (verde). .... 132
- Figura 111 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica (C) amostras de topo, meio superior, meio inferior e base, dispostas na vertical do alto para baixo. .... 133
- Figura 112 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica (C) amostras de topo, meio superior, meio inferior e base, dispostas do alto para baixo. .... 133
- Figura 113 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica. (C) amostras de topo, meio e base, dispostas do alto para baixo. .... 134
- Figura 114– Imagem indicando as características dos depósitos na área não confinada. Esquema das formas de fundo (a direita), imagem fotográfica (centro) e análises granulométricas (a esquerda). .... 135
- Figura 115 – Gráficos indicando a espessura dos depósitos (roxo) e a altura da camada basal da corrente em função do tempo. As setas vermelhas indicam pontos onde há concordância entre os dados e azuis onde não há. .... 136
- Figura 116 – Histograma da distribuição granulométrica carvão presente da mistura em 6 amostras coletadas antes e após os três primeiros eventos. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira. .... 137

- Figura 117 – Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distancia..... 138
- Figura 118 – Uma vista geral do Ensaio Janeiro de 2003 Pulso mostrando as relações entre a granulometria do depósito, a variação da espessura (medição com ultra-som) e a distância percorrida pela corrente (escala em cm). No gráfico inferior é apresentada a espessura dos sedimentos após o primeiro (azul), o segundo (rosa) e o quarto evento (verde). ..... 139
- Figura 119 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica (C) amostras de topo, meio superior, meio inferior e base, dispostas na vertical do alto para baixo. .... 141
- Figura 120 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica (C) amostras de topo, meio superior, meio inferior e base, dispostas do alto para baixo. .... 141
- Figura 121 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica. (C) amostras de topo, meio e base, dispostas do alto para baixo. .... 142
- Figura 122 – Imagem indicando as características dos depósitos na área não confinada. Esquema das formas de fundo (a direita) e imagem fotográfica (a esquerda)..... 142
- Figura 123 – Gráfico utilizado para estimar a velocidade de queda representativo da fração granulométrica ensaiada. A vinha verde determina o ponto onde 50 % do material colocado no ensaio atingiu a base da coluna. .... 143
- Figura 124 – Imagem microscópica do carvão utilizado nos ensaios a escala acima corresponde a 2 mm..... 146
- Figura 125 – Relação entre concentração de sedimento e viscosidade na mistura ..... 147
- Figura 126 – Gráfico dos valores do numero de Froude em função da distância do ponto de alimentação dos ensaios realizados..... 151
- Figura 127 – Gráfico dos valores do numero de Reynolds em função da distância do ponto de alimentação dos ensaios realizados..... 151
- Figura 128 -Gráficos correlacionando a velocidade de queda adimensional com a fração volumétrica em peso nos depósitos para as diversas faixas granulométricas identificadas pela escala de cor apresentada na legenda (valores em mm). No alto dos gráficos estão identificados os ensaios..... 152
- Figura 129 -Curva da velocidade média de propagação da corrente em função distância..... 155
- Figura 130 - Graficos correlacionando a média harmônica da velocidade da corrente ao longo do canal com (A) Vazão de alimentação da corrente e (B) Concentração volumétrica de carvão .155
- Figura 131 - Grafico correlacionando a média harmônica da velocidade da corrente ao longo do canal com a quantidade de movimento da corrente nas condições de iniciação (vazão vezes a raiz quadrada concentração volumétrica de carvão-C) ..... 156

- Figura 132– Gráficos correlacionando as variações da velocidade de deslocamento da corrente em relação a uma tendência de decaimento exponencial média e à distância a partir do ponto de alimentação. .... 157
- Figura 133– Relação entre a velocidade da cabeça da corrente e sua forma. A- Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distância. Fotos indicam a forma da corrente e quadro ao lado mostra de forma esquemática a variação da forma da cabeça: vermelha – alongada e azul – arredondada. B – Esquema indicando a variação da forma da cabeça da corrente durante o seu deslocamento..... 158
- Figura 134 - Esquema mostrando o desenvolvimento de fluxo helicoidal na calha. .... 160
- Figura 135 – Imagem onde pode se constatar instabilidades internas a corrente de densidade longitudinais ao fluxo. (A) corte longitudinal esquemático, (B) imagem ecográfica,..... 161
- Figura 136 - Imagem onde pode-se verificar as instabilidades internas as correntes transversais ao fluxo. A e B imagens ecográficas em seções transversais ao fluxo onde se pode verificar variações internas de densidade associadas ao desenvolvimento de fendas e lobos. C modelo para fendas e lobos modificado de Simpson (1972). .... 162
- Figura 137– Imagens da corrente durante um experimento. A - imagem fotográfica a partir de uma janela lateral ao tanque. B - composição de imagens de ultra-som com Doppler do mesmo fluxo apresentado na imagem A. C – esquema indicando a interpretação das imagens A (cor amarelo) e B (cor laranja) onde é possível se verificar um espessamento da zona superior do fluxo da cabeça para o corpo. (maiores detalhes no texto)..... 164
- Figura 138– Esquema indicando a estrutura interna da corrente e o processo que provoca as oscilações no seu deslocamento..... 165
- Figura 139 –Gráficos apresentando os valores de velocidade de fluxo (U-curva preta) e da altura da camada basal da corrente (H-curva vermelha), sem (A) e com (B) filtro de frequência.166
- Figura 140 - Gráfico correlacionando a velocidade de fluxo (U) e da altura da camada basal da corrente (H) dos dados da Figura 12..... 167
- Figura 141 – (A) Imagem longitudinal de corrente de densidade obtida através de sonar no Lago Lilloet - Canada (Best, Peakall, Franklin & Kostaschuk, 2002). A linha amarela representa o limite superior da corrente. (B) Imagem longitudinal ao fluxo composta de scanner de ultra-som em experimento de corrente de densidade realizado no IPH. (C) Interpretação das imagens A onde se procura representar a formação de pulso em um único evento de corrente de densidade. O gráfico interno representa a distribuição vertical de velocidades de fluxo no interior da corrente. (D) Gráfico esquemático da distribuição de velocidades e altura da corrente da Figura C ao longo do tempo. .... 168
- Figura 142 – Gráficos indicando a espessura dos depósitos (roxo) e a altura da camada basal da corrente em função do tempo observados no ensaio 11–Janeiro de 2003. As setas vermelhas indicam pontos onde há concordância entre os dados, e as setas azuis onde não há concordância. .... 170
- Figura 143– Gráficos correlacionado as características das macro-estruturas do fluxo: frequência das variações de altura da camada basal da corrente (pontos azuis), razão

amplitude-comprimento de onda destas variações (linha amarela) e taxa de deposição em função do tempo. ....	171
Figura 144– Espessuras dos depósitos no eixo do canal medidas com ponta linimétrica. Os números associados às curvas indicam o volume, a vazão de alimentação e a densidade da corrente.....	173
Figura 145 - Gráficos correlacionando a distância em que ocorre o pico de maior espessura do depósito com: a vazão de alimentação da corrente ( $R^2=0,66$ ), o diâmetro médio do grão no depósito e a concentração volumétrica de carvão na corrente. ....	175
Figura 146 - Grafico correlacionando o volume depositado no canal em função da distância do ponto de alimentação. ....	176
Figura 147 - Grafico da fração volumétrica do depósito retida no canal em função da distância do ponto de alimentação. ....	176
Figura 148 - Gráficos da distância do ponto de alimentação até o centro de massa do depósito em função: da vazão de alimentação da corrente o ( $R^2=0,83$ ), do diâmetro médio do grão no depósito e da concentração volumétrica de carvão na corrente. ....	177
Figura 149– Gráfico da multiplicação do volume da mistura que alimentou a corrente (V) pela concentração volumétrica de carvão (C) dividida pela vazão (Q) em função do volume de sedimento depositado no canal ( $R^2=0,78$ ).....	179
Figura 150 - Gráfico da taxa de variação de espessura do depósito média em função da vazão ( $R^2=0,28$ ). ....	179
Figura 151– Gráficos dos valores da espessura dos depósitos normalizados pela concentração volumétrica em função da distancia do ponto de alimentação. ....	180
Figura 152 - Grafico do diâmetro médio dos depósitos em função da distância do ponto de alimentação. ....	181
Figura 153- Gráfico correlacionando o diâmetro médio em função da vazão de alimentação da corrente ( $R^2=0.67$ ). ....	182
Figura 154– Gráficos da fração depositada de uma granulométrica normalizada pela concentração desta faixa do sedimento em suspensão em função da distância do ponto de alimentação. Os números no alto dos gráficos correspondem ao diâmetro mínimo de grãos retido na peneira em mm.....	184
Figura 155– Gráficos correlacionando a velocidade de queda adimensional com a fração volumétrica em peso para as diversas faixas granulométricas investigadas nos depósitos. No alto dos gráficos estão identificadas faixas granulométricas em mm que cada um representa. As linhas vermelhas.....	186
Figura 156– Padrões de formas de leito apresentados pelos depósitos. A) 05-dez01 – vazão=5 l/min, B) 07-fev02-pulso – vazão=10 l/min, C) 04-Manica03 – vazão=12,5 l/min, D) 10-jun02-pulso – vazão=27 l/min, E) 11-jan03-pulso – vazão=36 l/min. ....	187

- Figura 157– Seqüência ideal de formas de leito constatadas nos ensaios da esquerda para direita, inicialmente na linha superior passando a linha inferior. São elas ripples lineares que progressivamente vão se deformando até se tornarem com crista sinuosa, no sentido do fluxo passam a assumir a forma lingüóide diminuindo tanto a distância entre as cristas como a amplitude. .... 188
- Figura 158– Imagem 3D da reconstituição da superfície dos depósitos do ensaio Janeiro03-pulso com o programa GOCAD. Espessura do depósito ..... 189
- Figura 159– Gráficos representando as forma de leito em seção longitudinal ao canal. A- gráfico da cota do depósito em cm (linha azul- escala vertical) em função da distancia da fonte de alimentação em cm(escala horizontal). B- gráfico da amplitude das formas de fundo extraídas a partir da uma curva média em cm (linha vermelha - escala vertical) em função da distância a partir do ponto de alimentação em cm (escala horizontal). .... 190
- Figura 160 – Gráfico da amplitude e comprimento das formas de leito. Os pontos representam o comprimento das formas de leito interpretadas da imagem fotográfica. .... 191
- Figura 161– Correlação entre amplitude e distância entre cristas das formas de leito. .... 191
- Figura 162 – Variação da razão entre comprimento e amplitude entre cristas das formas de leito ao longo dos depósitos. .... 192
- Figura 163 - Imagens digitais das formas de leito desenvolvidas no ensaio 11-Jan03-pulso. (A) Visão lateral, (B) Visão de topo e (C) Perspectiva. .... 192
- Figura 164 – Correlação entre assimetria de formas de leito e suas amplitudes. .... 193
- Figura 165– Imagens dos depósitos de extravasamento de canal do ensaios (A) Maio 2002 - Workshop, (B) Junho 2002, (C) Janeiro 2003 e (D) Interpretação da imagem C. Na Figura 165B as cristas das ripples são mais sinuosas que nos dois outros ensaios indicando condições de fluxo diferentes. .... 194
- Figura 166 - Imagens dos depósitos da área não confinada do ensaios (A) Janeiro 2003, (B) Junho 2002 e (C) dezembro de 2004 que apresentaram intenso desenvolvimento de formas de leito. 196
- Figura 167 - Imagem tridimensional do depósito da área não confinada do ensaio Janeiro 03-pulso. 1) Visão lateral , 2) Visão de topo e 3) Seção longitudinal ao depósito com exagero vertical de 25 vezes. .... 197
- Figura 168 - Imagens de depósitos onde é possível identificar sobrepostos as ripples sulcos longitudinais (furrows). .... 198
- Figura 169– Gráfico mostrando a correlação inversa entre o produto da vazão pela concentração volumétrica de carvão e a raiz quadrada da fração do volume de sedimento colocado em suspensão pela corrente de densidade. .... 199
- Figura 170– Gráficos mostrando a capacidade de dispersão de sedimentos pela corrente. A - Fração do sedimento colocado em suspensão depositada em função da distância percorrida pela corrente. B-Fração do volume retido no canal em função da distancia. .... 200

- Figura 171 - Gráfico correlacionando a percentagem de finos na mistura com a distância do centro de massa do depósito em relação ao ponto de alimentação agrupando os ensaios pela vazão de alimentação da corrente..... 204
- Figura 172– Figura representando os histogramas de distribuição granulométrica ao longo do depósito e a distribuição granulométrica inicial da corrente. .... 205
- Figura 173 - Imagem do protótipo utilizado como modelo de nossos experimentos. A) imagem da topografia do paleocânion onde as cores quentes representam os pontos mais baixos e as cores frias os pontos mais elevados. A área destacada representa o mapa de isólitas . B) Isólitas de areia turbidítica onde as maiores espessuras (140 m) são representadas por cores roxas e as menores (<20 m) em cor laranja. C) Imagem dos depósitos do ensaio 9–maio02-Work. As setas indicam os pontos correspondentes entre modelo e protótipo..... 207
- Figura 174- Imagem de sonar sidescan mostrando um campo de ondas de sedimentos no Canal de Icod no flanco norte da Ilha de Tenerife nas Ilhas Canárias (Wynn et al. ; 2002) e imagem do ensaio 7-Fev2002-Pulso (item 5.7)..... 210
- Figura 175- Imagem de sonar sidescan mostrando um campo de ondas de sedimentos no Canal de El Julan no flanco norte da Ilha de El Hierro nas Ilhas Canárias (Wynn et al., 2002) e imagem do ensaio 10-Jun2002-Pulso (item 5.10)..... 211
- Figura 176- Imagem de sonar sidescan mostrando um campo de ondas de sedimentos no Vale leste do Leque Laurentiano (Wynn et al. 2002) e imagem do ensaio 10-Jun2002-Pulso (item 5.10)..... 212
- Figura 177 – Imagem da batimetria da porção superior (primeiros 5 km) do Cânion de Monterrey oeste da Califórnia EUA com resolução de 3 m (Smith et al. 2005) e imagem dos depósitos do experimento 11-Jan2003-pulso (ao topo)..... 213
- Figura 178 – (a) Imagem em planta das formas de leito no Cânion de Monterrey e (b) seção longitudinal ao cânion (Smith et al. 2005). (d) Imagem em planta dos depósitos do experimento 11-Jan2003-pulso e (c) seção longitudinal ao canal. .... 213
- Figura 179 – Imagens de formas de onda em diferentes escalas em afloramentos de turbiditos arenosos. (A) Forma de onda com cerca de 2 m de comprimento e 0,3 m de altura em arenito médio no Afloramento Apiuna 1, Bacia do Itajaí. (B) Forma de onda com cerca de 0,8 m de comprimento e 0,15 m de altura em arenito fino no Afloramento Bergamota, Bacia do Itajaí. (C) Forma de onda com cerca de 6 m de comprimento por 1 m de altura no Leque 6 na região da paleobacia, Fm Brushy Cânion, Bacia de Delaware. (D) Forma de onda com cerca de 4 m de comprimento por 0,6 m de altura no Leque 7 na região da paleobacia, Fm Brushy Cânion, Bacia de Delaware. (E) Forma de onda com cerca de 70 m de comprimento por 6 m de altura no Leque 7 na região da paleobacia, Fm Brushy Cânion, Bacia de Delaware. .... 217
- Figura 180– Imagens de afloramentos de turbiditos com estratificação cruzada. (A) Detalhe de forma de leito em onda com 10 m de extensão lateral com 0,6 m de altura com estratificação cruzada de baixo ângulo- Afloramento Apiuna 2, Bacia do Itajaí. (B) Detalhe de estratificação cruzada acanalada com 0,4 m de altura – afloramento no paleotalude no Leque 6 em feição canal confinado, Fm Brushy Cânion, Bacia de Delaware. (C) Detalhe de estratificação cruzada de baixo ângulo no Afloramento Bergamota, Bacia do Itajaí. (D) Detalhe de estratificação cruzada acanalada com 1 m – afloramento no Leque 7 em feição de canal distributário, Fm

Brushy Cânion, Bacia de Delaware. (E) Visão geral de feição canalizada no Leque 6 na região da paleobacia, Fm Brushy Cânion, Bacia de Delaware. (F) Detalhe da estrutura interna do depósito da figura F com estratificação cruzada. .... 218

Figura 181– Feições de corte e preenchimento em várias escalas que indicam terem sido formadas por ondas internas a correntes de densidade. (A) Macrofeição de corte e preenchimento em arenito muito fino e siltito com 10m de comprimento por 2 m altura no Leque 3 na região da base do paleotalude, Fm Brushy Cânion, Bacia de Delaware. (B) Detalhe da estrutura interna dos sedimentos da Foto A onde se pode observar a mesma feição de corte e preenchimento na escala 0,25 m de comprimento 0,05 m de altura. (C) Macrofeição de corte e preenchimento em arenito de granulação média a siltito com 25 m de comprimento e 3m de altura na Fm Urucutuca, Bacia de Almada. (D) Detalhe de macrofeição de corte e preenchimento em arenito granulação média a siltito com 5 m de comprimento e 1m de altura no Afloramento Bergamota, Bacia de Itajai. .... 219

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Estimativa de características de fluxos turbidífticos modernos (modificado de Zeng & Lowe, 1997).....	72
Tabela 2 – Dados Gerais Sobre os Ensaios.....	74
Tabela 3 - Valores medidos no ensaio de velocidade de queda de partículas para fração retida na peneira com malha 0,088 mm. ....	144
Tabela 4 - Valores de velocidade de queda e características granulométricas do carvão utilizado nos experimentos. ....	145
Tabela 5 - Números adimensionais característicos de sistemas turbidíticos atuais.....	149
Tabela 6 - Características representativas dos ensaios realizados. ....	174

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	I
RESUMO .....	III
ABSTRACT .....	V
INDICE DE FIGURAS .....	VI
INDICE DE TABELAS.....	XX
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
3.1 GENERALIDADES .....	4
3.2 PROCESSOS SEDIMENTARES DE ÁGUA PROFUNDA.....	5
<b>3.2.1 Decantação .....</b>	<b>7</b>
<b>3.2.2 Escorregamentos .....</b>	<b>7</b>
<b>3.2.3 Fluxo de Detritos .....</b>	<b>7</b>
<b>3.2.4 Correntes de densidade .....</b>	<b>8</b>
<b>3.2.5 Extravasamentos .....</b>	<b>8</b>
<b>3.2.6 Ravinamentos.....</b>	<b>9</b>
<b>3.2.7 Correntes de fundo .....</b>	<b>9</b>
3.3 MODELOS DE SISTEMAS TURBIDÍTICOS .....	9
3.4 PROCESSOS DE INICIAÇÃO DE UMA CORRENTE DE TURBIDEZ.....	17
3.5 ANATOMIA DA CORRENTE DE DENSIDADE .....	18
3.6 CARACTERÍSTICAS DAS CORRENTES DE DENSIDADE NÃO CONSERVATIVAS ..	22
3.7 VARIAÇÕES VERTICAIS NAS CARACTERÍSTICAS DAS CORRENTES DE DENSIDADE NÃO CONSERVATIVAS.....	29
3.8 MECANISMOS DE SUPORTE DOS GRÃOS .....	30
3.9 TIPOS DE FLUXOS .....	31
3.10 CLASSIFICAÇÃO DO FLUXO EM FUNÇÃO DA REOLOGIA DA MISTURA .....	32
3.11 A CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS E SUAS IMPLICAÇÕES.....	36
<b>3.11.1 Densidade da corrente .....</b>	<b>38</b>
<b>3.11.2 Viscosidade .....</b>	<b>38</b>
<b>3.11.3 Velocidade de queda do grão .....</b>	<b>39</b>
<b>3.11.4 Capacidade de transporte .....</b>	<b>40</b>
<b>3.11.5 Velocidade de fluxo e resistência ao fluxo.....</b>	<b>41</b>
<b>3.11.6 Efeito da difusão .....</b>	<b>41</b>
3.12 RELAÇÕES ENTRE FORMAS DE LEITO E REGIMES DE FLUXO.....	42
3.13 EQUAÇÕES UNIDIMENSIONAIS PARA DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS.....	44
3.14 SIMULAÇÃO FÍSICA DE CORRENTES DE DENSIDADE.....	48
3.15 ESTUDOS EXPERIMENTAIS DE MODELAGEM DE CORRENTES DE DENSIDADE.	51
3.16 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60

4.....	<b>METODOLOGIA</b>	<b>61</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	61
4.2	EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTAÇÃO.....	65
4.2.1	<b>Filmadoras digitais</b> .....	<b>65</b>
4.2.2	<b>Câmara fotográfica digital</b> .....	<b>65</b>
4.2.3	<b>Ecógrafo Ultra-sônico</b> .....	<b>65</b>
4.2.4	<b>Anemômetro de filme quente</b> .....	<b>66</b>
4.2.5	<b>Medidor de distância a laser Opto MD250 ADV</b> .....	<b>67</b>
4.2.6	<b>Ponta linimétrica</b> .....	<b>68</b>
4.2.7	<b>Peneiras e balança para análise granulométrica</b> .....	<b>69</b>
4.2.8	<b>Siltômetro para determinação de velocidade de queda de partícula</b> .....	<b>70</b>
4.3	RELAÇÕES DE SEMELHANÇA.....	71
4.3.1	<b>– Valores característicos do protótipo</b> .....	<b>71</b>
4.4	PROGRAMA DE ENSAIOS .....	72
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>75</b>
5.1	ENSAIO DE AGOSTO DE 2001:.....	75
5.2	ENSAIO DE SETEMBRO DE 2001 MANICA 1: .....	81
5.3	ENSAIO DE SETEMBRO DE 2001 MANICA 2: .....	86
5.4	ENSAIO DE SETEMBRO DE 2001 MANICA 3: .....	90
5.5	ENSAIO DE DEZEMBRO DE 2001: .....	94
5.6	ENSAIO DE FEVEREIRO DE 2002 CENPES:.....	100
5.7	ENSAIO DE FEVEREIRO DE 2002 PULSO: .....	106
5.8	ENSAIO DE MAIO DE 2002 PULSO: .....	113
5.9	ENSAIO DE MAIO DE 2002 WORK: .....	117
5.10	ENSAIO DE JUNHO DE 2002 PULSO:.....	122
5.11	ENSAIO DE JANEIRO DE 2003 PULSO:.....	128
5.12	ENSAIO DE DEZEMBRO DE 2004 PULSO:.....	137
5.13	ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE QUEDA DE PARTÍCULAS DE CARVÃO.....	143
5.14	ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA REOLOGIA DAS MISTURAS COM CARVÃO.....	146
<b>6</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS</b> .....	<b>148</b>
6.1	CARACTERÍSTICAS DAS CORRENTES INVESTIGADAS E ANÁLISE DE SEMELHANÇA COM SISTEMAS NATURAIS .....	148
6.2	DINÂMICA E ESTRUTURA INTERNA DAS CORRENTES DE DENSIDADE NÃO CONSERVATIVAS .....	153
6.2.1	<b>Características da propagação da corrente</b> .....	<b>153</b>
6.2.2	<b>Estrutura Interna da Corrente</b> .....	<b>160</b>
6.2.3	<b>Correlação entre a estrutura interna da corrente e as características da propagação da corrente</b> .....	<b>164</b>
6.3	IMPLICAÇÕES DA DINÂMICA DA CORRENTE NAS CARACTERÍSTICAS DOS DEPÓSITOS.....	168
6.4	PADRÕES DEPOSICIONAIS VERIFICADOS NOS ENSAIOS.....	172
6.4.1	<b>Distribuição espacial dos depósitos</b> .....	<b>172</b>
6.4.2	<b>Distribuição granulométrica dos depósitos</b> .....	<b>181</b>
6.4.3	<b>Formas de leito desenvolvidas no canal</b> .....	<b>186</b>
6.4.4	<b>Formas de leito desenvolvidas na área de extravasamento do canal</b> .....	<b>193</b>

6.4.5	Formas de leito desenvolvidas na área de não confinada.....	195
6.4.6	Formas de leito sobrepostas as feições maiores.....	198
6.5	CAPACIDADE DE DISPERSÃO DE SEDIMENTOS PELA CORRENTE.....	199
6.6	EFEITOS DAS VARIÇÕES DAS CARACTERÍSTICAS CORRENTES NO PADRÃO DEPOSICIONAL DOS ENSAIOS .....	201
6.6.1	Efeito da vazão de alimentação .....	201
6.6.2	Efeito da densidade da corrente.....	203
6.6.3	Efeito da granulometria do sedimento em suspensão.....	203
6.6.4	Efeito das variações na geometria do modelo.....	204
6.7	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS DEPÓSITOS.....	204
<b>7</b>	<b>DISCUSSÕES SOBRE A CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS COM SISTEMAS TURBIDITICOS NATURAIS.....</b>	<b>205</b>
7.1	ESPESSURAS DOS DEPÓSITOS .....	206
7.2	FORMAS DE LEITO .....	207
7.2.1	Lei de semelhança para formas de leito .....	209
7.2.2	Similaridades com sedimentos recentes.....	210
7.2.3	Similaridades com depósitos antigos.....	214
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>220</b>
8.1	QUANTO A METODOLOGIA .....	220
8.2	QUANTO AS CARACTERÍSTICAS DO FLUXO.....	220
8.3	QUANTO ÀS CARACTERÍSTICAS DOS DEPÓSITOS .....	221
8.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES .....	223
<b>9</b>	<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>224</b>



# **Simulação Física de Processos Gravitacionais Subaquosos: uma aproximação para o entendimento da sedimentação marinha profunda.**

## **2 INTRODUÇÃO**

O tema turbiditos tem causado muita controvérsia nos últimos anos. A nosso ver, isto ocorre principalmente devido ao abandono das pesquisas sobre os mecanismos que envolvem a iniciação, o transporte e a deposição deste tipo de rocha sedimentar.

O termo turbidito foi utilizado, inicialmente, para denominar rochas sedimentares depositadas em ambiente marinho profundo através de um tipo específico de corrente de densidade, denominada corrente de turbidez, em que a diferença de densidade entre o fluxo e o fluido envolvente é caracterizada pela suspensão de sedimentos em seu interior. Posteriormente, dada a importância que estas rochas foram ganhando para indústria petrolífera, foram sendo introduzidos novos conceitos que, na sua grande maioria, basearam-se unicamente em feições sedimentares constatadas em depósitos antigos. Tudo isto gerou uma profusão de termos e modelos que causam uma grande confusão no estudo desses depósitos.

Um aspecto que se deve salientar é que a superfície terrestre tem dois terços de sua área coberta por mares e os processos sedimentares desenvolvidos neste ambiente não são acessíveis à observação direta como os desenvolvidos por rios, ventos e correntes costeiras. Desses dois terços de ambiente marinho, temos um razoável entendimento dos processos sedimentares que se desenvolvem em águas rasas, nas plataformas continentais, onde as ações de ondas e correntes costeiras desenvolvem papéis predominantes. Entretanto, estes representam apenas uma pequena fração deste universo, onde predomina a decantação de sedimentos finos que são perturbados por correntes de fundo e, principalmente, por processos gravitacionais que respondem pelo transporte de um enorme volume de sedimentos da plataforma continental para o fundo da bacia.

Esses processos gravitacionais se desenvolvem dentro de um amplo espectro de fluxos com características que variam desde sua origem até o término de sua propagação cujos tipos extremos são os fluxos de detritos (Debris Flows) e as correntes de turbidez de baixa densidade (Middleton & Hampton 1976). A física desses processos foi intensamente estudada durante as décadas de 50 e 60 através de inúmeros trabalhos dentre os quais devemos destacar os de Ph.

H. Kuenen e de Gerard V. Middleton no qual foi estruturada boa parte da teoria utilizada até hoje. Somente em meados dos anos oitenta é que foram sendo retomados os estudos experimentais de correntes de densidade. Esta retomada das pesquisas tem contribuído sobremaneira para um novo entendimento acerca dos processos gravitacionais de sedimentação.

Durante a retomada da pesquisa foi criado, no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, um Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade para desenvolver metodologias e aparatos experimentais com o objetivo de realizar estudos sedimentológicos e da física dessas correntes. Este Núcleo resultou de um projeto de pesquisa desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), pelo Instituto de Geociências da UFRGS e pela PETROBRAS, iniciado em 1999, com financiamento FINEP/CTPETRO, que propunha o desenvolvimento de metodologias para ensaios em modelos físicos, bem como a seleção e a classificação de diversos materiais granulares capazes de reproduzir a carga de sedimentos das correntes de densidade não-conservativas em escala reduzida.

Nesse Núcleo já foram concluídas duas dissertações de mestrado que estudaram os processos e desenvolveram tecnologia para a pesquisa de correntes de densidade conservativas (Fabian, 2001) e não-conservativas (Manica, 2002). Nosso trabalho tem por objetivo dar continuidade a tais estudos. Para tanto, visa a um aprofundamento dos processos de sedimentação envolvidos por essas correntes para, desta forma, contribuir para um melhor entendimento sobre os processos de transporte e padrões de deposição sedimentares dessas correntes, que são as principais fontes de formação dos sistemas deposicionais turbidífticos.

### **3 OBJETIVOS**

A proposta desta pesquisa é avaliar o potencial que a simulação física de correntes de turbidez possui de prever e explicar feições deposicionais encontradas em depósitos sedimentares por ela desenvolvidos.

Essa idéia surgiu da necessidade de uma parametrização das geometria tridimensionais dos depósitos sedimentares de águas profundas, uma vez que os seus registros geológicos podem ser visualizados somente por meio de seções (2D) ou poços (1D). Também é possível pesquisar sistemas deposicionais recentes, porém, seria excessivamente oneroso e, dificilmente, os processos sedimentares que se desenvolvem durante a formação dos depósitos pode ser estudada diretamente. A visualização tridimensional dos sistemas deposicionais de

águas profundas tem evoluído bastante através de dados sísmicos 3D. Contudo, ainda faltam subsídios para a interpretação correcta desses dados.

Como o estudo de correntes de turbidez, também denominadas de correntes de densidade não-conservativas, ainda hoje não é bem entendido na sua teoria, temos também como proposta estudar os fenômenos físicos que ocorrem durante o transporte sedimentar por correntes de densidade.

A principal dificuldade encontrada pelos pesquisadores para estudar as correntes de turbidez em escala natural é que estes processos ocorrem, normalmente, em eventos catastróficos ou em condições de difícil acompanhamento. A simulação desse fenômeno em modelo reduzido nos permite realizar observações em um sistema que se comporta de forma semelhante ao natural, mas que apresenta menores dimensões e no qual é possível introduzir modificações ou variar as características que desejamos estudar.

Nesta pesquisa, precisamos de um protótipo, ou seja, um sistema natural cujo comportamento desejamos estudar. Neste caso, consiste de um cânion e parte da bacia abissal localizado na costa leste brasileira.

Esse trabalho faz parte da segunda fase de um projeto de pesquisa iniciado por Manica(2002), o qual se propõe a descrever o fluxo de corrente de densidade não-conservativa gerada em canal tridimensional de geometria simplificada. O autor projetou e construiu as instalações físicas e selecionou os materiais a serem utilizados para estabelecer as correntes de densidade. Realizou também três ensaios para analisar as condições de iniciação e alimentação dos experimentos.

Nossa pesquisa tem por finalidade estudar o transporte sedimentar e os depósitos de correntes de densidade não-conservativas em escala reduzida em um aparato que procura representar um cânion e a uma bacia.

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

- estudar das características geométricas e dinâmicas das correntes de densidade não-conservativas;
- avaliar o processo de iniciação na forma dos depósitos;

- pesquisar a influência da vazão de descarga na geometria dos depósitos;
- verificar a influência da concentração de sedimentos na deposição;
- investigar da influência do declive do substrato nos depósitos ;
- definir os padrões de deposição em condições confinadas e não-confinadas;
- mensurar as variações da granulometria dos depósitos tanto na vertical como na horizontal;
- estudar a influência da sobreposição de eventos na formação dos depósitos.

Para o cumprimento de tais objetivos, foram utilizadas as instalações físicas do Pavilhão Fluvial do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, onde foi projetado e construído um canal tridimensional de geometria simplificada.

## **4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1 GENERALIDADES**

O primeiro impulso no conhecimento da sedimentação marinha profunda foi dado no final da década de quarenta pelos trabalhos de dois geólogos, Kuenen e Migliorini. Estes geólogos desenvolveram estudos sedimentológicos isolados para explicar a origem dos sedimentos com estruturas gradacionais que tanto intrigavam os estudiosos da época. O primeiro realizou o seu trabalho descrevendo afloramentos no norte da Itália, enquanto o segundo fez experimentos físicos de correntes de turbidez de alta densidade. Ao associarem as suas observações durante o 18º Congresso Internacional de Geologia (Londres), eles escreveram o artigo “Turbidity Currents as a Cause of Graded Bedding” (Kuenen & Migliorini,1950), que foi um marco nesta área do conhecimento geológico. A partir de então, estes depósitos sedimentares passaram serem normalmente chamados de turbiditos.

É importante se salientar que estes autores apresentaram a primeira classificação de fluxo onde se conceituam correntes de turbidez de alta e baixa densidade e fluxos coesos (thick paste) baseada limites de concentração de sedimentos na mistura e na distribuição granulométrica das partículas em suspensão.

Iniciou-se assim uma intensa pesquisa dos mecanismos de formação não só dos turbiditos, mas de todas as rochas sedimentares em ambiente marinho profundo que redundaram em importantes descobertas de hidrocarbonetos. Foi principalmente após os anos 70 que estes depósitos passaram a ter uma grande importância econômica, o que despertou o interesse dos

pesquisadores e da indústria de petróleo. Segundo Bruhn (1998) os reservatórios turbidíticos acumulam 88.6% do total das reservas de petróleo no Brasil.

Além da sua importância para recursos energéticos, as correntes de turbidez podem causar desastres industriais, ambientais e humanos tais como: rompimento de tubulações e de cabos submarinos e alterações da topografia do fundo do mar sendo clássico o exemplo do rompimento de cabos telegráficos em Grand Banks (Heezen & Ewing, 1952).

Uma grande polêmica foi iniciada no final dos anos 90 sobre o real mecanismo de transporte de sedimentos da plataforma para águas profundas. Esta foi motivada principalmente pelas idéias sintetizadas no artigo de Shanmugam (2000) que se baseou em experimentos físico com fluxos de detritos arenosos (sands debris flows) e pelas observações de campo realizadas pelo autor. Suas idéias contrariavam o paradigma da exclusividade das correntes de turbidez para explicar a presença de sedimentos arenosos no fundo oceânico. A partir deste artigo foram surgindo novas possibilidades para explicar a sedimentação profunda.

Esta discussão já se delineava no artigo de Middleton(1993) onde o autor destacava dois problemas básicos nos estudos dos turbiditos: o primeiro é saber se estes foram realmente gerados por correntes de turbidez ou por um outro tipo de fluxo gravitacional; e, o segundo, é se as estruturas e as texturas geradas no depósito dizem muito sobre a natureza e a dinâmica do fluxo que transportou os sedimentos. Por coincidência ou não, este autor foi responsável por outro marco no entendimento dos processos de sedimentação marinha profunda com seus estudos em simulação física de correntes de turbidez realizados na década do sessenta.

Pelo breve histórico que apresentamos podemos ver a importância que os estudos de modelagem física têm oferecido ao conhecimento dos processos sedimentológicos de águas profundas.

#### 4.2 PROCESSOS SEDIMENTARES DE ÁGUA PROFUNDA

Como classificar os sedimentos de água profunda? Esta é uma das perguntas mais polêmicas que tem surgido no meio geológico dos últimos tempos. Como uma regra, as classificações têm se baseado no processo genético que lhes deu origem, sendo este o ponto básico das discussões. Isto se deve ao fato de que diversos processos podem gerar estruturas sedimentares semelhantes e é a partir destas que se tenta definir a sua origem. Outro ponto básico nesta discussão reside no fato de que a estrutura

sedimentar representa o processo final de deposição de um material que pode ter sido transportado por inúmeros tipos de escoamento.

Na Figura 1, são apresentados, de forma sintética, os principais processos sedimentares conhecidos que atuam em águas profundas. Destes processos, os que possuem maior importância econômica são as correntes de densidade confinadas e não-confinadas que, com o conhecimento atual, são as principais responsáveis pelo transporte de areias da plataforma a águas profundas formando importantes reservatórios para acumulação de hidrocarbonetos. Contudo, a sedimentação que predomina em águas profunda é a decantação de sedimentos finos ao longo de todo o talude e bacia. Desta forma, iniciaremos a nossa classificação por estes sedimentos.

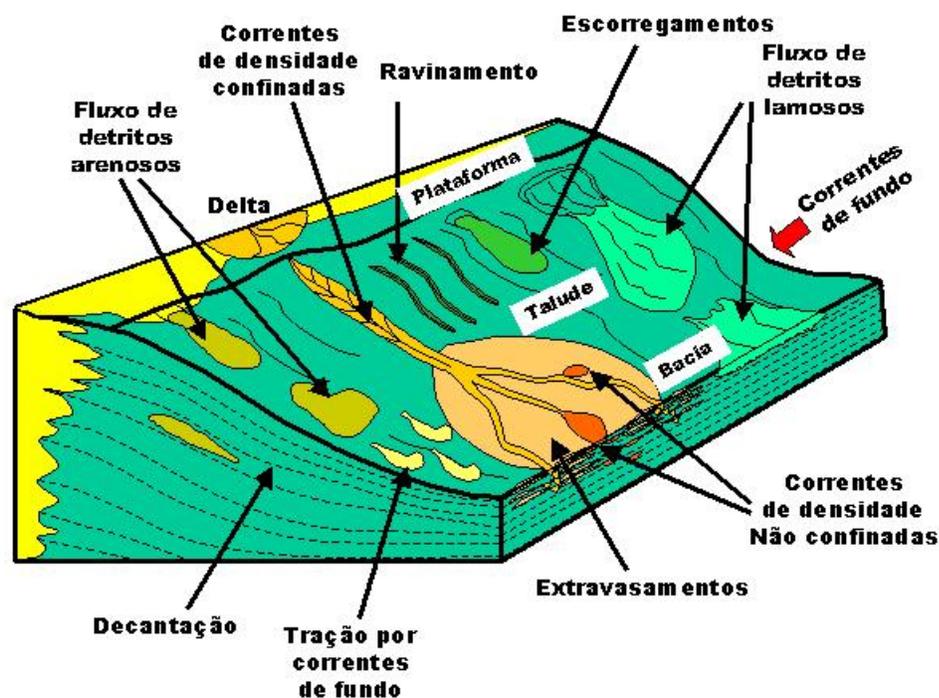


Figura 1- Principais processos que atuam em águas profundas.

#### **4.2.1 Decantação**

Os sedimentos resultantes deste processo são denominados por pelitos pelágicos ou hemipelágicos. São compostos predominantemente por terrígenos e material biogênico de granulometria argila e silte. Associados ao processo de decantação ocorrem também a floculação e a peletização das partículas devido as suas diminutas dimensões. Para maiores detalhes, indicamos a consulta uma excelente uma revisão do assunto que é apresentada por Stow, Reading & Collinson (1996).

#### **4.2.2 Escorregamentos**

Devido a instabilidades que ocorrem principalmente junto à quebra da plataforma ocorrem rupturas das camadas depositadas principalmente por decantação, que geram grandes fragmentos de sedimento que se deslocam talude abaixo, formando corpos que se depositam em massa (bloco). Quando não se dá o total rompimento de um fragmento forma-se o depósito de talus (creep deposits), quando há o rompimento, mas a estrutura interna se mantém, forma-se o que na literatura inglesa chama-se “slide” e, em português, podemos chamar de “lasca” ou de dimensões menores, olistolito. Finalmente, quando há uma deformação da estrutura interna, são gerados os depósitos de escorregamentos (slump).

#### **4.2.3 Fluxo de Detritos**

Se um escorregamento durante seu deslocamento começar a se fluidizar pela incorporação de água ou, pelo rearranjo interno de grãos, ele se transforma em um processo muito mais eficiente de transporte sedimentar que são os fluxos de detritos (debris flow). Este processo é responsável por uma intensa movimentação de material do talude e, secundariamente, da plataforma, para a bacia. De acordo com o material disponível na sua iniciação, os fluxos de detritos podem ser classificados em lamosos ou arenosos (Shanmugam,2000). Os depósitos de fluxo de detritos lamosos são comuns no registro geológico e são identificados em seções sísmicas por feições caóticas e em afloramentos pela não-seleção granulométrica e pela quase ausência de estruturação interna. Já os fluxos de detritos arenosos, conforme descritos por Shanmugam (2000) ofereceriam muito maior dificuldade para serem reconhecidos. Segundo o autor, estes sedimentos seriam originados pelo rompimento de espessos pacotes arenosos depositados junto à quebra da plataforma e/ou ao talude, que se deslocariam bacia a dentro. Além da estrutura maciça preponderante destes depósitos, podem ser desenvolvidas outras estruturas, assim como estarem presentes variados graus de seleção e de granulometrias.

#### **4.2.4 Correntes de densidade**

Basicamente, as correntes de densidade são definidas como fluxos mantidos pela diferença de densidade entre ele e o fluido que o envolve. Em nossa abordagem, utilizaremos o termo corrente de densidade para designar fluxos cuja diferença de densidade é dada por sedimentos que se encontram em suspensão. Estes fluxos são responsáveis pelo transporte de sedimentos de maior importância econômica depositados no fundo marinho: os turbiditos. Por ser um dos processos mais estudados, é também aquele cujo entendimento causa as maiores controvérsias. Como a discussão destas controvérsias é o objetivo deste trabalho, restringir-nos-emos aqui a abordar os aspectos morfológicos dos sistemas a eles associados.

Sendo uma das estruturas mais marcantes no contexto de águas profundas, os chamados sistemas turbidíticos, tiveram suas feições identificadas já nos primeiros trabalhos de reconhecimento do fundo marinho na década de 30 através dos trabalhos pioneiros de Shepard (Shepard, 1961). Estes sistemas são caracterizados por um cânion, situado no talude, de caráter predominantemente erosivo. Ao atingir o sopé do talude e a região proximal da bacia este cânion se transforma em uma rede de canais e intercanais que nas porções distais da bacia terminam através do desenvolvimento lobos arenosos. Bruhn (1998) apresentou um critério consistente para a classificação dos sedimentos formados nos sistemas turbidíticos classificando-os em: complexos de canais turbidíticos ricos em areia e seixos, sistema de lobos confinados ricos em areia e seixos, sistemas de lobos não confinados ricos em areia, sistema de lobos ricos em areia e lama e leques turbidíticos ricos em areia e seixos. Além desta classificação pode-se destacar as de Mutti & Ricci Lucchi (1972), Lowe (1982), Stow (1985) e Mutti (1999) todas procurando classificar as fácies sedimentares geneticamente.

#### **4.2.5 Extravasamentos**

Os depósitos de extravasamento ocorrem associados aos sistemas turbidíticos e se posicionam lateralmente às áreas confinadas destes sistemas. São caracterizados por heterólitos resultantes da sedimentação do material que está em suspensão na corrente de turbidez que ao perderem seu confinamento reduzem rapidamente a sua energia gerando seqüências delgadas e granodecrescentes.

#### **4.2.6 Ravinamentos**

A formação de ravinamentos não-enraizadas em sistemas fluviais recentes é um processo bastante comum na área do talude. Vianna & Faugères (1998) descrevem a presença de inúmeras destas feições no talude atual da Bacia de Campos na costa leste brasileira e atribuem a sua formação à ocorrência de correntes de densidade conservativas geradas por variações de temperatura e salinidade na quebra da plataforma, que se deslocam talude abaixo gerando remobilização de material lamoso através da erosão e deposição que desenvolve pelo seu deslocamento.

#### **4.2.7 Correntes de fundo**

No fundo do mar ocorrem correntes de densidade de grande escala ocasionadas por diferenças de temperatura e salinidade que se deslocam dos pólos para o equador e vice-versa e que podem provocar o deslocamento de partículas sedimentares (Stow, Reading & Collinson, 1996 e Vianna & Faugères, 1998). Estas correntes desenvolvem, normalmente, velocidades muito baixas, contudo a sua intensidade é significativamente aumentada pela presença de restrições a seu fluxo. Nestas condições, estas correntes podem deslocar granulometrias mais grossas e gerar dunas arenosas. Um exemplo deste fenômeno ocorre na área do Cabo de São Tomé na plataforma da Bacia de Campos (Vianna op. cit.). Em águas profundas as correntes de fundo geram grandes estruturas em ondas lamosas de grande comprimento de onda (> 10 km) e baixa amplitude (>150 m) (Wynn & Stow, 2002). Estas correntes podem também se desenvolver em áreas confinadas como cânions submarinos pelo efeito de maré. Nestas situações já foram relatadas velocidades bastante expressivas que podem deslocar sedimentos grossos.

### **4.3 MODELOS DE SISTEMAS TURBIDÍDICOS**

Os modelos deposicionais de sistemas turbidídicos foram de fundamental importância na história do conhecimento dos sistemas sedimentares marinhos profundos. A partir das primeiras pesquisas que identificaram a presença de sedimentos arenosos nestes ambientes foram propostos modelos para a sua formação.

O mecanismo mais provável para este transporte são as correntes de turbidez. Dada a dificuldade em observar este tipo de fenômeno na natureza foram propostos modelos que tentavam compatibilizar os resultados de ensaios em laboratório de correntes de densidade

com observações de corpos sedimentares observados em bacias sedimentares recentes e antigas.

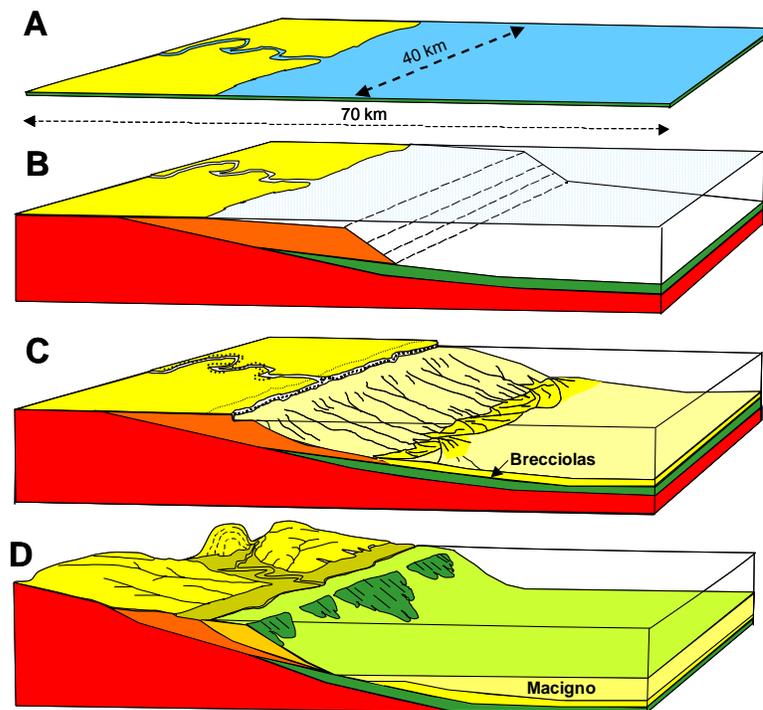
O breve histórico que apresentamos a seguir nos mostra que a evolução do conhecimento dos sistemas turbidífticos indica que a complexidade dos processos gravitacionais subaquosos não nos permite a definição de modelos gerais que descrevam a variedade dos sedimentos de águas profundas encontrados em bacias sedimentares atuais e antigas.

Podemos colocar como marco inicial destes modelos aquele apresentado por Kuenen & Migliorini (1950). Este trabalho resultou de pesquisas realizadas independentemente pelos autores, o primeiro realizando ensaios em laboratório e, o segundo, estudando afloramentos na Itália.

Eles explicam os corpos de arenitos e conglomerados com gradação normal (macigno e brecciola), encontrados nos Apeninos, como resultantes do transporte sedimentar por fluxos de densidade que, ao perderem energia na base do talude continental, formaram depósitos em leque. Estes fluxos, denominados por eles de correntes de turbidez de alta densidade, se formariam pela remobilização de sedimentos arenosos acumulados na plataforma continental. Os mecanismos considerados para iniciação desta remobilização foram :

- o colapso da borda da plataforma pelo acúmulo de sedimentos quando era atingido o ângulo máximo de repouso e,
- pela ação intensiva de ondas dada por um rebaixamento relativo do nível do mar resultante do soerguimento da plataforma continental.

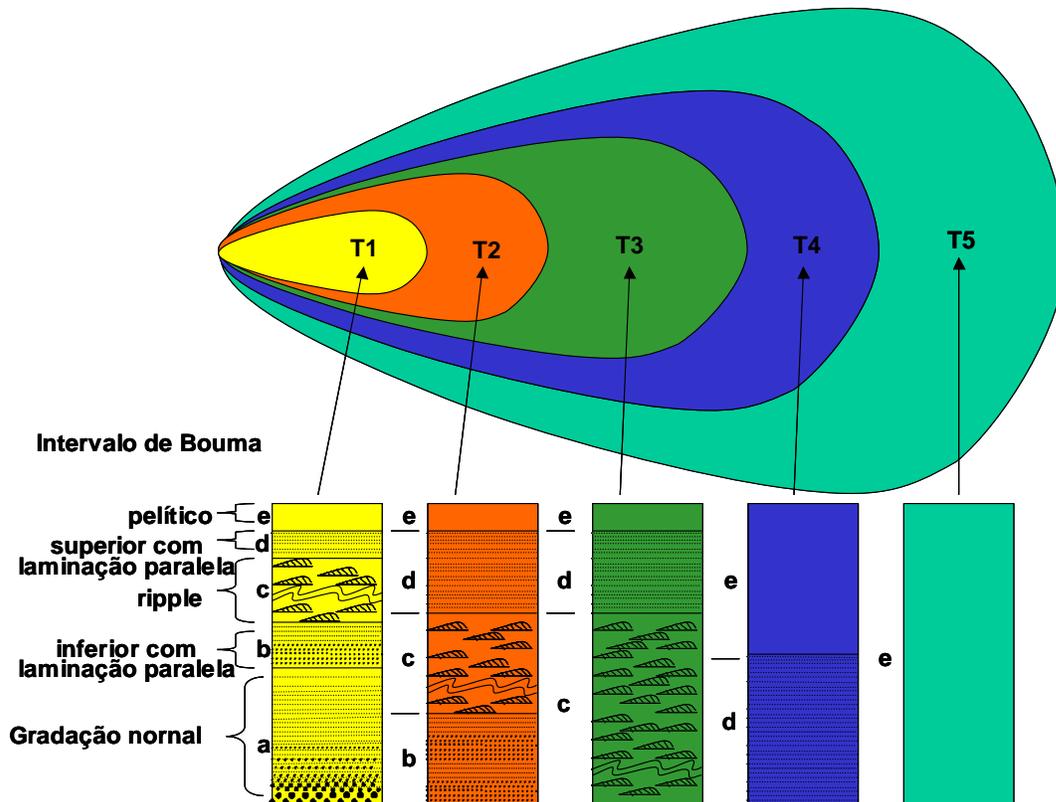
Esses processos formariam uma mistura de sedimento e água que se deslocaria talude abaixo até atingir o fundo da bacia onde era depositada a carga sedimentar grossa com gradação tanto na horizontal quanto na vertical e os sedimentos mais finos seriam mantidos em suspensão por grandes distancias até serem capturados em depressões do fundo do mar. Posteriormente, estes sedimentos eram recobertos por sedimentos finos, esperados nesta porção da bacia. Na Figura 2, apresentamos como este modelo foi proposto.



**Figura 2 Blocos diagramas ilustrando a sedimentação proposta por Kuenen & Migliorini (1950) para a formação de corpos turbidíticos de alta densidade dos arenitos Brecciolas e Macigno. A – indicações das dimensões iniciais do modelo. B – fase imediatamente precedente a sedimentação do Arenito Brecciolas onde a sedimentação siliciclástica é baixa. C – elevação do nível do mar em cerca de 30 m com erosão costeira por ondas e do talude por correntes de turbidez. e, deposição dos Arenitos Brecciolas. D – Soerguimento da porção continental e rejuvenescimento do relevo com erosão da plataforma continental e deposição dos Arenitos Macigno.**

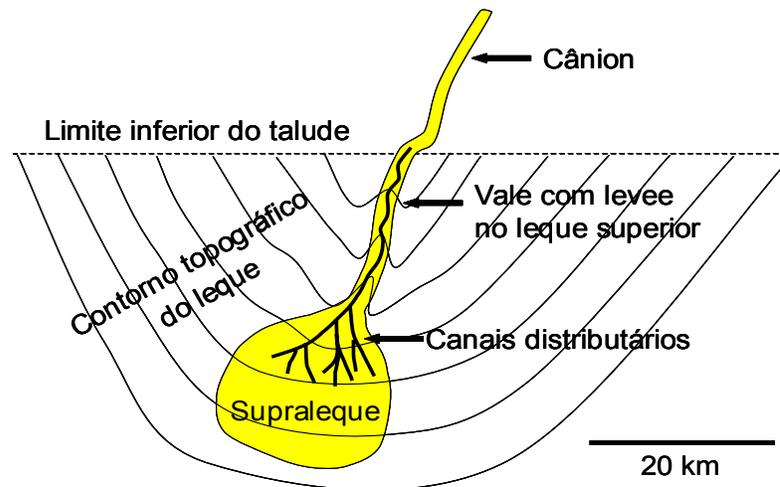
Outro marco da evolução deste conhecimento é o modelo apresentado por Bouma (1962). Nele, propõe uma organização vertical e lateral de fácies sedimentares (Figura 3) que resultaria de uma desaceleração gradativa da corrente de turbidez. O autor preconiza que, na base, se formaria uma camada arenosa mais grossa e maciça que representa a deposição por decantação de grão (Ta). Sobreposta a esta camada se formaria outra com areias mais finas que se depositariam com laminação plano paralela (Tb). Com a redução da energia do sistema se formariam “ripples” com a fração siltica e arenosa muito fina e, secundariamente, laminação convoluta (Tc). Na fase terminal do fluxo há a deposição de uma camada delgada de material lamítico. Esta camada apresenta na base laminação plano paralela (Td) que indica ainda alguma tração que no sentido do topo passa a apresentar característica decantação pelágica de sedimentos de fundo da bacia (Te).

Embora preconize a formação de toda esta seqüência, o autor salienta que sua ocorrência completa na natureza não é predominante, ocorrendo, sim, seguimentos onde predominam uma ou outra fácies. Embora na área onde esta seqüência foi descrita não tenha sido possível comprovar uma distribuição em leque dos sedimentos com predomínio de grossos nas porções proximais e finos nas distais e de suas respectivas estruturas sedimentares, o autor afirma que em trabalhos anteriores foi sugerida esta distribuição.



**Figura 3 Modelo hipotético de organização vertical e lateral de fácies para um lobo turbidítico segundo Bouma(1962).**

Normark (1970) baseado em observações de sistemas deposicionais recentes define um modelo geométrico para sistemas turbidíticos onde, no talude, ocorre um cânion predominantemente erosivo, que passa a bacia para um sistema de canal-“levee” ainda confinado que vai se dividindo em uma série de canais distributários em uma porção intermediária passando a um leque de geometria lobada (suprafan) (Figura 4).



**Figura 4 Modelo de sistema turbidítico proposto por Normark(1970).**

O modelo que, por sua simplicidade e praticidade, perdurou com pequenas modificações até o início dos anos 90 foi o proposto por Mutti & Ricci Lucchi (1972). Os autores basearam seu modelo na descrição de afloramentos em bacias de margem ativa e nas descrições de Normark (1970) de sistemas turbidíticos que ocorrem em bacias sedimentares atuais.

A estruturação interna do sistema preconizada por eles foi desenvolvida com a descrição detalhada de extensa coluna sedimentar de sedimentos marinhos que ocorrem nos Apeninos e nos Alpes Franceses. A geometria externa adotada foi a de leque turbidítico sugerida por Normark (1970).

Este modelo clássico de depósitos turbidíticos define uma seqüência de distribuição de fácies sedimentares arranjadas em um leque que se desenvolve a partir de um canal de alimentação no sopé do talude continental. Na porção proximal, denominada leque interno, se formariam depósitos canalizados, com corpos de granulação grossa e estrutura maciça, intensamente amalgamados. Em posição Intermediária ocorre o leque médio, onde os sedimentos de canal e de extravasamento são preservados. Estes últimos são de granulação fina com estrutura ripple e laminação plano paralela. Este fácies não ocorreria no leque proximal devido ao intenso processo de erosão caracterizado por estruturas de corte e preenchimento característicos daquela área. No leque externo predominam depósitos arenosos com geometria lobada com grande extensão lateral intercalados a depósitos pelíticos de fundo. Na vertical, espera-se que haja um aumento na espessura dos corpos da base para o topo. Prevê também a formação de depósitos de fluxo de detritos nas porções próximas ao talude (Figura 5).

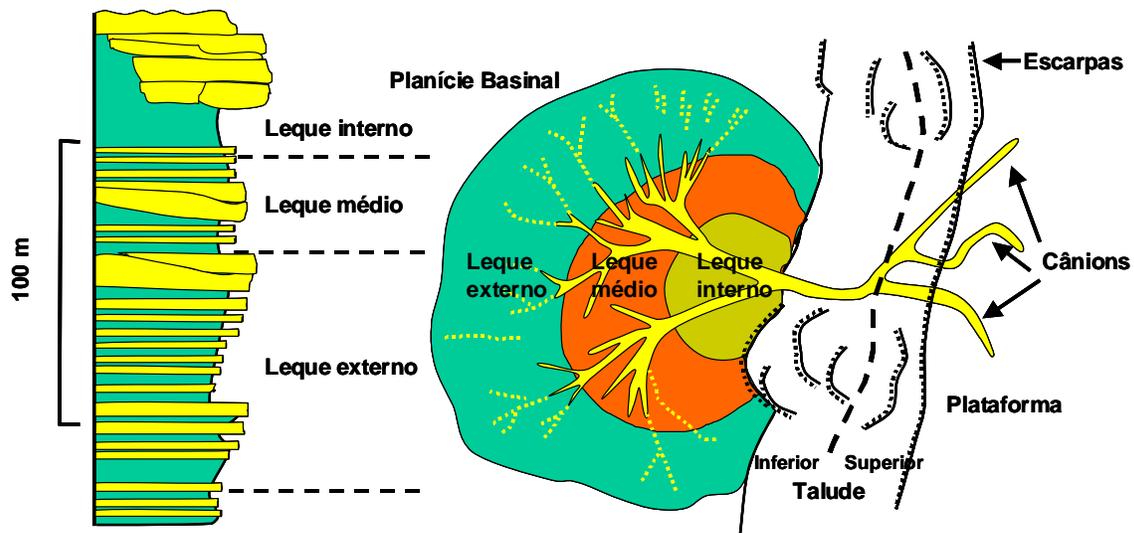


Figura 5 Modelo hipotético de organização vertical e lateral de fácies para um sistema turbidítico segundo Mutti & Ricci Lucchi (1972).

Walker (1978) baseado em seu amplo conhecimento de sistemas fluviais lançou um modelo de leques onde se evidencia a similaridade entre os sistemas fluviais e turbidíticos. Nele, o autor representa as porções canalizadas proximais como rios e os depósitos distais lobados com os deltas. Descreve associações de fácies para as diversas porções do leque de uma forma bastante similar à apresentada por Mutti & Ricci Lucchi (1972).

Mutti (1985) lançou o conceito de sistemas turbidíticos que é baseado em condicionantes como tectônica, variações relativas do nível do mar, tamanho e configuração de bacias sedimentares, volume e tipo de sedimento disponível para ressedimentação e frequência e volume dos fluxos gravitacionais. Os sistemas turbidíticos são unidades genéticas cujos registros estão ligados a eventos erosionais e deposicionais estratigraficamente correlatos. Os principais elementos que os compõem são as feições erosionais, os canais, os depósitos de extravasamento e os lobos. Pelo predomínio de um ou outro elemento, o autor define três principais tipos de sistemas (Figura 6):

- Tipo I – são sistemas onde predominam depósitos de lobos arenosos com um a dezenas de metros de espessura intercalados a pacotes espessos de heterólitos que apresentam uma marcada geometria tabular. Estes depósitos são correlacionáveis a feições erosionais de larga escala na borda da plataforma adjacente.

- Tipo II – são compostos, na porção proximal, por corpos de arenitos e conglomerados canalizados, profundamente amalgamados, que passam a depósitos de lobos na direção da bacia. Estão também relacionados a processos erosivos de grande escala na borda da bacia.
- Tipo III – apresentam uma predominância de turbiditos lamosos e delgados que pode estar associada a esparsos corpos arenosos de preenchimento de canal (canal-levee). As feições erosionais associadas a estes sistemas são de difícil identificação.

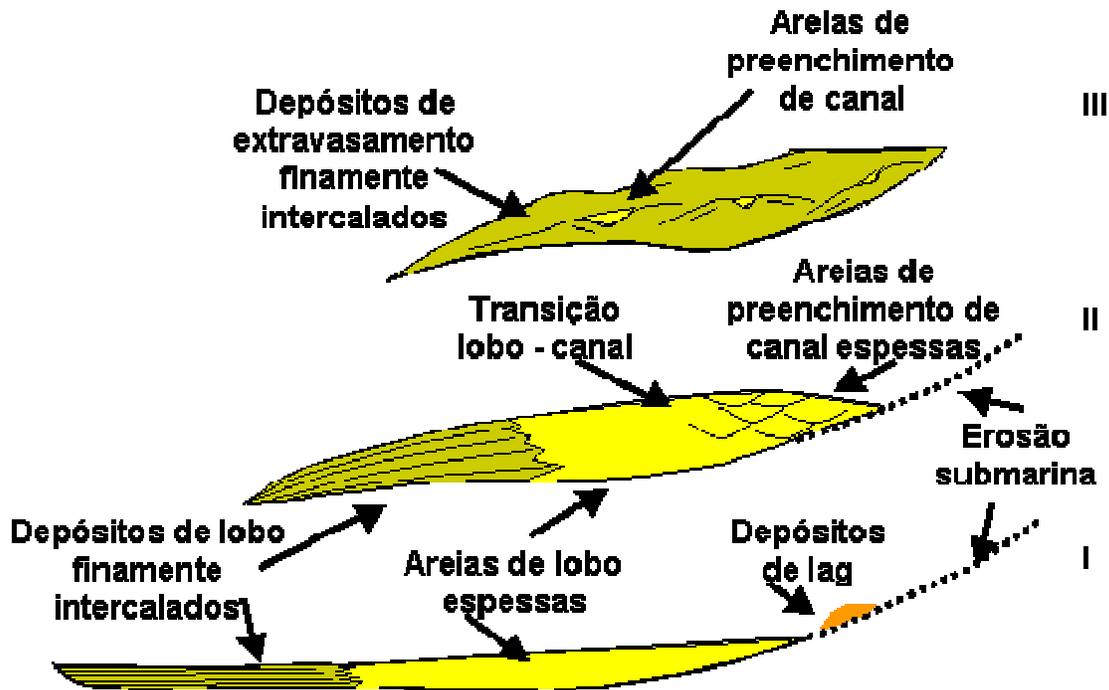


Figura 6 Principais tipos de sistemas turbidíticos segundo Mutti (1985)

Com o advento da estratigrafia de seqüências foi preconizado um modelo para os depósitos de água profunda onde os sistemas turbidíticos não são controlados por ciclos internos às bacias e sim por variações eustáticas do nível do mar (Posamentier et al. 1988; Van Wagoner et al. 1988). Este modelo prevê que as frações grossas dos depósitos de água profunda seriam depositadas sobre limites de seqüências em períodos de nível relativo do mar baixo formando os leques de talude e de assoalho de bacia.

Mutti et al. (1999) apresentou um modelo de sistema turbidítico onde a distribuição de fácies é baseada no princípio de que as correntes de turbidez se desenvolvem através de um fluxo bipartido. Na base do fluxo forma-se, por segregação gravitacional da carga sedimentar, uma

camada com fluxo granular de alta densidade e com excesso de pressão. Sobreposta a esta camada, desenvolve-se uma zona de baixa densidade totalmente turbulenta e composta pelos sedimentos mais finos.

Os processos que controlam o transporte e a deposição guardam uma relação direta com a capacidade do fluxo basal granular de manter seu excesso de pressão, dificultando o escape de fluido do seu interior e da intensidade da energia turbulenta desenvolvida na camada superior. O primeiro fator controla a distância e a extensão lateral que conseguem atingir os sedimentos grossos. Já o segundo, define o volume de sedimentos finos que são ressuspensos pela camada basal e o quanto de força trativa o fluxo turbulento pode exercer nas partículas grossas da base.

Esses dois fatores combinados determinam o grau de eficiência de uma corrente de turbidez, isto é, a sua capacidade de carregar e segregar granulometricamente os sedimentos na direção do centro da bacia. Assim sendo, a eficiência do fluxo é também de fundamental importância no controle da geometria e a qualidade dos corpos turbidíticos. Fluxos de alta eficiência gerarão uma grande diversidade de fácies com alto grau de seleção granulométrica. Os de pobre eficiência segregarão apenas parcialmente as diferentes populações granulométricas do sedimento em suspensão originando um menor número de fácies texturalmente menos desenvolvidas. A Figura 7 apresenta os padrões deposicionais preconizados por este modelo.

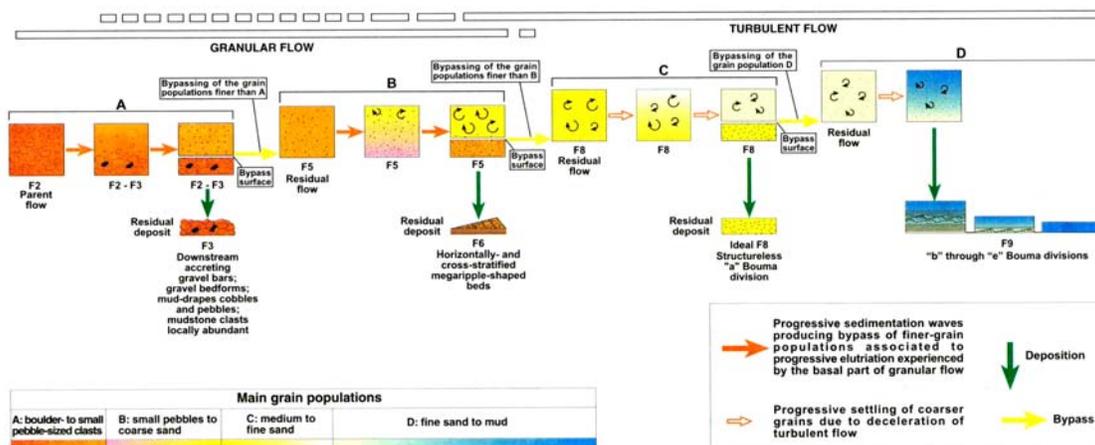


Figura 7 Esquema mostrando a fácies turbidíticas preconizadas por Mutti et al. (1999) e processos de transporte e sedimentação a elas relacionados.

#### 4.4 PROCESSOS DE INICIAÇÃO DE UMA CORRENTE DE TURBIDEZ

O conhecimento do processo de iniciação das correntes é um problema que permanece controverso desde os primeiros trabalhos que tratam do assunto. No clássico artigo de Kuenen & Migliorini (1950), os autores atribuem o colapso da borda da plataforma como o processo de iniciação das correntes de turbidez que geraram os depósitos por eles estudados.

Menard & Ludwick (1951) propõem quatro hipóteses para a origem das correntes de turbidez:

1. rápida entrada de sedimentos no oceano por rios, tempestades, erupções vulcânica, fluxos de lama e escorregamentos de encostas;
2. agitação dos sedimentos do fundo oceânico por ondas, correntes de maré, tsunamis e correntes oceânicas;
3. movimentos de massas formados por colapsos, principalmente na borda da plataforma, originando escorregamentos e fluxos de detritos;
4. alimentação direta por fluxos densos de rios.

Os autores destacaram as condições em que cada mecanismo poderia agir baseando-se, principalmente, no critério da densidade da corrente mínima para elas se desenvolverem. Mostram-se pouco favoráveis à hipótese dos movimentos de massa apregoados por Kuenen & Migliorini (1950).

Ao longo dos anos foram surgindo argumentos favorecendo uma ou outra daquelas causas como predominante no processo de transferência de sedimentos até águas profundas, persistindo esta situação até hoje.

Por muito tempo, a idéia dominante nos meios geológicos para origem dos corpos turbidíticos baseava-se na hipótese de uma ignição ligada a escorregamentos do talude motivados por abalos sísmicos. Esta idéia baseava-se nas observações de quebra de cabos submarinos muito bem documentada no Leque Laurentiano (Nova Inglaterra EUA) pelo evento denominado Sismo de Grand Banks ocorrido em 1929 (Heezen & Ewing, 1955 e Piper et al, 1988) que teve uma velocidade inicial de  $23 \text{ ms}^{-1}$  tendo os sedimentos por ele transportados atingido uma distância de 800km. Mais recentemente, outro evento deste tipo, ocorrido pelo colapso de parte da pista

do Aeroporto Internacional de Nice (França) em 1979, na região do Var, permitiu que os pesquisadores estimassem o volume de sedimentos da ordem  $15 \cdot 10^8 \text{ m}^3$  (Savoye et alli, 1998).

Nos últimos anos, contudo, aumentaram os pesquisadores que atribuem outras causas para explicarem os grandes pacotes arenosos encontrados em depósitos de águas profundas. Boa parte deles (Mutti et alli, 1999, Kneller e Buckee, 2000, Alexander & Mulder, 2002) tem atribuído a origem destes depósitos a fluxos hiperpicnais gerados por cheias de rios implicando uma íntima relação entre os deltas de rios e os turbiditos. Contudo, até o momento não foi constatado o desenvolvimento de correntes hiperpicnais em sistemas recentes capazes de transferirem diretamente sedimentos para regiões marinhas profundas. Este fenômeno tem sido registrado principalmente em lagos e represas onde são relatadas correntes com duração de alguns dias, velocidades inferiores a  $1 \text{ ms}^{-1}$  e densidades relativamente baixas (Middleton, 1993). Nestes sistemas, o conteúdo arenoso fica depositado principalmente no delta formado na cabeceira do lago.

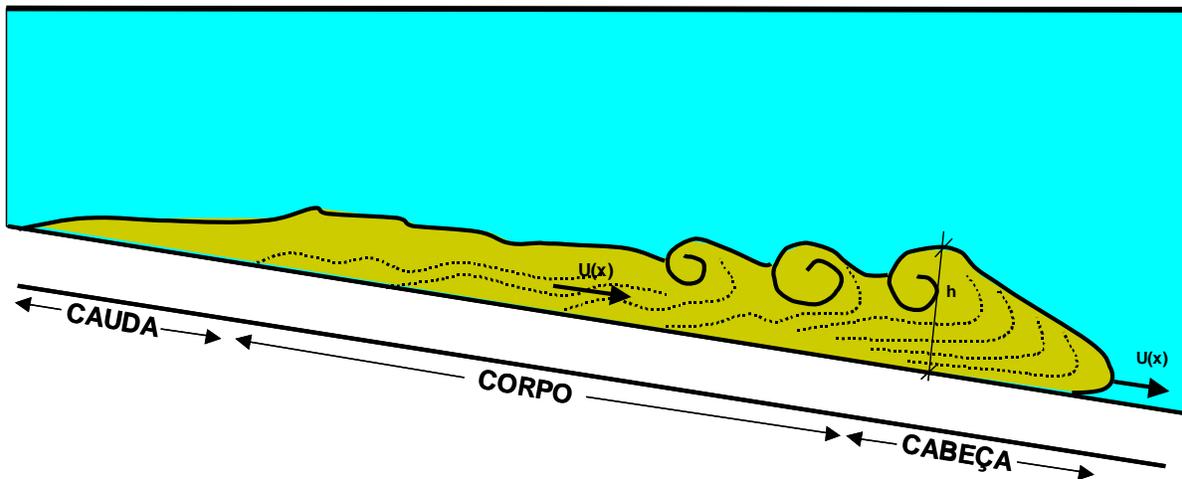
Zeng et al. (1997) estudaram a formação de correntes de turbidez associada a fjords. Nestes sistemas uma grande quantidade de sedimento é transportada por geleiras e depositada junto a cabeceiras de cânions submarinos gerando correntes em pulsos com durações mais ou menos longas e velocidades que variam entre  $0,1$  e  $3 \text{ ms}^{-1}$ .

A importância das correntes de turbidez associadas a vulcanismos também não pode ser desprezada sendo constatada a sua importância no sistema na planície abissal da Ilha da Madeira (Wynn et al., 2000).

Outro mecanismo que não pode ser esquecido para iniciação de correntes de densidade não-conservativas são os fluxos ignitivos ou auto-suspensivos. Este tipo de fluxo ocorre quando um fluxo de pequeno porte desencadeia grandes fluxos gravitacionais de sedimentos, devido ao carreamento de sedimentos previamente depositados em cânions e/ou bacias, para o seu interior, ou seja, auto-alimentando-se.

#### 4.5 ANATOMIA DA CORRENTE DE DENSIDADE

Quando se observa uma corrente de densidade é possível se distinguir o desenvolvimento de três elementos com geometria peculiar que a literatura descreve: cabeça, corpo e cauda (Figura 8). Estes elementos podem se desenvolver mais ou menos de acordo com as condições em que a corrente se desenvolve.



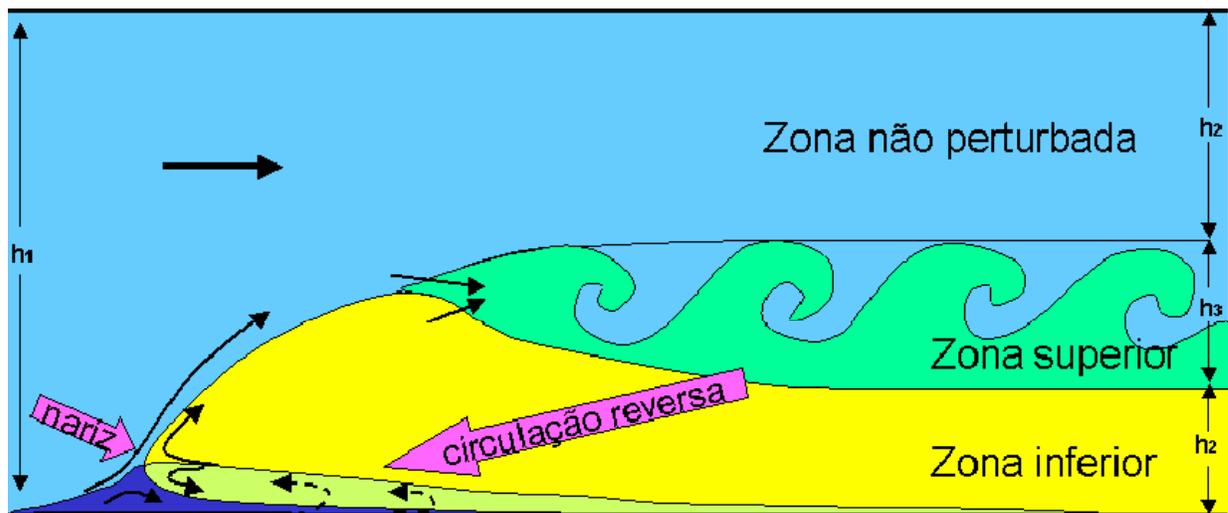
**Figura 8 Modelo da uma corrente de densidade indicando de forma esquemática as linhas de fluxo e suas principais estruturas.**

A cabeça da corrente de densidade é a zona onde se desenvolvem as principais instabilidades que condicionam comportamento geral da corrente. É também um local onde ocorre uma intensa mistura do fluxo da corrente com o fluido ambiente e que possui um papel importante na dinâmica do escoamento. Apesar desta intensa mistura, a cabeça apresenta uma nítida separação com o fluido ambiente (Simpson, 1997). Apesar de ser reconhecível como sendo uma área com maior altura que o restante da corrente, a cabeça não possui uma forma única.

Simpson (1997) descreve diversos fatores que influenciam na sua altura e extensão, destacando a inclinação do fundo e a viscosidade da corrente como os mais importantes. As observações realizadas por Middleton (1966a) trouxeram muitas informações sobre a dinâmica do fluxo na cabeça. O autor observou que, à medida que a cabeça vai avançando, sofre resistência do fluido ambiente e desenvolvem linhas de fluxo que divergem para cima dentro da cabeça. Tais linhas, por sua vez, deslocam e aceleram o fluido ambiente no seu entorno. Isto ocorre porque a resistência à frente da corrente é maior do que a resistência junto ao fundo e junto à interface superior.

Desta forma, a cabeça da corrente deve apresentar uma maior espessura que o corpo para compensar essa força, uma vez que ele possui somente a resistência de fundo e da interface superior agindo contra o escoamento. Tal fato implica que o balanço de massa e de quantidade de movimento da cabeça difere significativamente daquele do corpo e da cauda (Middleton, 1993).

Simpson (1997) descreve a cabeça de corrente em três regiões: a zona densa inferior onde não há mistura do fluido, a zona superior onde ocorre de mistura com o fluido menos denso através do colapso de vórtices e a zona não-perturbada de fluido ambiente menos denso (Figura 9). O ponto mais frontal da corrente, também denominado por nariz, está situado um pouco acima da superfície inferior, como resultado da condição de não-deslizamento do fundo, da resistência na interface superior e da entrada de fluido ambiente abaixo da cabeça. Esta situação provoca uma pequena circulação reversa junto ao fundo.



**Figura 9 Fluxos que ocorrem na cabeça de uma corrente de densidade se deslocando sobre uma superfície plana segundo Simpson (1997).**

A influência da declividade do fundo na velocidade e na forma da cabeça foi investigada por Middleton (1966a). Ele constatou que, para ângulos menores que  $2,3^\circ$ , a velocidade da cabeça independe da declividade. Outros experimentos realizados por Britter e Linden (1980) indicam que a velocidade da cabeça é pouco dependente da declividade ( $5-90^\circ$ ), a despeito do incremento da força gravitacional, devido ao incremento da resistência na interface do fluxo e ao aumento da entrada do fluido ambiente na corrente. Assim sendo, a velocidade da cabeça não aumenta proporcionalmente à declividade do fundo, pois o efeito que leva à progressão da cabeça é a diferença de densidade e, se houver um aumento significativo na declividade, esta induzirá ao aumento da velocidade com conseqüente aumento da resistência ao escoamento. Como a cabeça da corrente é deformável, o aumento da declividade facilita o aumento da altura da cabeça, neutralizando em parte o efeito de declividade.

A resistência ao escoamento da corrente pode ser descrita por uma equação do tipo:

$$F_D = (1/2)C_D A \rho V^2$$

Onde  $F_D$  = Força de resistência de forma (“drag force”),

$C_D$  = coeficiente de arraste, adimensional função da forma da cabeça da corrente,

$\rho$  = massa específica do fluido ambiente,

$A$  = área da seção transversal à direção da corrente, e

$V$  = velocidade da corrente em relação ao meio ambiente.

A velocidade no corpo da corrente depende da inclinação do fundo e, devido ao fenômeno acima descrito, pode apresentar velocidade 30 a 50% superior que a velocidade da cabeça.

Britter e Simpson (1978), estudando a zona de mistura que ocorre na porção superior das correntes de densidade logo atrás da cabeça, mostram que o desprendimento de vórtices nesta região é similar às ondulações Kelvin-Helmoltz que ocorrem pelas instabilidades formadas na interface entre dois fluidos de densidades diferentes com movimento relativo entre eles. Neste fenômeno, a amplitude e o comprimento de onda observados crescem até aproximadamente o tamanho da cabeça e colapsam com o fluido denso arrastado para a zona de mistura. Fabian (2002) constatou a influência do desprendimento de vórtices na variação de velocidade cabeça da corrente.

Simpson (1972) discute um segundo tipo de instabilidades que ocorrem na cabeça através de um complexo padrão de lobos e rachas. Essas instabilidades são desenvolvidas pelos movimentos convectivos produzidos pelo fluido menos denso que entra sob a corrente em uma pequena camada (Figura 9). Essa entrada de líquido causa instabilidades gravitacionais de segunda ordem na corrente sendo assim carregado para cima e misturado pelos movimentos que ocorrem dentro da cabeça. O autor, visualizando-as, constatou que elas permanecem por uma distância significativa atrás da cabeça.

Simpson e Britter (1979) demonstraram que a entrada do fluido ambiente pela porção inferior da corrente é responsável por apenas 1% do volume total incorporado pela corrente durante o seu deslocamento sendo a grande maioria da incorporação de fluido no sistema desenvolvida na interface superior da corrente.

O corpo da corrente é caracterizado como uma região de velocidade estável que possui uma camada fina e densa de fluido próximo à base da corrente e outra acima desta, onde ocorre o processo de mistura com o fluido ambiente. Como já descrito acima, o corpo possui uma

velocidade maior do que a da cabeça da corrente de densidade podendo chegar a 30% ou 40%. Isto ocorre pela divergência do fluxo que se desenvolve na cabeça da corrente aumentando a sua dimensão e pela maior diluição nesta região. Para compensar este fenômeno e manter a taxa constante de avanço a corrente tem que apresentar uma maior velocidade do corpo.

Paradoxalmente a este fato, inúmeros autores sugerem que a cabeça da corrente é o principal local de erosão de material e o corpo da corrente é o principal local de deposição. Isto se deve ao fato de que na cabeça se desenvolvem instabilidades do fluxo muito maiores que no corpo, que apresenta uma condição de quase estabilidade. É importante salientar, contudo, que esta não é uma regra geral. Devido à velocidade do corpo ser superior à da cabeça, esta última recebe um impulso do corpo. Para dissipar esta energia, a cabeça tende a aumentar sua geometria ou utiliza esse excesso de energia para carrear material para o seu interior. Assim, esta zona se caracteriza por ser predominantemente de erosão. Já no corpo principal do fluxo, o sedimento é carregado em suspensão mantendo a espessura de fluxo quase uniforme. A cauda do fluxo afina-se repetidamente e torna-se mais diluída, depositando os sedimentos finos assim que o fluxo vai desaparecendo.

#### 4.6 CARACTERÍSTICAS DAS CORRENTES DE DENSIDADE NÃO CONSERVATIVAS

A principal característica que difere as correntes de densidade conservativas das não-conservativas é o fato de que, nestas últimas, a causa do seu aumento de densidade é a presença de partículas que se mantêm em suspensão pela turbulência do fluido que as envolvem, o que não ocorre com as outras. Nas correntes conservativas, a variação de densidade da corrente se faz somente pela entrada do fluido ambiente, enquanto nas não-conservativas esta variação ocorre também pela entrada e saída de partículas em seu meio. Assim, a dinâmica de uma corrente de densidade não-conservativa envolve um maior número de variáveis, tornando o estudo deste fenômeno muito mais complexo. A estrutura da turbulência interna da corrente implica alterações na forma como o sedimento é suspenso e transportado, alterando, assim, o comportamento destas correntes e o seu padrão de deposição.

As correntes de densidade não-conservativas no meio marinho, objeto de nosso estudo, devem ser consideradas como fluxos não-estacionários. Hipóteses estacionárias não dão bons resultados às causadas por grandes mudanças no seu comportamento ao longo do seu desenvolvimento.

O modelo mais aceito para sua origem atribui o início do movimento a deslizamentos no talude continental, iniciando assim seu movimento. Outro modelo de ignição confere a cheias catastróficas a origem do movimento, porém tanto um como outro são claramente não-estacionários.

Após a ignição, as correntes iniciam a sua movimentação com caráter erosional confinadas a cânions acelerando-se progressivamente. Posteriormente podem, eventualmente, passar por uma fase relativamente estável que, grosso modo, pode-se associar uma hipótese quase estacionária onde há pouca erosão e deposição, mas com grande entrada de fluido ambiente.

Quando chegam à base do talude, as correntes permanecem confinadas a um canal inicialmente fixo, que passa a migrar lateralmente formando meandros e depósitos de extravasamento. Com a desaceleração progressiva da corrente, o processo de deposição se torna mais intenso e há, finalmente, a formação os lobos turbidíticos nas zonas não-confinadas.

Embora estes processos ocorram com frequência na natureza, Kneller e Buckee (2000) nos alertam que a predição da erosão causada pelas correntes de densidade não-conservativas e a distribuição dos seus depósitos, tais como: sua extensão, espessura e distribuição granulométrica, requerem o entendimento dos mecanismos de transporte/deposição de sedimentos.

As condições em que as correntes de densidade ocorrem são muito diversas, pois são relatadas na literatura situações onde as correntes tiveram durações muito efêmeras assim como casos em que elas necessariamente tiveram uma duração muito longa ou mesmo condições de fluxo estacionário (Tinterri et al, 2003 e Mulder et al. 2001).

As dimensões variam numa grande faixa, podendo ocorrer desde fluxos delgados e diluídos até aqueles que se desenvolvem com mais de uma centena de metros de espessura transportando dezenas de quilômetros cúbicos de sedimentos (Zeng et al, 1997, Savoye et al. 1998, Piper et al. 1999). Relatam-se casos nos quais a concentração de sedimentos pode ser estimada em de algumas partes por mil ou chegar a 40% em peso.

As estruturas sedimentares observadas nos sedimentos indicam condições de fluxos que podem variar de subcrítica a supercrítica (Middleton, 1993). Também são descritas feições de erosão e deposição associadas a um único evento.

A teoria das correntes de densidade não-conservativas tem como um de seus fundamentos a existência de condições de auto-suspensão. Este princípio formulado por Bagnold (1962), pressupõe que a energia gravitacional que a corrente contém é suficiente para manter a turbulência e para sustentar as partículas em suspensão. Isto se processa porque o material em suspensão gera uma diferença de densidade entre o fluido ambiente e a corrente. Este material, ao se movimentar desloca o fluido intersticial acelerando-o. Esta aceleração, por sua vez, desloca outros grãos que já estão se movimentando pela ação da gravidade mantendo a turbulência, a qual mantém a carga em suspensão na corrente e a suspensão mantém a turbulência completando o ciclo.

Fisicamente, Bagnold propõe que os movimentos verticais do fluido, mesmo tendo a velocidade média nula, possuem uma distribuição interna cujas variações instantâneas não serão simétricas provocando um “excesso de potência” na direção vertical no sentido de cima para baixo. Porém, em seu trabalho não explica o motivo deste excesso de potência.

Na época em que este trabalho foi escrito a turbulência era vista como um fenômeno de características estocásticas sem nenhum ordenamento. À luz dos trabalhos de Kline et alii (1967) e os que se seguiram apud Leader (1999) verificou-se que junto à camada limite há um “ordenamento” do escoamento dividindo-o em zonas de alta e baixa velocidade. Devido a efeitos de segunda e terceira ordem sobre o escoamento junto à parede este cria zonas de turbulência concentrada que, através de ejeções, lançam material de fundo ao meio ambiente. Esta diferença entre o comportamento da velocidade vertical nos dois sentidos explica a manutenção dos sedimentos em suspensão (Leader, 1999).

Outros processos influenciam a dinâmica das correntes pelo aumento ou diminuição da densidade da corrente causado pelos fenômenos de erosão e deposição. Pela erosão, o material de fundo é removido e carregado para dentro da corrente. Esta transferência de material causa o aumento da densidade da corrente, o que eleva sua energia interna fazendo crescer a capacidade de transporte e provocando um maior deslocamento. Situação inversa ocorre pela deposição de material da corrente. Neste caso, pela redução da massa específica da corrente há uma desaceleração do fluxo que passa a tender a depositar cada vez mais até a sua parada. Embora pareçam simples, estes processos de troca ainda não são totalmente explicados pela ciência. Middleton (1993) apresenta um exemplo com o seguinte questionamento: "Quando uma quantidade de sedimento suspenso começa a se mover rampa abaixo algumas partículas

irão se depositar no fundo. A questão crítica é então saber se este sedimento ficará no fundo ou será erodido, voltando à suspensão".

Desde as primeiras referências sobre correntes de densidade não-conservativas acreditou-se serem possíveis transformações em suas características durante o seu desenvolvimento. Kuenen (1950) faz alusão à possibilidade de um fragmento gerado por escorregamento no talude através de mudanças sucessivas se transformar em um fluxo de detritos e posteriormente a turbiditos (corrente de densidade não-conservativa). Posteriormente Dott (1963), Hampton (1972), Middleton & Hampton (1973) desenvolveram hipóteses similares.

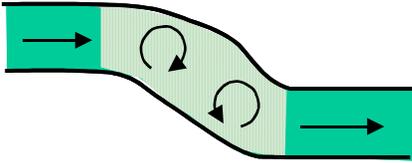
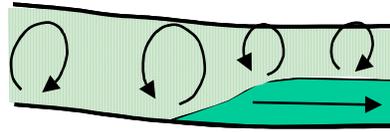
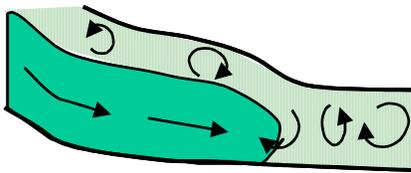
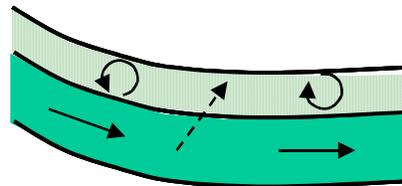
Fischer (1983) propôs quatro processos de transformações possíveis para correntes de densidade: transformações no corpo, transformações gravitacionais, transformação em uma superfície e transformação por elutriação (Figura 10).

As transformações no corpo se desenvolvem quando o fluxo é acelerado por uma variação na declividade do substrato ou por uma restrição lateral, mudando o regime de laminar para turbulento dentro do corpo sem adição ou perda de fluido (Figura 10A).

Quando as partículas carregadas pelo fluxo são gravitacionalmente segregadas, o regime turbulento, que inicialmente se desenvolve em todo o fluxo, passa a cessar na região basal. Desenvolve-se, então, uma camada altamente concentrada, onde o movimento é essencialmente viscoso sendo que, ao mesmo tempo, o fluxo se mantém inercial na região diluída que ocorre logo acima (Figura 1B).

Outro processo de transformação do fluxo ocorre na superfície da corrente, tanto no limite superior da corrente como pela superfície frontal inferior da mesma onde se forma o nariz, onde se desenvolve uma intensa mistura com o líquido ambiente provocada pelo arraste na interface do escoamento (Figura 10.C).

Pelo processo de elutriação ocorre a transferência de massa da camada basal para a superior modificando o fluxo. Neste processo, há o movimento ascendente das partículas da região mais densa, junto ao fundo, para fase mais diluída e turbulenta que ocorre pela aceleração vertical do fluido intersticial dada pela entrada deste pela base ou quando há salto hidráulico pela quebra na inclinação do fundo.

**A) Transformações no Corpo****B) Transformações Gravitacionais****C) Transformações na Superfície****D) Transformações por Elutriação**

**Figura 10** Processos possíveis de transformações de fluxo em correntes de densidade não conservativas segundo Fischer (1983).

Baseado nas definições da hidráulica de regime permanente e não-permanente bem como uniforme e variável em meios deformáveis, Kneller (1995) apresentou um modelo físico descrevendo o fluxo em correntes de densidade que prevê suas condições de erosão e deposição.

Este modelo indicou a possibilidade de geração de depósitos turbidíticos com vários tipos de estruturas sedimentares. Considerando as três variações que um fluxo pode sofrer através do tempo: permanecer constante, acelerar ou desacelerar, o autor classificou as correntes em estacionárias, erosivas (waxing) ou deposicionais (waning) respectivamente (Figura 11A). Por outro lado, uma corrente ao se deslocar pode se manter com velocidade uniforme ou variá-la. Se a velocidade aumenta com o deslocamento, a corrente foi classificada como acumulativa e se diminui, foi chamada de depletiva (Figura 11B).

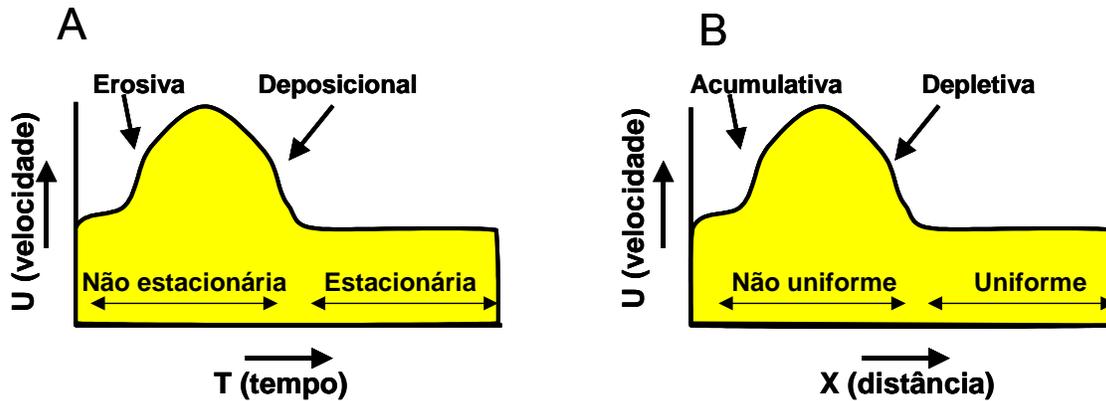


Figura 11 Variações possíveis no fluxo de correntes de densidade em função do tempo (A) e do deslocamento (B) (Kneller, 1995).

Na Figura 12, Kneller (1995) ilustra possíveis causas para ocorrerem acelerações e desacelerações nas correntes, em resposta a variações na fisiografia de fundo. Estas variações explicariam as flutuações na velocidade da corrente durante o seu deslocamento. Por exemplo, em gargantas situadas no interior do canal condutor, as correntes apresentariam acelerações. Zonas em que ocorrem desconfinamentos da corrente, causariam desaceleração. Por outro lado, o aumento e a diminuição da inclinação do fundo causariam efeitos similares.

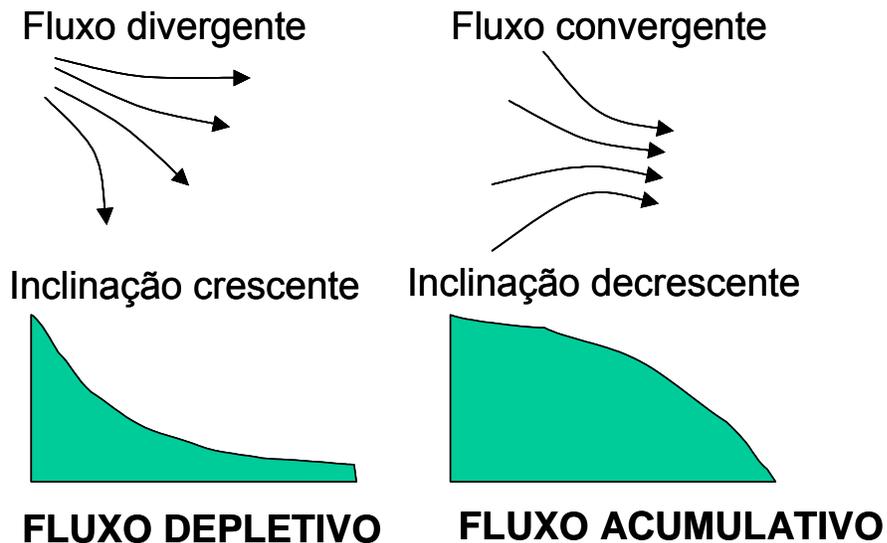


Figura 12 Situações que produzem fluxo não uniforme (Kneller, 1995)

Pelo acima exposto, as variações da velocidade de fluxo de uma corrente de densidade podem ser definidas pela equação abaixo:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x}$$

onde o primeiro termo representa a variação total da velocidade, a primeira derivada do segundo termo representa a variação em função do tempo e, a segunda, a variação com o deslocamento. Para entender o que causariam estas variações nas características dos depósitos, apresentou-se o gráfico da Figura 13. Nele pode-se analisar como a interação entre os processos pode gerar depósitos com gradações inversas, normais ou maciças.

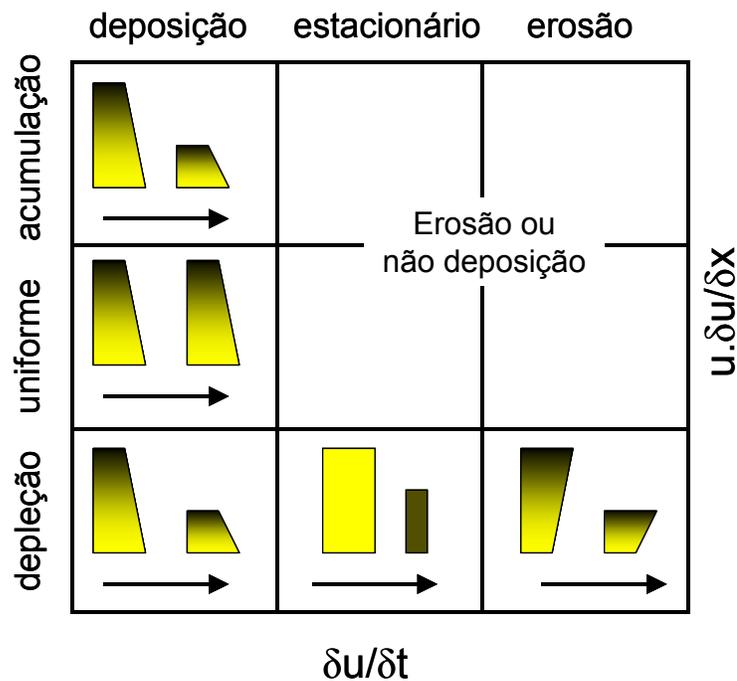
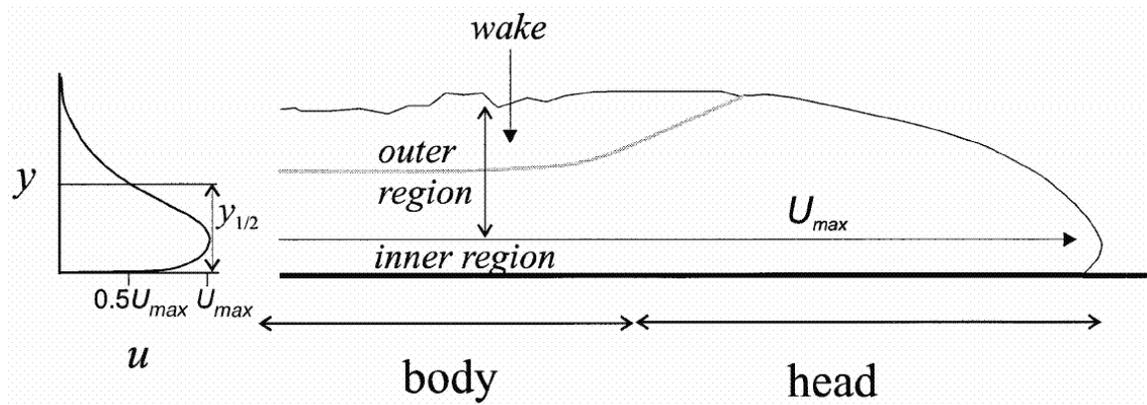


Figura 13 Gráfico ilustrando as condições sob as quais ocorrem a não deposição e os tipos de depósitos ao longo de um sistema turbidítico considerando as variações de aceleração a que o fluxo pode estar submetido. (Kneller , 1995)

#### 4.7 VARIAÇÕES VERTICAIS NAS CARACTERÍSTICAS DAS CORRENTES DE DENSIDADE NÃO CONSERVATIVAS

Pelas suas características dinâmicas, as correntes de densidade não conservativas apresentam variações significativas no seu perfil vertical. A Figura 14 mostra um perfil vertical de velocidades típico destas correntes. Este perfil, que pode ser observado tanto em experimentos como na natureza, pode ser dividido em uma porção interna, situada acima do substrato, onde se tem um gradiente de velocidade positivo e, uma porção externa, onde ele é negativo. A porção interna geralmente apresenta a metade da espessura externa. A altura em que o ponto de máxima velocidade ocorre depende das forças de arraste que se desenvolvem tanto nos limites superiores e inferiores da corrente, ocorrendo entre 0,2 e 0,3 da altura total da corrente (Kneller & Buckee, 2000). Este ponto de máxima velocidade separa a porção interior e exterior da corrente.



**Figura 14** Esquema mostrando a cabeça e o corpo de uma corrente de gravidade indicando um típico perfil de velocidades (Kneller & Buckee, 2000).

O perfil de densidade tem sido descrito por uma camada basal densa dada pela concentração de sedimentos e uma superior menos densa e mais homogênea, caracterizada por uma intensa mistura com o fluido ambiente. Embora o ponto de inflexão no perfil de densidade normalmente coincida com o ponto de máxima velocidade vertical, estudos mais detalhados têm demonstrado que esta distribuição pode ser mais complexa (Kneller & Buckee, op. cit). Dois principais tipos de perfil de concentração foram observados: um perfil com variação gradual de densidade ocorre em correntes com baixas concentrações e pouco deposicionais e outro, em que ocorre uma variação abrupta, observado em correntes erosivas ou correntes com elevada entrada de fluido pelo limite superior.

O primeiro tipo, embora não mostre uma estratificação, apresenta, próximo à base, uma elevada concentração que diminui rapidamente em sentido ao topo até o ponto de máxima velocidade, mantendo-se então praticamente constante. No segundo tipo, os finos tendem a ter uma distribuição mais uniforme que o material grosso, que se concentra na porção basal da corrente (Garcia, 1994).

Middleton & Southard (1984) sugeriram que a concentração vertical de sedimentos obedece a uma distribuição pela lei de potência cujo expoente desta é diretamente proporcional à razão entre as velocidades da corrente e a de queda do grão. Este modelo indica a possibilidade de formação de uma alta concentração de sedimentos próxima ao fundo com estratificação, tanto em termos de densidade como de tamanho de grãos.

#### 4.8 MECANISMOS DE SUPORTE DOS GRÃOS

Os mecanismos de suporte dos grãos em correntes de densidade foram apresentados por Middleton e Hampton (1976) para propor uma classificação dos fluxos gravitacionais de sedimentos baseada neste critério que, posteriormente, foi ampliada por Lowe (1979). Segundo estes autores, são definidos quatro mecanismos de suporte (Figura 15):

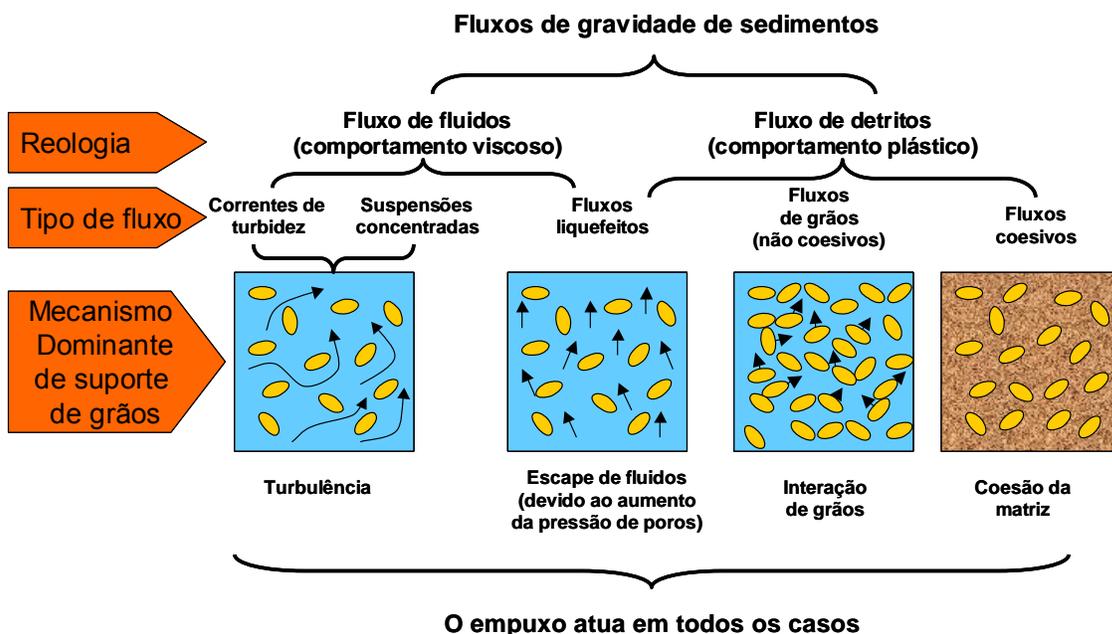


Figura 15 Classificação de fluxos de densidade mostrando os mecanismos dominantes de suporte de grãos ( Middleton e Hampton,1976) e a sua reologia (Lowe, 1979).

1. **Turbulência do fluido intersticial** - é o mecanismo típico das correntes de turbidez e, em parte, de suspensões concentradas. Nelas os grãos são mantidos em suspensão pela componente ascendente da turbulência do fluido.
2. **Movimento ascendente do fluido intragranular** – ocorre pela energia gerada devido o aumento da pressão de poros que ocorre pela redução volumétrica ocasionada pelo rearranjo de grãos em fluxos de sedimentos liquefeitos e pela entrada de fluido sob a cabeça das correntes de densidade.
3. **Interação de grãos** - os grãos são mantidos em suspensão diretamente pelas forças geradas durante a colisão entre grãos (regime inercial) ou pela ação das forças viscosas produzidas pela interação entre o grão (regime viscoso). Este mecanismo é particularmente conhecido em fluxo de detritos arenosos (fluxo de grãos) verificado em frentes de dunas eólicas.
4. **Coesão da Matriz** - os grãos são submersos em uma matriz lamosa que possui reologia não newtoniana. Neste caso o principal fenômeno que atua no deslocamento é a interação dos grãos com a matriz sendo as forças gravitacionais pouco atuantes. Este é o mecanismo de transporte predominante dos fluxos de detritos lamosos.

Nas correntes de densidade, normalmente, ocorrem esses quatro mecanismos de suporte de grãos. Eles podem atuar conjuntamente ou em regiões distintas no seu interior. Contudo, há sempre o predomínio de um dos processos em cada etapa de seu desenvolvimento. Por sua vez, Shanmugam (2000) enfatiza que o mecanismo de transporte que pode ser inferido pelo registro sedimentar de uma corrente de densidade somente nos dá uma indicação do estágio final do fluxo, enquanto que, durante o seu desenvolvimento mais de um mecanismo de suporte pode estar envolvido. Além disto, este autor afirma que, até o momento, não há um critério capaz de reconhecer, univocamente, o mecanismo de transporte através da análise das rochas depositadas.

#### 4.9 TIPOS DE FLUXOS

Enquanto se deslocam as correntes de densidade não conservativas sofrem constantes mudanças em sua natureza através da sua interação com o meio que a envolve. Num processo contínuo concorrem fatores que possibilitam a manutenção, entrada ou saída de sedimento. Isto modifica continuamente as características de fluxo. Embora seja difícil a definição precisa entre

seus limites, Lowe (1979) sugere a seguinte classificação baseada, principalmente, na modificação do processo de suporte de grãos (Figura 15):

1. **correntes de turbidez de baixa densidade:** onde as partículas são suportadas pela turbulência do fluxo que devido a sua baixa energia, não é capaz de transportar sedimentos grossos por longas distâncias;
2. **correntes de turbidez de alta densidade:** onde as partículas são suportadas pela turbulência do fluxo em alta concentração de sedimento ;
3. **fluxos fluidizados:** onde as partículas são totalmente suportadas pelo movimento ascendente dos fluidos intersticiais entre os grãos. Este fluxo é ocasionado pelo colapso dos poros e pelo rearranjo dos grãos motivados por processos que desestabilizem os sedimentos;
4. **fluxos liquefeitos:** onde as partículas são mantidas em suspensão pelo fluxo de fluido entre os poros;
5. **fluxos de grãos:** onde as partículas são suportadas pela “pressão dispersiva” derivada da colisão entre as partículas;
6. **fluxos coesivos:** onde os grãos são suportados pela matriz coesiva.

#### 4.10 CLASSIFICAÇÃO DO FLUXO EM FUNÇÃO DA REOLOGIA DA MISTURA

Define-se Reologia como a ciência que estuda as relações entre a tensão e a deformação dos materiais. É o ramo da física que estuda a viscosidade, plasticidade, elasticidade e o escoamento da matéria, ou seja, um estudo das mudanças na forma e no fluxo de um material, englobando todas estas variantes.

A importância da reologia do fluido na classificação dos fluxos gravitacionais de sedimentos foi percebida desde os primeiros trabalhos sobre este tema que, segundo Shanmugam (2000), foi introduzido no trabalho pioneiro de Dott (1963). Este autor classifica os fluxos de sedimentos subaquosos em dois tipos: newtonianos (correntes de turbidez) e plásticos (fluxos de massa, tais como fluxo de detritos, fluxo de grãos e outros).

Segundo Leeder (1999, p.84), os fluidos newtonianos por definição apresentam a viscosidade constante, ou seja, apresentam uma taxa de deformação ( $\dot{\gamma}$ ) que varia linearmente com uma

taxa de cisalhamento ( $\tau$ ), mantidas a temperatura e a pressão. As substâncias plásticas, por sua vez, apresentam uma resistência inicial ao cisalhamento (tensão limite  $\tau_0$ ) seguida pela deformação (Figura 16). As substâncias plásticas com reologia de Bingham mostram a pseudo-viscosidade ou viscosidade plástica ( $\mu_p$ ), ou seja, a taxa de incremento de deformação é linear com o aumento da tensão cisalhante.

Os corpos (ou fluidos) pseudo-plásticos com o aumento do gradiente de deformações têm um aumento na sua viscosidade aparente. Além de todos estes corpos cujas propriedades independem do tempo de aplicação das tensões, tem-se os fluidos dependentes do tempo (fluidos com memória). Caso a viscosidade aparente diminua com o tempo em que o fluido é submetido à tensão, ele é denominado tixotrópico, caso ela aumente é chamado reopético. A tixotropia ocorre devido à interação elétrica entre as partículas de argila. Esta interação aumenta de intensidade quase que linearmente após o fluxo ter cessado provocando uma organização progressiva das partículas, que, por sua vez, aumenta a viscosidade da mistura. Este arranjo é quebrado quando o fluido inicia o seu movimento.

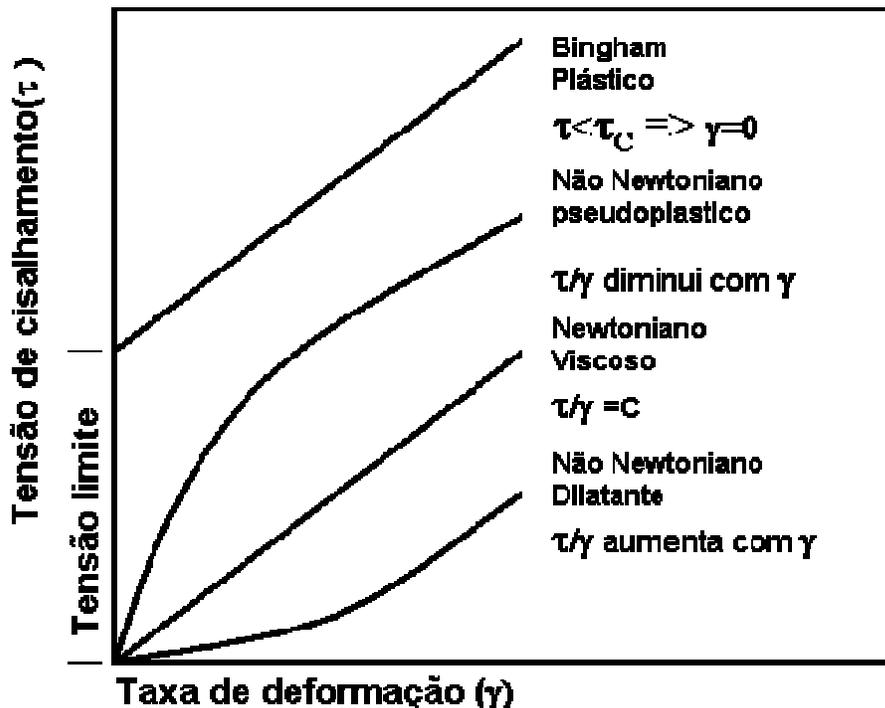


Figura 16 Comportamento de vários tipos de fluxos fluidos e plásticos quando deformados por uma tensão.

As equações que descrevem o comportamento desses corpos podem ser encontradas em Coussot (1997) , e alguns dos modelos que tentam descrever a relação tensão – gradiente de deformações são os seguintes:

Plásticos de Bingham :  $\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma}$  ,

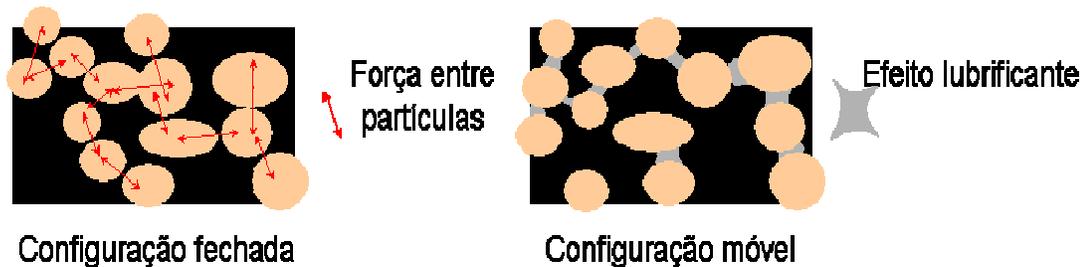
Pseudo-plásticos (equação de Ostwald) :  $\tau = k\dot{\gamma}^n$  com  $n > 1$ ,

Dilatante (equação de Ostwald):  $\tau = k\dot{\gamma}^n$  com  $n > 1$ .

As misturas que compõem as correntes de densidade não-conservativas não podem ser consideradas como fluidos convencionais. São na realidade compostas de água e sólidos com dimensões e composições variáveis que apresentam interações entre si bastante complexas. Dentre as interações possíveis, Coussot (1997) destaca as seguintes:

1. Movimento browniano – de forma semelhante ao que ocorre ao nível molecular, há o choque elástico entre as partículas provocando um movimento em cadeia. Este fenômeno só é importante quando temos baixas concentrações de partículas em condições de não-turbulência (número de Reilnolds baixo).
2. Efeitos hidrodinâmicos – a presença de partículas sólidas num meio líquido impede a sua livre movimentação reduzindo a capacidade deste escoamento, aumentando a viscosidade aparente da mistura.
3. Efeito do empacotamento - com o aumento da concentração de partículas nas misturas, torna-se cada vez mais importante o efeito do arranjo espacial destas nas suas características reológicas (Figura 17). Isto ocorre pela interação cada vez mais intensa entre elas. Embora seja difícil prever o efeito de cada empacotamento, a literatura nos informa que as características do fluido intersticial passam a ser cada vez mais importantes. Se o fluido possuir características lubrificantes, o arranjo entre as partículas apresenta uma configuração móvel. Caso contrário, se desenvolve uma força friccional entre as partículas reduzindo drasticamente a capacidade da mistura em fluir.
4. Efeitos de inércia – são importantes em escoamentos a altas velocidades e ocorrem tanto em nível macroscópico como de partículas. Macroscopicamente, estes efeitos estão ligados à turbulência interna da corrente que movimenta a mistura como um todo. Em termos de partícula, há a turbulência inercial, a colisão de grãos e a flutuação.

5. Efeitos coloidais – são importantes em escoamentos de partículas pequenas e em fluxos lentos. Vários tipos de forças eletroquímicas tornam-se mais relevantes que as forças hidrodinâmicas, modificando a característica das misturas que passam a apresentar tixotropia e plasticidade.



**Figura 17** Efeito do empacotamento em misturas granulares.

Segundo Drew & Passman (1999) existem na literatura algumas aproximações que possibilitam estimar a viscosidade de misturas com base na concentração volumétrica de sólidos ( $\phi$ ) ou do tipo de empacotamento ( $\varepsilon$ ):

Einstein (1906) 
$$\mu_e = \mu_0 (1 + 2,5\phi) \quad \phi < 0,02$$

Batchelor & Green (1972) 
$$\mu_e = \mu_0 (1 + 2,5\phi + 7,6\phi^2) \quad \phi < 0,10$$

Chong et al. (1971) 
$$\mu_e = \mu_0 \left( 1 + \frac{0,75}{\varepsilon} \right) \quad \phi < 0,45 \text{ onde } \varepsilon = 2 \left( \left( \frac{\phi_m}{\phi} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right)$$

O termo  $\phi_m$  é dado pela concentração volumétrica máxima que se pode obter para um tipo específico de empacotamento.

As correntes de densidade não-conservativas estão sujeitas a mudanças na sua reologia pela variação da concentração de sólidos em suspensão. Este processo, muito comum na natureza, implica modificações no escoamento entre as condições newtoniana e plástica binghamiana.

O aumento da viscosidade que ocorre pelo incremento na concentração de sólidos em suspensão pode reduzir drasticamente a velocidade de queda das partículas. Estas mudanças podem gerar morfologias de fluxo que podem ser preservadas mesmo após a sedimentação de parte do material em suspensão.

Um outro fenômeno importante ocorre por variações na velocidade de fluxo de um fluido com reologia de Bingham. Se por algum motivo houver uma redução na velocidade interna ao escoamento, parte do corpo pode se “solidificar” formando um bloco no seu interior que se deslocará por um processo diferente do restante.

#### 4.11 A CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS E SUAS IMPLICAÇÕES

A incorporação ou a perda de sólidos em suspensão nas correntes de turbidez é uma constante durante o seu deslocamento desde sua iniciação até a sua extinção. Este fato é que determina mudanças constantes nos mecanismos de transporte e deposição que estão de alguma forma presentes nos registros geológicos das seqüências marinhas profundas.

A concentração de sedimentos nas correntes de turbidez pode alterar significativamente as propriedades do fluido e do comportamento do fluxo. A densidade do fluido, a velocidade de queda do grão, a viscosidade, a velocidade do fluxo e a capacidade de transporte podem ser todas alteradas.

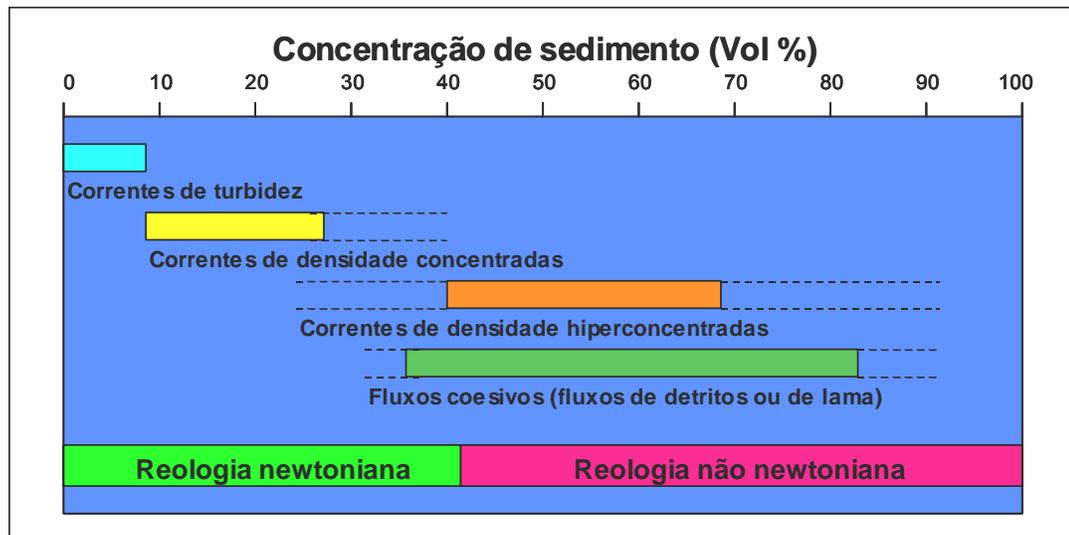
Mulder & Alexander (2001) apresentaram um exaustivo trabalho sobre os fluxos de densidade subaquosos no qual propõem que a concentração de sedimentos seja medida pela razão entre o volume de sedimento e o volume total. A partir destes valores apresentam uma classificação para o tipo de fluxo esperado, conforme é apresentado na Figura 18.

Embora a concentração de sedimentos seja um fator importante na definição das características dos fluxos, deve-se levar em consideração outros fatores como a proporção de finos na sua composição. Devido ao tamanho reduzido das frações lamosas, começam a ser percebidos fenômenos eletrostáticos que promovem a coesão ou a repulsão entre as partículas, fato que é pouco percebido em grãos maiores.

Nas baixas concentrações, a turbulência é o principal processo de transporte de sedimentos pelo fluxo (Wan & Wang, 1994). Em correntes hiperconcentradas, os sedimento passam a ser suportados pelo empuxo, pela tensão dispersiva e pela turbulência. Os fluxos hiperconcentrados são fluxos turbulentos bifásicos nos quais a “fase fluida” é formada pela água e por sedimentos menores que 0,01 mm uniformemente distribuída dentro dela. A fase sólida é formada pelas partículas maiores em suspensão.

Em concentrações muito elevadas, as correntes se transformam em fluxos de detritos e apresentam alta coesão e fricção interna. Neste caso, a turbulência é quase totalmente

suprimida e o processo de manutenção dos sedimentos em suspensão é o empuxo, a tensão dispersiva, a interação entre os grãos e a coesão. Os sólidos e a água se movem conjuntamente como um corpo viscoplástico onde a sedimentação é muito dificultada.



**Figura 18 Terminologia para tipos de fluxos baseada na concentração volumétrica de sedimento medida em porcentagem conforme proposta por Mulder & Alexander (2001). Como a concentração de sedimento por si só não define as condições limites as linhas ponteadas representam estas incertezas.**

Mulder & Alexander (2001) consideram que a principal distinção entre os fluxos é pelo predomínio ou não das forças coesivas e cisalhantes entre as partículas. Nos fluxos coesivos, há a resistência a tensão da matriz que não permite à percolação de água no fluxo mantendo a coerência no corpo do fluxo. Já nos friccionais há uma interação entre as partículas aumentando o espaço intergranular que é preenchido por água. Neste caso a característica do fluxo depende diretamente da concentração de grãos que pode variar muito durante o seu deslocamento pela entrada de água ou decantação de sólidos.

Os fluxos cisalhantes, por sua vez, são classificados como correntes de turbidez quando a concentração é inferior a 9%, que é o critério adotado por Bagnold para definir suspensões turbulentas. Nestas condições, a turbulência é o principal mecanismo de suporte das partículas. Nas correntes de densidade concentradas, há uma mudança no mecanismo de sustentação dos grãos que não permite mais a livre segregação granulométrica que ocorre nas correntes de turbidez, embora esta ainda possa ocorrer. A segregação granulométrica deixa de acontecer nas correntes hiperconcentradas e a reologia passa a ser não-newtoniana.

Discutiremos a partir de agora os múltiplos efeitos da concentração de sedimentos no comportamento do fluxo e na sua capacidade de transporte. Embora estes efeitos não possam ser separados por ocorrerem simultaneamente, apresentá-los-emos separadamente para facilitar o entendimento.

#### 4.11.1 Densidade da corrente

A densidade da corrente apresenta aumento com a concentração de sedimentos em suspensão. A densidade da mistura com diferentes concentrações pode ser calculada pela fórmula:

$$\rho_f = \left(1 - \frac{C_f}{\rho_s}\right) * \rho_w + C_f$$

onde  $\rho_f$  = massa específica do fluido (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_s$  = massa específica do sólido (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_w$  = massa específica da água (kg/m<sup>3</sup>)

$C_f$  = concentração de sedimento em massa

Assim sendo altas concentrações implicam em uma maior energia potencial e em uma maior quantidade de movimento. Se todas as propriedades do fluxo permanecerem as mesmas o aumento de concentração resulta em um aumento da velocidade do fluxo.

#### 4.11.2 Viscosidade

O efeito da concentração de sedimentos na viscosidade da corrente já foi discutido no item 3.10 em que foram apresentadas equações onde é possível se estimar a viscosidade da corrente em função da concentração. Estas equações levam em consideração o efeito da concentração e do empacotamento dos grãos na viscosidade da mistura. Contudo, Wan & Wang (1994) alertam que as partículas argilosas oferecem uma influência muito mais acentuada que as outras partículas. Desta maneira, a distribuição granulométrica, assim como a mineralogia das argilas, deve ser considerada nas estimativas.

Se todas as outras propriedades permanecerem constantes, um incremento na viscosidade pode resultar num decréscimo na velocidade do fluxo.

### 4.11.3 Velocidade de queda do grão

A equação de Stokes apresentada abaixo fornece uma estimativa da velocidade de queda dos grãos.

$$\omega = \frac{2gr^2(\rho_s - \rho_f)}{9\mu}$$

onde  $\omega$  = velocidade de queda do grão (m/s)

$g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

$r$  = raio da grão (m)

$\rho_f$  = massa específica do fluido (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_s$  = massa específica do sólido (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu$  = viscosidade dinâmica do fluido

Segundo Wan & Wang (1994), o aumento da concentração implica a diminuição da velocidade de queda dos grãos devido aos seguintes efeitos:

- a queda das partículas induz a um movimento ascendente de água que provoca o arraste das partículas;
- o empuxo da partícula diminui em função da maior densidade do fluido;
- a viscosidade aumenta;
- se o fluido muda a sua reologia, passa a existir, para Bingham, o efeito da tensão-limite;
- há a interferência entre as partículas (efeito de população);
- quando há uma quantidade suficiente de argila em suspensão, ocorre a floculação. Em casos extremos, as partículas de argila formam uma estrutura floculada que inibe a queda das partículas grossas.

Esses efeitos são especialmente importantes em correntes hiperconcentradas nas quais o processo de sedimentação, praticamente, está bloqueado.

Hawksley (1951, apud Wan & Wang, 1994) fornece uma interessante equação para estimar a velocidade de queda a partir da concentração de sedimentos e da existência ou não de floculação de argilas que é assim expressa:

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \xi(1 - C_{vf})^2 * e^{\left(\frac{-k_1 C_{fv}}{1 - k_2 C_{vf}}\right)}$$

onde  $\omega$  = velocidade de queda do grão na corrente (m/s)

$\omega_0$  = velocidade de queda do grão na água limpa (m/s)

$C_{vf}$  = concentração volumétrica de sedimento

$\xi$  = 1 sem floculação e 2/3 com floculação

$k_1$  = 5/2 para esferas

$k_2$  = 39/54

O efeito das velocidades de queda muito baixas pode também propiciar que sedimento que entra na corrente tenha dificuldade em sair do fluxo. Isto realimenta o processo aumentando a capacidade de transporte da mesma.

#### 4.11.4 Capacidade de transporte

O aumento de concentração em correntes hiperconcentradas promove uma elevação de sua densidade que, por sua vez aumenta o empuxo sobre os grãos. Disto resulta que menos energia é necessária para manter as partículas em suspensão que, por sua vez, possibilita que este excedente de energia possa ser utilizado para assimilar mais sedimento, resultando num aumento da capacidade de transporte da corrente.

Wan & Wang (1994) estudaram este fenômeno em fluxos subaéreos e constataram que concentrações volumétricas superiores a 7,5% ampliam significativamente a capacidade de transporte em fluxos a baixa velocidade. Isto foi atribuído a uma diminuição na velocidade de queda das partículas.

Esta observação indica a existência de um mecanismo de retroalimentação onde há uma correlação positiva entre a concentração de sedimento e a capacidade de transporte de grãos maiores. Um outro resultado desta retroalimentação é que a concentração aumenta no sentido de deslocamento da corrente como foi constatado por Wan & Wang (1994) em um afluente do Rio Amarelo. Neste rio foi constatado um aumento na concentração volumétrica de 26% para 48% em poucos quilômetros.

#### **4.11.5 Velocidade de fluxo e resistência ao fluxo**

A influência da concentração na velocidade de fluxo é resultado de um balanço entre os aumentos da viscosidade e da densidade que provocam efeitos inversos no comportamento da corrente. Em fluxos subaéreos tem se constatado experimentalmente que há um aumento na velocidade do fluxo com a concentração (Govers, 1990 e Einstein & Chien, 1955). Este fenômeno tem sido atribuído a um aumento na quantidade de movimento do fluxo e a mudanças na estrutura turbulenta do fluxo.

Torri & Borselli (1991) mostraram que a tal relação citada só é possível se menos energia é dissipada pela turbulência e pela fricção implicando num decréscimo na resistência do fluxo.

De acordo com Wan & Wang (1994), a resistência do fluxo em correntes com sedimentos em suspensão pode ser analisada sob três aspectos: a resistência devido a forças viscosas, a resistência devido a turbulência e a resistência causada pelo atrito interno a carga de fundo e sobre as formas de fundo. Os autores salientaram que para esta análise é importante se conceituar os fluxos como pseudo-unifásicos (somente finos) ou como bifásicos (finos mais grossos).

No primeiro caso, o atrito interno a carga de fundo não é importante e a resistência do fluxo é somente viscosa e turbulenta. Com o aumento da concentração há um aumento viscosidade reduzindo a turbulência. Como resistência é depende da rugosidade do fundo e do regime de fluxo (laminar ou turbulento) não é possível uma relação direta da resistência ao fluxo com o aumento da concentração.

No caso do fluxo bifásico a resistência ao fluxo diminui com o aumento da concentração principalmente se o transporte de material grosso passa a ser por suspensão e não por carga de fundo. Além disso, há uma tendência do fundo em ficar mais plano e a resistência ao fluxo ser reduzida.

#### **4.11.6 Efeito da difusão**

A difusão é um fenômeno que ocorre quando temos dois fluidos de concentrações diferentes. Este fenômeno pode ser importante no caso de a corrente se expandir rapidamente pela perda do confinamento. Desta forma, ocorre a diluição das correntes de densidade provocando mudanças rápidas na sua reologia.

Uma idéia para explicar o transporte da carga sedimentar mais grossa pelas correntes de densidade não-conservativas é a presença na base da corrente de densidade de uma camada com uma quantidade de argila que desenvolva uma reologia de Bingham em que o peso da partícula é inferior à tensão-limite não permitindo a decantação das partículas. Para argilas motmoriloníticas (smectitas sódicas) bastam concentrações da ordem de 5% para atingir estas condições reológicas.

#### 4.12 RELAÇÕES ENTRE FORMAS DE LEITO E REGIMES DE FLUXO

Quando uma corrente unidirecional se desenvolve sobre um fundo móvel é formada uma série de irregularidades na interface entre o fluido e o substrato. Isto ocorre devido à interação entre os grãos que se encontram depositados no fundo e aqueles que estão em suspensão carregados pela corrente. Nesta interação, uma parte deles é removida e outra é depositada formando um arranjo característico tanto internamente ao sedimento como na superfície. A estes arranjos denominamos forma de leito.

As formas de leito ocorrem em uma variedade de escalas e formas. São formadas desde alguns grãos até montanhas de areias que se desenvolvem nos desertos. As formas de leito e os depósitos a elas correlacionados guardam em si um histórico dos processos em que elas foram desenvolvidas (Leeder, 1999).

Swift & Ludwicck (1976), baseados em inúmeros trabalhos experimentais realizados por eles e outros autores, indicam que as formas de leitos sofrem variações e vão se diferenciando em uma seqüência que responde às mudanças na intensidade e nas propriedades do fluxo. As variáveis que controlam este processo são:  $h$  – a espessura do fluxo,  $u$  – a sua velocidade média,  $\rho_f$  – a densidade do fluido,  $\rho_s$  – a densidade do grão,  $\nu$  – a viscosidade cinemática do fluido e  $D$  – diâmetro do grão.

O regime de fluxo é definido através do número de Froude, o qual é adimensional sendo definido em função da espessura do fluxo ( $h$ ), da sua velocidade ( $u$ ) e das características do grão. Estabeleceu-se, experimentalmente, que se número for superior à unidade, o regime de fluxo é supercrítico. Neste caso, as ondas que se desenvolvem da superfície do fluxo se acoplam com as rugosidades do substrato formando antidunas que tendem a migrar corrente acima. Caso este número seja inferior à unidade, o regime de fluxo é classificado como subcrítico. Desta forma, os autores sugerem que é possível através da tensão de cisalhamento do fluxo e do tamanho dos grãos estabelecer relações como as da Figura 19.

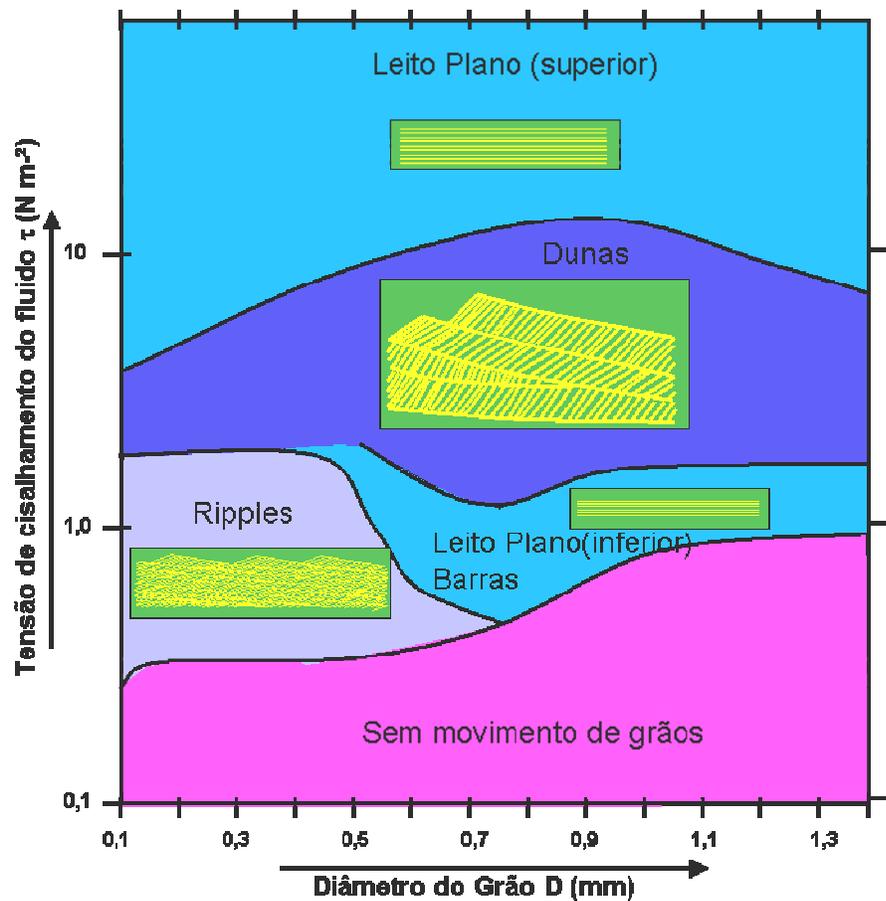


Figura 19 Gráfico ilustrando Variações de formas de leito em função das características do grão e do fluxo. (Swift & Ludwicck (1976))

Na figura citada, pode-se verificar que o aumento da tensão de cisalhamento do fluxo provoca variações nas formas de leito que passam de mini-dunas (ripples) para as dunas e destas para estruturas plano paralelas. O diâmetro do grão ( $D$ ) e a sua densidade ( $\rho_s$ ), são de fundamental importância na definição da formas de leito. Ambas as características dependem diretamente da área fonte dos sedimentos.

A viscosidade ( $\nu$ ) e a densidade do fluido ( $\rho_s$ ) variam com a temperatura, salinidade e finos em suspensão e definem sua capacidade de transportar os grãos.

A potência do fluxo que é proporcional à terceira potência da velocidade do fluxo ( $u^3$ ) e o diâmetro do grão ( $D$ ) é definido pelos autores como mais importante na definição das formas de leito.

Leeder (1999) indica que em ripples é possível definir uma relação entre  $\lambda$  e  $\Delta H$  variando entre 10 e 40 e que há uma relação não muito conhecida entre a altura do fluxo e a sua força trativa e estes parâmetros. Para  $\lambda$ , diz que foi observada uma fraca correlação com o diâmetro dos grãos dada por  $\lambda=1000D$ . As ripples podem ser retas, sinuosas ou linguóides. Contudo, experimentos indicam que as duas primeiras são metaestáveis e com a evolução do fluxo se tornam linguóides.

Cellino & Graff (2000) apresentaram a seguinte correlação empírica sobre a distância entre as cristas das formas de leito ( $\lambda$ ) e a altura do fluxo ( $h$ ) para dunas formadas por seixos e calhaus em córregos torrenciais nos Alpes.

$$\frac{\lambda}{h} \approx 5$$

Leeder (1999), a partir das observações de Allen(1982) em dunas de areia em canais com fluxo unidirecionais fornece um valor médio para essa relação em 5, mas indicam uma larga escala de variação entre (1 e 16).

Cellino & Graff (2000) também nos oferecem uma relação entre a altura da forma de leito( $\Delta H$ ) e a altura do fluxo ( $h$ ):

$$\frac{\Delta H}{h} < \frac{1}{6}$$

Da mesma forma que para outra relação, Leeder (1999) fornece um valor médio para esta em 0,167, mas indica uma larga escala de variação entre 0,025 e 0,4.

Cellino & Graff (2000) ainda nos informam que as formas de leito propiciam uma separação no fluxo após a sua passagem sobre a crista da forma de leito. Neste ponto ocorre uma desaceleração localizada da corrente criando uma região de refluxo que aumenta a turbulência. O aumento da turbulência modifica a distribuição vertical de sedimentos evitando a deposição e realimenta o processo de formação das formas de leito.

#### 4.13 EQUAÇÕES UNIDIMENSIONAIS PARA DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS

As correntes de densidade que desejamos estudar se enquadram entre dois tipos de fluxo que, na literatura, são denominadas por correntes de turbidez e fluxo de detritos. A distinção entre

elas se faz pela concentração de sedimentos e pelo conteúdo de argila. As correntes de turbidez são diluídas, transportam a argila como os materiais mais grossos em uma solução de água e sedimento que são mantidos em suspensão pela turbulência do fluxo. Os fluxos de detritos são densos e possuem uma quantidade de argilas suficiente para suportar os materiais de granulometria mais grossa durante a sua movimentação (Middleton e Hampton, 1976).

Os estudos realizados até o momento formalizam a física envolvida nesses processos por meio de equações que os descrevem em uma geometria unidimensional. Pratson et alli (2000) fazem uma ampla discussão sobre o assunto, o qual foge ao nosso escopo, mas, para o nosso estudo, é pertinente que conheçamos a formulação destes processos.

Três equações descrevem a física básica de um fluxo de detritos subaquoso, segundo Lin e Leblond (1993):

$$\underbrace{\frac{\partial h}{\partial t}}_a + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left[ U_p h_p + \frac{3}{2} U_p h_s \right]}_b = 0 \quad (1)$$

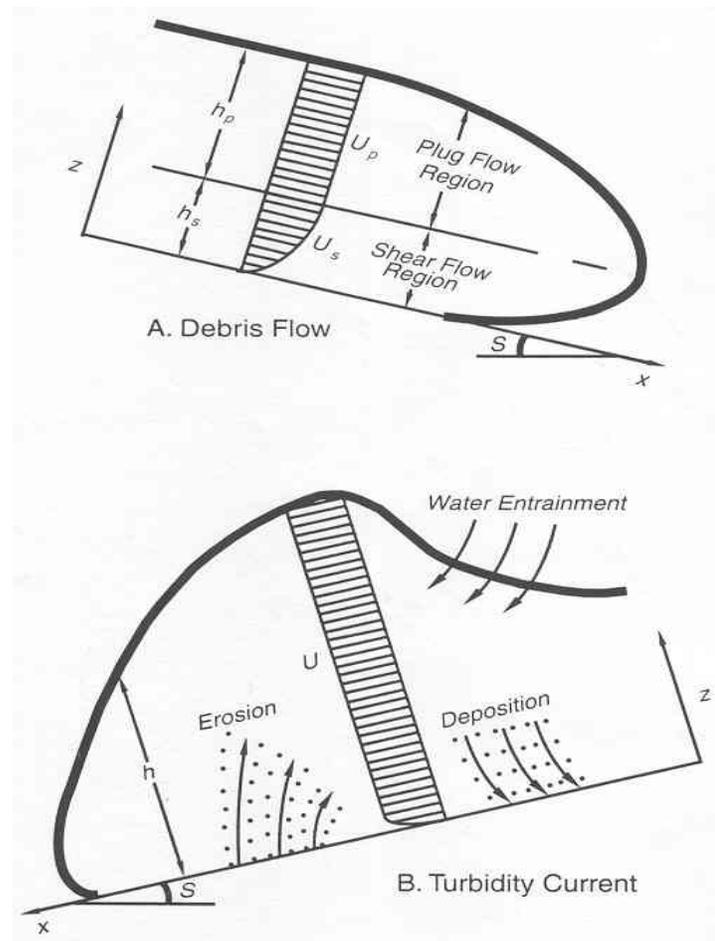
$$\underbrace{\frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial t} (U_p h_s) - U_p \frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{8}{15} \frac{\partial}{\partial x} (U_p^2 h_s) - \frac{3}{2} U_p \frac{\partial}{\partial x} (U_p h_s)}_a =$$

$$\underbrace{h_s g \left( 1 - \frac{\rho_w}{\rho_m} \right) S}_b - \underbrace{h_s g \left( 1 - \frac{\rho_w}{\rho_m} \right) \frac{\partial h}{\partial x}}_c - \underbrace{2 \frac{\mu_m U_p}{\rho_m h_s}}_d \quad (2)$$

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} (U_p h_p) + \frac{\partial}{\partial x} (U_p^2 h_p) + U_p \frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{3}{2} U_p \frac{\partial}{\partial x} (U_p h_s)}_a =$$

$$\underbrace{h_p g \left( 1 - \frac{\rho_w}{\rho_m} \right) S}_b - \underbrace{h_p g \left( 1 - \frac{\rho_w}{\rho_m} \right) \frac{\partial h}{\partial x}}_c - \underbrace{\frac{\tau_m}{\rho_m}}_d \quad (3)$$

Estas equações unidimensionais fornecem a espessura (h) e a velocidade média (U) em função da profundidade a cada tempo e a cada ponto ao longo fluxo.



**Figura 20** Esquemas dos elementos dinâmicos para fluxo de detritos (debris flow) e correntes de turbidez segundo Pratson et al (2000).

A Figura 20 representa os principais elementos que caracterizam este tipo de corrente de densidade quais sejam: a camada basal caracterizada por um fluxo cisalhante e a camada superior onde ocorre um deslocamento maciço de material. A equação (1) é a equação da continuidade para fluxo de detritos e expressa a conservação de sedimento e água combinados no fluxo. As equações (2) e (3) são equações da quantidade de movimento para as camadas em que há deslocamento por cisalhamento e por bloco maciço. Equações diferentes são necessárias por causa destas duas maneiras de as camadas se movimentarem. No entanto, as mesmas forças governam a mudança da quantidade de movimento em ambas camadas : (A) o peso do fluxo “escalado” pela inclinação do fundo (2b e 3b); (B) forças geradas pela pressão de fluidos devido variação lateral da altura do fluxo (2c e 3c); e forças cisalhantes (2d e 3d). Para a camada cisalhante, as forças deformacionais relacionam-se à viscosidade da matriz, enquanto para camada maciça, ela deriva da resistência à deformação da matriz.

Quatro equações unidimensionais descrevem a física básica de uma corrente de turbidez (Parker et alli, 1986):

$$\underbrace{\frac{\partial h}{\partial t}}_a + \underbrace{\frac{\partial Uh}{\partial x}}_b = \underbrace{e_w U}_c \quad (4)$$

$$\underbrace{\frac{\partial Ch}{\partial t}}_a + \underbrace{\frac{\partial UCh}{\partial x}}_b = \underbrace{v_s (E_s - r_0 C)}_c \quad (5)$$

$$\underbrace{\frac{\partial Uh}{\partial t}}_a + \underbrace{\frac{\partial U^2 h}{\partial x}}_b = \underbrace{RgChS}_b - \underbrace{\frac{1}{2} Rg \frac{\partial Ch^2}{\partial x}}_c - \underbrace{u_*^2}_d \quad (6)$$

$$\underbrace{\frac{\partial Kh}{\partial t}}_a + \underbrace{\frac{\partial UKh}{\partial x}}_b = \underbrace{u_*^2 \frac{1}{2} U^3 e_w}_b - \underbrace{\varepsilon_0 h}_c - \underbrace{Rgv_s Ch}_d - \underbrace{\frac{1}{2} RgChUe_w}_e - \underbrace{\frac{1}{2} Rghv_s (E_s - r_0 C)}_f \quad (7)$$

Adicionalmente à espessura (h) e à velocidade média em função da profundidade (U), estas equações também fornecem a sua concentração média de sedimento em função da profundidade (C) a cada tempo ou posição ao longo do fluxo.

As equações (4) e (5) são equações da continuidade para a água e para o sedimento na corrente. Elas são similares aquela utilizada no fluxo de detrito (equação - 1) onde a espessura de água na corrente (h) e a espessura de sedimento em suspensão na corrente (Ch) são inversamente proporcionais à velocidade da corrente. Porém, cada variável também depende de um fator adicional que implica a utilização de equações de continuidade separadas. Este fator leva a um aumento no volume por entrada de água na corrente (4c). O sedimento na corrente pode aumentar ou diminuir dependendo da taxa total de erosão (5c), que é positiva se a erosão excede a deposição e negativa no caso contrário.

Uma única equação (6) é necessária para descrever a quantidade de movimento de uma corrente de turbidez porque ela é turbulenta ao longo de toda a sua dimensão. Mesmo sendo diferente das equações que descrevem a quantidade de movimento no fluxo de detritos para as camadas cisalhante e maciça, ela contém as três mesmas fontes e perdas de quantidade de

movimento: o peso da corrente (6b), a pressão de fluidos (6c), e o cisalhamento (6d). Neste caso, o cisalhamento é gerado na base da corrente quando ela se move sobre o fundo.

Finalmente, o balanço energia cinética da turbulência (7) é utilizado para restringir a erosão causada pela corrente de turbidez. A energia cinética da turbulência é criada pela velocidade da corrente (7b); quanto mais rápido ela se move, mais energia é gerada. Ao mesmo tempo, esta energia é dissipada: pela viscosidade da corrente (7c); pela manutenção do sedimento em suspensão e é utilizada para entrada de água na corrente (7e). Toda energia restante é disponibilizada para erodir o fundo (7f). Logo, se não restar energia, a corrente chega a sua capacidade de transporte e não erode mais.

Esta formulação nos oferece um embasamento das grandezas físicas e das relações de dependência que devemos estudar para constituir um modelo físico. Fornece também uma lista daquelas grandezas que devemos medir e observar em nossos experimentos.

#### 4.14 SIMULAÇÃO FÍSICA DE CORRENTES DE DENSIDADE

A corrente de densidade é um fenômeno muito complexo onde as relações físicas dos processos nelas envolvidos ainda não são totalmente conhecidas. Desta forma, é necessária a realização de ensaios físicos destas correntes para observação direta do seu comportamento na natureza. A abordagem do problema na escala real dos fenômenos, embora seja a mais fidedigna, é praticamente impossível de ser realizada, uma vez que, devido a sua magnitude, implicaria instalações muito grandes com um custo elevado, além de se considerar as dificuldades de se observar os fenômenos nesta escala pelo seu poder destrutivo. A fim de se contornar estes problemas, têm sido realizados estudos em modelos físicos com escalas reduzidas, sejam eles sem controle de escala ou utilizando escalas distorcidas. Neste último caso, os resultados podem se mostrar confiáveis, porém, a extrapolação para o fenômeno natural, deverá ser realizada com cuidado. Já os modelos sem controle de escala apresentam resultados meramente qualitativos.

Por meio de modelos reduzidos, é possível se realizar observações em um sistema que se comporta de forma semelhante ao natural, mas que apresenta menores dimensões e no qual é possível se introduzirem modificações ou variar as características que desejamos estudar. Para isto, é necessário que sejam obedecidos um conjunto de princípios de semelhança para projetar, construir, operar e interpretar modelo a partir do qual se deseja prever o comportamento de um sistema natural cujo comportamento desejamos estudar (protótipos).

Para Motta (1972), dizer que um modelo se comporta de modo semelhante a um protótipo implica que:

1. o mesmo fenômeno, pondo em jogo as mesmas grandezas regidas pela lei física, se passa nos dois sistemas considerados;
2. para cada categoria de grandeza existem relações constantes, bem conhecidas e independentes dos valores absolutos da grandeza em questão, entre os valores nos modelos e os valores que ocorrerão no protótipo.

Assim, é importante que sejam estabelecidas as relações de transferência entre o modelo/protótipo e o tipo de relação entre as diversas grandezas intervenientes no modelo físico a fim de se poderem pesquisar sistematicamente os dados mais significativos, garantindo que sua geometria, cinemática e dinâmica apresentem alguma relação de escala com o fenômeno natural.

Middleton (1966b), ao estudar de forma detalhada os princípios de semelhança na simulação física de correntes de densidade em condições estacionárias e uniformes nos indica que os seguintes fatores devem ser considerados: a diferença de densidade, expressa pelo termo da gravidade reduzida ( $g' = g (\rho_s - \rho_f) / \rho_f$ ), a velocidade média ( $u$ ), a espessura do fluxo ( $h$ ), a declividade ( $S$ ) e os fatores de perda de carga junto ao fundo ( $f_o$ ) e na interface ( $f_i$ ). Considerando que o fator ( $f_i$ ) depende do número de Reynolds, devemos, portanto, considerar a viscosidade cinemática ( $\nu$ ). Pela análise dimensional, nos fornece a expressão:

$$f(g', u, h, S, f_i, f_o, \nu) = 0$$

ou em termos de números adimensionais:

$$f\left(\frac{u}{\sqrt{g'h}}, uh/\nu, S, f_i, f_o\right) = 0$$

Como estamos estudando correntes de densidade não-conservativas, devemos considerar, ainda, as variáveis que controlam o comportamento dos sedimentos no fenômeno. São estas variáveis: o diâmetro do sedimento ( $d$ ), o coeficiente de uniformidade ( $\sigma$ ) e concentração em volume ( $C$ ). Assim:

$$f\left(\frac{u}{\sqrt{g'h}}, uh/\nu, S, fi, fo, \frac{\sqrt{g'hS} \cdot d}{\nu}, \sigma, C\right) = 0$$

Se utilizarmos a velocidade de queda do grão ( $w$ ) como representativa dos fenômenos hidrodinâmicos relacionados à sedimentação, chega-se à expressão final para descrever o nosso fenômeno:

$$f\left(\frac{u}{\sqrt{g'h}}, uh/\nu, S, fi, fo, \frac{w}{u}, C\right) = 0$$

onde:

$\frac{u}{\sqrt{g'h}}$  - é o número de Froude densimétrico que representa a razão entre as forças inerciais e gravitacionais. Ele não determina apenas o fator de perda de carga da interface, mas o regime e o grau de mistura na interface. É importante respeitar esta relação no modelo e protótipo.

$uh/\nu$  - é o número de Reynolds que procura representar o balanço entre as forças inerciais e as viscosas que atuam no volume fluido. A partir de um dado valor por invariância assintótica ( $\sim 2000$ ), se admite que o fluxo deixa de ser laminar e passa a ser totalmente turbulento. Nesta condição, o número de Reynolds torna-se irrelevante para o estudo.

Middleton (1966b) faz as seguintes observações com base nesta expressão:

1. O número de Froude do modelo precisa ser similar ao do protótipo para garantir a similaridade no regime de fluxo. Consegue-se isto aumentando um pouco a declividade do modelo;
2. A similaridade do número de Froude garante apenas parcialmente que a perda de carga na interface superior é similar. Tem-se observado que o efeito do número de Reynolds na mistura que ocorre nesta interface é maior para sedimentos grossos do que em correntes com sedimentos mais finos;
3. a velocidade da corrente no modelo deve ser reduzida em função da raiz quadrada da escala de comprimento se mantida a diferença de densidade;

4. a velocidade de queda do grão deve ser reduzida proporcionalmente à redução da velocidade da corrente;
5. a seleção e a concentração de sedimentos possuem um efeito na sedimentação. A velocidade de queda dos grãos é reduzida consideravelmente pela presença da fração argila em suspensão e pela elevada concentração de sedimento.

Sintetizando o que apresentamos acima, temos que os principais parâmetros adimensionais utilizados para garantir que os ensaios sejam representativos são os seguintes: o número de Froude densimétrico; o número de Reynolds e a velocidade de queda adimensionalizada.

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

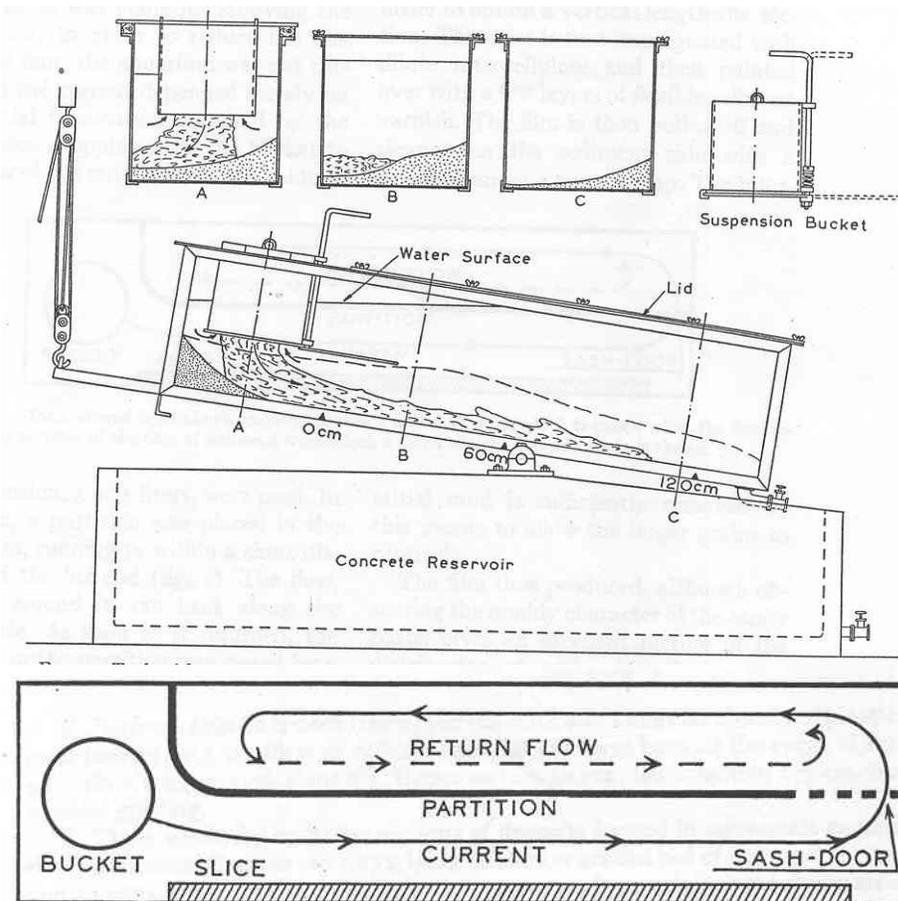
O número de Reynolds será avaliado para indicar se o regime de fluxo é laminar ou turbulento. Segundo Kneller & Buckee (2000), em algumas situações é difícil alcançar em laboratório um valor para o número de Reynolds que garanta uma turbulência completamente desenvolvida ( $Re > 2000$ ).

A velocidade de queda adimensionalizada é a razão entre a velocidade de queda terminal do grão de sedimento e alguma velocidade característica da corrente, normalmente a velocidade média da corrente. Assim sendo a velocidade de queda das partículas ( $w$ ) utilizada deve representar adequadamente o comportamento hidrodinâmico das partículas. Para isto ocorrer é necessário levar em conta não somente a viscosidade, mas, também, a concentração de sedimentos que modifica a velocidade de queda efetiva das partículas e a massa específica efetiva da mistura (Middleton, 1966b).

#### 4.15 ESTUDOS EXPERIMENTAIS DE MODELAGEM DE CORRENTES DE DENSIDADE

O primeiro pesquisador que estudou as correntes de densidade com vistas a explicar a formação de sedimentos arenosos em águas profundas foi Kuenen, cujos trabalhos se iniciaram nos anos 40 e se prolongaram até o final da década de 60. Suas pesquisas, realizadas sem muitos recursos tecnológicos geraram uma base muito segura para o entendimento dos processos de transporte e deposição em meio subaquoso.

Seu trabalho mais brilhante foi publicado em co-autoria com Migliorini em 1950. Este trabalho provocou uma revolução na idéia que se tinha dos processos deposicionais marinhos profundos. Nele, foram utilizados dois aparatos para o estudo do que ele denominou de correntes de turbidez de alta densidade, que consistia de uma mistura de sedimentos dentro de um vasto espectro granulométrico desde grânulos até frações argilosas com água em diversas proporções volumétricas. O primeiro aparato era uma calha de vidro com 2 m de comprimento que, no seu final, possuía uma curva que permitia que a corrente retornasse através de um canal lateral (Figura 21). Por ser transparente, possibilitava a visualização lateral do desenvolvimento das correntes o que permitia um estudo da dinâmica interna das correntes e medir a velocidade de deslocamento da cabeça. Com estes experimentos foram selecionados preliminarmente o material e as concentrações que foram ensaiados posteriormente.

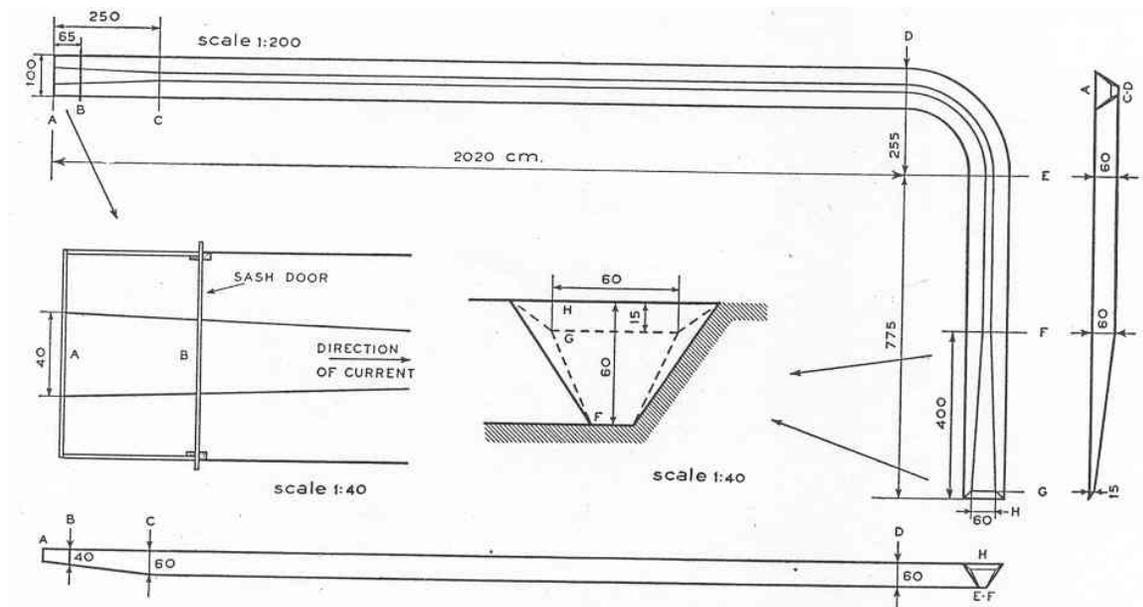


**Figura 21** Aparato utilizado por Kuenen & Migliorini (1950) seleção de materiais.

O segundo aparato era um canal de alvenaria com uma extensão de 31 m e uma largura de 60 cm em cujos primeiros 2 m o fundo tinha uma inclinação de 1:10 e os últimos 4 m tinham

inclinação similar, conforme esquema da Figura 22. Neste aparato, realizou-se, em cada ensaio, uma sucessão de eventos (4 ou 5) que permitiram a identificação de inúmeras feições sedimentares até então não explicadas na literatura. Nestes ensaios, constatou-se a formação de camadas com gradação normal, a formação de sulcos (scuors), laminações convolutas e inúmeras outras estruturas constatadas em afloramentos.

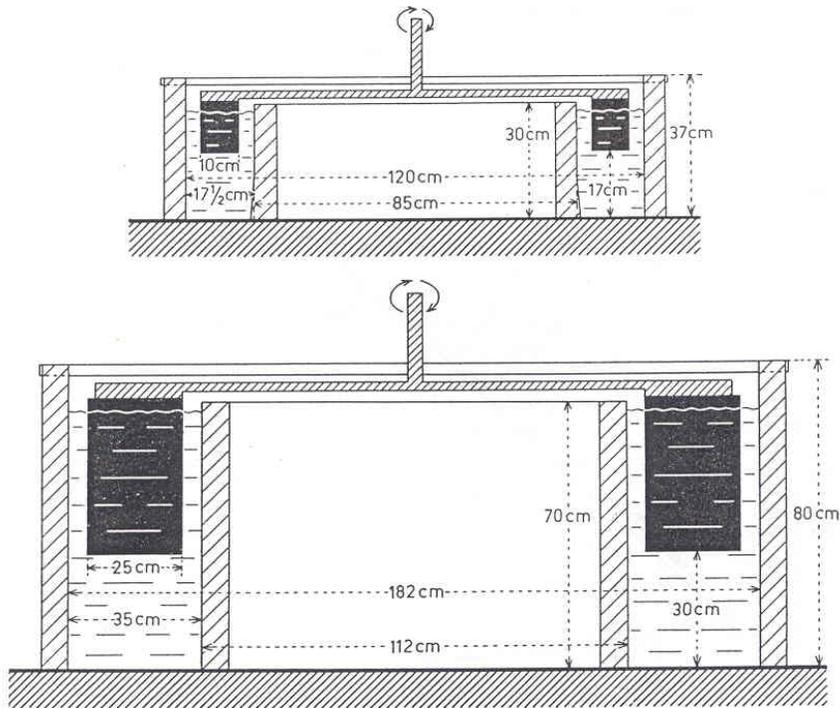
Os parâmetros que foram controlados nos ensaios são a densidade e a granulometria do material de entrada, a espessura e a granulometria depósitos e a velocidade de avanço da cabeça da corrente.



**Figura 22** Aparato utilizado por Kuenen & Migliorini (1950) para estudo de corrente de turbidez de alta densidade.

Uma série de ensaios bastante interessante apresentada em Kuenen (1966) foi realizada em dois canais circulares que procuraram representar em laboratório a desaceleração de uma corrente de turbidez em uma dimensão e um tempo similar ao esperado na natureza. Este experimento bastante inventivo foi realizado porque o autor não notou diferenças significativas nem nos depósitos nem na evolução da corrente quando transpunha as curvas do canal nos ensaios apresentados em 1950. Nestes ensaios, foram utilizados dois aparatos circulares onde pás imprimem a velocidade ao fluxo (Figura 23). Estas pás eram aceleradas até todo o material do experimento entrar em suspensão e desaceleradas gradualmente até a sua parada completa. Neste trabalho, Kuenen procurou demonstrar a formação de laminação plano-

paralela pela ação seletora do carpete trativo basal de uma corrente de turbidez. Nele foi reproduzida a seguinte seqüência de estruturas : gradação normal, ripples, estruturas convolutas e laminação plano paralela.



**Figura 23 -Canais circulares utilizados por Kuenen(1966).**

Middleton (1966 a e b, 1967) apresentou, em três artigos, a base de praticamente todo conhecimento da dinâmica das correntes de turbidez. Seu trabalho consta de duas séries de experimentos: uma com 40 ensaios no qual estudou o comportamento de correntes conservativas e uma segunda, com 22 ensaios, onde estudou as correntes não-conservativas.

Foi utilizado nos experimentos um canal de plástico transparente com 5 m de comprimento, 50 cm de altura e 15,4 cm de largura (Figura 24). O sistema de alimentação das correntes foi realizado de duas formas. Nas correntes conservativas, nas quais utilizou soluções salinas, a alimentação foi feita continuamente a partir de um reservatório posicionado acima do canal através de um tubo que conduzia a corrente na base do canal e havia um controle da vazão injetada. Nas correntes não-conservativas, nas quais utilizou uma mistura de grãos de poliéster e água, a alimentação foi feita por pulsos a partir de uma caixa posicionada dentro do canal, com uma porta lateral que era removida rapidamente.

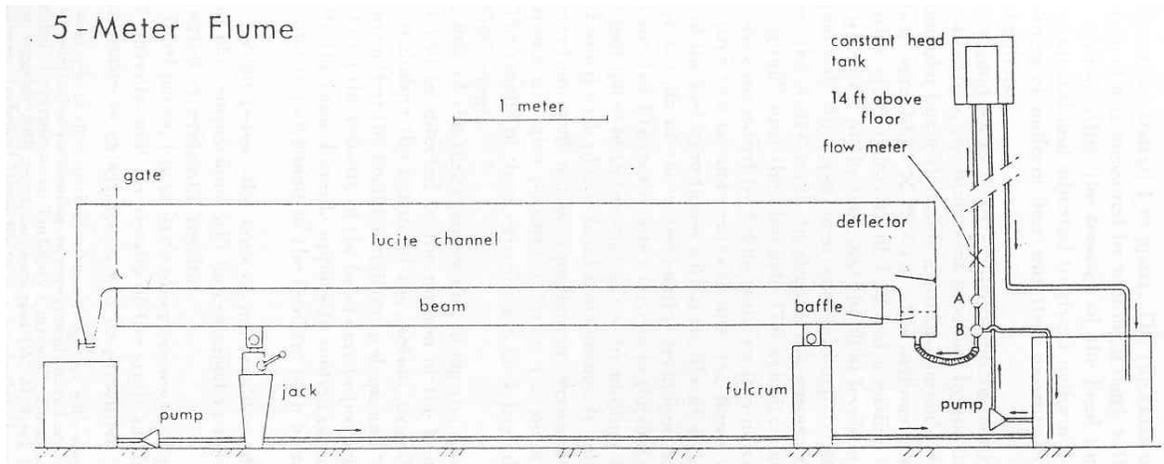
A observação dos ensaios foi feita por filmagem e por medidas pontuais da altura da cabeça e da velocidade da corrente a cada metro. Para analisar a estrutura interna da corrente, adicionou cerca 1% grãos de poliéster de cor diferente cujo movimento pode ser observado na análise quadro a quadro do filme.

O sedimento depositado foi amostrado a cada 50 cm a partir da saída da caixa de alimentação até 350 cm, através de um amostrador circular com 5 cm de diâmetro e a amostra foi dividida verticalmente em intervalos de 1.5 mm. Após a amostragem, todo o depósito foi seccionado longitudinalmente para o estudo das estruturas internas. As análises granulométricas foram realizadas através de um tubo de acumulação visual, que é baseado na velocidade de sedimentação.

Como resultado foram analisadas a espessura dos depósitos, a variação granulométrica na vertical e horizontal, o mecanismo de deposição e a orientação dos grãos. Suas principais conclusões foram:

1. a cabeça da corrente de turbidez é uma região bem definida com fluxo ascendente e divergente onde não há deposição ou erosão;
2. a velocidade de deslocamento da cabeça se mantém quase constante até uma certa distância do ponto de alimentação. Há, porém, uma rápida deposição após a passagem da cabeça. São formadas ondas de Kevin-Helmholtz na interface superior corrente pelo efeito cisalhamento do fluxo pelo fluido envolvente;
3. a espessura dos depósitos permanece quase constante nas regiões onde a velocidade da cabeça esteve constante. A espessura do depósito depende da concentração inicial da corrente;
4. observou-se a granodecrescência vertical e horizontal dos depósitos. A gradação na horizontal foi motivada pelo carregamento das partículas mais finas pela corrente diluída ocorrendo a predominância na fração mais grossa nas porções proximais. A gradação vertical é atribuída à maior velocidade de queda das partículas mais grossas.
5. observaram-se quatro estágios de deposição nos fluxos de baixa e alta concentração. Todavia, estes estágios guardam diferenças significativas que estão condicionadas às condições de fluxo durante a passagem da corrente de densidade.

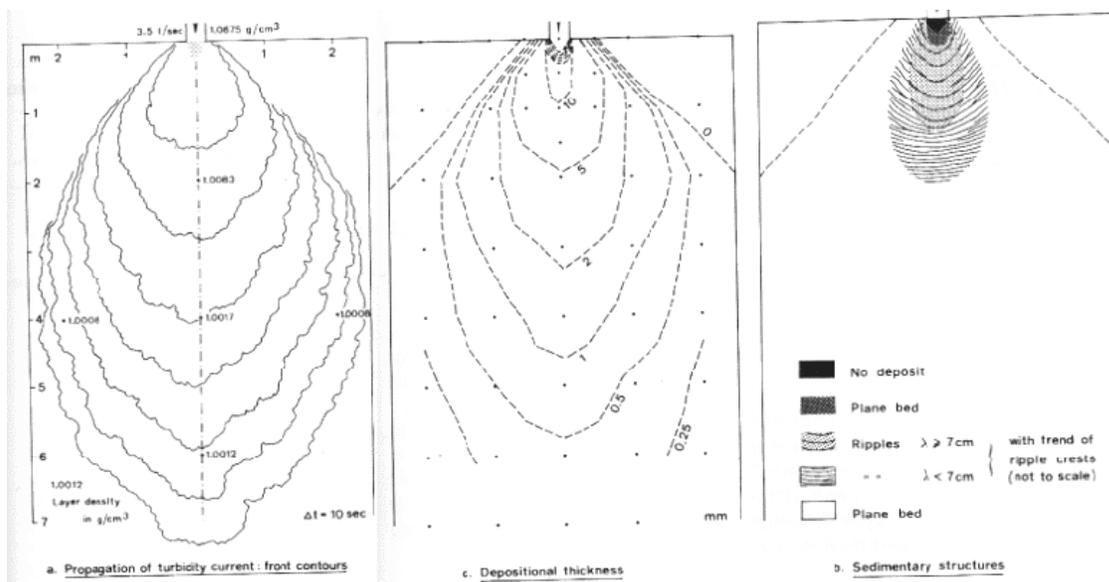
6. verificou-se a orientação de partículas irregulares paralelamente ao fluxo.



**Figura 24** Esquema do canal utilizado por Middleton (1966a,b, 1967).

Middleton (1993) fez uma revisão de todos os estudos de simulação física realizados a partir de seu trabalho de 1967. Nele, são listados apenas 25 trabalhos, sendo que a grande maioria destes foram realizados a partir do final da década de 80, período que marca a retomada dos estudos experimentais. Neste artigo, o autor discute as soluções encontradas para resolver os problemas da mudança de escala entre as correntes de turbidez encontradas na natureza e aquelas modeladas em laboratório e indica como solução a utilização de materiais de baixa densidade como plásticos e carvão.

Dos trabalhos listados no artigo citado destacamos três. Laval et alli (1988) realizaram experimentos comparando o comportamento de correntes conservativas e não-conservativas utilizando sedimento e sal para aumentar a densidade da corrente em seus experimentos. Garcia & Parker (1989) estudaram correntes de solução salina para investigar a erosão em leitos de areia e silte. Lutti (1980 a, b e 1981) simulou correntes de densidade não-confinadas com a formação de depósitos geometria lobada em um tanque com 10 m de comprimento, 6 m de largura e 1m de profundidade. Utilizou quartzo na fração silte como sedimento. Ele identificou a formação de estruturas de tração nas áreas proximais dos depósitos (Figura 25).



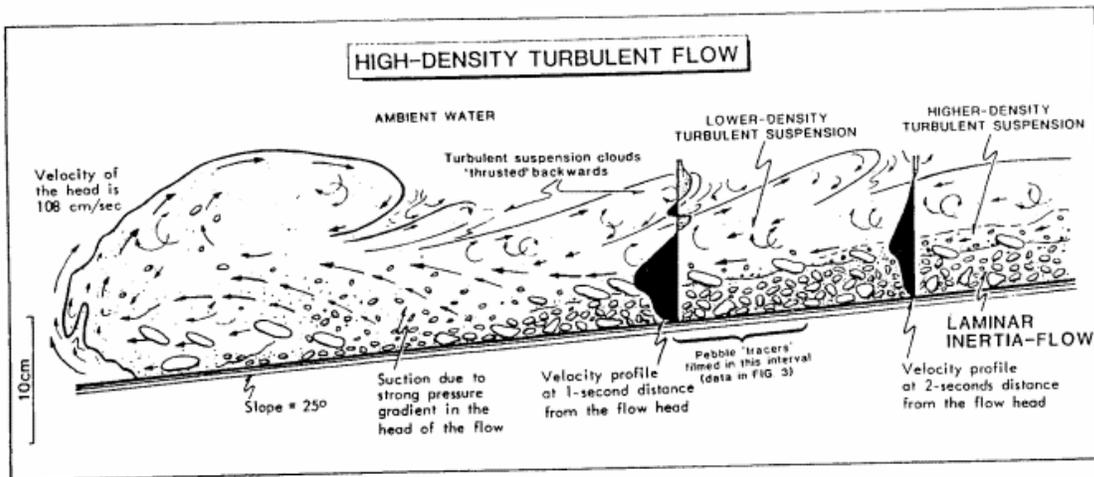
**Figura 25 Resultados experimentais de Lutti (1981): a) evolução da corrente durante o fluxo; b) formas de leito identificadas nos depósitos e c) espessura da camada depositada.**

Um importante trabalho experimental associado a observações de afloramentos foi apresentado por Postma et alli (1988).

O aparato utilizado foi um canal com 4m de comprimento, 25 cm de largura e 60 cm de profundidade utilizando como sedimento um amplo espectro granulométrico desde seixos até argila onde predominam seixos (4-16mm) com 40% em peso.

Os experimentos foram realizados com o fundo do canal coberto por uma camada de areia e com uma inclinação de 25°.

O ensaio foi filmado com 70 frames por segundo, para estudar os mecanismos de transporte dos seixos sendo observada a rápida formação de uma densa e altamente concentrada camada de seixos e areia próxima a base, com fluxo laminar, em contraste com uma rápida, turbulenta e pouco concentrada camada situada na porção superior do fluxo (Figura 26). Por meio deste comportamento explicou a formação de vários padrões deposicionais encontrados em sedimentos turbidíticos.



**Figura 26 Principais estruturas de fluxo verificadas por Postma et al. (1988).**

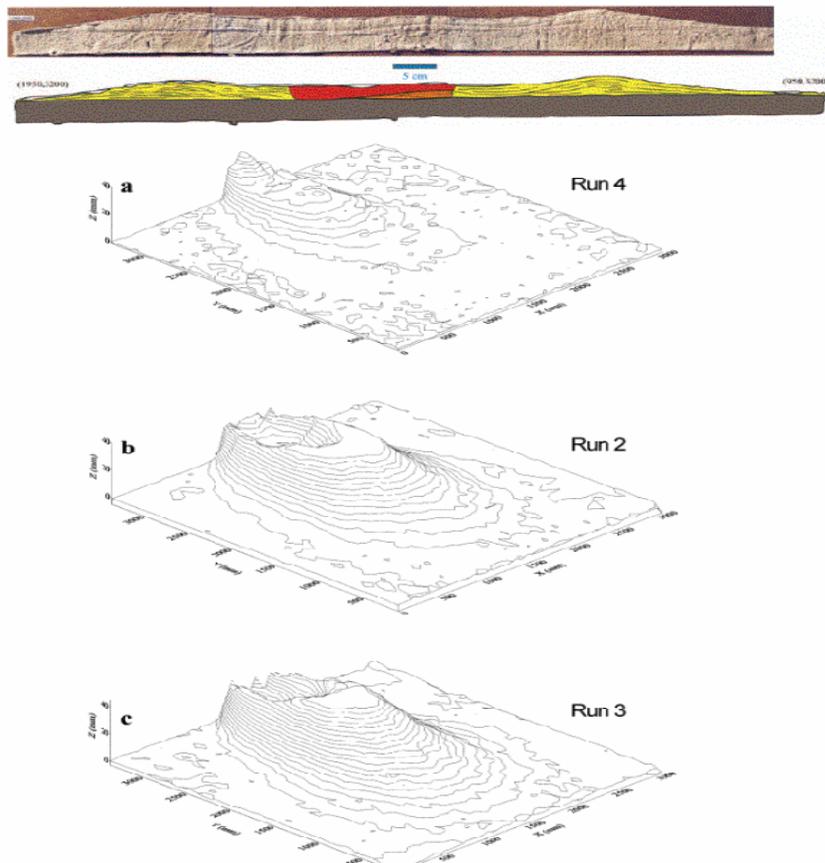
Neste período de retomada dos estudos físicos de correntes de turbidez foram formadas três grandes escolas para estes estudos nos laboratórios de Saint Anthony Falls na Universidade de Minnesota nos Estados Unidos, da Universidade de Leeds, no Reino Unido e na Universidade de Utrecht, na Holanda. Todos estes centros desenvolveram canais de pequeno e médio porte e tanques para estudos de correntes não-confinadas e estão equipados com os mais modernos métodos de observação. Para uma visão geral destes métodos, sugerimos a leitura do artigo de Peakall et al. (2001).

Desta nova geração de pesquisas, destacamos o trabalho de Baas et al. (2001) pela similaridade com a nossa proposta de estudos. Embora o principal autor esteja ligado ao grupo de Leeds, seu trabalho foi no laboratório da Universidade de Utrecht utilizando um aparato que possui um canal com 4 m de comprimento, 22 cm de largura e 50 cm de profundidade com inclinação variando entre 0° e 8.6° e um tanque de expansão quadrado com 4 m de extensão lateral e 1 m de profundidade. A alimentação é feita continuamente a partir de um tanque de mistura.

Para tanto, foram utilizados três tipos de sedimentos: areia fina mediamente selecionada ( $D_m=0.235$  mm), areia muito fina bem selecionada ( $D_m=0.069$  mm) e esferas de vidro com  $D_m=0.040$  mm, tendo adicionado ao sedimento uma pequena fração de grãos coloridos ao material injetado.

Cada fluxo teve duração entre 11 e 14 s com a vazão variando entre 7,8 e 5,2  $\text{L s}^{-1}$ . O fundo do tanque de expansão foi recoberto por uma camada de sedimento igual ao colocado em suspensão para permitir a erosão.

Em seus experimentos, observou a divisão do fluxo em uma camada basal mais densa e uma superior mais diluída. Verificou, como outros pesquisadores, que a velocidade no corpo da corrente é 2.0 à 2.9 superior a da cabeça, e na saída do canal, verificou desenvolvimento de salto hidráulico. No canal não foi verificada a criação de depósitos significativos e na área não-confinada a sedimentação formou uma geometria em leque onde se distinguem o canal, os leves e o lobo. No salto hidráulico, constatou-se, primeiramente, uma área com erosão e logo em seguida espessamento dos depósitos. Notou-se uma correlação entre a geometria dos depósitos com os parâmetros investigados pelo estudo como a granulometria do sedimento e a sua concentração (Figura 27).



**Figura 27** Depósitos observados por Baas et al (2004).

#### 4.16 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O primeiro impulso no conhecimento da sedimentação marinha profunda foi dado no final da década de quarenta pelos trabalhos de dois geólogos, Kuenen e Migliorini. Estes geólogos desenvolveram estudos sedimentológicos isolados para explicar a origem dos sedimentos com estruturas gradacionais que tanto intrigavam os estudiosos da época. O primeiro realizou o seu trabalho descrevendo afloramentos no norte da Itália, enquanto o segundo fez experimentos físicos de correntes de turbidez de alta densidade. Ao associarem as suas observações durante o 18º Congresso Internacional de Geologia (Londres), eles escreveram o artigo “Turbidity Currents as a Cause of Graded Bedding” (Kuenen & Migliorini, 1950) que foi um marco nesta área do conhecimento geológico. A partir de então, estes depósitos sedimentares passaram a ser normalmente chamados de turbiditos.

Iniciou-se, assim, uma intensa pesquisa dos mecanismos de formação não só dos turbiditos, mas de todas as rochas sedimentares em ambiente marinho profundo, que redundaram em importantes descobertas de hidrocarbonetos. Foi, principalmente, após os anos 70, que estes depósitos passaram a ter uma grande importância econômica, o que despertou o interesse dos pesquisadores e da indústria de petróleo. Neste período, veio a público o trabalho de Middleton & Hampton (1976) que passou a ser um grande marco no conhecimento deste contexto sedimentar. Nele, os autores reuniram as pesquisas de simulação física, que haviam sido desenvolvidas em correntes de turbidez por Middleton e de fluxos de detritos, por Hampton. Desta forma, eles realizaram uma síntese onde foram discutidas as formas de como estes processos podem se desenvolver na natureza de forma contínua. Este conceito influenciou de maneira marcante todas as demais pesquisas que foram desenvolvidas nesta área do conhecimento geológico.

Uma outra contribuição importante foi dada por Lowe (1982) que, ampliando os conceitos de Middleton & Hampton (1976), apresentou uma proposta na qual descreve os mecanismos de fluxo em que são desenvolvidos os processos de transferência de sedimentos em ambientes marinhos profundos. Esta proposta foi embasada nos estudos em laboratório sobre fluxos de sedimentos fluidizados.

Entre os anos 80 e 90, as idéias sobre os processos de sedimentação marinha estavam bem estabelecidas e praticamente todos os esforços dos pesquisadores concentraram-se no estabelecimento de modelos conceituais sobre sistemas turbidíticos. Somente no final dos anos 90, uma grande polêmica foi iniciada sobre o real mecanismo de transporte de sedimentos da

plataforma para águas profundas. Ela foi motivada principalmente pelas idéias sintetizadas no artigo de Shanmugam (2000), que se baseou em experimentos físico com fluxos de detritos arenosos (sands debris flows) e pelas observações de campo realizadas por ele. Suas idéias contrariavam o paradigma da exclusividade das correntes de turbidez para explicar a presença de sedimentos arenosos no fundo oceânico. A partir deste artigo, foram surgindo novas possibilidades para explicar a sedimentação em ambiente marinho profundo.

Esta discussão já se delineava no artigo de Middleton (1993), no qual o autor destacava dois problemas básicos nos estudos dos turbiditos. O primeiro problema é saber se estes foram realmente gerados por correntes de turbidez ou por um outro tipo de fluxo gravitacional. Já o segundo seria se as estruturas e as texturas geradas no depósito podem trazer muita informação sobre a natureza e a dinâmica do fluxo que transportou os sedimentos. Por coincidência ou não, este autor foi responsável por outro marco no entendimento dos processos de sedimentação marinha profunda com seus estudos em simulação física de correntes de turbidez realizados na década do sessenta.

Pelo breve histórico que apresentamos podemos ver a importância que os estudos de modelagem física tem oferecido ao conhecimento dos processos sedimentológicos de águas profundas.

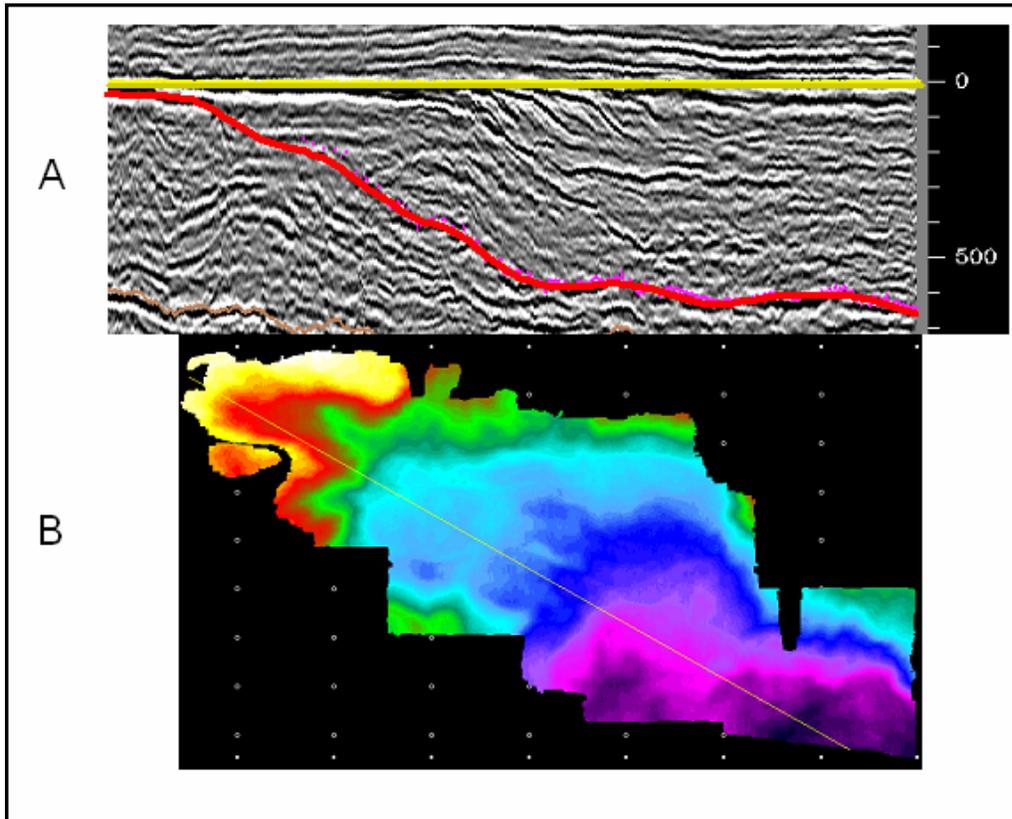
## **5 METODOLOGIA**

### **5.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA**

O objetivo da pesquisa é estudar como se desenvolve de um sistema turbidítico natural através de um modelo físico em escala reduzida. Inicialmente, foi necessário escolher um sistema real do qual se tivessem informações sobre a sua geometria e sobre a características dos depósitos a ele associados. Para isto, foram utilizadas informações de um sistema turbidítico antigo situado na margem oriental brasileira de onde se dispunham das informações necessárias. Na Figura 28 temos uma imagem da topografia deste sistema em seção e em planta.

Para esta pesquisa, optou-se por simplificar a geometria do substrato para que não fossem inseridas muitas variáveis, que poderiam dificultar as investigações. Optou-se por considerar o cânion que, no protótipo, apresentava uma certa sinuosidade, como retilíneo. O declive, que apresenta-se com pequenas variações, foi considerado inicialmente plano, passando a um declive inicialmente mais elevado, para um menor e voltando a ser plano. Os depósitos que preenchem este sistema são constituídos por terrígenos, onde a sedimentação de fundo é de

característica batial e é constituída por folhelhos, siltitos. Intercalados a estes sedimentos ocorrem corpos arenosos turbidíticos de granulometria predominante grossa à conglomerática. Os corpos arenosos individualmente apresentam espessuras que variam de centímetros a alguns metros, podendo atingir, raramente, uma dezena de metros.

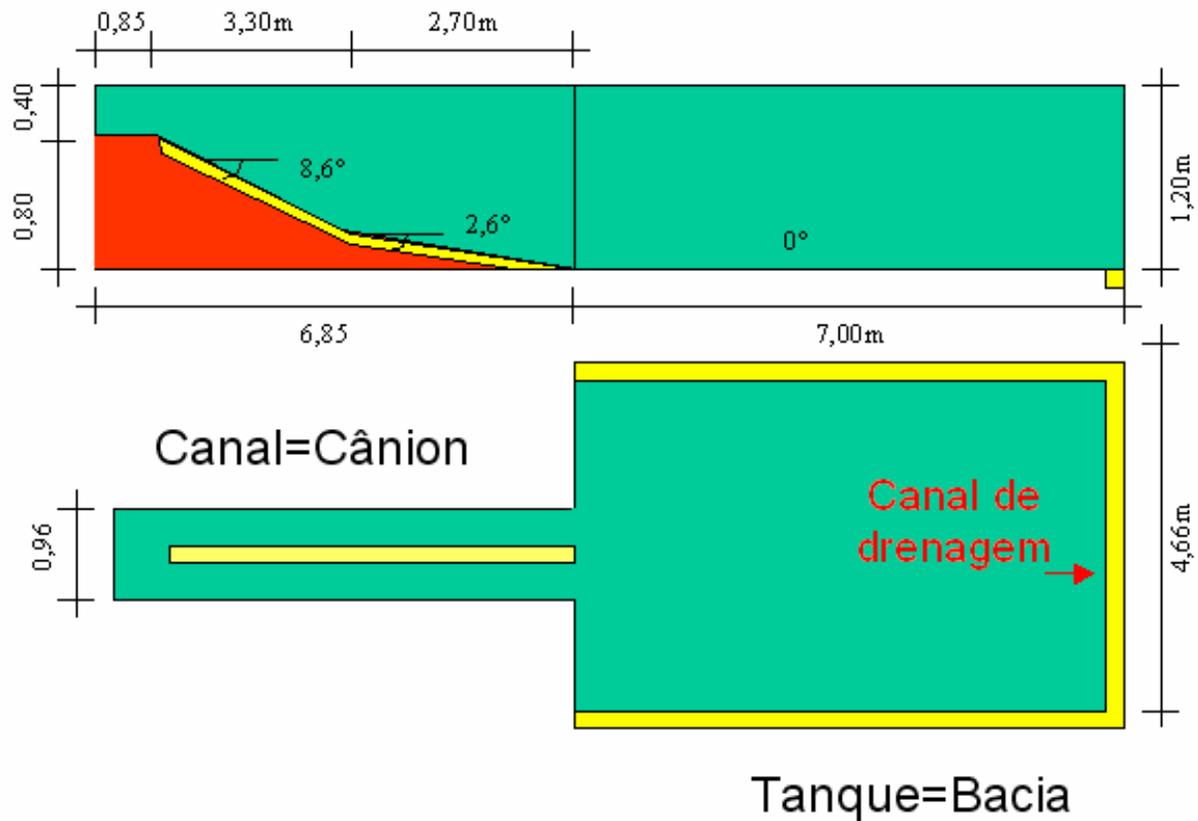


**Figura 28 – A) Imagem de uma seção sísmica longitudinal ao paleocanion utilizado como protótipo de nosso modelo. B) Mapa em planta onde a topografia do paleocanion é representada através de uma escala de cores onde as porções mais rasas estão em cor amarela e a mais profunda em roxo**

## 4.2 APARATO EXPERIMENTAL

Para realização do estudo foi construído no Núcleo de Correntes de Densidade do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul um modelo em alvenaria com geometria simplificada composto de um canal retilíneo com  $L=6,85$ ,  $W= 0,96$ ,  $H=1,20 - 0,40$  m e uma bacia com  $L=7,00$ ,  $W= 4,66$ ,  $H=1,20$ m (Figura 29). O canal representa um talude que apresenta três seguimentos: um trecho plano de 0,85 m onde é feita a alimentação das correntes, um plano inclinado com  $8,60^\circ$  de 3,30 m e um seguimento final com 2,70 m e inclinação de  $2,6^\circ$ . A bacia tem o fundo plano. No centro do canal, foi construída uma calha

parabólica com 5,70m de comprimento, 0,20 m de largura e 0,08m de profundidade para confinar o fluxo (Figura 30). No final do tanque, há um canal de drenagem que captura o material em suspensão evitando a reflexão da corrente. Quatro janelas de vidro foram instaladas na lateral do tanque para a visualização do fluxo. Três delas se encontram no canal com dimensões de aproximadamente de 50cm de largura por 100cm de altura e 1,0cm de espessura a outra na saída do canal à direita com 60cm de largura por 100cm de altura e 1,0cm de espessura.



**Figura 29 – Esquema mostrando o arranjo experimental as dimensões do modelo utilizado.**

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

Dois reservatórios auxiliares, com capacidade de 2,00 m<sup>3</sup> cada, armazenam a mistura a ser injetada no canal. Os reservatórios são situados 4,00 m acima do ponto de alimentação e possuem uma tubulação de saída, ligado a um medidor de fluxo eletromagnético. A agitação do

material é realizada por hélice acionada por um motor situada no interior dos reservatórios. A velocidade do motor pode ser controlada através de um conversor de frequência, instalado abaixo do reservatório (Figura 31A).



Figura 30 Figura 4.3 – Fotografias das instalações utilizadas. A esquerda detalhe dos reservatórios onde foram realizadas as misturas de carvão com água, as instalações hidráulicas e o sistema de medição e coleta de amostras. A direita detalhe do tanque onde foram realizados os ensaios.

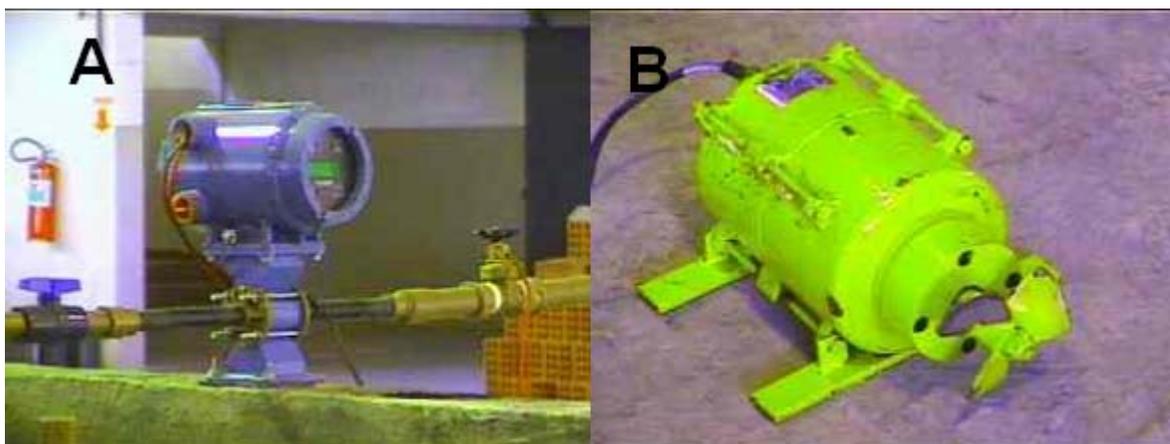


Figura 31 - A) medidor eletromagnético de vazão; B) agitador da mistura.

A alimentação do reservatório é feita por tubos de 50mm derivada da canalização de abastecimento do Instituto e a descarga é feita por uma saída de 50mm junto ao fundo do reservatório que leva o material até o medidor eletromagnético de vazão (20mm), responsável pelo controle de material injetado no canal. Um tubo flexível foi instalado na saída do medidor de vazão até o ponto de alimentação material no canal tridimensional de geometria simplificada (Figura 31B).

## 5.2 EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTAÇÃO

### 5.2.1 Filmadoras digitais

O registro visual dos ensaios foi realizado com duas filmadoras digitais SONY, modelos DCR-TRV110 (Figura 32A) e DCR-TRV120 (Figura 32B), cujas principais características técnicas as seguintes: sistema da gravação digital 8 mm, resolução horizontal 500 linhas (240 sistema VHS-C), zoom ótico 25 x, taxa de transferência 29.97 quadros/segundo.



Figura 32 - A) Filmadora modelo DCR-TRV110 e; B) Filmadora modelo DCR-TRV120

### 5.2.2 Câmara fotográfica digital

O registro visual dos depósitos foi utilizada uma câmara digital SONY, modelos Mavica, cujas principais características técnicas as seguintes: resolução 3.2 megapixel e zoom ótico 25 x.

### 5.2.3 Ecógrafo Ultra-sônico

O equipamento de ecografia por ultra-som utilizado foi o modelo LOGIQ  $\alpha$  100 MP TM fabricado pela General Electric, normalmente utilizado para fazer exames clínicos com uma sonda linear. A capacidade do “scanner” em revelar aspectos internos à corrente de densidade foi aplicada à identificação da geração de vórtices na interface mistura-fluido ambiente e na identificação do

perfil interno de densidade. Na Figura 33, apresenta-se o equipamento utilizado nos ensaios assim como a montagem do aparato experimental. A figura mostra a fotografia de uma corrente, estando a frente de propagação sob a sonda linear do “scanner”. Nota-se a dificuldade de individualização dos vórtices na interface na imagem fotográfica. No quadro abaixo, temos a imagem ecográfica onde se pode observar a capacidade desta imagem de revelar aspectos internos à corrente de densidade.

A seleção apropriada de parâmetros de controle do ecógrafo proporciona a obtenção de imagens de alta qualidade. A qualidade da visualização é aprimorada pelas diferentes rotinas de medição e cálculo disponíveis no sistema. Os ensaios realizados foram registrados através de um videocassete conectado à saída de vídeo.

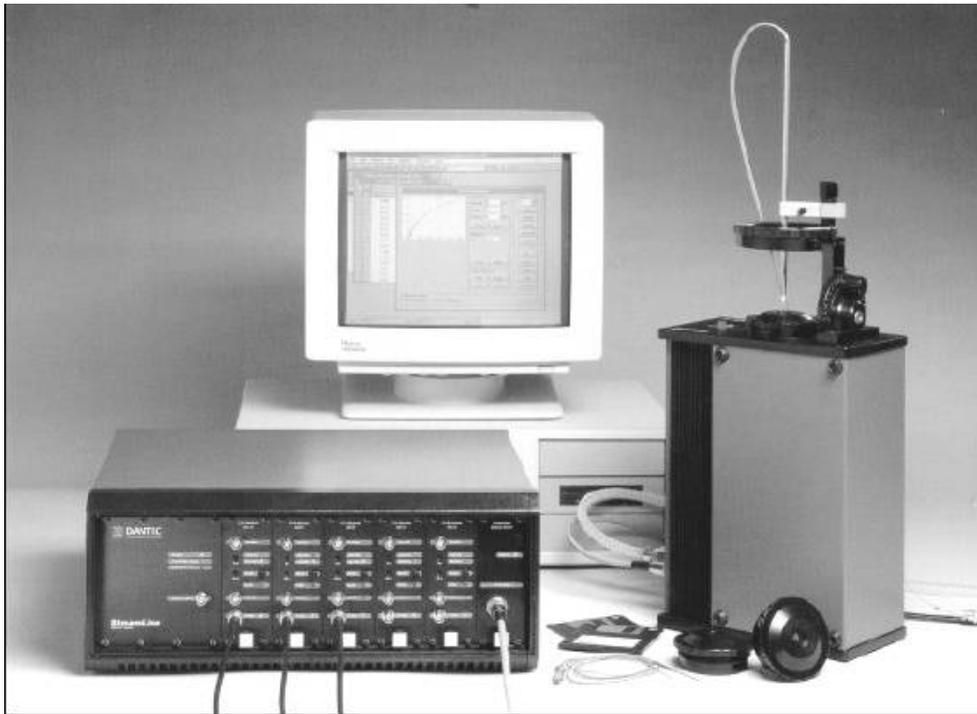


**Figura 33 – À esquerda é apresentado o ecógrafo utilizado nos ensaios. À direita acima temos uma fotografia do arranjo experimental em um canal bidimensional com a sonda linear situada acima. A direita abaixo é apresentada uma imagem da corrente de densidade ecográfica que representa o registro da passagem da corrente sob a sonda, permitindo, claramente, a identificação do vórtice na interface, com a incorporação de fluido ambiente à corrente.**

#### **5.2.4 Anemômetro de filme quente**

A anemometria de filme quente foi utilizada como principal ferramenta de análise quantitativa de propriedades do escoamento. Particularmente adequados para aplicação em laboratório, este tipo de equipamento realiza medidas com alta resolução espacial e temporal, podendo ser utilizado no escoamento de líquidos e gases com níveis de turbulência baixo e moderado – geralmente inferior a 25%.

Seu princípio de funcionamento é razoavelmente simples e baseia-se na transferência de calor por convecção entre um pequeno elemento metálico aquecido eletricamente e o fluido circundante. Em sua versão mais usual, conhecida como Anemômetro de Temperatura Constante, o elemento sensor representa um dos resistores da ponte. Quando exposto ao movimento do fluido, este elemento tende a se resfriar, provocando alterações em sua resistência elétrica. Nestas condições, o controlador do circuito é imediatamente acionado, ajustando automaticamente o valor da corrente elétrica para restabelecer a temperatura do sensor e, conseqüentemente, o equilíbrio da ponte. Assim, a velocidade local instantânea do escoamento pode ser determinada, medindo-se a diferença de tensão na saída do circuito que alimenta a sonda e realizando-se, em seguida, a conversão deste sinal elétrico em velocidade.

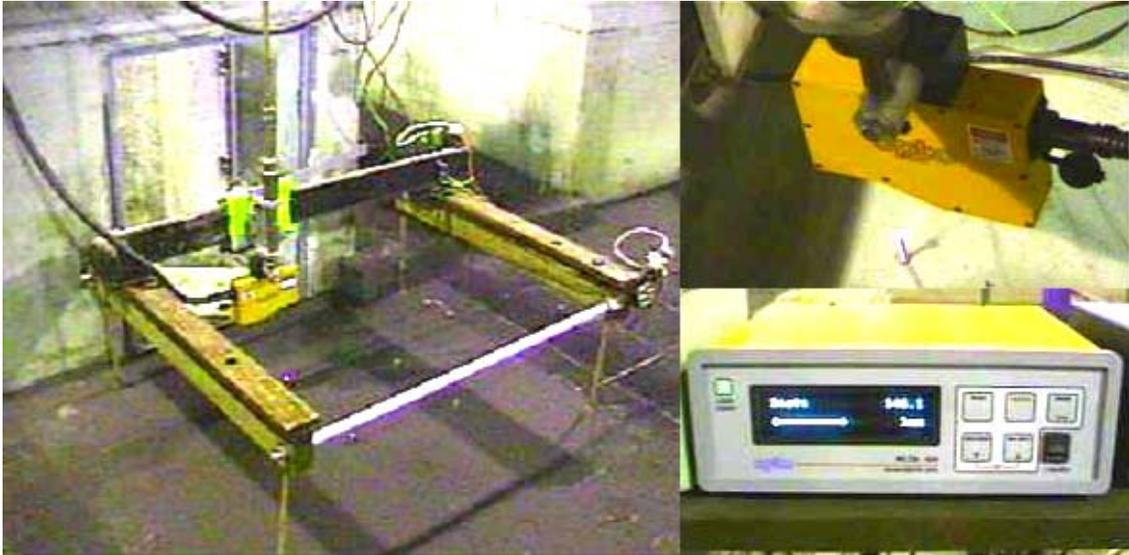


**Figura 34 - Anemômetro de filme quente utilizado.**

### **5.2.5 Medidor de distância a laser Opto MD250 ADV**

Um medidor de distância a laser, acoplado a um sistema de movimentação foi utilizado para se levantar a superfície dos depósitos. O equipamento denominado MD250 ADV, é um medidor de distância à laser de alta precisão (Figura 35), destinado à avaliação de distâncias em um campo de medição de 10cm a 35cm. Realiza as medidas sem contato físico entre o medidor e o objeto alvo, com uma boa precisão (0,1mm), durabilidade e rapidez (100 medidas/seg).

O sistema de movimentação e de aquisição de dados do medidor de distância foi desenvolvido no laboratório do instituto (Figura 35) a partir de uma placa digital com entradas e saídas analógicas e digitais. Esta placa comanda o movimento uma mesa equipada com eixos sem-fim, diretamente conectados a motores de corrente contínua cuja tração é monitorada fornecendo as posições iniciais e finais do equipamento. Pode-se programar o número de linhas e colunas da varredura (passo de tempo), além do tempo de estabilização dos sensores.



**Figura 35 - Distanciômetro a laser MD250 ADV e mesa de movimentação.**

### **5.2.6 Ponta linimétrica**

Além das medidas com distanciômetro a laser, foram realizadas medidas de espessuras dos depósitos diretamente utilizando uma ponta linimétrica que é uma régua de precisão posicionada na vertical em uma plataforma fixa que serve de referência. Na sua extremidade, há uma ponteira que permite identificar precisamente o seu contato com a superfície (Figura 36).



**Figura 36 - Detalhe da ponta linimétrica.**

### **5.2.7 Peneiras e balança para análise granulométrica**

Na Figura 37 é apresentado o laboratório onde foram realizadas as análises granulométricas dos depósitos. Elas foram feitas por peneiramento mecânico com as seguintes malhas: <0,063, 0,063, 0,088, 0,125, 0,177, 0,250, 0,350, 0,500 mm. As amostras, após a secagem em estufa, foram agitadas e, posteriormente, o material retido em cada peneira foi pesado em uma balança eletrônica.



**Figura 37- Laboratório de sedimentologia utilizado para análises granulométricas.**

### 5.2.8 Siltômetro para determinação de velocidade de queda de partícula

Através de um siltômetro (Figura 38) foram realizados os ensaios de velocidade de queda de partículas de carvão para cinco faixas granulométricas  $<0,063$ ,  $0,063$ ,  $0,088$ ,  $0,125$ ,  $0,177$  m. Esta caracterização foi realizada por meio da metodologia adaptada de (Tarqui,2000). Basicamente, para os ensaios, coloca-se o material a ser ensaiado num recipiente no topo da coluna (Figura 38). Preenche-se a coluna com água através de uma bomba de vácuo e se despeja o material do recipiente. A partir de intervalos predeterminados movimenta-se a bandeja que está sendo depositado. Retira-se material depositado nas calhas, que posteriormente é secado em uma estufa para ser pesado. Considera-se, em termos estatísticos, que a velocidade de queda é a que corresponde a 50% em peso da amostra analisada.

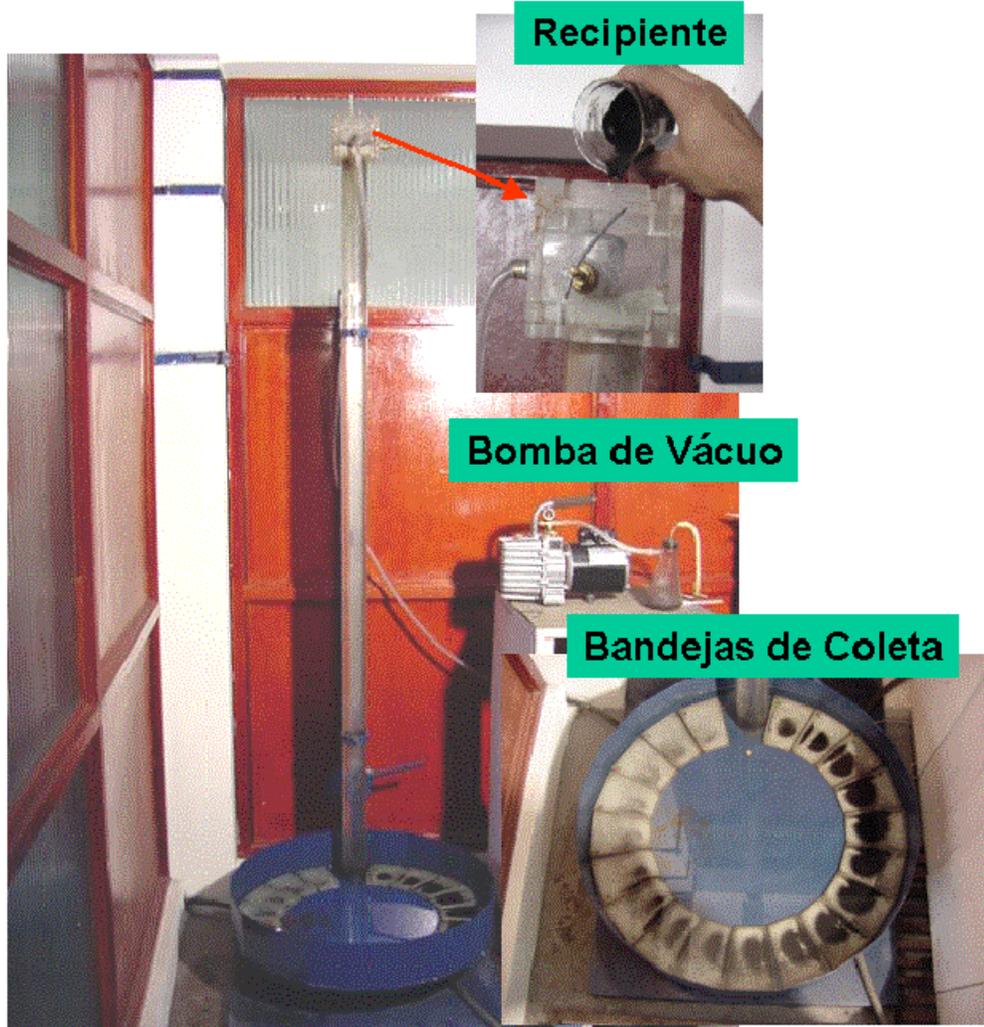


Figura 38 – Siltômetro utilizado nos ensaios de velocidade de queda de partículas.

### 5.3 RELAÇÕES DE SEMELHANÇA

Considerando-se os critérios de semelhança apresentados por Middleton (1966b) para garantir que os ensaios sejam representativos deve haver a similaridade no número de Froude densimétrico, no número de Reynolds e na velocidade de queda adimensionalizada entre o modelo e o protótipo.

Como no caso estudado não é possível a medição destes valores no protótipo, temos que buscar na literatura situações análogas em que estes parâmetros foram medidos. Para o número de Froude densimétrico é necessário obter dados sobre a velocidade de deslocamento da corrente, da gravidade reduzida e da espessura do fluxo. O número de Reynolds pode ser estimado pelas características dos depósitos que indicam a presença de regime de fluxo turbulento sendo desta forma necessário que ele seja superior a 2000.

A velocidade de queda adimensionalizada, que é a razão entre a velocidade de queda terminal do grão de sedimento e a velocidade média da corrente, pode ser obtida pelas características dos grãos do protótipo e do modelo levando em consideração a viscosidade e a concentração de sedimentos que modificam a velocidade de queda efetiva das partículas. A velocidade de queda dos materiais foi determinada analiticamente através da equação de Rubey, empregada para sedimentos em transporte por escoamentos canalizados. A equação de Rubey é a seguinte:

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

$$\text{Sendo: } f = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{gd^3(\beta - 1)}} - \sqrt{\frac{36v^2}{gd^3(\beta - 1)}} \text{ e } \beta = \frac{\rho_m}{\rho_w}$$

onde:  $\omega$  = Velocidade de queda (m/s);  $g$  = Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);  $d$  = Diâmetro do grão (m);  $v$  = Viscosidade cinemática (m<sup>2</sup>/s);  $\rho_m$  = Massa específica do material (kg/m<sup>3</sup>);  $\rho_w$  = Massa específica da água (kg/m<sup>3</sup>).

#### 5.3.1 – Valores característicos do protótipo

Zeng & Lowe (1997) apresentaram uma compilação das principais informações sobre eventos turbidíticos modernos. Na Tabela 1, apresentamos os resultados desta compilação que servirão de base para nossas análises de semelhança.

**Tabela 1 - Estimativa de características de fluxos turbidíticos modernos (modificado de Zeng & Lowe, 1997).**

Caso	altura do fluxo (m)	Gradiente do talude e inclinação em graus	Velocid. (m/s)	Concentração de sedimento	Volume do fluxo (m <sup>3</sup> )	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Diametro Máximo do grão (mm)
Monterey1	100		2,0 – 4,0	0,05 – 0,1			
Monterey2	100		2,0 – 20	0,003 – 0,1			
Navy 1	25		1,0	0,001 – 0,01	15000	6,5-132	0,5
Navy 2	10		1,5 – 2,0	0,01-0,02			
Navy sec1	<70	0,017-0,95	0,75				
Navy sec2	20	0,01-0,57	0,73	0,00175	15000	26	
Navy sec3	25	0,007-0,38	0,70	0,001	14000	15	
Navy sec4	15	0,007-0,38	0,32	0,00042	38000	16	
Navy sec5	75	0,002-0,11	0,12	0,00038	38000	14	
Grand Bank	270	0,0059-0,33	6,2-7,7	0,35			
Setor H-I		0,0059-0,33	28				
Setor I-J		0,0022-0,12	11,2				
Setor J-K		0,0007-0,04	8,0				
Setor K-L		0,0007-0,04	6,1				
Orleanavill							
Setor 3-5		0,011-0,6	20,5				
Setor 4			2,5				argila
Setor 5		0,0013-0,08	5,1				lama
Silver Ab	35		3,0	0,07			
Leque Nitinat	>100			0,0001			
Lago Walenstadt	5-10		0,06	0,0001-0,0002			
Leque Laurentiano	>100		0,1-0,2	0,002			Silte-argila
Leque Hueneme	10-15		0,75	0,004			
Lago de Zurique	>8		1,15	0,03			
Cadeia Mesoatlantica	30		1,5 – 4,0	0,03-0,12			
Bute Inlet							
Estação 1-2	30-40	0,027-1,5	3,35	0,01-0,005			0,48
Estação 2-3	6-22	0,012-0,69	0,75	0,005-0,003			0,18
Estação 2	>27	0,012-0,69	0,7-1,3		10600	412	0,18
Estação 3	>7	0,008-0,4	0,2-0,3		50000	12	0,18
Var Canyon –42km	30	0,018	9,3-11,3	0,09			
45 km	50	0,014	7,6-9,3	0,06			
59 km	120	0,008	6,2	0,02			
95 km	30	0,0027	2,0	0,015			
122,5 km		<0,002	1,6				

#### 5.4 PROGRAMA DE ENSAIOS

Os ensaios realizados foram desenvolvidos procurando o estabelecimento de procedimentos para obtenção das informações que desejamos investigar. Desta forma, as observações dos experimentos sofisticaram-se a partir dos conhecimentos adquiridos nas etapas anteriores. Como os ensaios demoram cerca de uma semana para serem realizados desde sua preparação até a coleta de amostras para análises granulométricas, não foi possível a realização do número de experimentos que queríamos. Foram realizados 12 ensaios nos quais

puderam ser avaliadas basicamente as influências da densidade da corrente e da vazão de alimentação da corrente.

No primeiro ensaio realizado adotou-se o método de alimentação da corrente a partir de um compartimento situado na extremidade do aparato experimental através de uma porta tipo guilhotina. Utilizou-se este procedimento pela crença de que este tipo de alimentação pudesse melhor representar o fenômeno. Este método se mostrou pouco prático considerando as dimensões do aparato e não possibilitou um controle de dados fundamentais para o estudo como a densidade do material e o controle sobre a variação do volume injetado durante o desenvolvimento da corrente. Nos demais ensaios, optou-se pela alimentação através do sistema hidráulico descrito acima. Neste experimento foi também observada a importância de se esvaziar o tanque a uma velocidade muito baixa visando não afetar as formas de leito dos depósitos.

A partir do quarto ensaio passou-se a se dispor do equipamento de ecografia, o que enriqueceu sobremaneira as observações dos fenômenos. Também neste experimento se passou a investigar a sobreposição de eventos.

Somente no segundo evento do décimo primeiro ensaio foi possível a instalação de anemômetros para medição da velocidade do fluxo durante a passagem da corrente. Infelizmente, o sensor utilizado ficou completamente destruído após o experimento não sendo possível a sua utilização em outras oportunidades.

O distanciômetro a laser pôde ser utilizado operacionalmente apenas no penúltimo experimento e se mostrou uma ferramenta de observação extremamente valiosa.

A Tabela 2 sintetiza as principais características dos ensaios realizados.

**Tabela 2 – Dados Gerais Sobre os Ensaios**

Ensaio	tipo	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Volume (l)	Vazão (l/min)
1 Ago/01	pulso	1,015	120	7-12
2 Manica 1	contínuo	1,005	50	5,0
3 Manica 2	contínuo	1,012	125	5,0
4 Manica 3	contínuo	1,014	125	12,5
5 dez/01Cont	contínuo	1,005	125	5,0
6 fev02Cenpes	contínuo	1,005	125	5,0
7 fev02 Pulso	multievento	1,016	70 (10)	10,0
8 mai02 Pulso	multievento	1,014	100 (10)	8,5
9 mai02 Work	continuo	1,015	125	25,0
10 jun02 Pulso	multievento	1,012	124 (31)	27,0
11 Jan03 Pulso	Multievento	1,042	480 (120)	36,0
12 Dez04 Cont	continuo	1,040	120	10,0

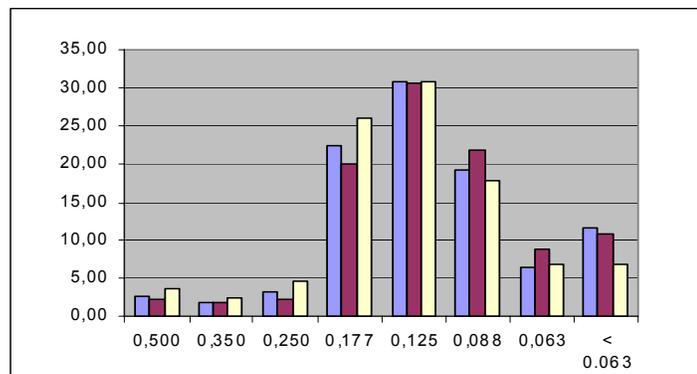
## 6 RESULTADOS

### 6.1 ENSAIO DE AGOSTO DE 2001:

**Tipo:** pulso

**Volume injetado:** 120 litros sem controle preciso de vazão de descarga.

**Material em suspensão:** Carvão 205 não peneirado. A distribuição granulométrica do material em suspensão encontra-se na Figura 39.



**Figura 39 - Histograma da distribuição granulométrica carvão presente na mistura em três amostras coletadas antes liberação da corrente. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira.**

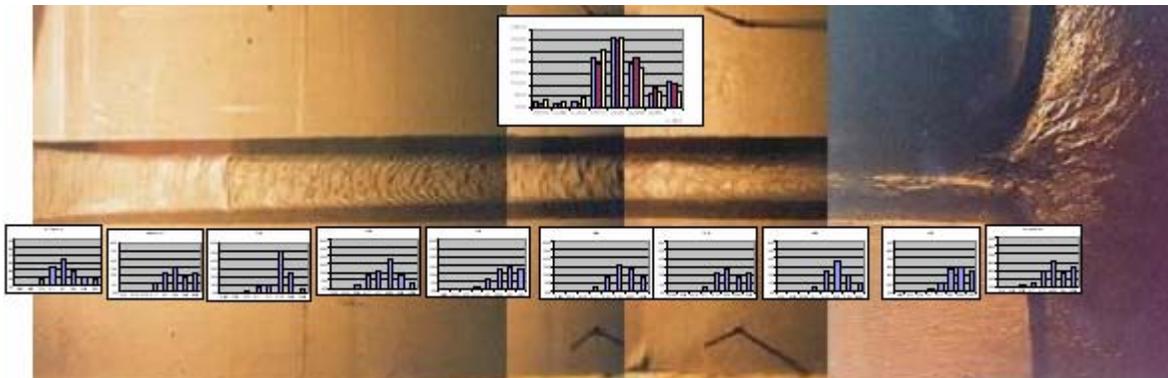
**Massa Específica da Mistura:** 1,015 g/cm<sup>3</sup>

**Documentação:** filmagem da evolução da cabeça da corrente, registro da espessura dos depósitos por ultra-som e ponta linimétrica, análises granulométricas em pontos notáveis do depósito, registro fotográfico convencional das formas de leito.

**Alimentação:** a partir de um compartimento situado na extremidade superior do canal.

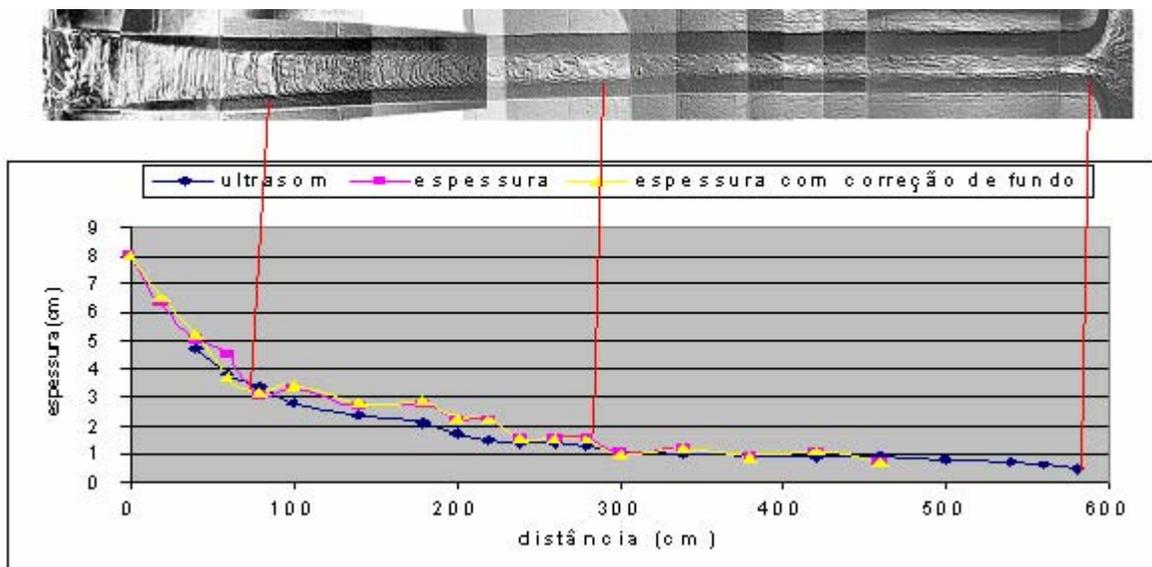
**Característica do fluxo:** A preparação da mistura foi realizada num compartimento situado logo acima do canal isolado por uma comporta vertical. A mistura foi realizada pela agitação intensiva da mistura por alguns minutos antes do ensaio. Assim que foi liberada a mistura ao fluxo através da abertura da comporta formou-se rapidamente uma corrente com o desenvolvimento de uma cabeça bem delimitada. Como não se tinha um controle preciso da vazão de descarga, procurou-se controlar o fluxo mantendo-se a comporta aberta a uma certa altura. Desta forma, foi possível manter o fluxo num regime próximo ao estacionário.

**Propriedades dos depósitos:** Na Figura 40, são apresentadas de forma resumida as principais características dos depósitos que resultaram da corrente de densidade. Nesta figura, pode-se observar uma sucessão de formas de leito desde a zona de alimentação à esquerda até a porção não-confinada à direita. Na parte superior da figura, é apresentada a distribuição granulométrica do material injetado e na parte inferior os histogramas indicam esta propriedade nos depósitos. Estes histogramas apontam um afinamento granulométrico no sentido do fluxo. Devido a problemas durante o esvaziamento do tanque as formas de leito primárias presentes nos depósitos foram praticamente destruídas. Porém, ficaram marcas nos depósitos que representam de forma esquemática curvas de nível. Estas feições secundárias foram geradas porque a velocidade de esvaziamento foi relativamente alta e remobilizou a porção superior dos depósitos. Este fato prejudicou em parte os resultados obtidos. Por outro lado, ele indicou que o topo dos depósitos se apresenta plano nas porções proximais, passando em seguida a apresentar ondulações que sugerem uma sinuosidade do eixo do canal. Na porção não-confinada houve a formação de um leque característico. As análises granulométricas indicam uma tendência geral de afinamento em direção à bacia.

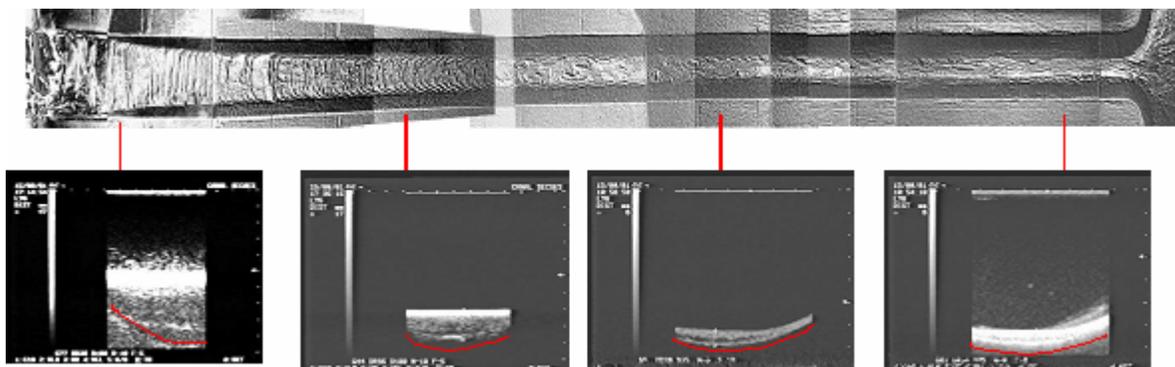


**Figura 40 - Uma vista geral do Ensaio de agosto de 2001 e a relação entre a granulometria do depósito e a distância percorrida pela corrente**

Na Figura 41, procura-se correlacionar as feições observadas com a espessura dos depósitos. As linhas vermelhas verticais delimitam zonas onde os depósitos mostram uma taxa de afinamento praticamente constante. Nestas zonas, pode se verificar que não ocorrem mudanças na tipologia das formas de leito secundárias. Nela também se pode constatar que há uma boa conformidade entre as medidas de espessura realizadas por ultra-som e aquelas realizadas pela ponta linimétrica. Nota-se apenas algum desvio entre 100 e 240 cm onde a superfície do depósito é mais rugosa. Na Figura 42, são apresentadas algumas imagens obtidas pelo ecógrafo indicando a potencialidade da ferramenta para o estudo dos depósitos.



**Figura 41 - Relação entre as formas de leito observadas e a variação da espessura (escala em cm) dos depósitos. Os termos ultra-som e espessura indicam o método de medição com ecografia e ponta linimétrica respectivamente.**



**Figura 42 - Imagens realizadas com ecógrafo em alguns pontos do depósito.**

Na Figura 43, é apresentado um detalhamento das características do depósito nas porções proximais da corrente. Nesta figura, pode-se verificar com maior detalhe as características das formas de leito e como a distribuição granulométrica se desenvolve tanto longitudinalmente como verticalmente. Em pontos a 15 e 30 cm distantes da alimentação foi possível a coleta de amostras segmentando o depósito em três intervalos. As análises granulométricas desta amostras estão representadas pelos histogramas da figura 5 e indicam que houve uma tendência de afinamento granulométrico para o topo. Nas amostras a 15 cm, a moda passa da faixa 0,177 mm na base, para 0,125 mm no meio e 0,088 mm no topo.

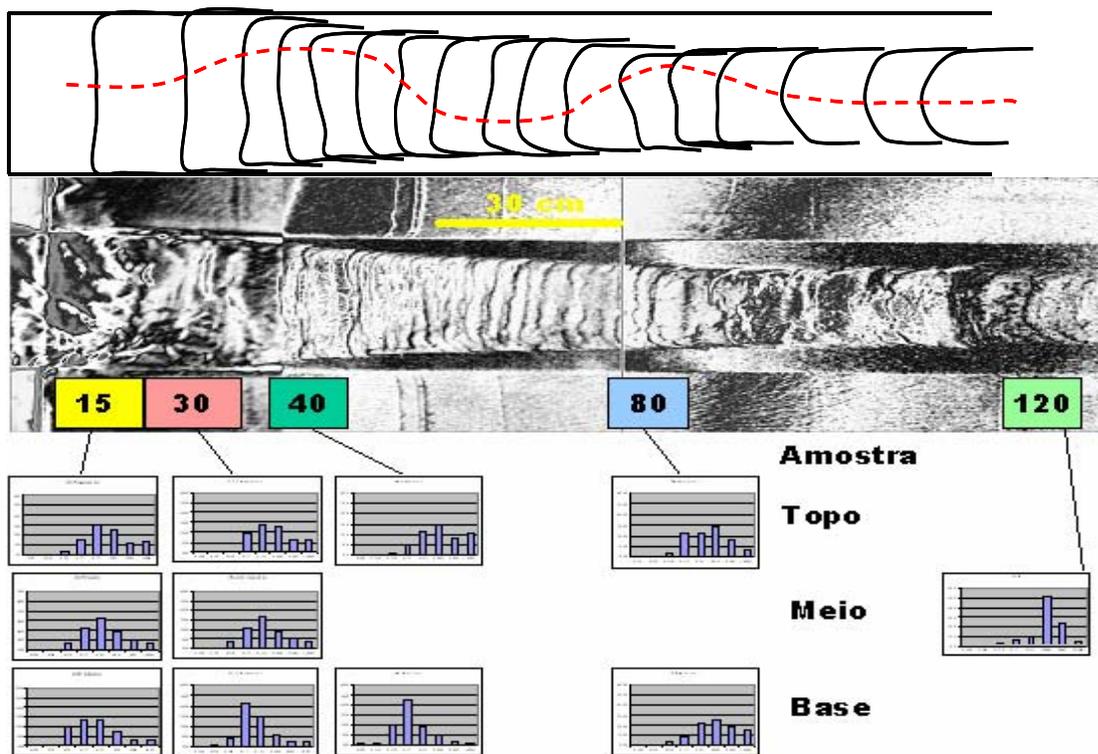


Figura 43 - Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas e o comportamento variação granulométrica na vertical e longitudinalmente. Os números nas caixas coloridas indicam as distâncias entre o início da corrente e o ponto de amostragem.

Situação similar se repete nas amostras a 30 cm com mesmas modas se verificando, contudo, uma melhor seleção. Nas amostras coletadas a 40 e 80 cm, foi possível se dividir os depósitos em base e topo. Nelas, ainda foi verificada tendência de afinamento para o topo com moda na base de 0,125 e no topo de 0,088. É importante observar que, nas amostras coletadas no topo a 15, 30 e 40 cm, há uma ligeira tendência de aumento da fração fina (à direita do histograma) indicando a presença neste intervalo de uma contribuição do processo de decantação de partículas. Na porção superior da figura, apresenta-se um esquema que mostra o comportamento das curvas de nível dos depósitos onde se verifica que embora o canal tenha sido construído reto, após a formação dos depósitos o seu eixo mostra uma sinuosidade não presente antes da deposição.

Na Figura 44, verifica-se o mesmo comportamento de forma de leito com as curvas de nível indicando o mesmo padrão sinuoso do canal. A distribuição granulométrica mostra uma tendência de aumento proporcional das frações mais finas. Já na Figura 45, nota-se uma mudança significativa no padrão dos depósitos, principalmente entre 300 e 360 cm, onde a sua espessura, assim como, a distribuição granulométrica se mantenha constante. Mesmo que ainda seja verificado o padrão sinuoso no canal, ele é menos acentuado que os anteriores. Este comportamento se mantém no segmento apresentado na Figura 46.

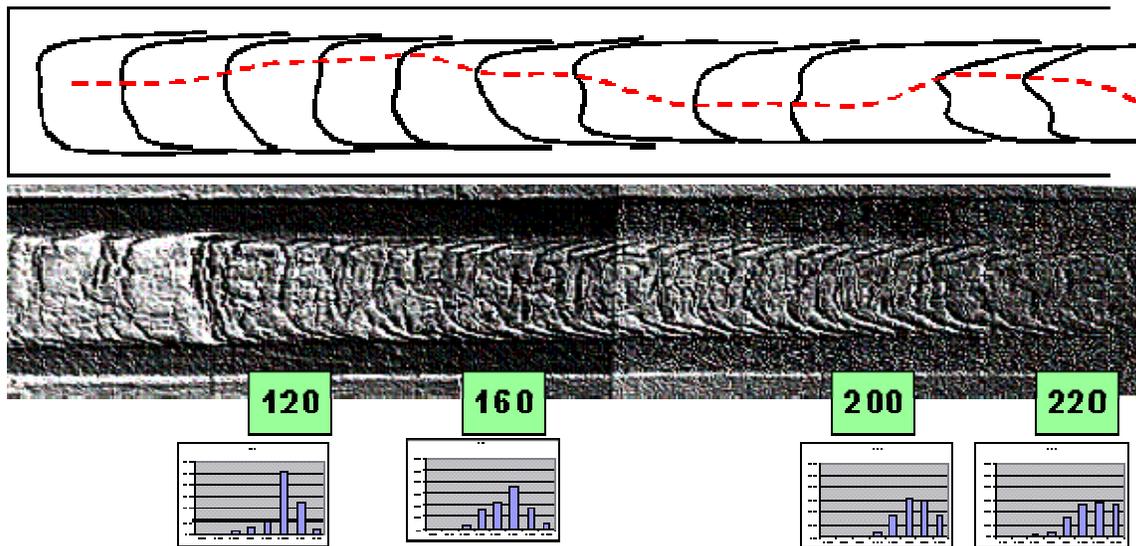
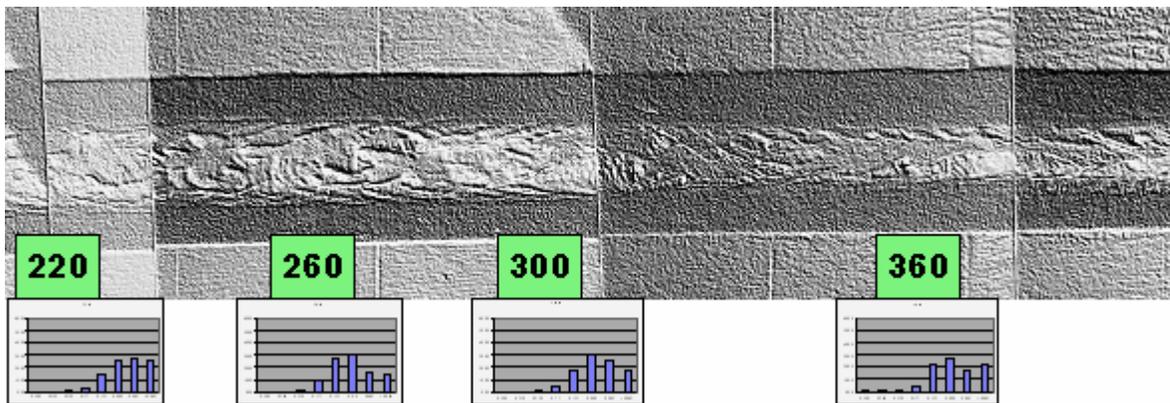
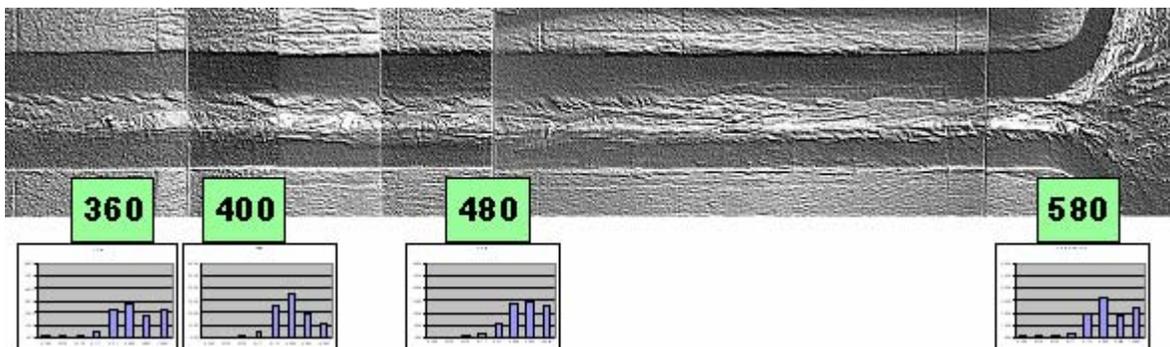


Figura 44 - Detalhe do depósito em continuação da Figura 43.



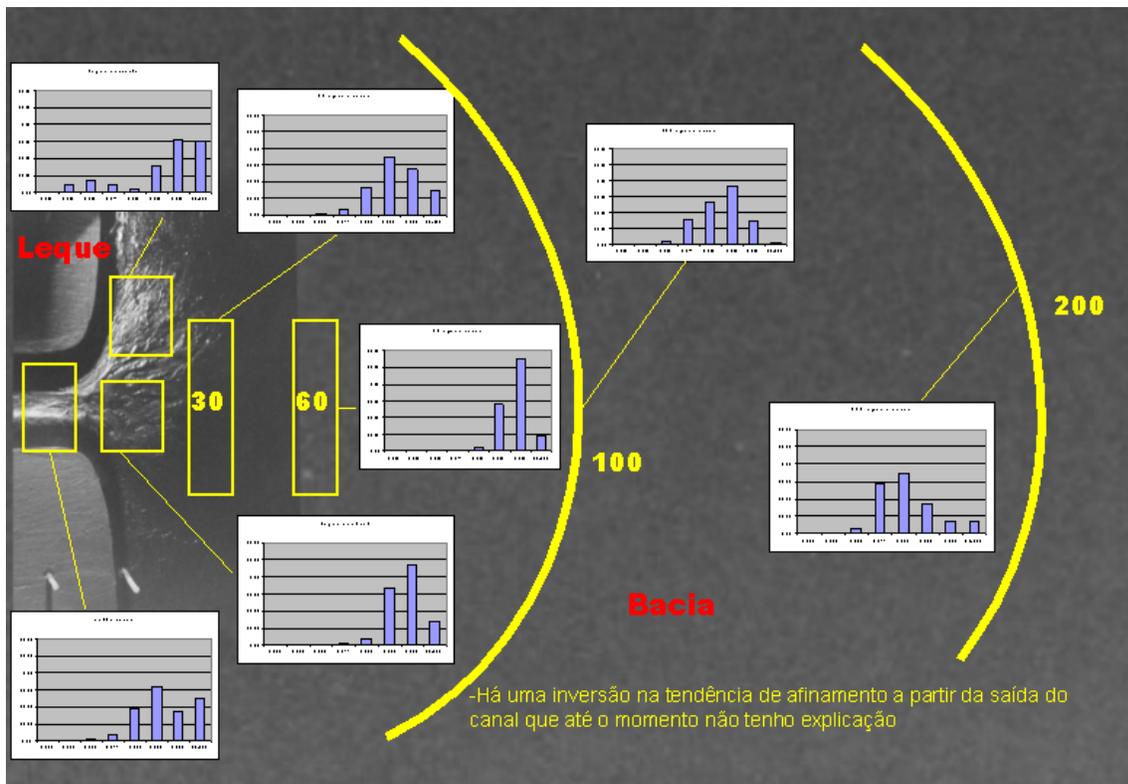
**Figura 45 - Detalhe do depósito em continuação da Figura 43.**



**Figura 46 - Detalhe do depósito em continuação da Figura 43.**

O detalhe apresentado na Figura 47 mostra a formação de um leque no ponto em que fluxo entra na bacia. Este leque mostra um desenvolvimento radial dos depósitos gerando uma geometria de semicírculo. As análises granulométricas indicaram tendência de afinamento granulométrico próxima à saída do canal. Observou-se porém, uma estranha inversão desta tendência nas amostras coletadas a 100 e 200 cm da saída do canal. Este comportamento parece estar relacionado a um problema na amostragem ou uma possível tendência dos sedimentos de granulação mais fina de se depositarem nas porções proximais do leque e de uma continuidade do deslocamento dos sedimentos mais grossos em direção à bacia. Este fato é observado nos depósitos turdíticos atuais e tem sido atribuído à retrogradação do sistema devido a oscilações no processo de alimentação das correntes (Mutti, 1985).

**Síntese:** os resultados deste ensaio indicaram uma sucessão de formas de leito que sugerem ter correspondência com as variações de espessuras dos depósitos e uma redução da granulometria, tanto no sentido longitudinal, quanto na vertical. Notou-se também uma inversão na tendência de redução longitudinal da granulometria após a entrada da bacia que precisa ser investigada.



**Figura 47 - Detalhe do depósito na saída do canal. Os retângulos amarelos e os semicírculos indicam as áreas onde foram coletadas as amostras para análise granulométrica.**

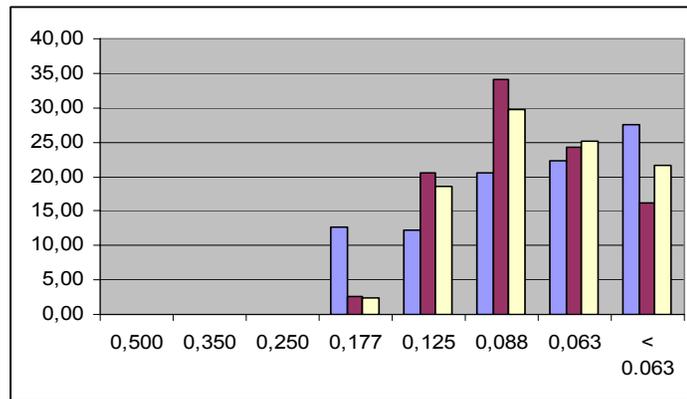
## 6.2 ENSAIO DE SETEMBRO DE 2001 MANICA 1:

**Tipo:** contínuo

**Volume injetado:** 50 litros

**Vazão:** 5 litros/minuto

**Material em suspensão:** Carvão 205 (15% 0,074, 35% 0,105, 35% 0,149, 15% 0,210 mm) a distribuição granulométrica do material em suspensão encontra-se na Figura 48.



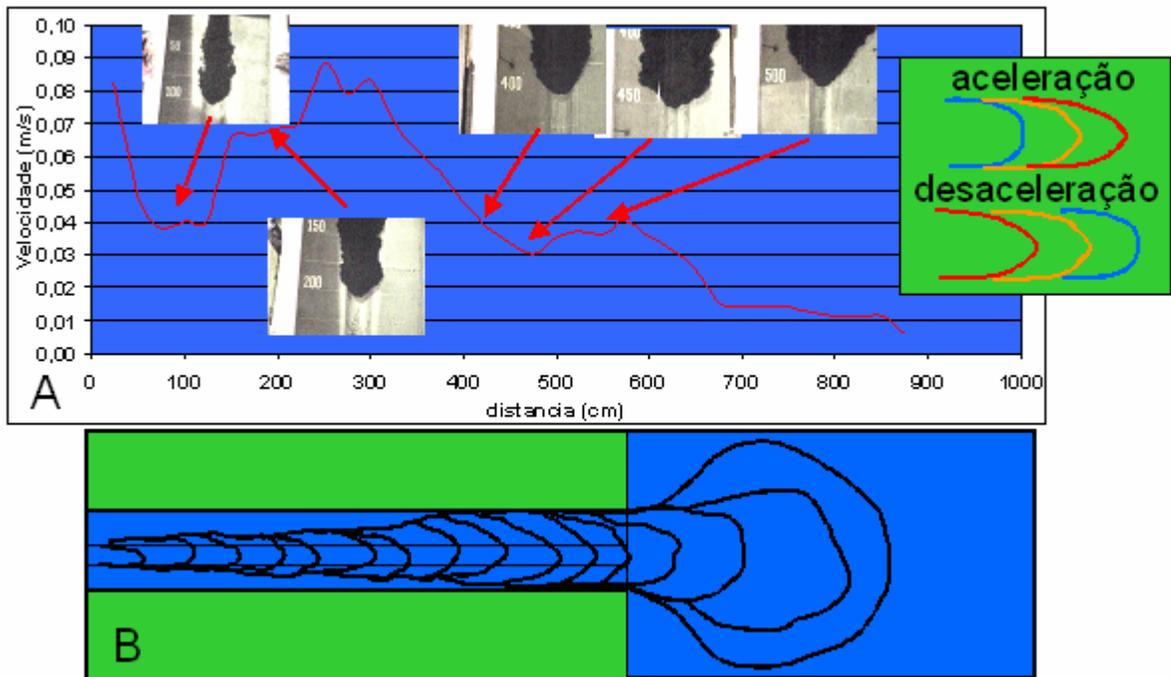
**Figura 48 - Histograma da distribuição granulométrica de carvão presente na mistura em três amostras coletadas antes da liberação da corrente. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira.**

**Massa Específica da Mistura:** 1,005 g/cm<sup>3</sup>

**Documentação:** filmagem da evolução da cabeça da corrente, registro da espessura dos depósitos por ultra-som e ponta linimétrica, análises granulométricas a cada 25 cm, registro das formas de leito com a câmara de vídeo.

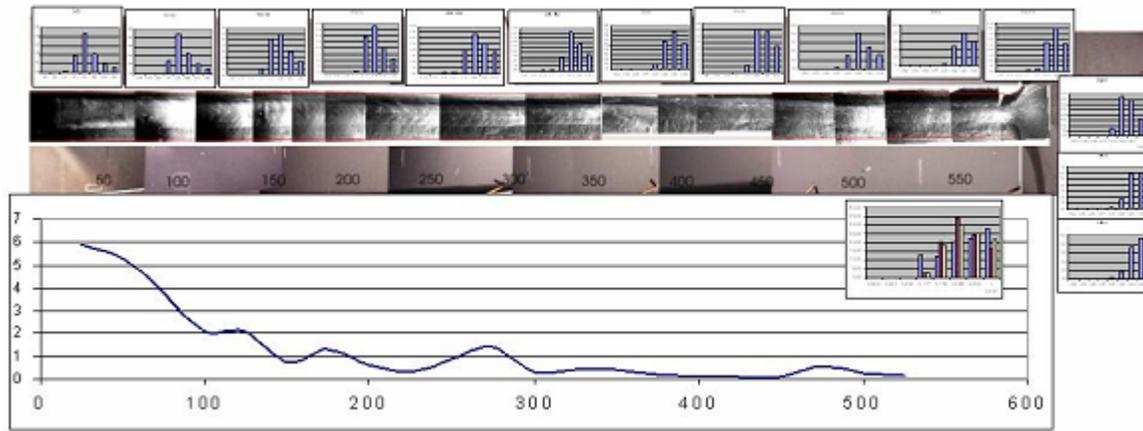
**Alimentação:** contínua a partir do reservatório de preparação da mistura com a calibração da vazão controlada por dois registros, um à montante (gaveta) e o outro à jusante (esfera) do medidor de vazão.

**Característica do fluxo:** Assim que foi iniciada a corrente, rapidamente houve o desenvolvimento de uma cabeça bem delimitada como mostrado na Figura 49. O gráfico da velocidade da cabeça em função do deslocamento da corrente indica que a corrente, embora apresente uma tendência geral de desaceleração, apresenta episódios de aceleração que indicam ter uma correlação com a forma da cabeça. Nos momentos de aceleração esta desenvolve um nariz mais proeminente e na desaceleração uma forma mais arredondada, o que parece estar relacionado a fenômenos internos à corrente. Notou-se também um aumento na velocidade da corrente logo após a saída do canal (Figura 49A). O esquema da Figura 49B mostra de uma forma mais evidente as variações que ocorrem na forma da corrente. É possível se verificar que a corrente começa a perder o confinamento do canal progressivamente. Quando desemboca na bacia mantém ainda por uma certa distância a sua forma alongada e paulatinamente passa a forma circular.



**Figura 49 - Relação entre a velocidade da cabeça da corrente e sua forma. A- Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distância. Fotos indicam a forma da corrente. B – Esquema indicando a variação da forma da cabeça da corrente durante o seu deslocamento.**

**Propriedades dos depósitos:** Os registros das formas de leito realizados com a câmara de vídeo não apresentaram a mesma qualidade obtida através das fotografias dificultando a sua visualização (Figura 50). Neste ensaio o problema de remobilização do depósito foi solucionado reduzindo-se a velocidade de esvaziamento do tanque. As amostras para análises granulométricas foram realizadas em intervalos fixos de 50 cm obtendo-se assim um melhor controle de suas variações. Não foi possível se obter amostras em vários níveis para observar mudanças na vertical. De uma forma geral, houve um afinamento dos grãos desde a alimentação até o final dos depósitos. Da mesma forma que, no primeiro ensaio, o sedimento se depositou predominantemente nas áreas próximas ao ponto de alimentação da corrente e mostrou pequenas oscilações na espessura ao longo do canal. Granulometricamente, os depósitos apresentaram uma tendência de afinamento no sentido do fluxo tanto na área confinada como na não-confinada.



**Figura 50 - Uma vista geral do Ensaio Manica1 mostrando as relações entre a granulometria do depósito, a variação da espessura e a distância percorrida pela corrente (escala em cm).**

O detalhe dos depósitos apresentado na Figura 51C mostra que foram desenvolvidas formas de leito a partir de 125 cm. Estas formas apresentam-se como *ripples* linguóides que parecem estar condicionadas ao perfil de velocidades desenvolvido dentro do canal por influência dos limites laterais impostos pela parede da calha. Esta mudança parece estar relacionada, também, ao aumento relativo das frações mais finas transportadas pela corrente. Analisando conjuntamente as Figura 51 à Figura 53 pode-se verificar na tendência de redução do espaçamento entre as cristas das formas de leito quando se afastam da área de alimentação. É possível ainda se constatar que as formas de leito apresentam uma oscilação na direção de seu eixo em torno do talvegue da calha indicando uma sinuosidade no fluxo durante a deposição. A partir dos 370 cm as *ripples* se desenvolvem apenas lateralmente na calha. Na distribuição granulométrica pode-se verificar uma moda de 0,125 mm e a presença da fração 0,177 até 100 cm (Figura 51). Estas representam as porções mais grossas do material colocado inicialmente em suspensão e que são secundárias na distribuição global (Figura 48). Isto indica que a velocidade até neste ponto foi capaz de segregar estas frações transportando as frações mais finas. A partir de 100 cm a moda dos depósitos passa a ser 0,088 mm que é a mesma da moda do material inicialmente colocado na corrente. Esta situação permanece constante até 350 cm quando começam a predominar as frações mais finas onde coincidentemente as formas de leito começam a desaparecer. Na área não-confinada são depositadas somente as frações mais finas colocadas em suspensão.

**Síntese:** neste ensaio podem-se verificar tendências nos depósitos similares ao item 5.1. Foram calculadas as velocidades de avanço da cabeça onde pode ser interpretada uma correlação entre as formas de leito e este parâmetro.

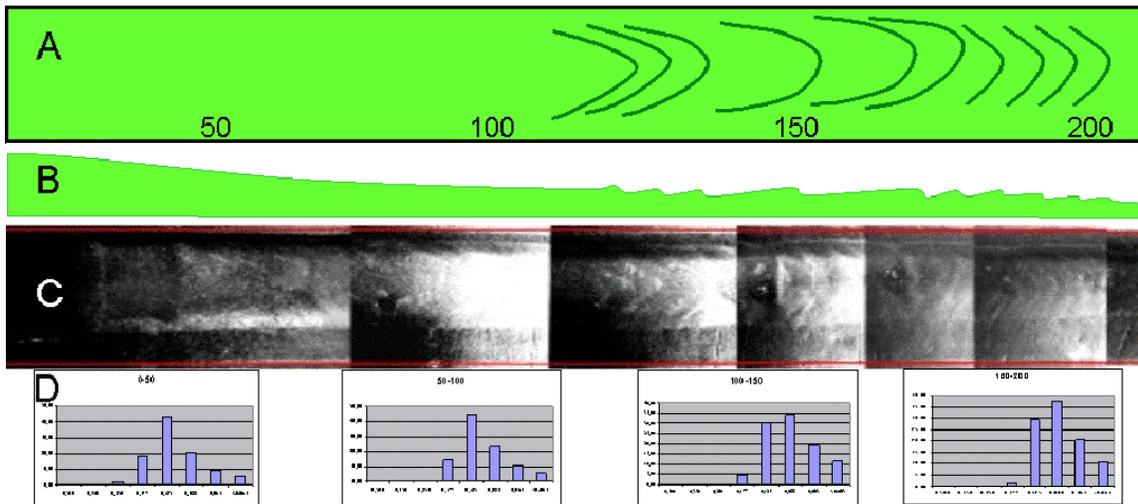


Figura 51 - Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e C) e o comportamento da variação granulométrica(D). B – Seção longitudinal esquemática indicando a forma na vertical das formas de leito.

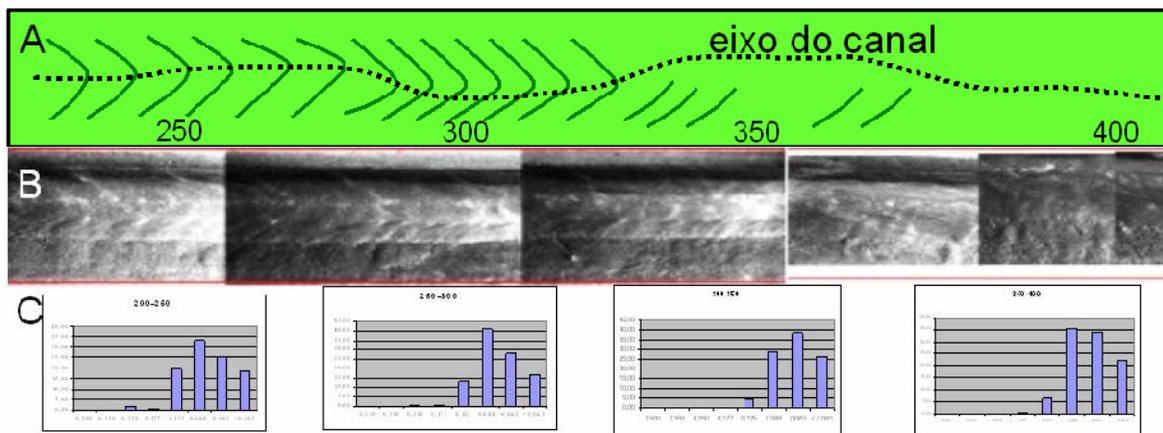


Figura 52 - Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C).

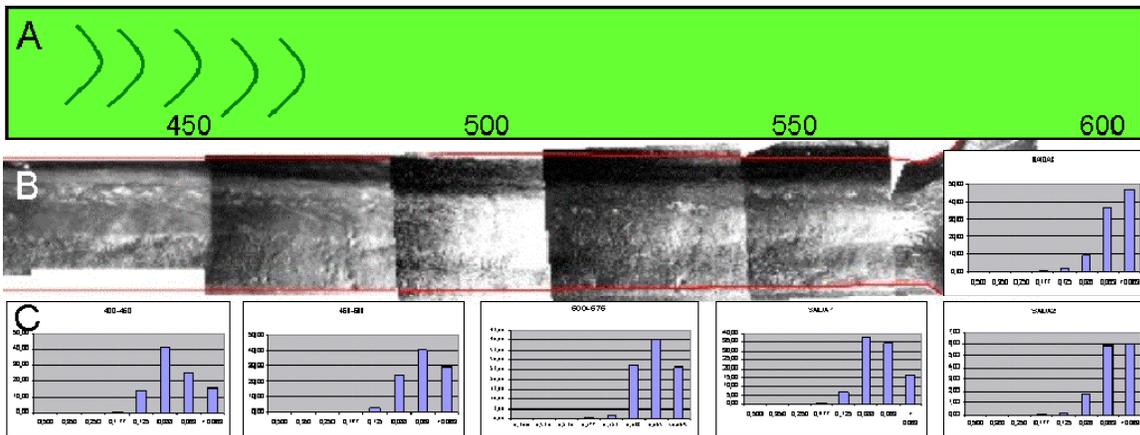


Figura 53 - Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C).

### 6.3 ENSAIO DE SETEMBRO DE 2001 MANICA 2:

**Tipo:** contínuo

**Volume injetado:** 125 litros

**Vazão:** 5 litros/minuto

**Material em suspensão:** Carvão 205 (15% 0,074, 35% 0,105, 35% 0,149,15% 0,210 mm) a distribuição granulométrica do material em suspensão encontra-se na Figura 54.

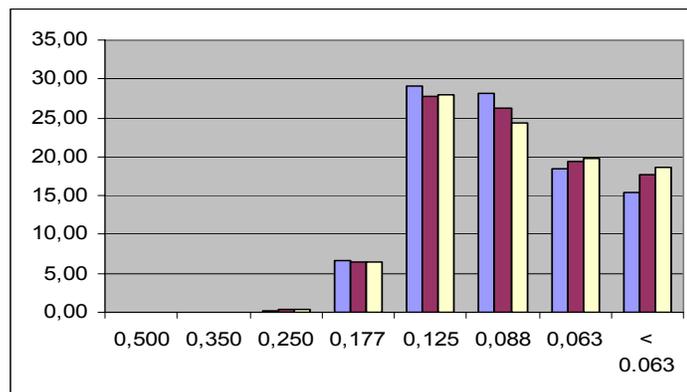


Figura 54 - Histograma da distribuição granulométrica carvão presente da mistura em três amostras coletadas antes liberação da corrente. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira.

**Massa Específica da Mistura:** 1,012 g/cm<sup>3</sup>

**Documentação:** filmagem da evolução da cabeça da corrente, registro da espessura dos depósitos por ultra-som e ponta linimétrica, análises granulométricas a cada 25 cm, registro das formas de leito com a câmara de vídeo.

**Alimentação:** contínua a partir do reservatório de preparação da mistura com a calibração da vazão controlada por dois registros, um à montante (gaveta) e o outro à jusante (esfera) do medidor de vazão.

**Característica do fluxo:** Da mesma forma que no ensaio anterior a corrente rapidamente desenvolveu uma cabeça bem delimitada como mostrado na Figura 55. A velocidade da cabeça apresenta também episódios de aceleração, porém, menos intensos que os verificados anteriormente. Observa-se uma pequena aceleração da corrente logo após o seu desconfinamento. O esquema da Figura 55B mostra de uma forma mais evidente as variações que ocorrem na forma da corrente. É possível se observar que a corrente começa a perder o confinamento do canal após o ponto verificado no ensaio anterior. Quando desemboca na bacia mantém ainda por uma certa distância a sua forma alongada e paulatinamente passa a forma circular.

**Propriedades dos depósitos:** As amostras para análises granulométricas foram realizadas em intervalos fixos de 50 cm obtendo-se assim um melhor controle de suas variações. Não foi possível se obter amostras em vários níveis para observar mudanças na vertical. Da mesma forma que os outros ensaios o início da deposição ocorreu muito próximo ao ponto de alimentação da corrente (Figura 56). Mostrou menores oscilações na espessura ao longo do canal. Granulometricamente, os depósitos apresentaram uma tendência de afinamento no sentido do fluxo tanto na área confinada como na não-confinada. O detalhe dos depósitos, apresentado na Figura 57, mostra que, próximo ao ponto de alimentação, foram desenvolvidas formas de leito que desaparecem a 50 cm e voltam a ocorrer a partir de 100 cm em área que corresponde ao pico deposicional (Figura 56), o que indica uma correspondência entre estes fatos e a rápida desaceleração que a corrente sofre neste intervalo. As formas anteriores e posteriores à zona de ausência apresentam uma crista retilínea mostrando que o fluxo não sofre a influência da parede do canal (Figura 57). A partir dos 250 cm começam a apresentar a forma de *ripple* linguóide. No final do canal, as formas de leito voltam a desaparecer. As curvas granulométricas mostram uma moda de 0,125 mm até 100 cm com uma distribuição similar do material colocado inicialmente em suspensão (Figura 56). Entre 100 e 250 cm a moda dos

depósitos passa a ser 0,088 mm passando após este intervalo para 0,063 mm. Esta coincide com a mudança nas formas de leito presentes (Figura 58). Esta situação permanece constante até a porção não-confinada onde predominam as frações mais finas que 0,063 mm.

**Síntese:** Neste ensaio, verificam-se as mesmas tendências nos depósitos observadas no ensaio 2. As formas de leito se distribuíram da seguinte forma : *ripple* de crista reta (0–250 cm), *ripple* linguóide (250–400 cm) e leito plano (400–575 cm).

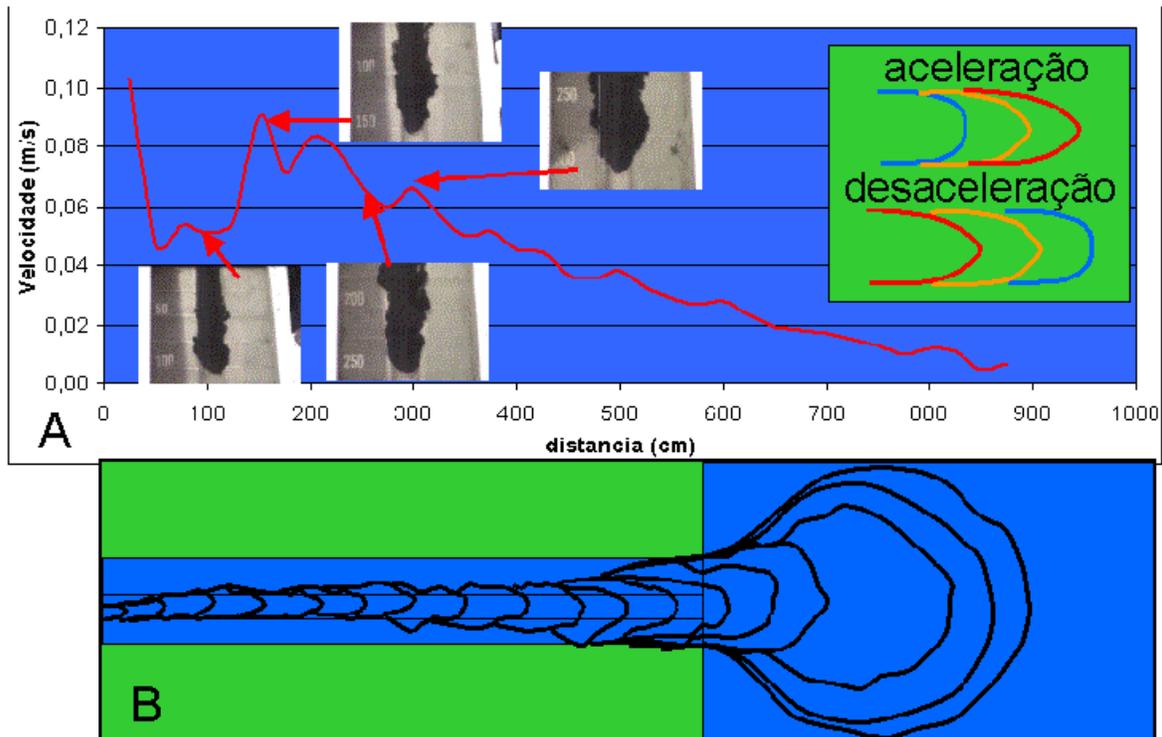


Figura 55 - Relação entre a velocidade da cabeça da corrente e sua forma. A- Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distancia. Fotos indicam a forma da corrente. B – Esquema indicando a variação da forma da cabeça da corrente durante o seu deslocamento.

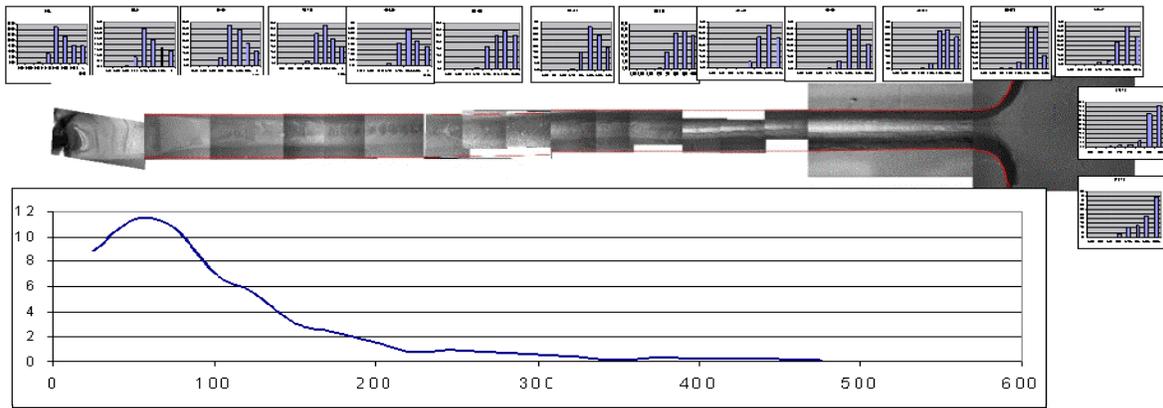


Figura 56 - Uma vista geral do Ensaio Manica2 mostrando as relações entre a granulometria do depósito, a variação da espessura e a distância percorrida pela corrente (escala em cm).

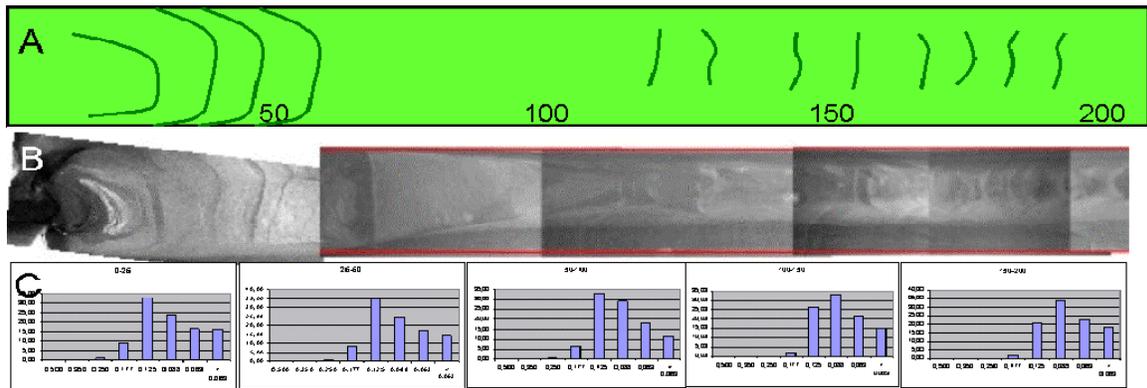


Figura 57 - Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento variação granulométrica(C).

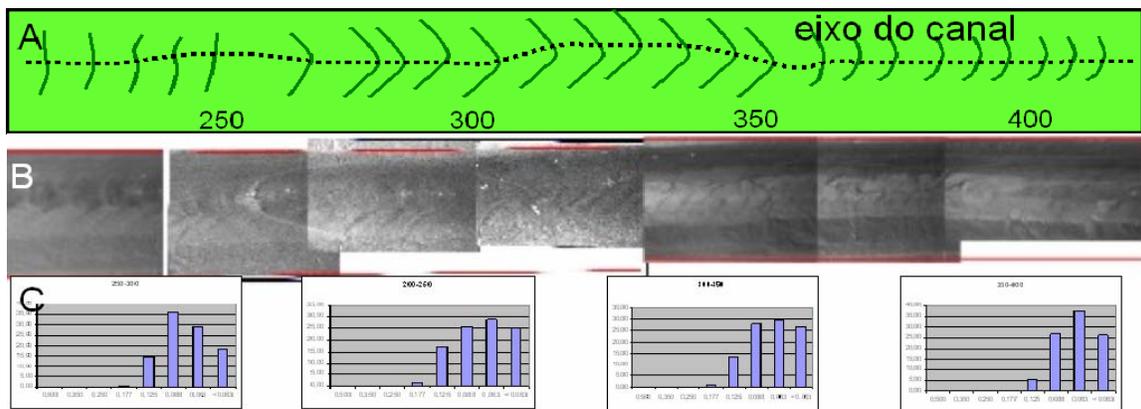


Figura 58 - Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento variação granulométrica(C).

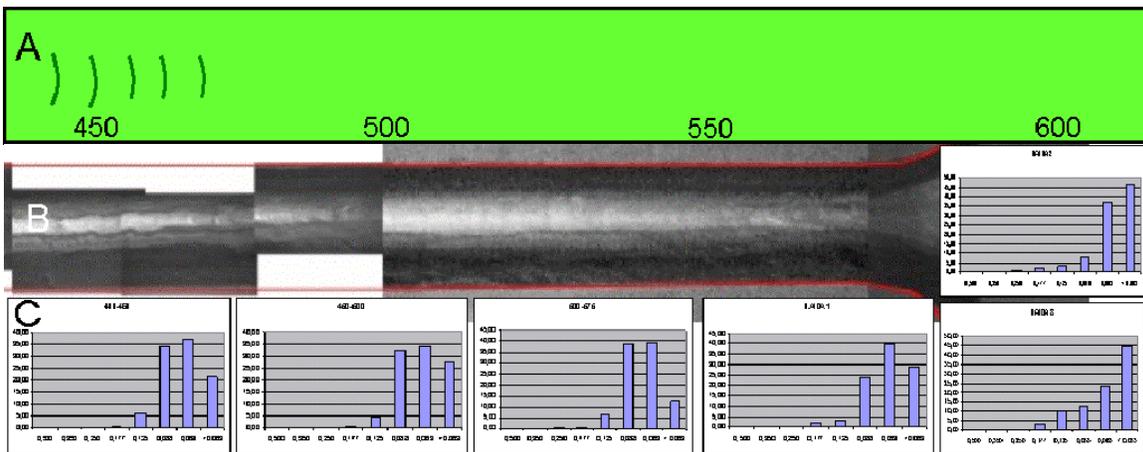


Figura 59 - Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento variação granulométrica(C)

#### 6.4 ENSAIO DE SETEMBRO DE 2001 MANICA 3:

**Tipo:** contínuo

**Volume injetado:** 125 litros

**Vazão:** 12,5 litros/minuto

**Material em suspensão:** Carvão 205 (15% 0,074, 35% 0,105, 35% 0,149,15% 0,210 mm) a distribuição granulométrica do material em suspensão encontra-se na Figura 60.

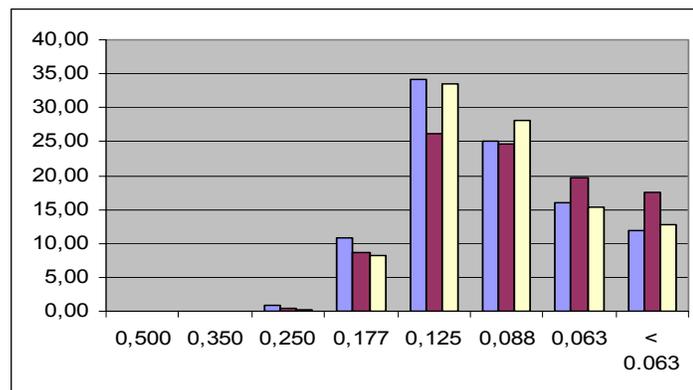


Figura 60 - Histograma da distribuição granulométrica do carvão presente na mistura em três amostras coletadas antes liberação da corrente. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira.

**Massa Específica da Mistura:** 1,014 g/cm<sup>3</sup>

**Documentação:** filmagem da evolução da cabeça da corrente, registro da espessura dos depósitos por ultra-som e ponta linimétrica, análises granulométricas a cada 25 cm, registro das formas de leito com a câmara de vídeo.

**Alimentação:** contínua a partir do reservatório de preparação da mistura com a calibração da vazão controlada por dois registros, um à montante (gaveta) e o outro à jusante (esfera) do medidor de vazão.

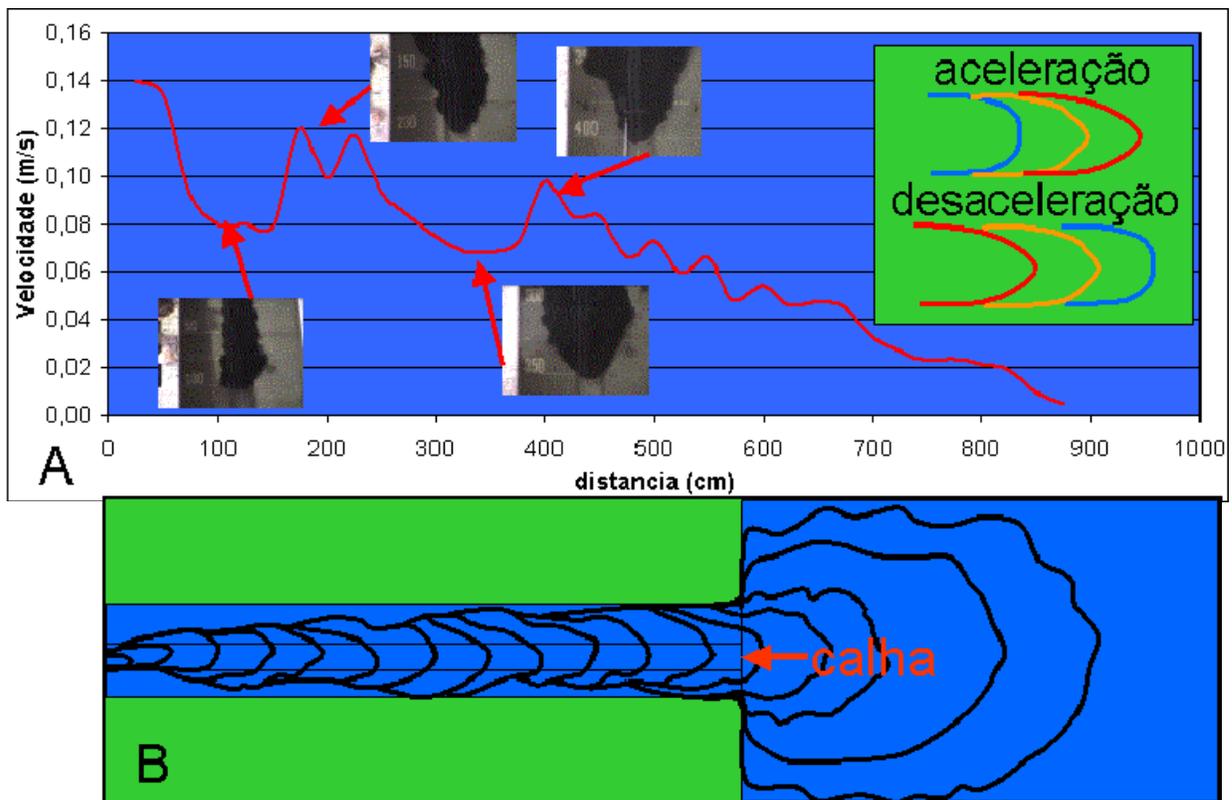
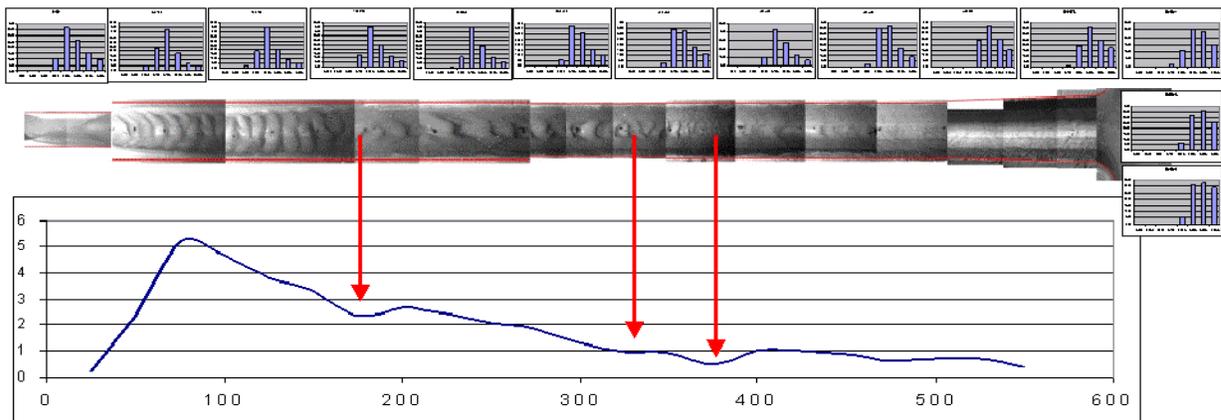


Figura 61 - Relação entre a velocidade da cabeça da corrente e sua forma. A- Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distância. Fotos indicam a forma da corrente. B – Esquema indicando a variação da forma da cabeça da corrente durante o seu deslocamento.

**Característica do fluxo:** Este ensaio apresentou uma velocidade inicial mais elevada em relação aos anteriores e mostrou episódios bem definidos de aceleração e desaceleração. Como se pode observar na Figura 61, estes episódios guardam uma associação direta com a forma da cabeça do fluxo. Neste ensaio, não se notou aceleração da corrente logo após o seu desconfinamento. A Figura 61B mostra que a corrente apresentou um maior extravasamento, ora de um lado da calha, ora em outro, indicando uma oscilação do fluxo em torno do eixo do canal evidenciando um movimento helicoidal da corrente durante o seu deslocamento. Quando atinge a área não-confinada, a corrente mantém ainda a sua forma alongada indicando que o fluxo tem quantidade de energia capaz de se manter alinhado com o canal não se dissipando lateralmente.

**Propriedades dos depósitos:** Diferentemente dos ensaios anteriores, o pico de deposição não ocorreu muito próximo ao ponto onde é feita a alimentação da corrente tendo a porção inicial do canal se comportado como zona de passagem de sedimento (Figura 62). Neste experimento, foram observadas formas de leito muito melhor desenvolvidas. Coincidentemente, nas mudanças das características das formas de leito (Figura 62) percebeu-se um afinamento localizado do depósito. Granulometricamente, os depósitos apresentaram uma tendência de afinamento no sentido do fluxo tanto na área confinada como na não-confinada.



**Figura 62 - Uma vista geral do Ensaio Manica3 mostrando as relações entre a granulometria do depósito, a variação da espessura e a distância percorrida pela corrente (escala em cm).**

O detalhe dos depósitos apresentado na Figura 63 mostra que após a zona de não-deposição foram desenvolvidas formas de leito linguóide, até 100 cm, formas de crista reta entre 100 e 200 cm, e formas de crescentes após 200 cm cujas linhas de crista estão orientadas transversalmente ao fluxo. As formas linguóides ocorrem associadas ao pico de maior deposição (Figura 62). As formas de leito com cristas retilíneas (Figura 64) mostram uma correspondência com a rápida desaceleração que sofre a corrente (Figura 61A). As curvas granulométricas mostram uma moda de 0,125 mm até 50 cm (Figura 63) com uma distribuição similar do material colocado inicialmente em suspensão (Figura 60). A partir de 100 cm, a moda permanece a mesma, mas com uma acentuada predominância desta classe granulométrica sobre as demais. Isto indica uma elevada seletividade do padrão deposicional da corrente que apresenta capacidade de manter as partículas mais finas em suspensão. A partir dos 300 cm, há um progressivo aumento das frações mais finas passando a moda para 0,088 mm a partir dos 400 cm (Figura 64). Somente fora do canal na área não-confinada a moda passa a 0,063 mm (Figura 65).

**Síntese:** Neste ensaio, verificam-se as mesmas tendências nos depósitos percebidas nos ensaios do item 5.2. Neste, notou-se uma maior variação das velocidades de avanço da cabeça que pode ser interpretada como correlata as formas de leito onde temos três estágios de aceleração – desaceleração com as formas de leito correlatas: estágio 1 (0-150 cm), estágio 2 (150-400) e estágio 3 (400-525) .

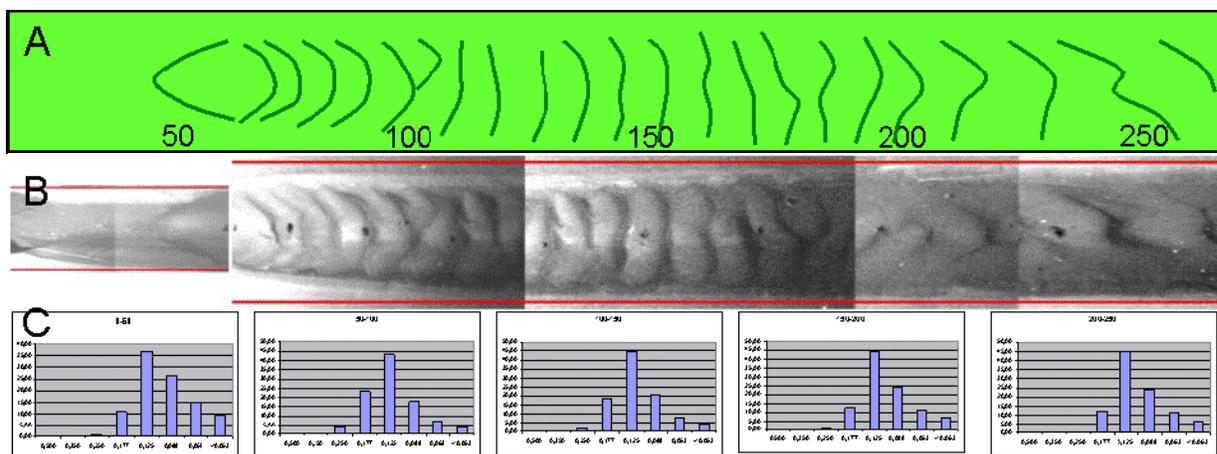


Figura 63 - Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C).

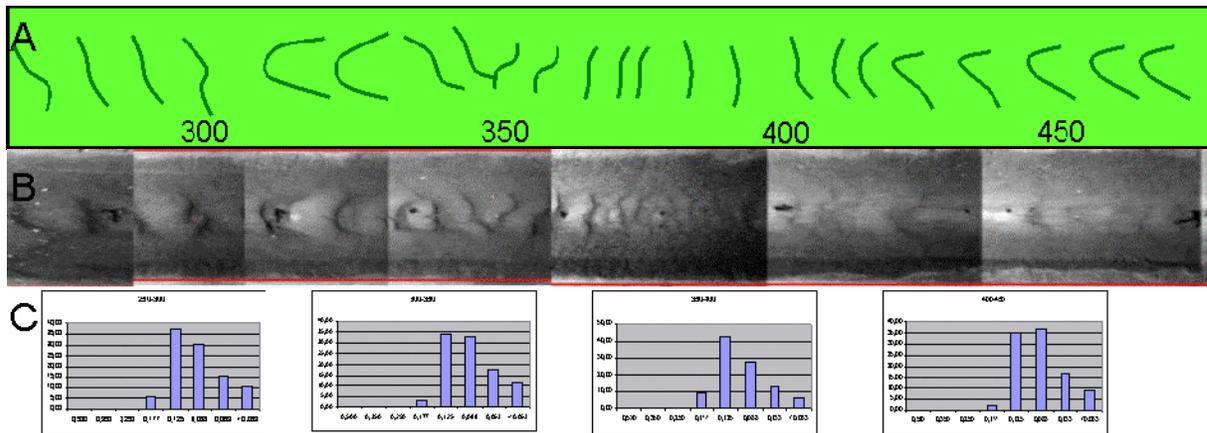


Figura 64 - Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C).

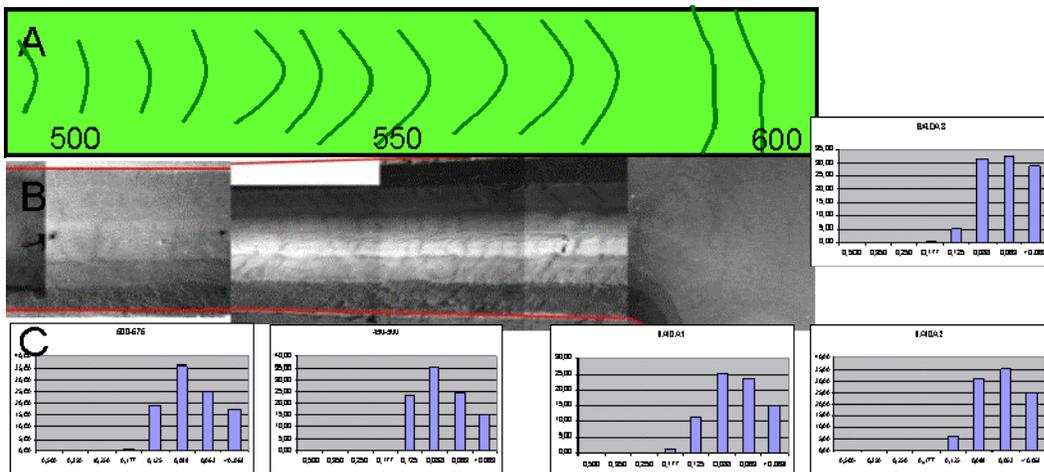


Figura 65 - Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C).

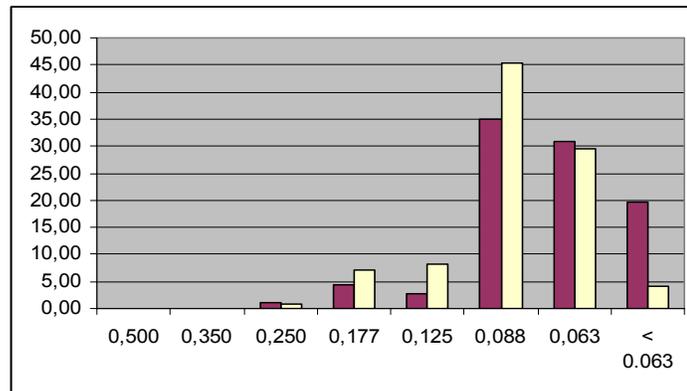
## 6.5 ENSAIO DE DEZEMBRO DE 2001:

Tipo: contínuo

Volume injetado: 125 litros

Vazão: 5,0 litros/minuto

Material em suspensão: Carvão 205 (15% 0,074, 35% 0,105, 35% 0,149,15% 0,210 mm) a distribuição granulométrica do material em suspensão encontra-se na Figura 66.



**Figura 66 – Histograma da distribuição granulométrica carvão presente na mistura em duas amostras coletadas antes liberação da corrente. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira.**

**Massa Específica da Mistura:** 1,005 g/cm<sup>3</sup>

**Documentação:** filmagem da evolução da cabeça da corrente, registro da evolução da espessura do depósito a 100 cm com ultra-som, registro da espessura dos depósitos por ultra-som e ponta linimétrica, análises granulométricas a cada 25 cm, registro das formas de leito com a câmara de vídeo.

**Alimentação:** contínua a partir do reservatório de preparação da mistura com a calibração da vazão controlada por dois registros, um à montante (gaveta) e o outro à jusante (esfera) do medidor de vazão.

**Característica do fluxo:** Neste ensaio a corrente inicialmente sofre uma rápida desaceleração até 200 cm, a partir deste ponto ela passa por uma ligeira aceleração seguida por uma redução de velocidade pouco acentuada até o desconfinamento. A partir da zona não-confinada há uma desaceleração mais acentuada até o final do ensaio. Assim como os experimentos anteriores ela mostrou episódios bem definidos de aceleração e desaceleração. Como pode se ver na Figura 67 estes episódios guardam uma associação direta com a forma da cabeça do fluxo. A Figura 67B mostra que a corrente apresentou uma oscilação em torno do eixo do canal evidenciando a presença de fluxo helicoidal durante o seu deslocamento. Quando atinge a área não-confinada a corrente mantém ainda a sua forma alongada.

A Figura 68 mostra imagens de ultra-som da corrente durante sua passagem a 100 cm do ponto de alimentação. Da esquerda para direita temos uma seção longitudinal a direção de deslocamento seguida de uma de série de seções transversais em um ponto fixo e em diversos momentos do fluxo. A primeira imagem apresenta a geometria externa e interna da corrente onde pode se visualizar o desprendimento de vórtices e a formação de uma estratificação da corrente. Há uma menor densidade na porção superior da corrente onde há tons cinza claros e uma concentração mais elevada de sedimento na base, coloração cinza escuro e preto. Esta estratificação pode também ser observada nas seções transversais apresentadas em seqüência indicando que a corrente mantém suas características gerais durante todo o ensaio. Nas seções transversais pode-se verificar que a porção basal mais densa ora situa-se no centro do canal ora lateralmente indicando corrente apresenta oscilações na posição de seu eixo ao longo da história da passagem do fluxo.

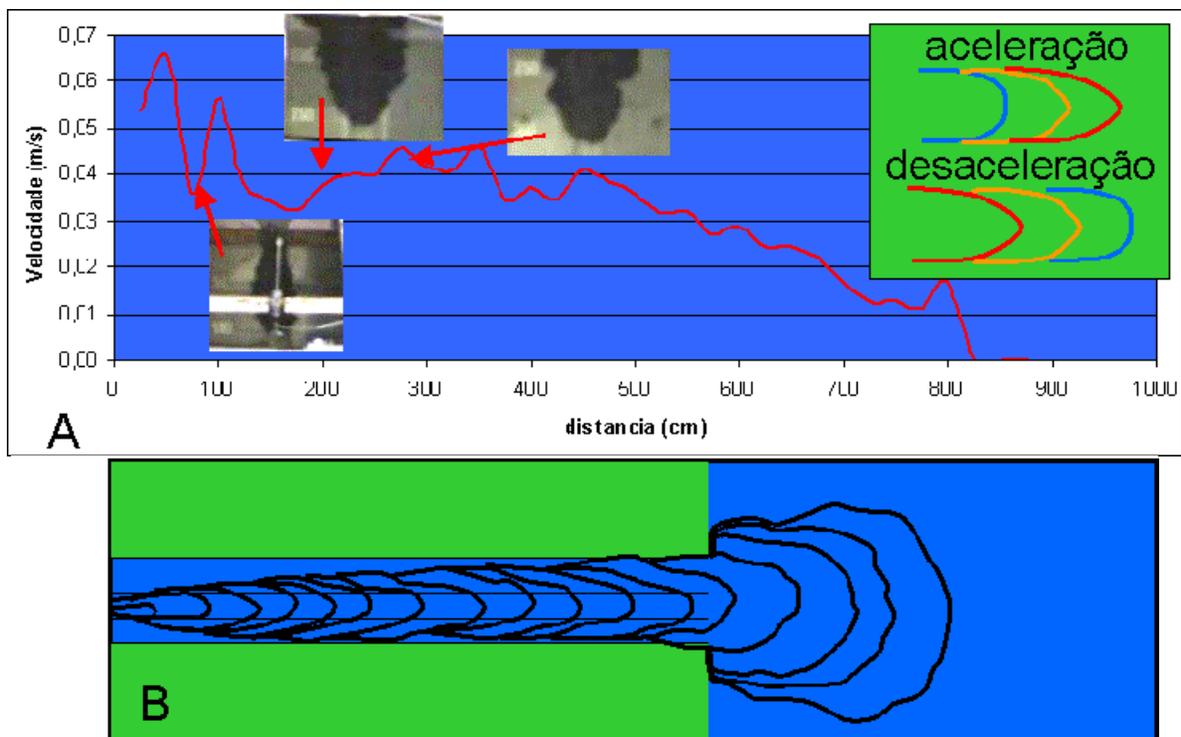


Figura 67 – Relação entre a velocidade da cabeça da corrente e sua forma. A- Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distancia. Fotos indicam a forma da corrente. B – Esquema indicando a variação da forma da cabeça da corrente durante o seu deslocamento

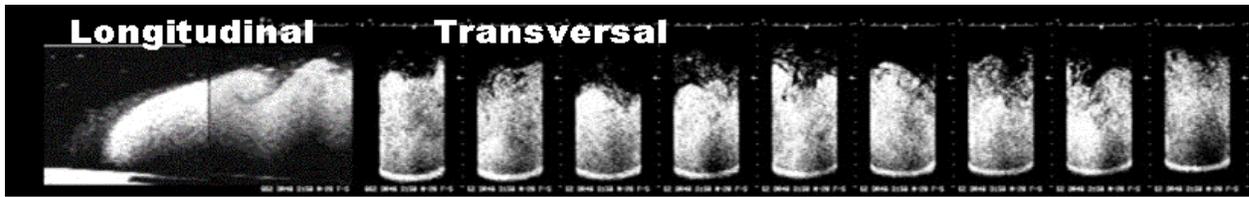


Figura 68– Imagens de ultra-som da corrente. Os tons de cinza mais claros indicam menores densidades na corrente. A primeira imagem a esquerda representa uma seção longitudinal ao fluxo. As subseqüentes são transversais em tempos diversos do fluxo sendo a primeira a esquerda no inicio da ensaio e a última a direita no final.

**Propriedades dos depósitos:** Neste ensaio houve um pico de deposição muito próximo ao ponto de alimentação onde foram desenvolvidas formas de leito bastante proeminentes (Figura 69). A granulometria dos depósitos indica uma tendência granodecrescente no sentido do fluxo. Não foi possível se obter amostras em vários níveis para observar mudanças na vertical.

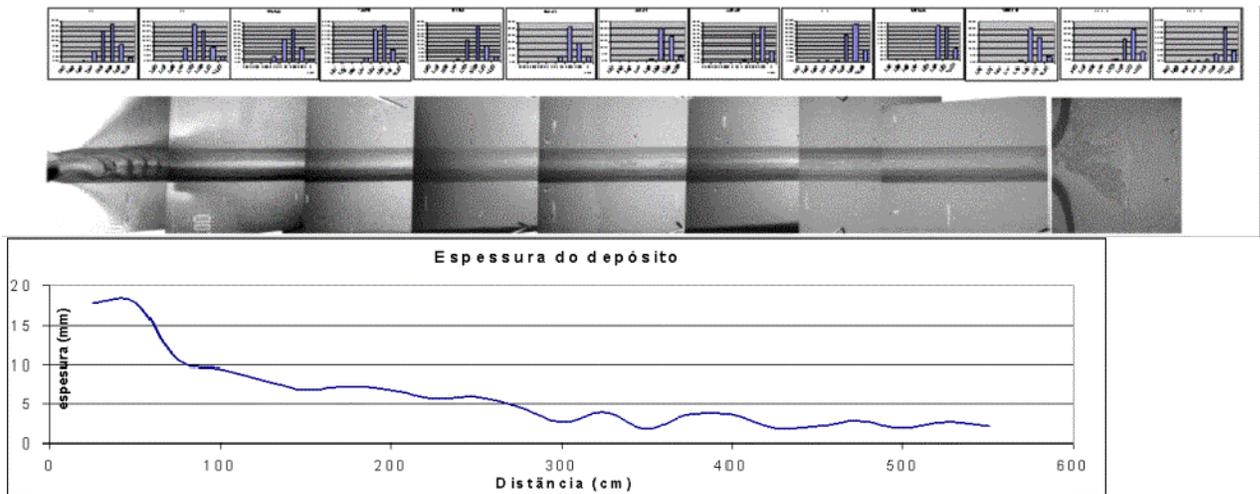
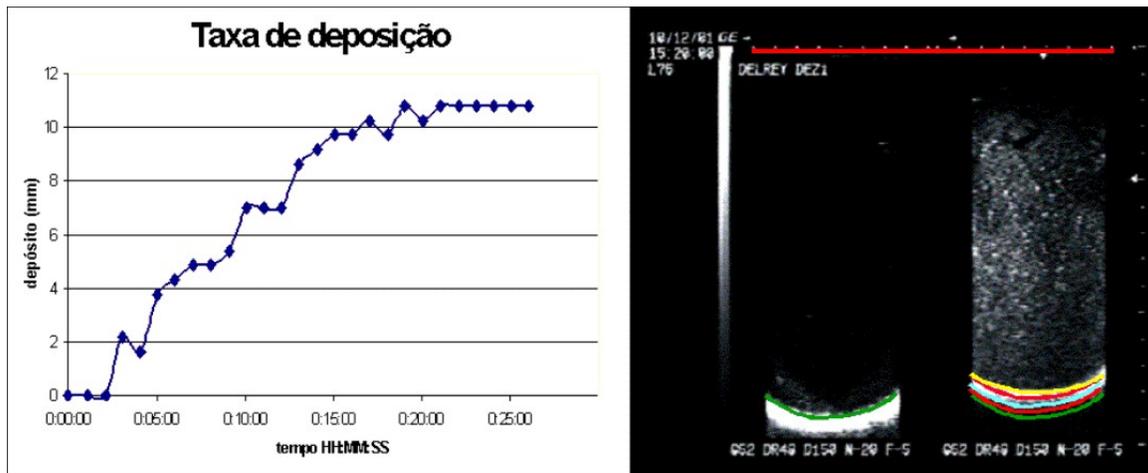


Figura 69 – Uma vista geral do Ensaio Dezembro 01 mostrando as relações entre a granulometria do depósito, a variação da espessura e a distância percorrida pela corrente.

Neste experimento, foi iniciada a utilização do ultra-som para investigar o comportamento da corrente. Este fato nos possibilitou observar a evolução dos depósitos durante o fluxo que teve vinte e cinco minutos de duração. Na Figura 70, pode-se observar, através do gráfico da direita, como a espessura do depósito evolui ao longo do tempo a 100 cm do ponto de alimentação. Nele, verificamos que durante os primeiros minutos não houve sedimentação. Passada esta fase ocorre a deposição em pulsos de rápida deposição seguidos de momentos de erosão ou não-deposição. Neste ensaio, são observados seis destes pulsos com duração de dois a quatro minutos cada. Assim como o observado na velocidade de deslocamento da corrente, a sedimentação indica ser controlada por pulsos. Na Figura 70, à direita temos duas imagens de ultra-som antes e após o experimento. Na imagem mais à direita são apresentadas linhas coloridas que representam o topo do depósito em vários momentos do ensaio. Acreditamos que elas representem a estratificação interna do depósito e, desta forma, inferimos que, transversalmente ao sentido de fluxo, a estruturação interna dos sedimentos tende a seguir a geometria do fundo com um ligeiro espessamento dos estratos no centro do canal.



**Figura 70 – A esquerda temos um gráfico indicando a evolução do depósito em função do tempo a 100 cm do ponto de alimentação. A direita uma imagem de ultra-som no mesmo ponto onde está representado o canal antes do ensaio (esquerda) e ao seu final. As linhas coloridas representam o fundo do canal em diversos momentos do ensaio e podem representar a estratificação interna do depósito.**

A imagem apresentada na Figura 71 mostra as formas de leito desenvolvidas próximas ao ponto de alimentação. Entre 0 a 50 cm são desenvolvidas ripples com altura e distância entre crista elevadas. A forma da crista em planta é quase retilínea e transversal ao fluxo. A partir deste ponto até 180cm, as ripples apresentam forma linguóide com altura bem menores. Entre 180 e 250 cm não se observam formas de fundo e entre 250 e 300 cm estas formas de leito anteriores voltam a ocorrer (Figura 72). No final do canal, as formas de leito voltam a desaparecer (Figura 73). As curvas granulométricas mostram uma distribuição granulométrica nos depósitos muito similares ao material colocado inicialmente em suspensão na corrente no intervalo 0 a 250 cm (figuras Figura 66, Figura 71 e Figura 72). A partir de 250 cm, as frações mais grossas passam a desaparecer dos depósitos progressivamente.

**Síntese:** A utilização do ultra-som neste ensaio possibilitou a observação da evolução do depósito durante o tempo. Estes dados indicaram que a deposição se processa em pulsos que parecem guardar correlação com as oscilações de velocidade da cabeça da corrente. Quanto ao padrão de distribuição granulométrica e de formas de leito foram observados os mesmos comportamentos dos ensaios anteriores.

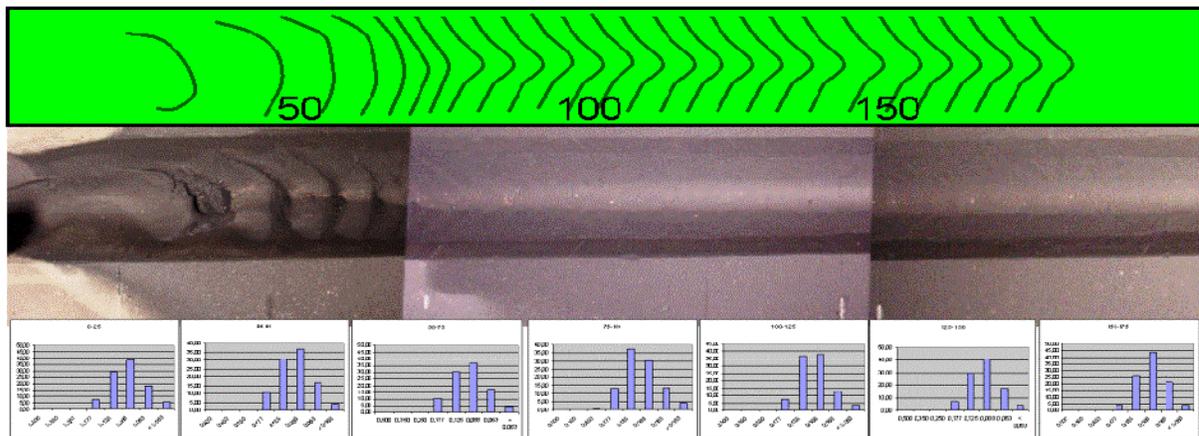


Figura 71– Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento variação granulométrica(C).

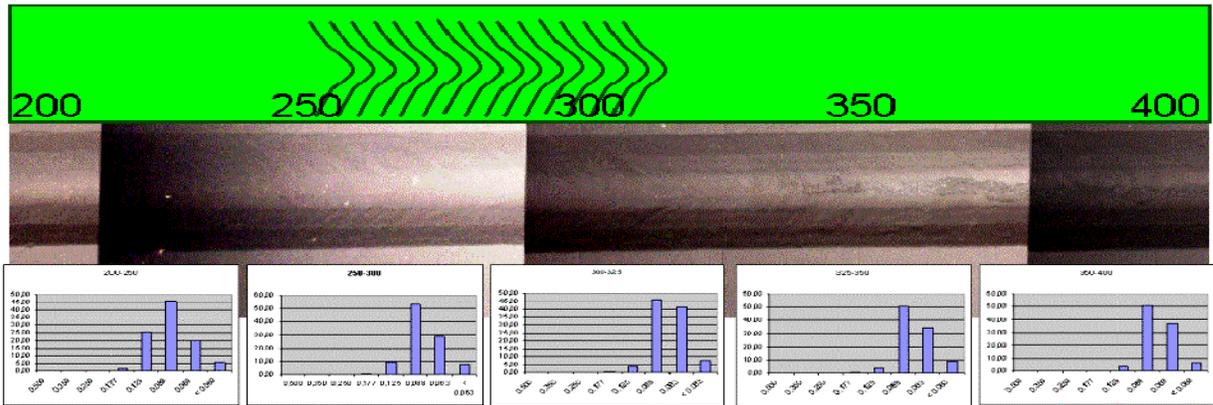


Figura 72– Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento variação granulométrica(C).



Figura 73 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento variação granulométrica(C).

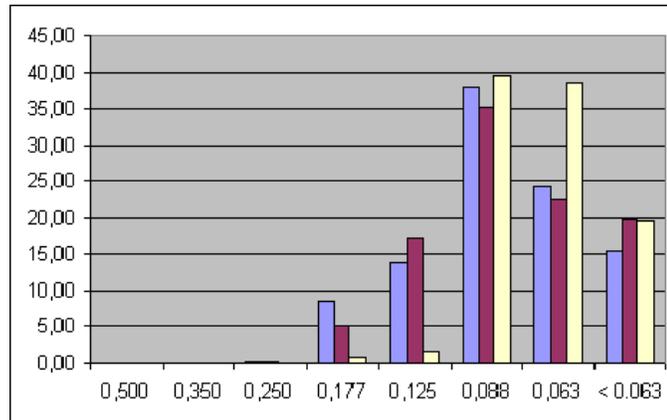
6.6 ENSAIO DE FEVEREIRO DE 2002 CENPES:

**Tipo:** contínuo

**Volume injetado:** 125 litros

**Vazão:** 5,0 litros/minuto

**Material em suspensão:** Carvão 205 (15% 0,074, 35% 0,105, 35% 0,149,15% 0,210 mm) a distribuição granulométrica do material em suspensão encontra-se na Figura 74.



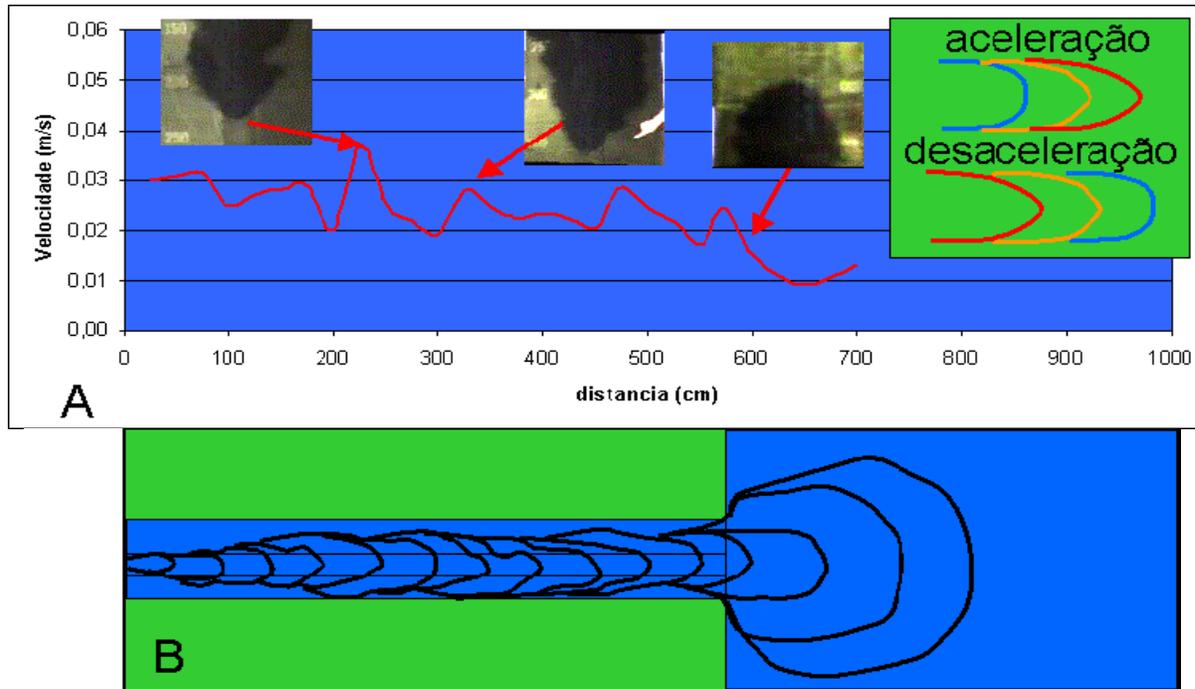
**Figura 74– Histograma da distribuição granulométrica carvão presente na mistura em três amostras coletadas antes liberação da corrente. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira.**

**Massa Específica da Mistura:** 1,005 g/cm<sup>3</sup>

**Documentação:** registro da espessura dos depósitos por ultra-som e ponta linimétrica, análises granulométricas a cada 25 cm, registro das formas de leito fotografias digitais.

**Alimentação:** contínua a partir do reservatório de preparação da mistura com a calibração da vazão controlada por dois registros, um à montante (gaveta) e o outro à jusante (esfera) do medidor de vazão.

**Característica do fluxo:** Neste ensaio, a corrente mantém uma velocidade de deslocamento da cabeça com oscilações variando em torno de um patamar praticamente constante até 600 cm, ou seja, até o ponto de desconfinamento. A partir deste ponto, ela passa por uma redução de velocidade acentuada até a sua parada. Assim como os experimentos anteriores a corrente mostrou episódios bem definidos de aceleração e desaceleração. Como pode se ver na Figura 75 estes episódios guardam uma associação direta com a forma da cabeça do fluxo. A figura 2B mostra que a corrente apresentou uma oscilação em torno do eixo do canal evidenciando a presença de fluxo helicoidal durante o seu deslocamento. Quando atinge a área não-confinada a corrente mantém ainda a sua forma alongada.



**Figura 75–** Relação entre a velocidade da cabeça da corrente e sua forma. A- Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distancia. Fotos indicam a forma da corrente. B – Esquema indicando a variação da forma da cabeça da corrente durante o seu deslocamento.

**Propriedades dos depósitos:** Neste ensaio, houve um pico de deposição muito próximo ao ponto de alimentação onde foram desenvolvidas formas de leito proeminentes (Figura 76). Granulometricamente os depósitos apresentaram uma tendência de afinamento no sentido do fluxo tanto na área confinada como na não-confinada. Não foi possível se obter amostras em vários níveis para observar mudanças na vertical.

As imagens apresentadas nas Figura 77, Figura 78 e Figura 79 mostram formas de leito desenvolvidas entre 0 a 100 cm que apresentam uma redução acentuada tanto na altura como na distância ente cristas no sentido do fluxo. Em planta apresentam forma de lingüóide. As curvas granulométricas mostram uma seletividade nos depósitos onde os grãos mais grossos foram depositados próximos ao alimentação da corrente com um afinamento acentuado até o final do canal onde há o predomínio das frações mais finas.

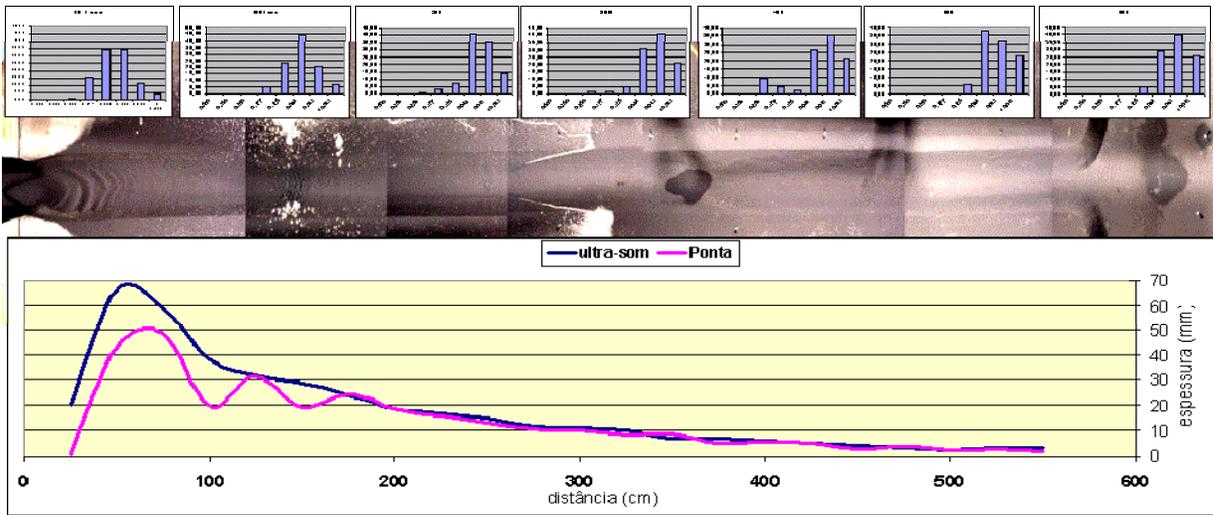


Figura 76– Uma vista geral do Ensaio Fevereiro de 2002 Cenpes mostrando as relações entre a granulometria do depósito, a variação da espessura (medição com ponta linimétrica e ultra-som) e a distância percorrida pela corrente (escala em cm).

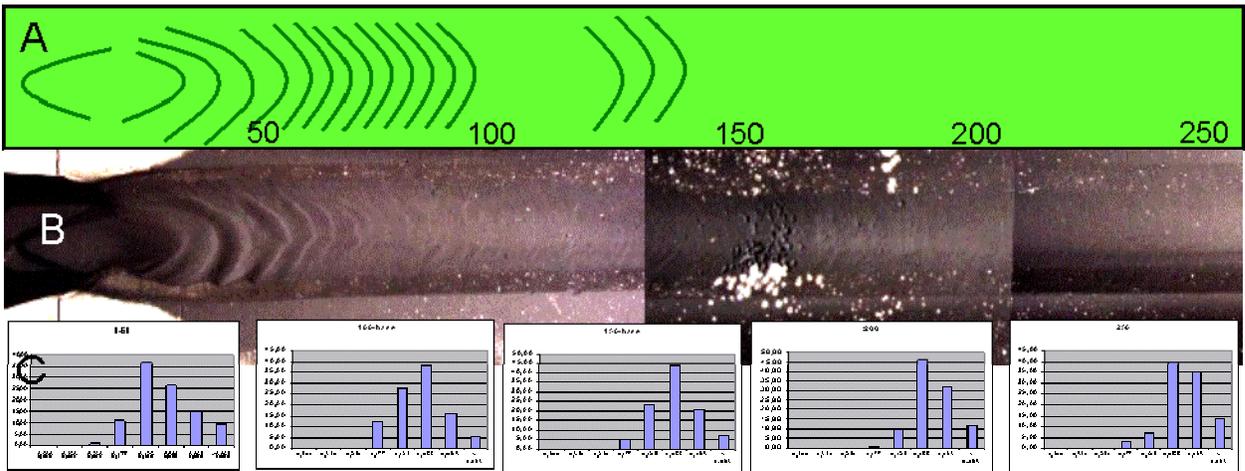


Figura 77– Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C).

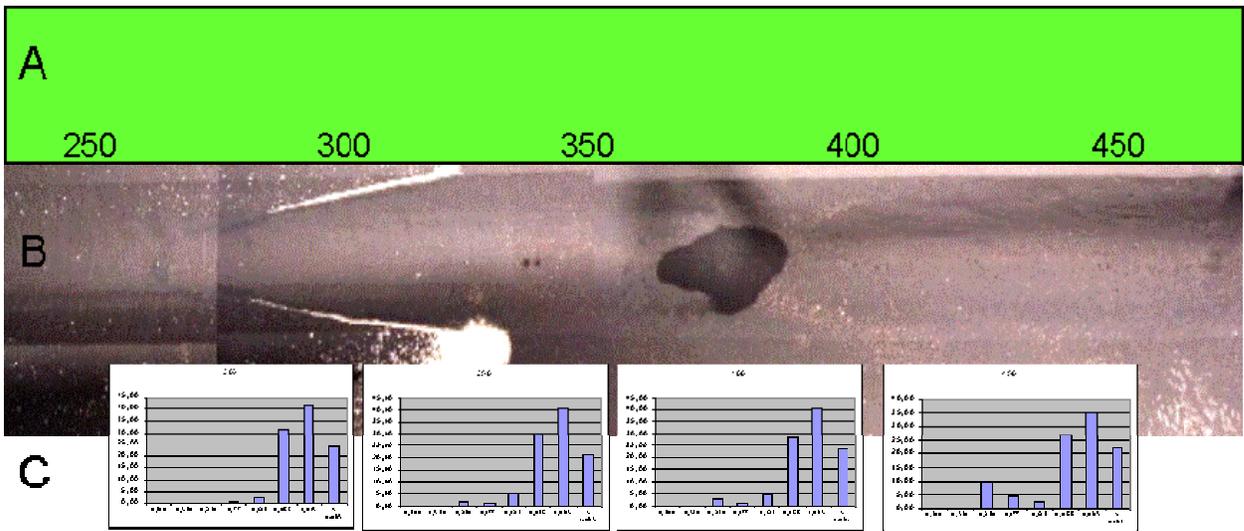


Figura 78– Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C).

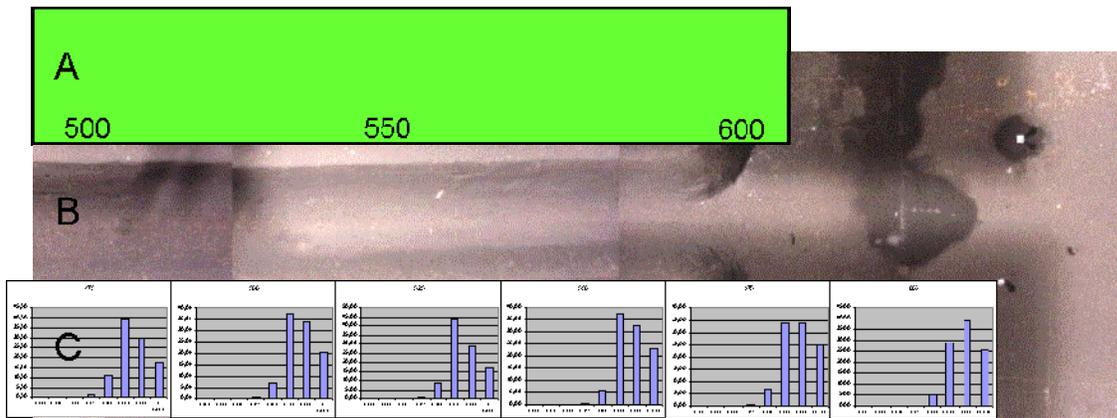
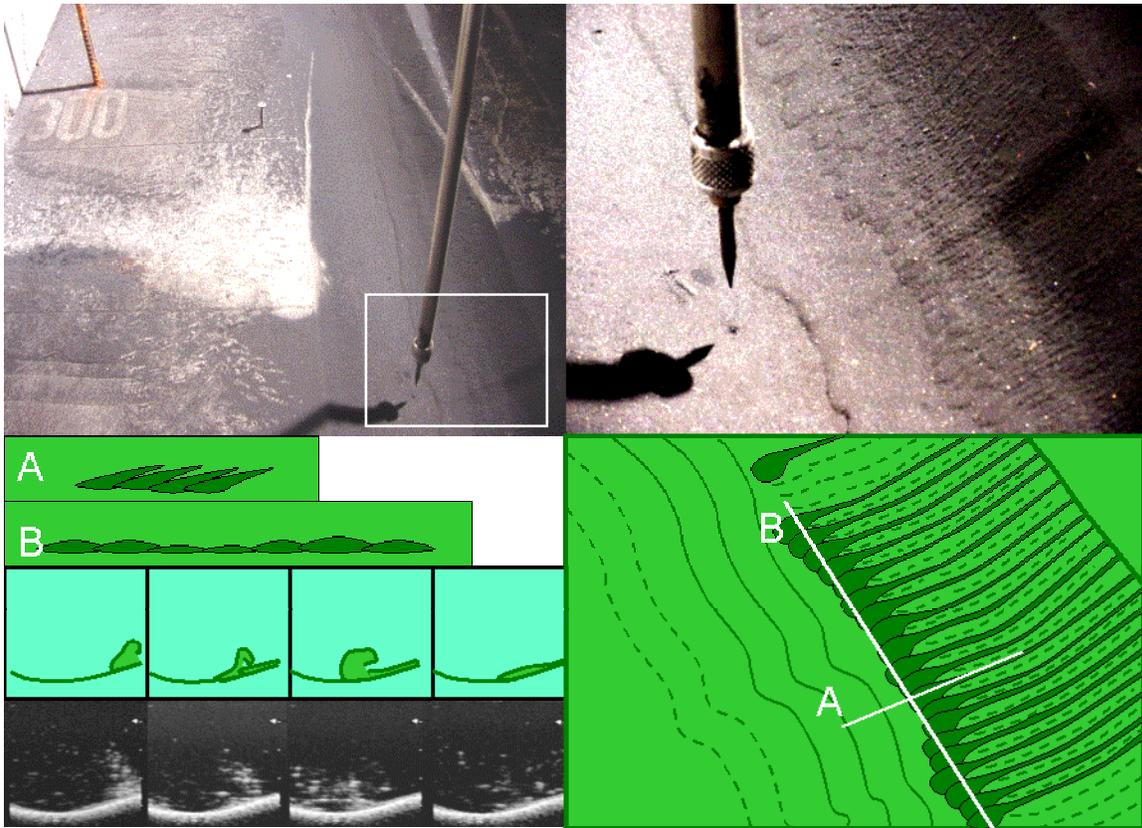


Figura 79– Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C).

Neste ensaio foi possível se observar a formação de leques laterais gerados pelo escorregamento de sedimentos depositados na parede lateral do canal. Na Figura 80, temos uma imagem que tenta representar estes depósitos e o seu processo de formação. Na fotografia, no alto, à direita, temos uma visão geral dos depósitos e, à esquerda, um detalhe onde podemos ver inúmeros pequenos leques que são formados na borda do canal. No canto inferior esquerdo, temos um esquema tentando detalhar a imagem fotográfica. No canto inferior direito, temos uma seção transversal (A) e outra longitudinal (B) indicando a geometria dos depósitos. Abaixo, temos a imagem de ultra-som transversal ao canal e um esquema desta mostrando com se processa este fenômeno que pode ser resumido nos seguintes passos:

1. ao término da passagem da corrente de densidade, todo o material em suspensão é decantado;
2. após alguns segundos, o material da parede do canal fica instável e começa a se deslocar no sentido do eixo do canal formando uma pequena corrente de densidade lateral ( primeiro quadro);
3. ao atingir o eixo do canal, cessa o deslocamento da corrente formando um leque (último quadro).

**Síntese:** Os padrões deposicionais observados foram similares ao dos ensaios anteriores. Como particularidade deste experimento, podemos destacar a observação da formação de leques laterais de escorregamento.



**Figura 80–** Esquema mostrando a formação de leques laterais de escorregamento sobre os depósitos de correntes de densidade.

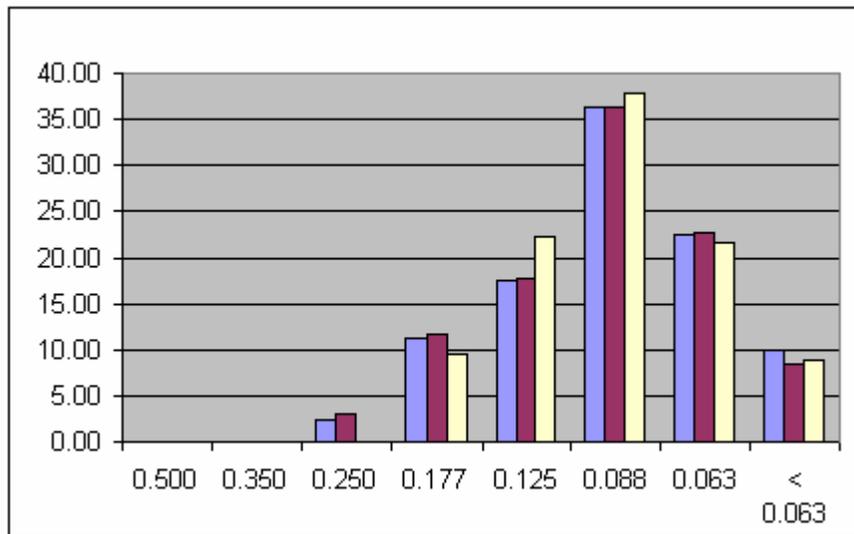
#### 6.7 ENSAIO DE FEVEREIRO DE 2002 PULSO:

**Tipo:** contínuo

**Volume injetado:** 70 litros em 7 eventos de 10 litros cada

**Vazão:** 10 litros/minuto

**Material em suspensão:** Carvão 205 (15% 0,074, 35% 0,105, 35% 0,149,15% 0,210 mm) a distribuição granulométrica do material em suspensão encontra-se na Figura 81.



**Figura 81 – Histograma da distribuição granulométrica carvão presente na mistura em três amostras coletadas antes liberação da corrente. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira.**

**Massa Específica da Mistura:** 1,016 g/cm<sup>3</sup>

**Documentação:** registro da espessura dos depósitos por ultra-som e ponta linimétrica, análises granulométricas a cada 25 cm, registro das formas de leito fotografias digitais.

**Alimentação:** 7 eventos com alimentação contínua a partir do reservatório de preparação da mistura com a calibração da vazão controlada por dois registros, um à montante (gaveta) e o outro à jusante (esfera) do medidor de vazão.

**Característica do fluxo:** Neste ensaio a corrente mantém uma velocidade de deslocamento da cabeça com uma ligeira queda até 275 cm. Neste ponto, sofre uma rápida desaceleração até 600 cm quando sofre uma aceleração até 60 cm voltando a desacelerar. Assim como os experimentos anteriores e mostrou episódios bem definidos de aceleração e desaceleração em alta e baixa frequência. Como pode se ver na Figura 82, estes episódios guardam uma associação direta com a forma da cabeça do fluxo. A Figura 82B mostra que a corrente apresentou uma oscilação em torno do eixo do canal evidenciando a presença de fluxo helicoidal durante o seu deslocamento. Quando atinge a área não-confinada, a corrente, embora mantenha ainda a forma alongada, tende um maior arredondamento que as anteriores.

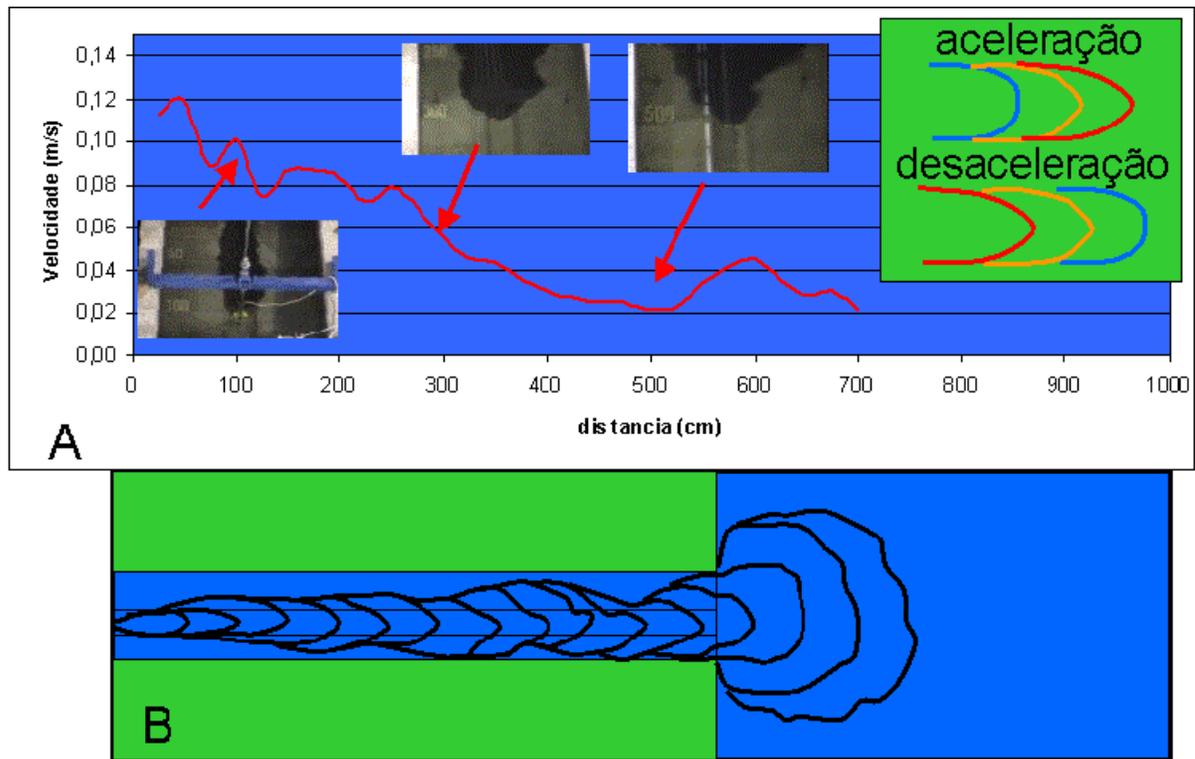
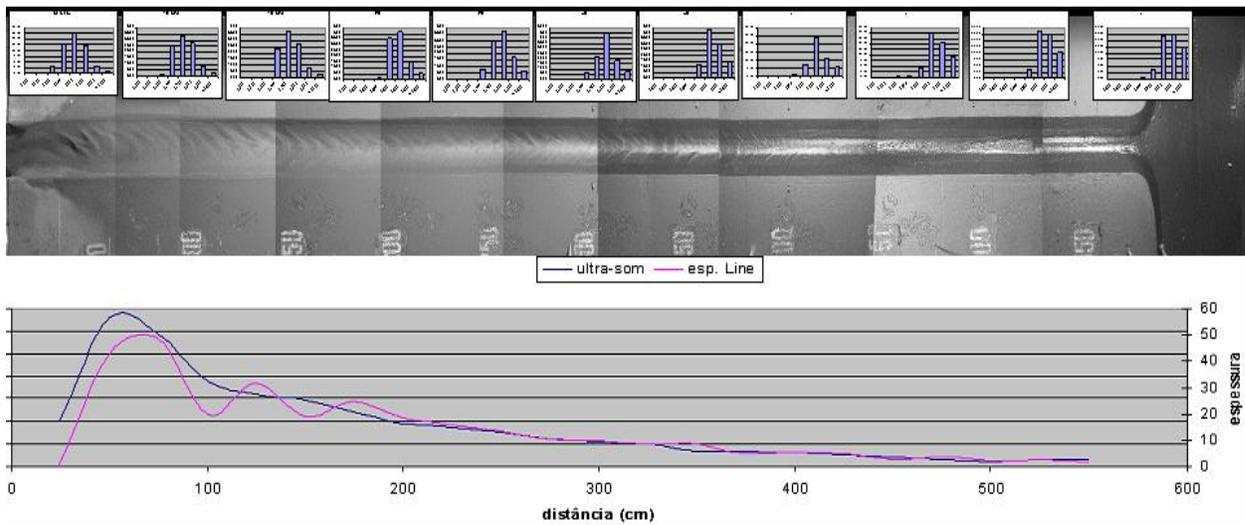


Figura 82 – Relação entre a velocidade da cabeça da corrente e sua forma. A- Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distancia. Fotos indicam a forma da corrente. B – Esquema indicando a variação da forma da cabeça da corrente durante o seu deslocamento.

**Propriedades dos depósitos:** Da mesma forma que os anteriores, este ensaio apresentou um pico de deposição muito próximo ao ponto de alimentação onde foram desenvolvidas formas de leito proeminentes que se desenvolveram, porém, por um trecho mais longo (Figura 83). Granulometricamente, os depósitos apresentaram uma tendência de afinamento no sentido do fluxo tanto na área confinada como na não-confinada. Na região proximal do canal foram coletadas amostras de topo e base onde se pode verificar uma não muito acentuada tendência de afinamento dos grãos para o topo (Figura 84).

As imagens apresentadas nas Figura 84, Figura 85 e Figura 86 mostram formas de leito desenvolvidas entre 0 a 440 cm que apresentam uma redução contínua tanto na sua altura como na distância ente cristas no sentido do fluxo. Em planta, elas se apresentam entre 0 e 150 cm formas com cristas praticamente retilíneas e transversais a fluxo. Entre 150 e 440 cm apresentam forma lingüóide. Aos 330 cm se verifica uma perturbação no padrão de formas de fundo aumentando o espaçamento entre as cristas e tornando sua forma mais complexa. Este ponto coincide com a mudança de declive na calha e, desta forma, atribuímos esta perturbação ao efeito de salto hidráulico.

As curvas granulométricas mostram uma seletividade nos depósitos onde os grãos mais grossos foram depositados próximos à alimentação da corrente com um afinamento acentuado até o final do canal onde há o predomínio das frações mais finas. No intervalo de 25 a 150 cm onde se dispõe de amostras de base e topo foi verificada uma ligeira tendência de afinamento dos grãos para o topo.



**Figura 83 – Uma vista geral do Ensaio Fevereiro de 2002 pulso mostrando as relações entre a granulometria do depósito, a variação da espessura (medição com ponta linimétrica e ultra-som) e a distância percorrida pela corrente (escala em cm).**

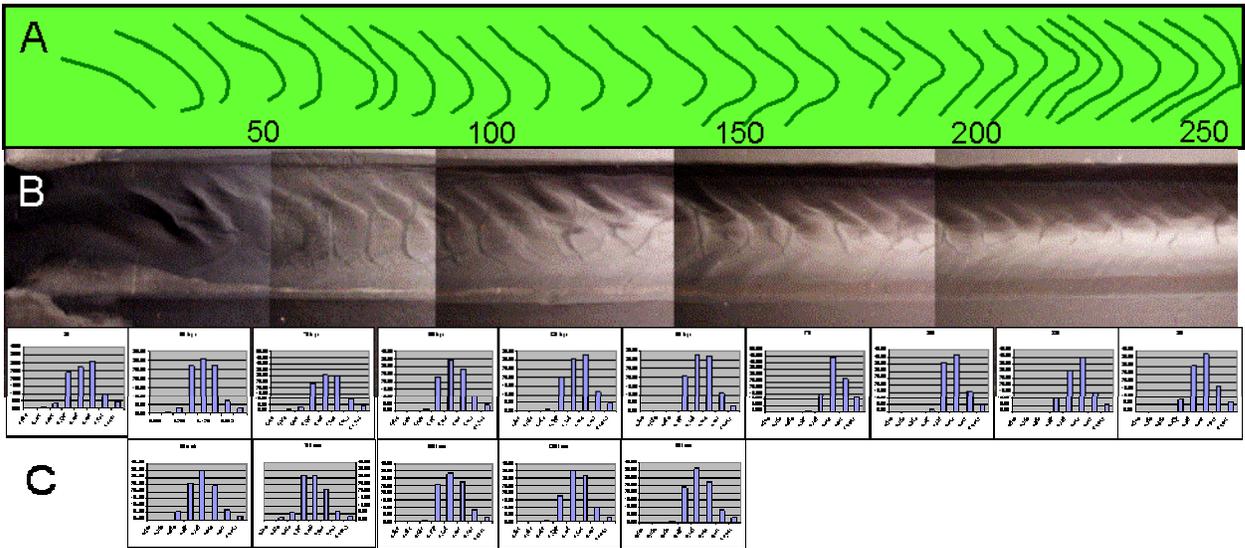


Figura 84 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C) no alto estão representadas as amostras de topo e abaixo as da base.

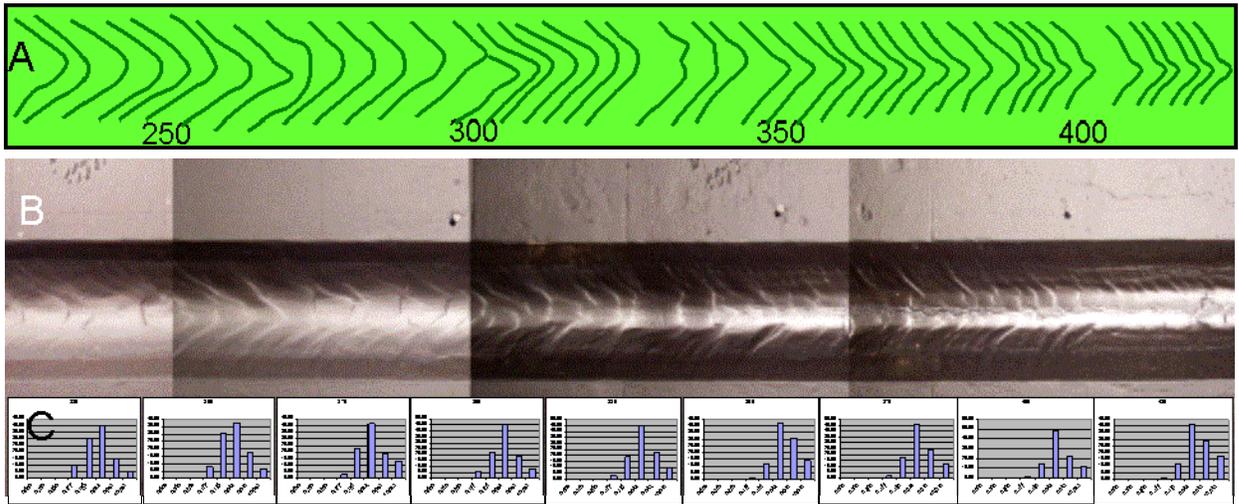
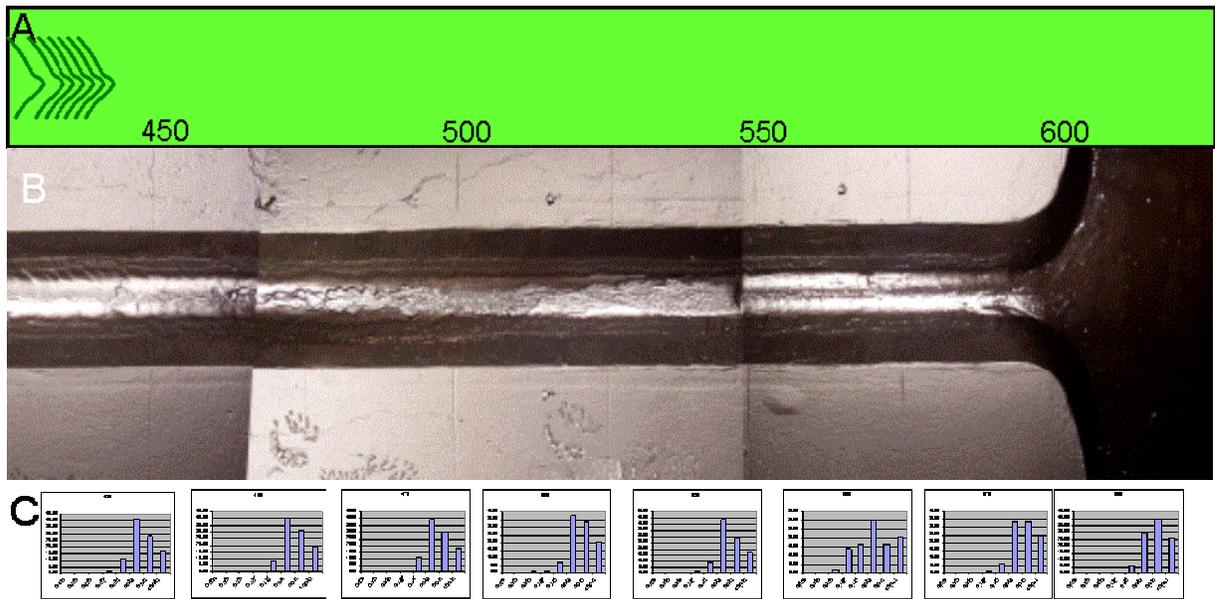
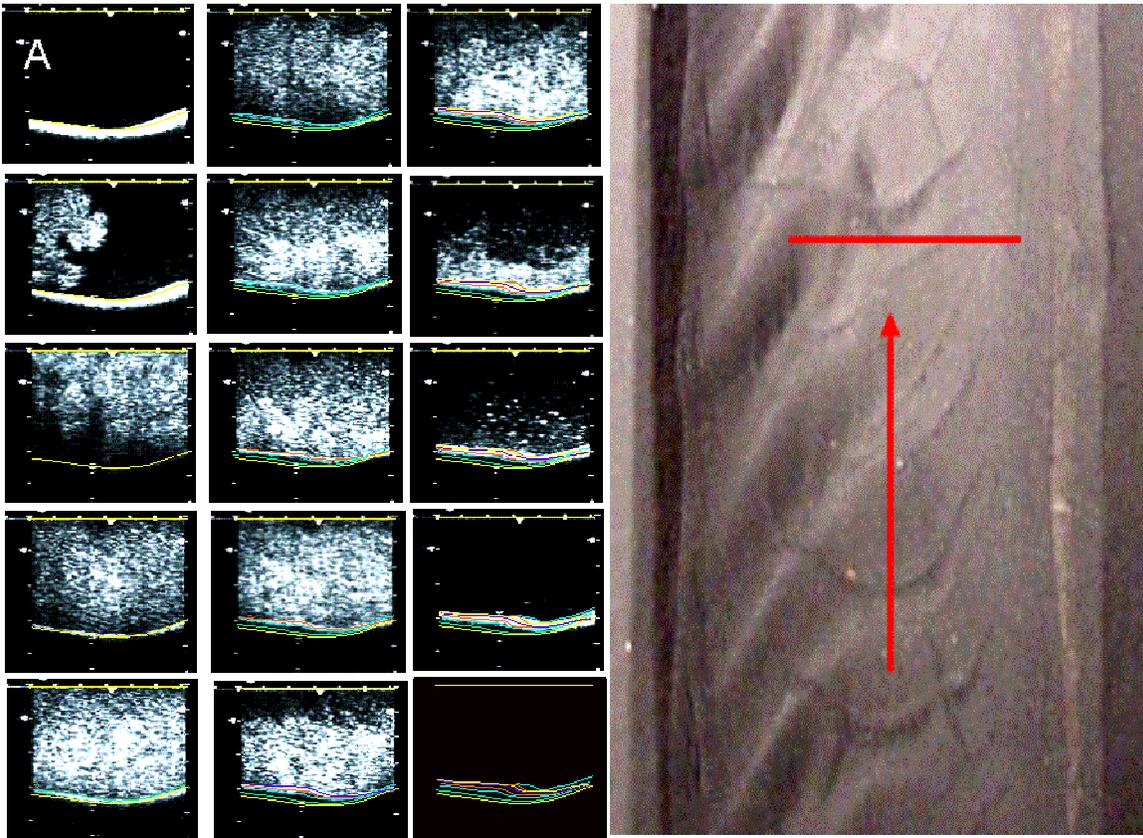


Figura 85 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C).



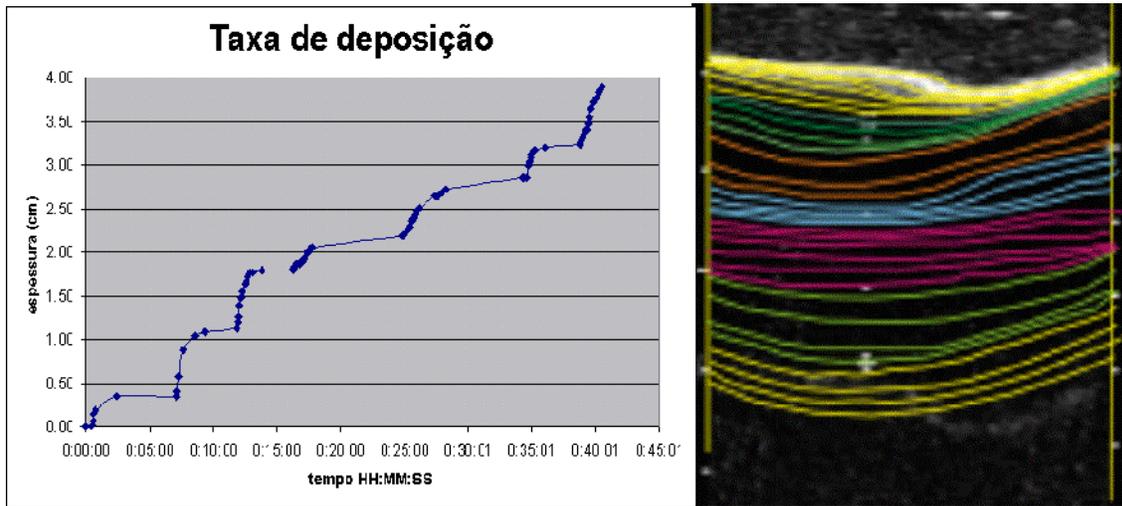
**Figura 86 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C).**

Na Figura 87 é apresentada uma série de imagens de ultra-som que procura ilustrar os estágios de formação de uma forma de leito durante a passagem de uma corrente de densidade. No alto, à esquerda, a imagem da calha antes do início da corrente, enquanto abaixo é apresentada a frente da corrente passando pelo sensor. Nos dois quadros subseqüentes, verifica-se a corrente fluindo sem deposição. No quinto quadro da coluna à esquerda abaixo se verifica o início da deposição marcado pela linha azul. Com a evolução do depósito que pode ser observada na coluna de quadros ao meio, configura-se, à esquerda dos quadros, a formação de um canal produzido pela sedimentação mais acentuada à direita. Na coluna à direita pode-se verificar a situação final do depósito. Sob esse ponto de vista, temos a impressão de que neste processo tivemos a formação de um canal sinuoso com a sua respectiva barra de acreção lateral. Mas, vendo a foto do depósito situada ao lado vemos que, no ponto de observação, marcado pela linha horizontal tivemos a formação de uma ripple na lateral da calha.



**Figura 87 – Imagens ilustrando a formação do depósito durante a passagem da corrente de densidade. Explicações no texto.**

Na Figura 88, temos um quadro ilustrativo de como se processou a sedimentação durante o ensaio que foi desenvolvido por sete eventos. Na imagem à direita, temos, marcadas com cores, diversas linhas que representam superfícies de tempo/estratificação interna do depósito. Cada cor corresponde a um evento. No gráfico à esquerda, temos a evolução da espessura de sedimento ao longo do tempo. Nele, podemos observar que houve variações na taxa de deposição entre os eventos. Esta variação está ligada, principalmente, ao fato de que foi necessário se estabelecer um ponto para medição situado ao centro da imagem e, como se pode notar, houve variação lateral na taxa de deposição que não pode ser representada no gráfico. No geral, verifica-se que há um padrão de redução da taxa de sedimentação ao final de cada evento neste experimento. Outra observação pertinente a ser feita com base nesta figura é que a variação na lateral na taxa de deposição mostra uma estreita relação com a migração do talvegue da calha. Esta migração do talvegue está ligada ao fluxo helicoidal da corrente que gera uma sinuosidade nos depósitos.



**Figura 88** – A esquerda temos um gráfico indicando a evolução do depósito em função do tempo a 100 cm do ponto de alimentação. A direita uma imagem de ultra-som no mesmo ponto onde está representado em linhas coloridas o fundo do canal em diversos momentos do ensaio e sugerindo a estratificação interna do depósito.

**Síntese:** Os padrões deposicionais observados foram similares ao dos ensaios anteriores. Como particularidade deste experimento podemos destacar a observação da formação de formas de fundo e um melhor detalhamento da taxa de deposição.

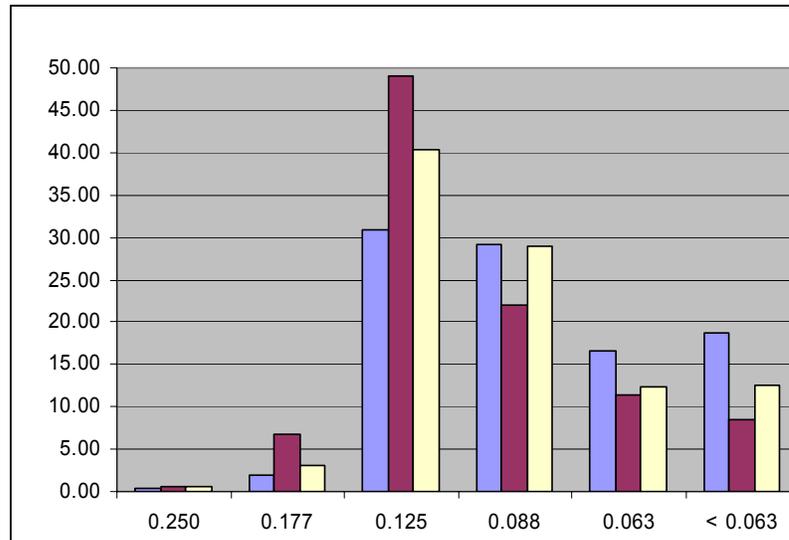
#### 6.8 ENSAIO DE MAIO DE 2002 PULSO:

**Tipo:** contínuo

**Volume injetado:** 100 litros em 10 eventos de 10 litros cada

**Vazão:** 8,5 litros/minuto

**Material em suspensão:** Carvão 205 (15% 0,074, 35% 0,105, 35% 0,149, 15% 0,210 mm) a distribuição granulométrica do material em suspensão encontra-se na Figura 89.



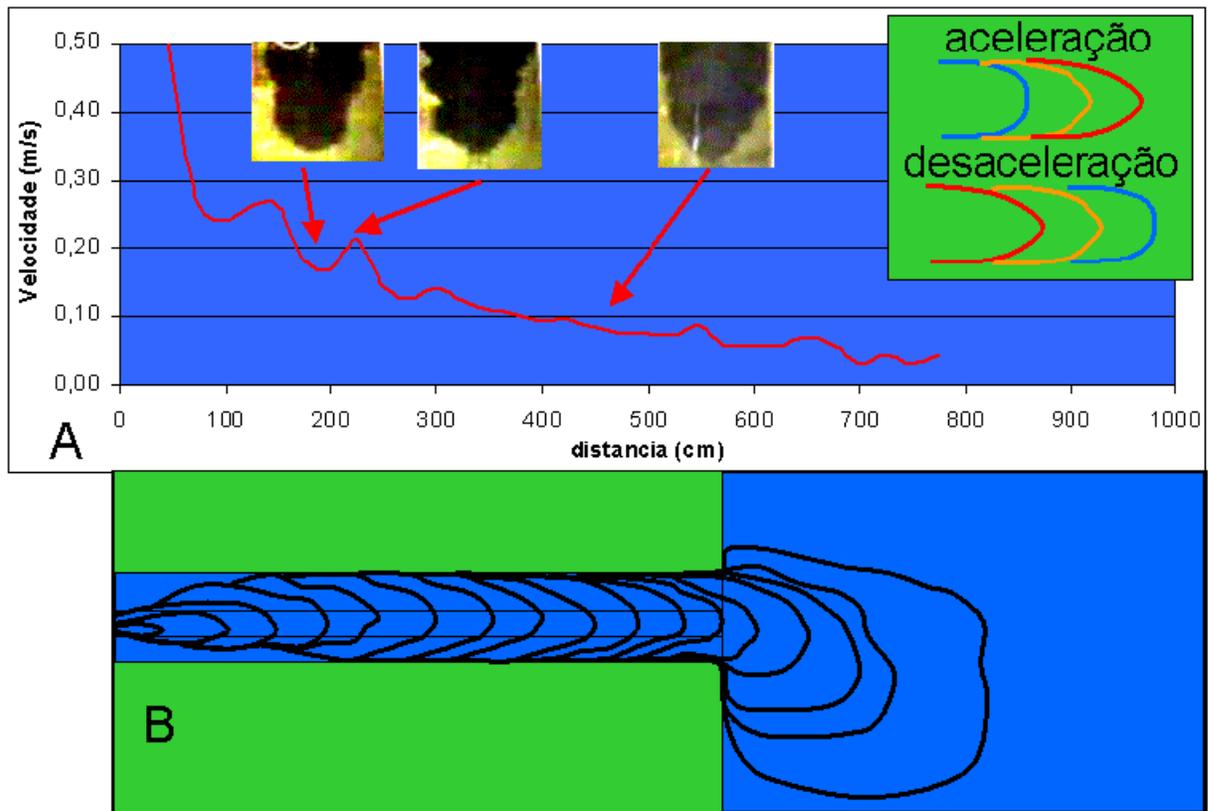
**Figura 89 – Histograma da distribuição granulométrica carvão presente na mistura em três amostras coletadas antes liberação da corrente. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira.**

**Massa Específica da Mistura:** 1,014 g/cm<sup>3</sup>

**Documentação:** Imagens digitais da evolução da corrente e registro da espessura dos depósitos por ultra-som.

**Alimentação:** 10 eventos com alimentação contínua a partir do reservatório de preparação da mistura com a calibração da vazão controlada por dois registros, um à montante (gaveta) e o outro à jusante (esfera) do medidor de vazão.

**Característica do fluxo:** Neste ensaio, a corrente apresenta uma forte desaceleração no início do fluxo. Aos 100 cm, há uma redução de desaceleração que se mantém até o final do ensaio, assim como os experimentos anteriores e mostrou episódios bem definidos de aceleração e desaceleração em alta e baixa frequência. Como se pode ver, na Figura 90, estes episódios guardam associação direta com a forma da cabeça do fluxo. A Figura 90B mostra que a corrente apresentou uma oscilação em torno do eixo do canal evidenciando a presença de fluxo helicoidal durante o seu deslocamento. Quando atinge a área não-confinada, a corrente apresentou uma forte divergência para a direita, indicando que o movimento helicoidal da corrente foi propagado para a zona não-confinada do fluxo.



**Figura 90 – Relação entre a velocidade da cabeça da corrente e sua forma. A- Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distancia. Fotos indicam a forma da corrente. B – Esquema indicando a variação da forma da cabeça da corrente durante o seu deslocamento.**

**Propriedades dos depósitos:** Este experimento foi prejudicado pelo fato de que o esvaziamento do tanque se processou de forma muito rápida destruindo a organização dos depósitos como pode ser visualizado na Figura 91. Entretanto como haviam sido feitas medições com o auxílio do aparelho de ultra-som foi possível se obter informações sobre a espessura dos depósitos e sobre como se processou a sedimentação. Da mesma forma que os anteriores, este ensaio apresentou um pico de deposição muito próximo ao ponto de alimentação (Figura 91). Não foi possível analisar a granulometria dos depósitos.

Na Figura 92 temos um quadro ilustrativo de como se processou a sedimentação durante o ensaio que foi desenvolvido em 10 eventos. Na imagem à direita, temos marcadas com cores diversas linhas que representam superfícies de tempo/estratificação interna do depósito. No gráfico à esquerda, temos a evolução da espessura de sedimento ao longo do tempo. Nele, podemos observar que houve variações na taxa de deposição entre os eventos.

Esta variação está ligada principalmente ao fato de que foi necessário se estabelecer um ponto para medição situado ao centro da imagem e, como se pode observar, houve variação lateral na espessura do depósito que não pode ser representada no gráfico. Não ficou clara a redução na taxa de sedimentação no final dos eventos como no experimento anterior.

**Síntese:** Os padrões deposicionais observados foram similares ao dos ensaios anteriores.

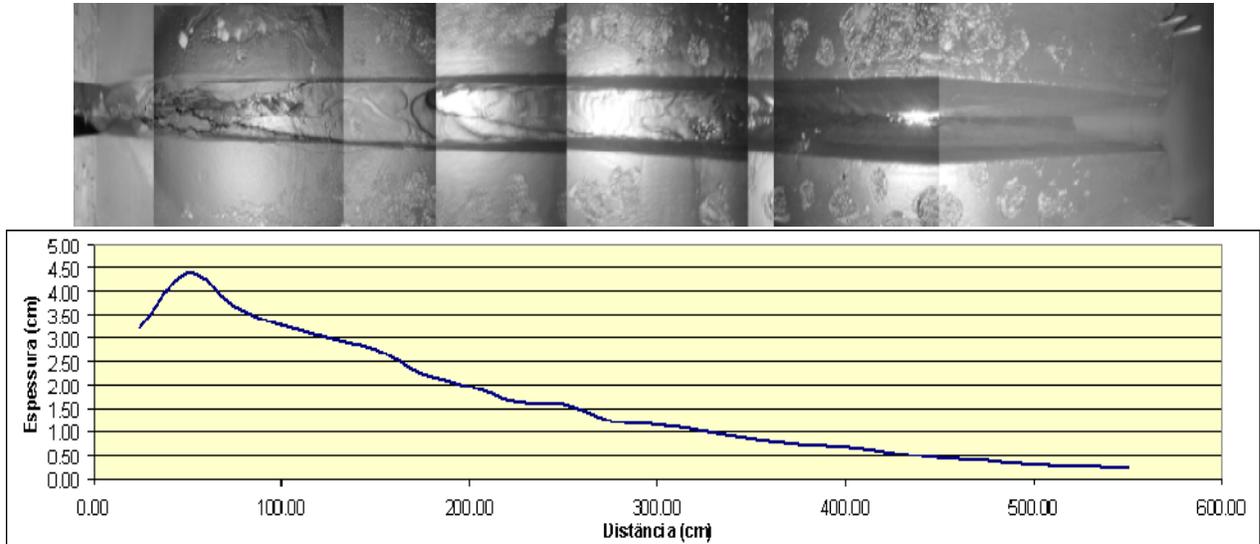


Figura 91 – Uma vista geral do Ensaio maio de 2002 Pulso mostrando a variação da espessura (medição com ultra-som) com distância percorrida pela corrente (escala em cm).

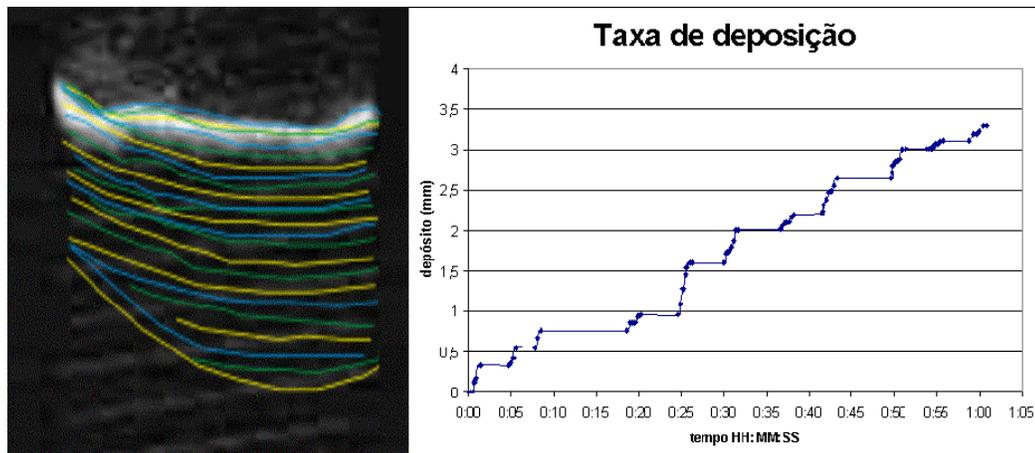


Figura 92 - A direita temos um gráfico indicando a evolução do depósito em função do tempo a 100 cm do ponto de alimentação. A esquerda uma imagem de ultra-som no mesmo ponto onde está representado em linhas coloridas o fundo do canal em diversos momentos do ensaio e podem representar a estratificação interna do depósito.

## 6.9 ENSAIO DE MAIO DE 2002 WORK:

**Tipo:** contínuo

**Volume injetado:** 125 litros

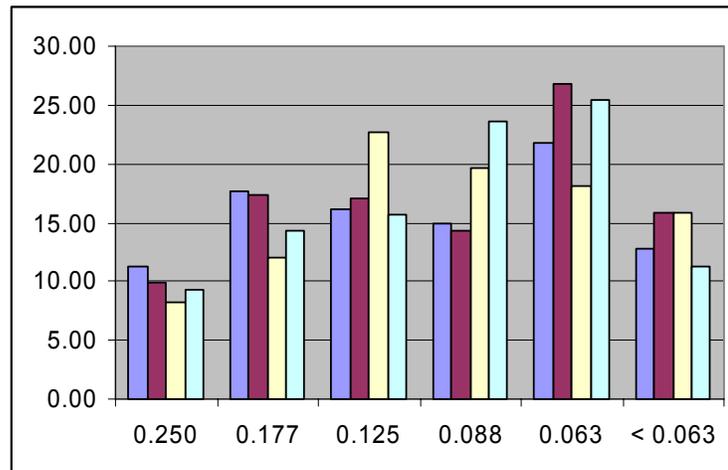
**Vazão:** 25,0 litros/minuto

**Material em suspensão:** Carvão 205 (15% 0,074, 35% 0,105, 35% 0,149,15% 0,210 mm) a distribuição granulométrica do material em suspensão encontra-se na Figura 93.

**Massa Específica da Mistura:** 1,005 g/cm<sup>3</sup>

**Documentação:** registro parcial da evolução da espessura do depósito a 100 cm com ultrassom, registro da espessura dos depósitos por ponta linimétrica, análises granulométricas a cada 25 cm, registro das formas de leito com a câmara de vídeo.

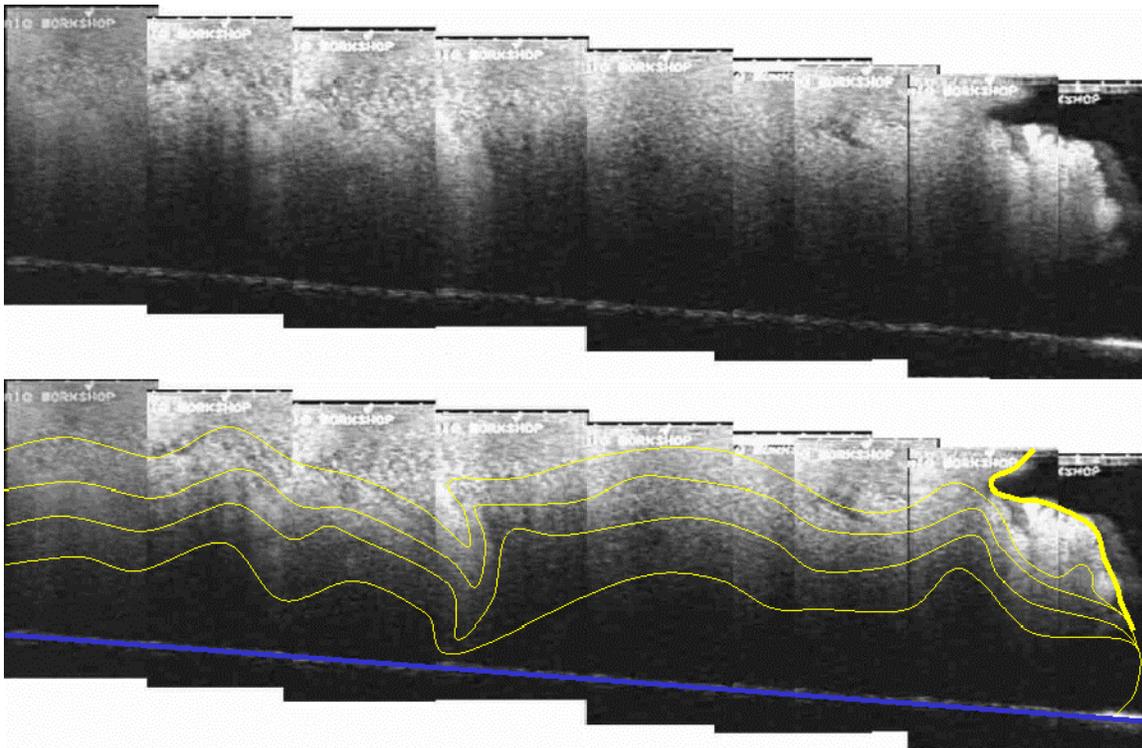
**Alimentação:** contínua a partir do reservatório de preparação da mistura com a calibração da vazão controlada por dois registros, um à montante (gaveta) e o outro à jusante (esfera) do medidor de vazão.



**Figura 93 – Histograma da distribuição granulométrica carvão presente da mistura em quatro amostras coletadas antes liberação da corrente. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira.**

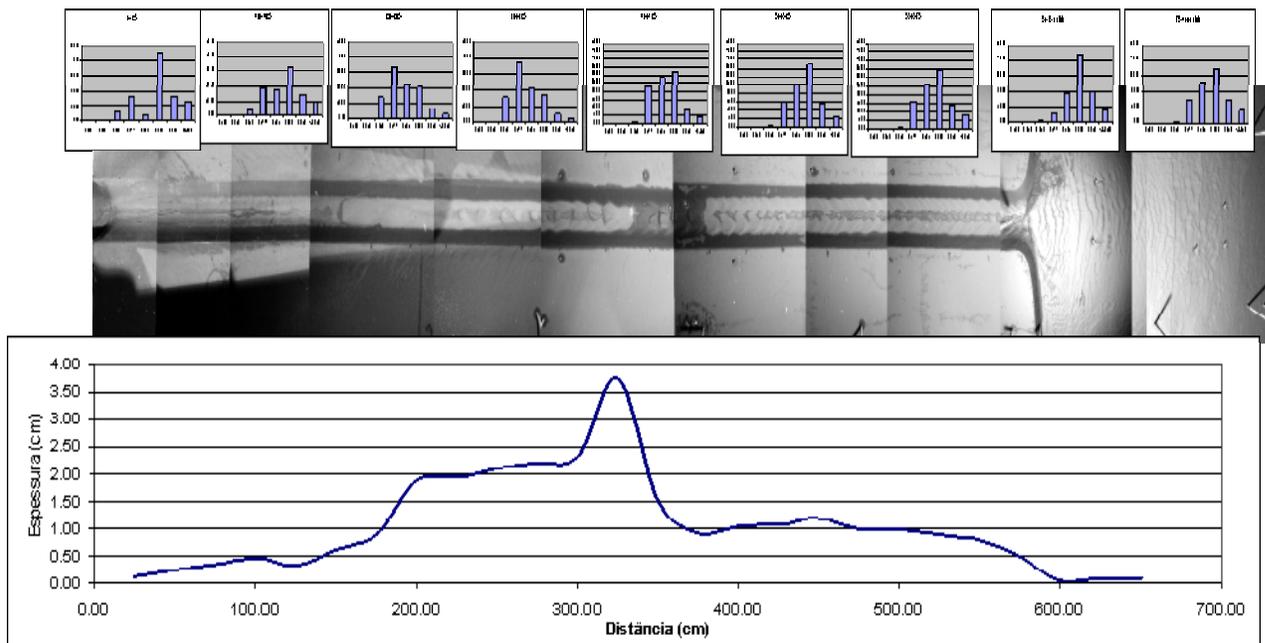
**Característica do fluxo:** Devido a não ter sido filmada a evolução da corrente durante este ensaio não foi possível o cálculo da velocidade da corrente. Por outro lado, o sensor de ultra-som foi posicionado transversalmente ao fluxo possibilitando uma nova visualização da estrutura interna da corrente.

A Figura 94 mostra uma composição de imagens de ultra-som que procuram representar a estrutura interna da corrente durante o fluxo. No topo, é apresentada a imagem da corrente sem interpretação. Na base, são interpretadas linhas que procuram dividir o fluxo em zonas de densidade diferentes. Nesta figura, tenta-se mostrar estaticamente o que pode ser verificado de forma dinâmica nas imagens de ultra-som. Neste experimento, ficou claro o caráter pulsante da corrente durante a sua passagem. Um desses pulsos está representado pela reentrância das linhas aproximadamente no meio da imagem. Esta reentrância mostra a passagem de uma frente de onda que se desloca mais acelerada que o fluxo inicial avançando no sentido da cabeça da corrente.



**Figura 94 – Imagem de ultra-som da corrente. Os tons de cinza mais claros indicam menores densidades na corrente. A primeira imagem superior representa uma seção longitudinal ao fluxo não interpretada. Na inferior são interpretadas linhas dividindo o fluxo em porções com densidades diferentes (linhas amarelas) em azul é marcado o fundo do canal.**

**Propriedades dos depósitos:** Este foi o primeiro ensaio realizado em que o máximo de deposição se deslocou para o meio do canal e onde as influências da quebra de relevo e do desconfinamento puderam ser constatadas com clareza. Na Figura 95, pode-se verificar que o pico de deposição se deu no ponto em que há a mudança de declive no canal. A partir deste ponto, há um rápido afinamento na espessura sedimentar que se mantém praticamente constante até término da calha. No ponto de transição entre calha e bacia, não houve registro de sedimentação. Na área não-confinada, foram geradas ripples de crista reta/ sinuosa transversais a direção de fluxo. Houve também a formação de ripples associadas aos depósitos de extravasamento da calha no intervalo entre 100 e 300 cm. Estas ripples são de cristas retas e de baixa amplitude. Em geral, as cristas apresentam um ângulo de  $60^\circ$  com a direção de fluxo. É importante se salientar que próximo à zona de alimentação não houve sedimentação. De uma forma geral, foram observadas inúmeras formas de leito que serão descritas a seguir. A granulometria dos depósitos indica uma tendência granodécrescente no sentido do fluxo. Não foi possível se obter amostras em vários níveis para observar mudanças na vertical.



**Figura 95 – Uma vista geral do Ensaio Dezembro 01 mostrando as relações entre a granulometria do depósito, a variação da espessura e a distância percorrida pela corrente (escala em cm).**

A imagem apresentada na Figura 96 mostra a zona onde praticamente não houve sedimentação. Neste intervalo, constata-se que material depositado não apresenta seleção granulométrica. Com o espessamento da camada a 150 cm desenvolve-se um padrão granulométrico bem definido com moda em 0,177 mm que se mantém até o pico de deposição (Figura 97). A partir deste ponto há uma transição com afinamento dos grãos passando a moda, então, para 0,088 mm. As formas de leito desenvolvidas neste experimento são muito variadas. Entre 0 a 200 cm não são desenvolvidas ripples. A partir de 200, as ripples aparecem e vão aumentando a sua dimensão mostrando, inicialmente, crista reta e oblíqua ao fluxo e passa a ter forma de barcana, gradualmente até 300. Entre 300 e 340, onde há a coincidência com o pico de deposição, as cristas ficam sinuosas. Deste ponto até o final do canal, as cristas ficam retas e transversais ao fluxo assumindo progressivamente a forma lingüóide (Figura 97 e Figura 98).

Na zona não-confinada (Figura 99) foi desenvolvida uma série de ripples com cristas praticamente retilíneas transversais a direção do canal. Na área próxima à desembocadura (600 a 650 cm) formou-se um cone principal na direção do fluxo e dois outros secundários e menores à direita e à esquerda do principal. Entre 650 e 725 cm, foi desenvolvido um outro cone de barras mais fechado que o primeiro.

**Síntese:** A elevada vazão de alimentação deste ensaio parece ter propiciado um padrão sedimentar diferente dos anteriores e pela segunda vez foi depositada uma camada significativa de sedimento na área não-confinada. A visualização do fluxo com o scanner de ultra-som possibilitou a verificação do caráter pulsado do fluxo através de ondas internas à corrente.

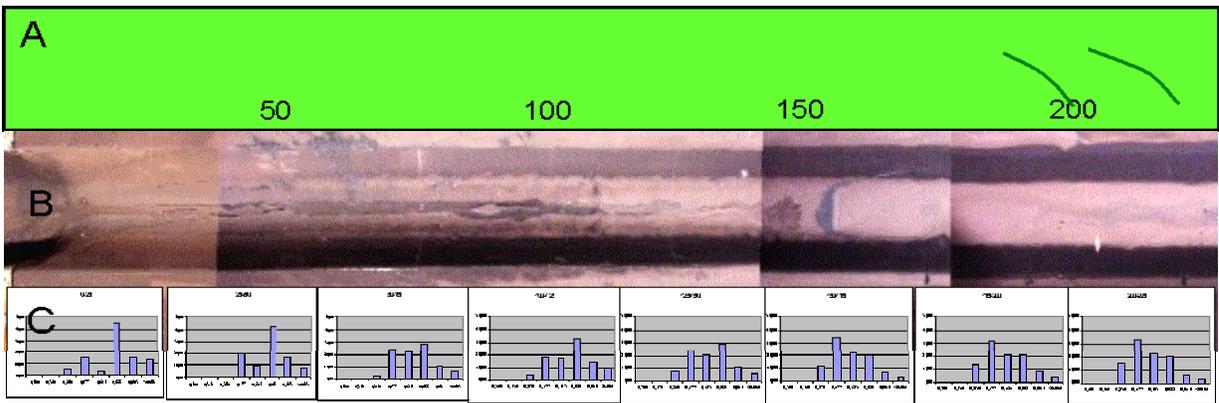


Figura 96 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C).

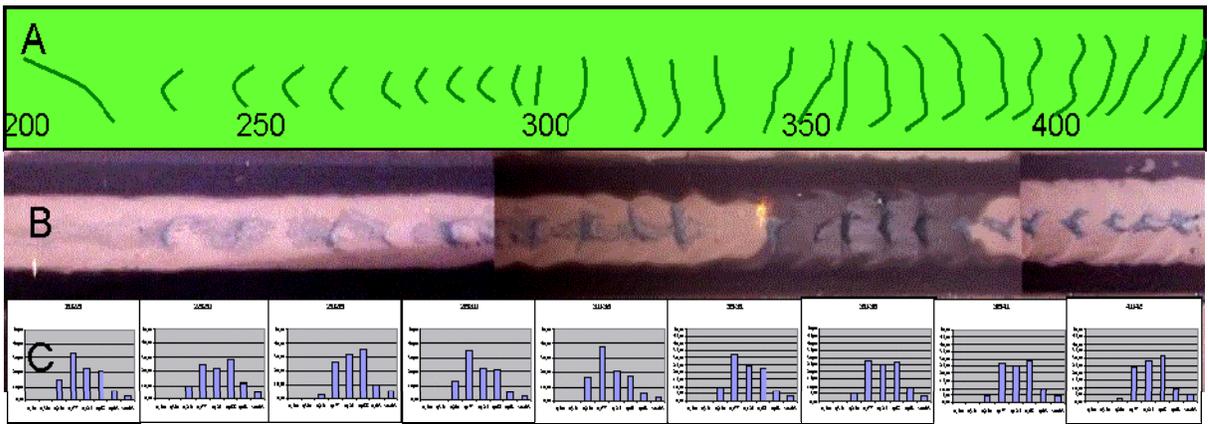


Figura 97 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C).

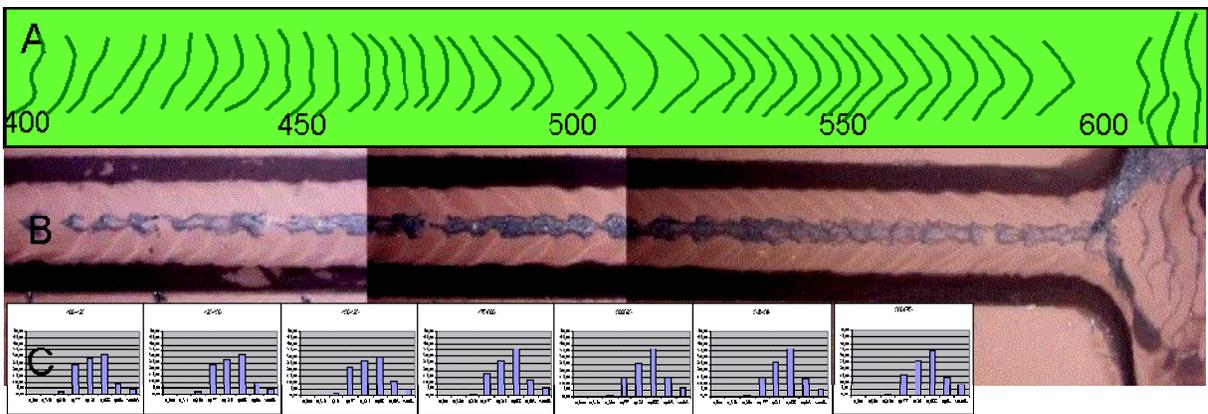


Figura 98 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C).

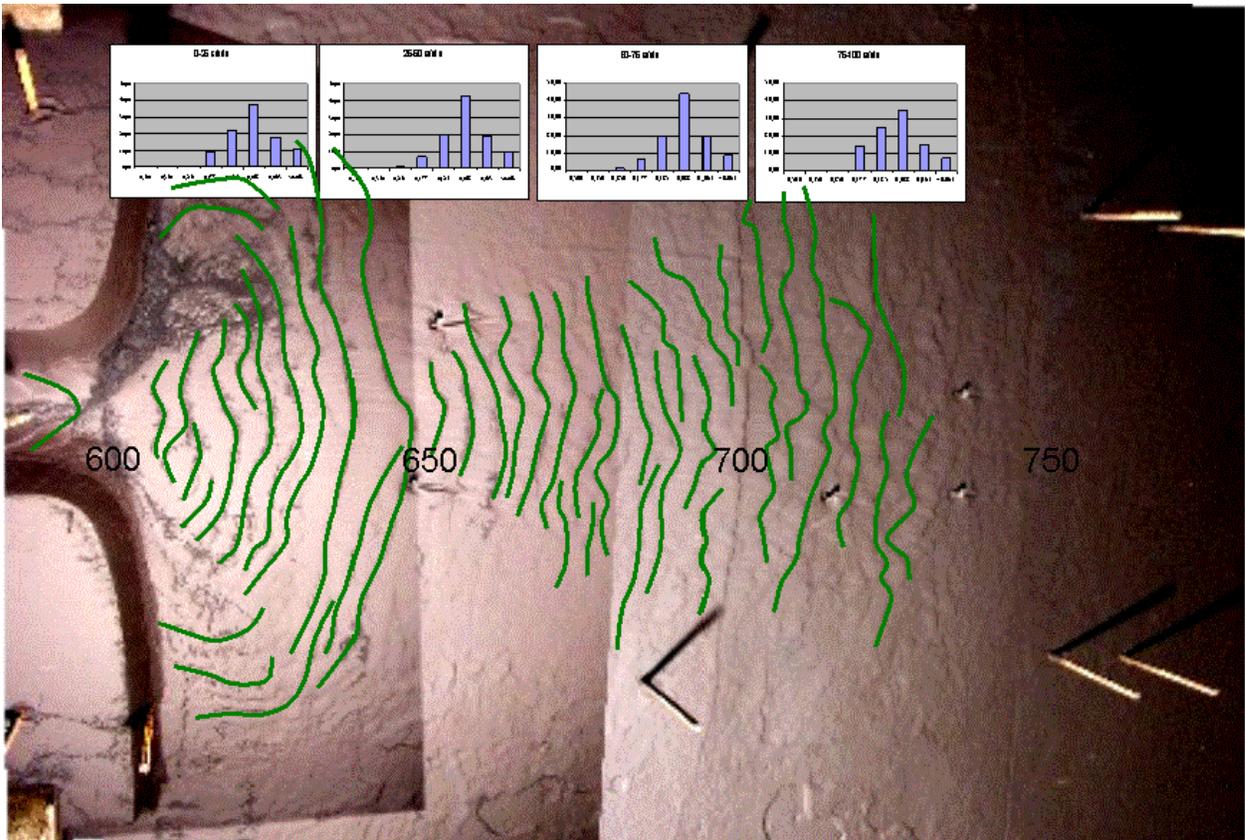


Figura 99 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica(C).

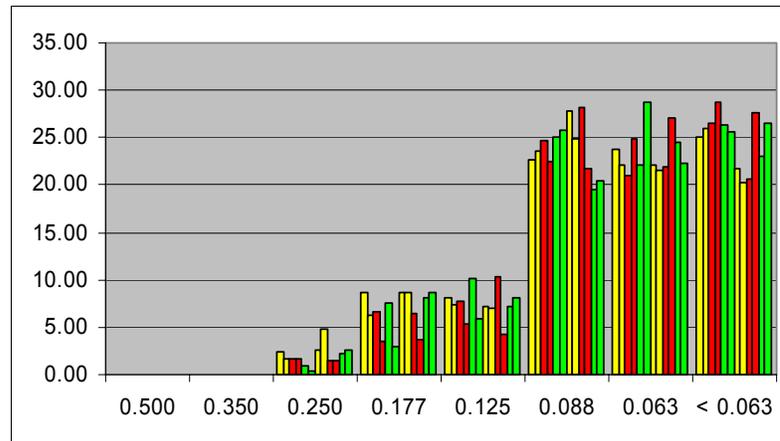
#### 6.10 ENSAIO DE JUNHO DE 2002 PULSO:

**Tipo:** contínuo

**Volume injetado:** 124 litros em 4 eventos de 31 litros cada

**Vazão:** 27 litros/minuto

**Material em suspensão:** Carvão 205 (15% 0,074, 35% 0,105, 35% 0,149,15% 0,210 mm) a distribuição granulométrica do material em suspensão encontra-se na Figura 100.



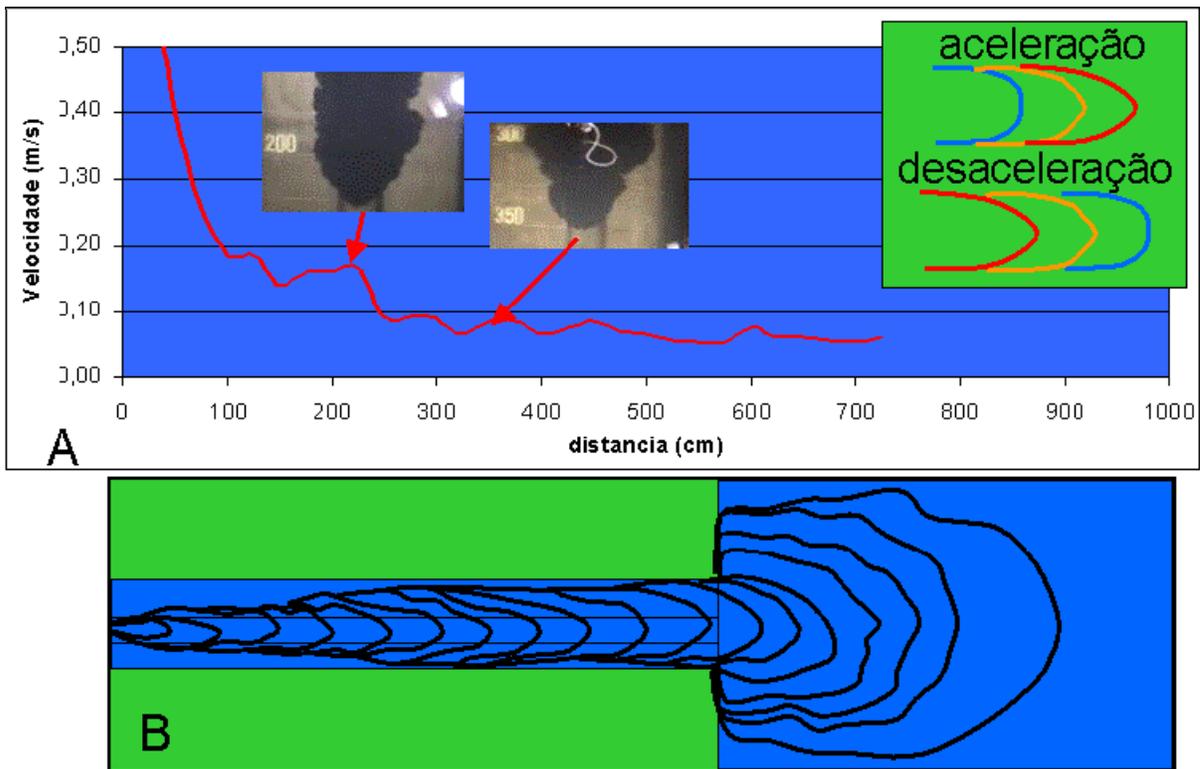
**Figura 100** – Histograma da distribuição granulométrica carvão presente da mistura em 12 amostras coletadas duas antes e duas após os três primeiros eventos. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira.

**Massa Específica da Mistura:** 1,012 g/cm<sup>3</sup>

**Documentação:** registro da espessura dos depósitos por ultra-som e ponta linimétrica, análises granulométricas a cada 25 cm, registro das formas de leito fotografias digitais.

**Alimentação:** 4 eventos com alimentação contínua a partir do reservatório de preparação da mistura com a calibração da vazão controlada por dois registros, um à montante (gaveta) e o outro à jusante (esfera) do medidor de vazão.

**Característica do fluxo:** Ocorre uma rápida desaceleração do fluxo ao liberar a corrente até 100 cm. A partir deste ponto a corrente passa a perder velocidade em uma taxa menor apresentando episódios bem definidos de aceleração e desaceleração em alta e baixa frequência (Figura 101). Estes episódios guardam uma associação direta com a forma da cabeça do fluxo. A Figura 101B mostra que a corrente apesar de apresentar uma oscilação em torno do eixo do canal este é menos evidente que nos experimentos anteriores. Quando atinge a área não-confinada a corrente apresenta a forma alongada.



**Figura 101 – Relação entre a velocidade da cabeça da corrente e sua forma. A- Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distancia. Fotos indicam a forma da corrente. B – Esquema indicando a variação da forma da cabeça da corrente durante o seu deslocamento.**

**Propriedades dos depósitos:** A principal característica deste ensaio é o desenvolvimento de depósitos com pequena espessura. Foi registrado no seu máximo deposicional apenas 0.9 cm sedimentação. Da mesma forma que no ensaio anterior, a alta vazão de descarga imprimiu de forma marcante na sedimentação os efeitos da quebra de declividade e do desconfinamento. Na Figura 102, pode se notar variações expressivas tanto na espessura sedimentar quanto na granulometria dos depósitos após a mudança de declive situada a 330 cm. Outra característica deste ensaio é o desenvolvimento de depósitos expressivos de extravasamento do canal na área onde ocorre a maior espessura de sedimento na calha entre 50 e 250 cm. Estes depósitos desenvolveram ripples de crista sinuosas orientadas praticamente perpendiculares à direção de fluxo.

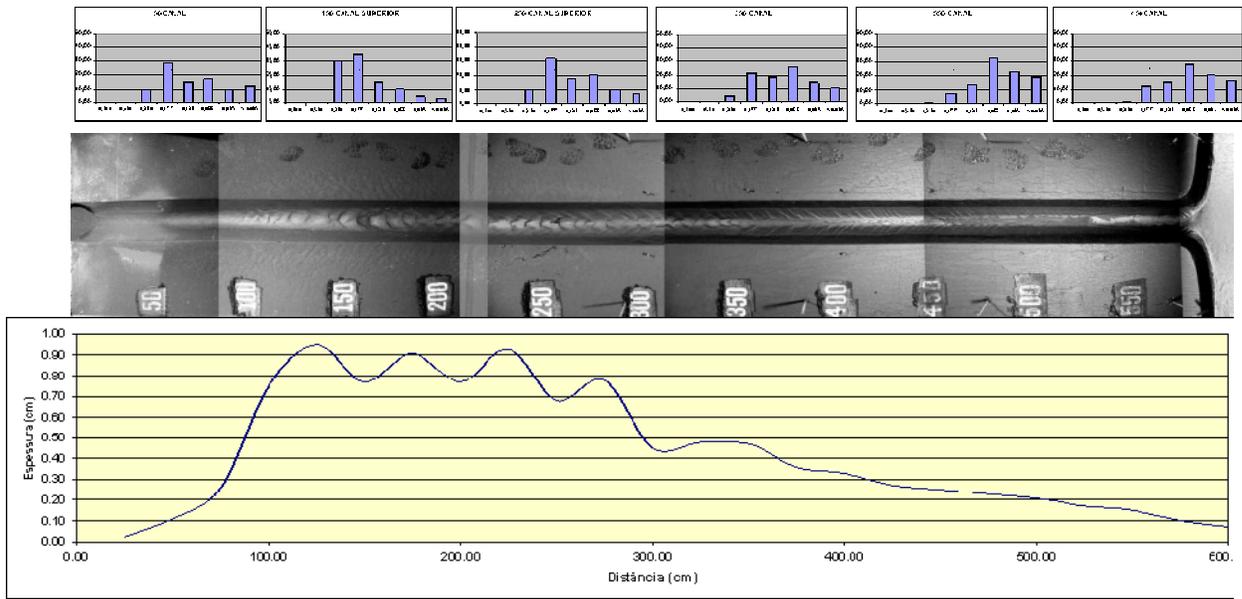


Figura 102 – Uma vista geral do Ensaio Fevereiro de 2002 pulso mostrando as relações entre a granulometria do depósito, a variação da espessura (medição com ponta linimétrica e ultra-som) e a distância percorrida pela corrente (escala em cm).

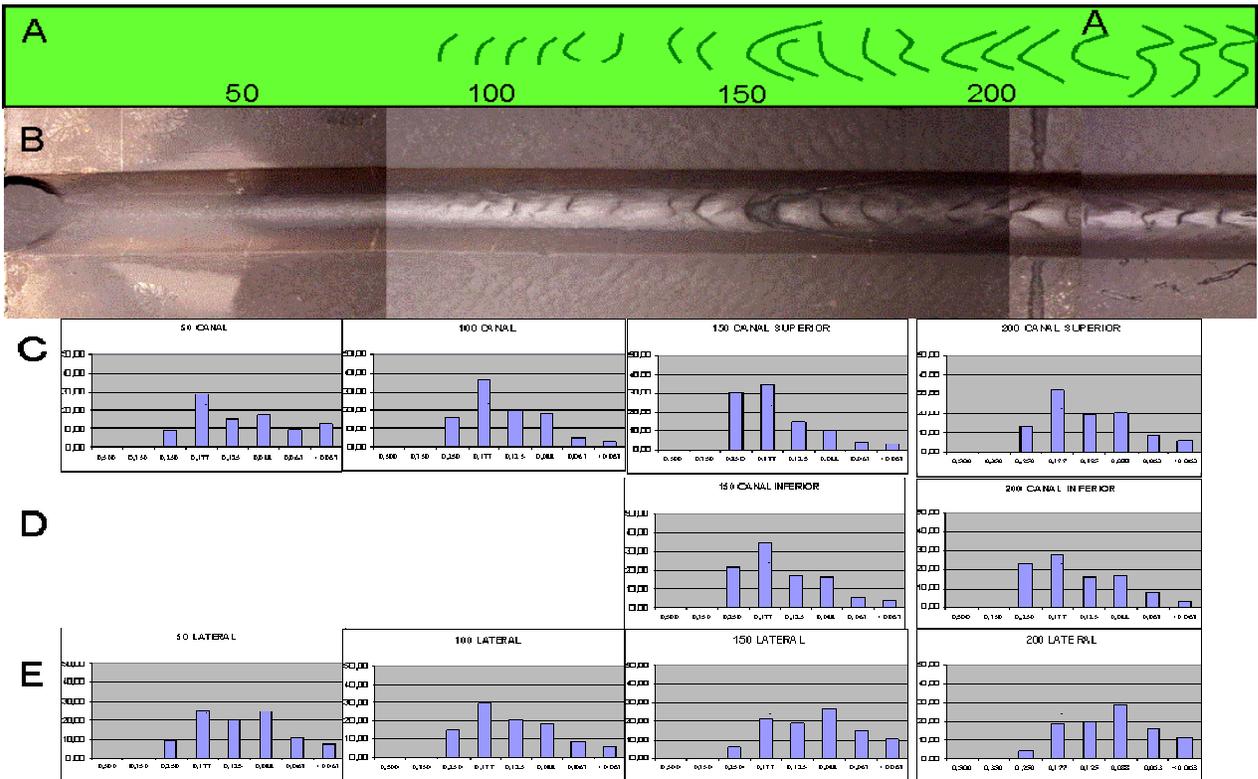


Figura 103 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica. (C) amostras de topo, (D) da base (E) extravazamento.

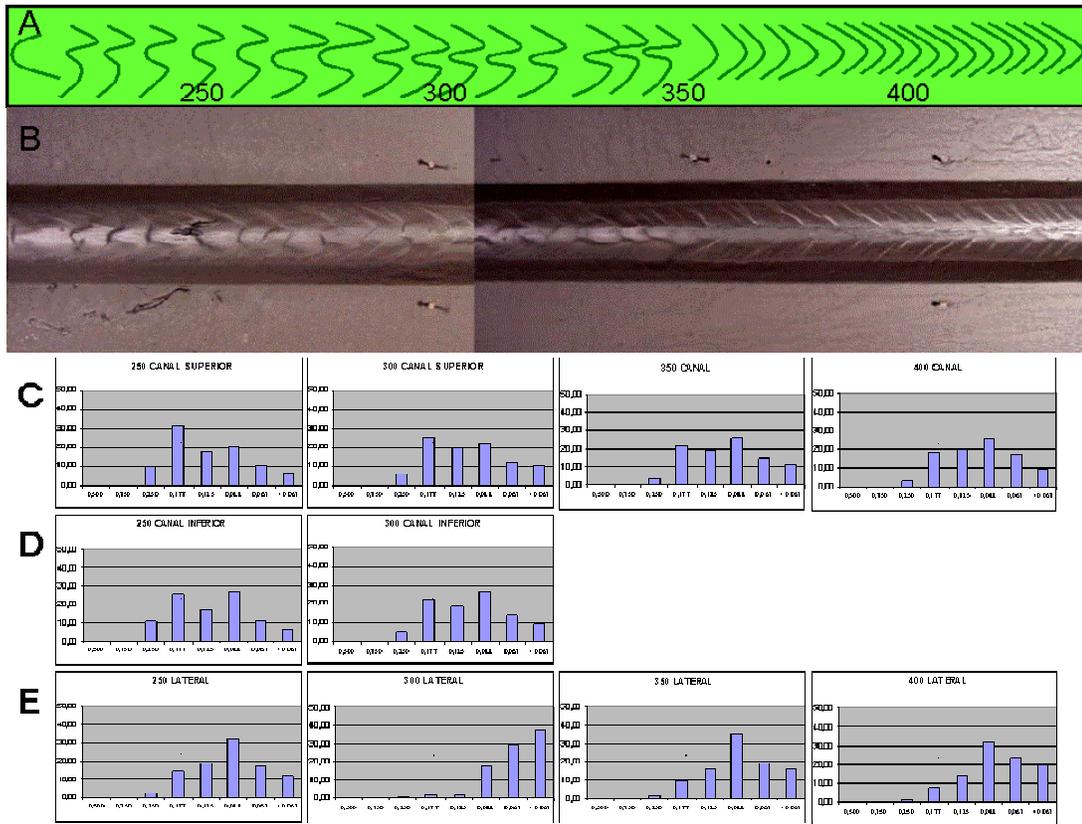


Figura 104 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica. (C) amostras de topo, (D) da base (E) extravasamento.

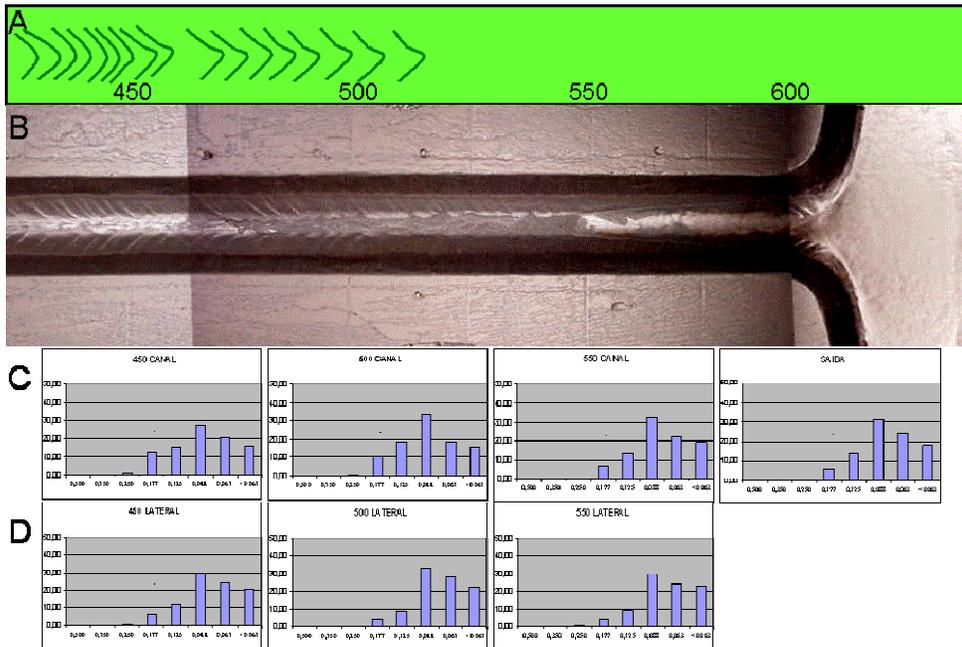


Figura 105 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica. (C) amostras de topo, (D) da base (E) extravasamento.

Na Figura 103, pode-se observar a área onde ocorre o espessamento inicial dos depósitos que apresentam inicialmente formas de leito de barcana que vão aumentando suas dimensões no sentido do fluxo até 225 cm. Neste ponto, aparecem ripples com forma de transição entre barcana e lingüóide que se mantêm até 350 cm (Figura 105) quando assumem uma forma lingüóide melhor definida até o final do canal.

As análises granulométricas indicam que os depósitos apresentam pouca gradação tanto no sentido do fluxo como na vertical (Figura 103A e B e Figura 104A e B). É notável, entretanto, a mudança na granulometria que ocorre na área de variação na inclinação do canal com uma piora na seleção e uma diminuição dos sedimentos.

Os depósitos de extravasamento desenvolveram formas de leito entre 100 e 250 cm. Como podem ser vistas nas Figura 102 e Figura 103 são ripples com cristas sinuosas oblíquas à direção de fluxo. A granulometria destes sedimentos é mais fina que os que se desenvolvem na calha. Na porção não-confinada (Figura 106), os sedimentos são finos e apresentam pouca espessura (<1 mm), mostram uma ligeira tendência a de granodecrescência no sentido do fluxo.

**Síntese:** Os padrões deposicionais observados foram similares ao do ensaio anterior. Como particularidade deste experimento podemos destacar a observação da formação de formas de leito na região de extravasamento do canal.

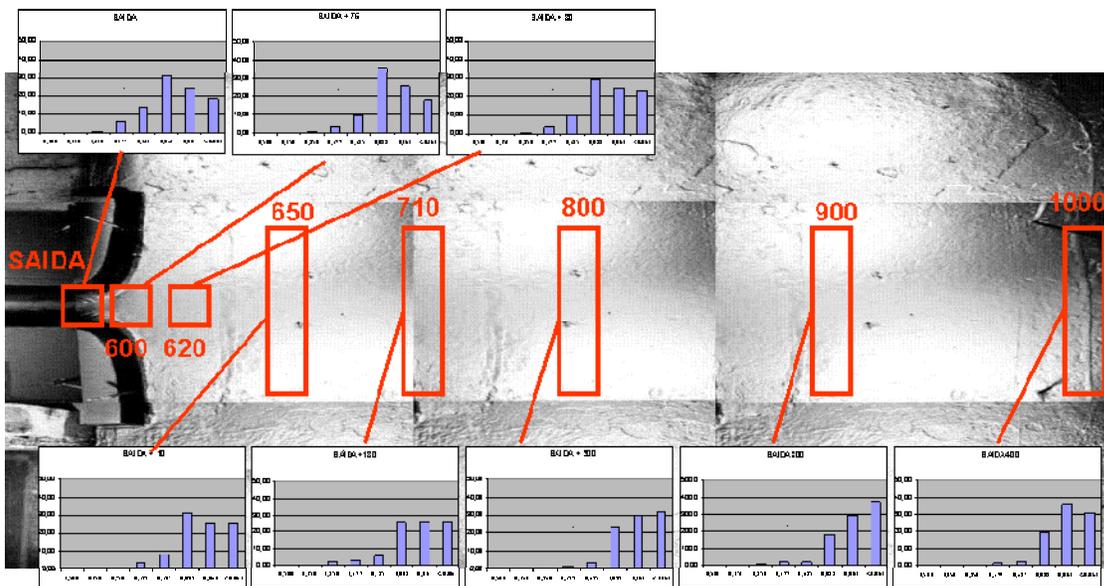


Figura 106 – Imagem indicando as características dos depósitos na área não confinada.

### 6.11 ENSAIO DE JANEIRO DE 2003 PULSO:

**Tipo:** contínuo

**Volume injetado:** 480 litros em 4 eventos de 120 litros cada.

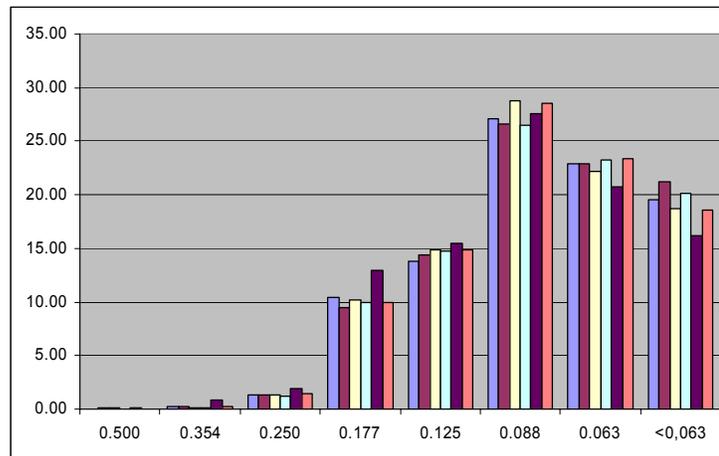
**Vazão:** 36 litros/minuto.

**Material em suspensão:** Carvão 205 (15% 0,074, 35% 0,105, 35% 0,149,15% 0,210 mm) a distribuição granulométrica do material em suspensão encontra-se na Figura 107.

**Massa Específica da Mistura:** 1,042 g/cm<sup>3</sup>

**Documentação:** registro da espessura dos depósitos por ultra-som e ponta linimétrica, análises granulométricas a cada 25 cm, registro das formas de leito fotografias digitais.

**Alimentação:** 4 eventos com alimentação contínua a partir do reservatório de preparação da mistura com a calibração da vazão controlada por dois registros, um à montante (gaveta) e o outro à jusante (esfera) do medidor de vazão.



**Figura 107 – Histograma da distribuição granulométrica carvão presente da mistura em 6 amostras coletadas antes e após os três primeiros eventos. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira.**

**Característica do fluxo:** Ocorre uma rápida desaceleração do fluxo ao liberar a corrente até 150 cm. A partir deste ponto a corrente passa a perder velocidade em uma taxa menor apresentando episódios bem definidos de aceleração e desaceleração em alta e baixa frequência (Figura 108). Estes episódios guardam uma associação direta com a forma da cabeça do fluxo. A Figura 108B mostra que a corrente, apesar de apresentar uma oscilação em torno do eixo do canal, mostra-se menos evidente que nos ensaios anteriores. Quando atinge a área não-confinada, a corrente apresenta a forma alongada. Neste ensaio foi possível monitorar a velocidade da corrente durante o fluxo através de um anemômetro de quartzo posicionado a 175 cm do ponto de alimentação. Foi também monitorada, por imagens de ultra-som, a altura da camada basal mais densa no mesmo ponto de observação. Infelizmente, após o segundo evento foi verificado que o sensor havia sido danificado não sendo possível acompanhar os demais eventos.

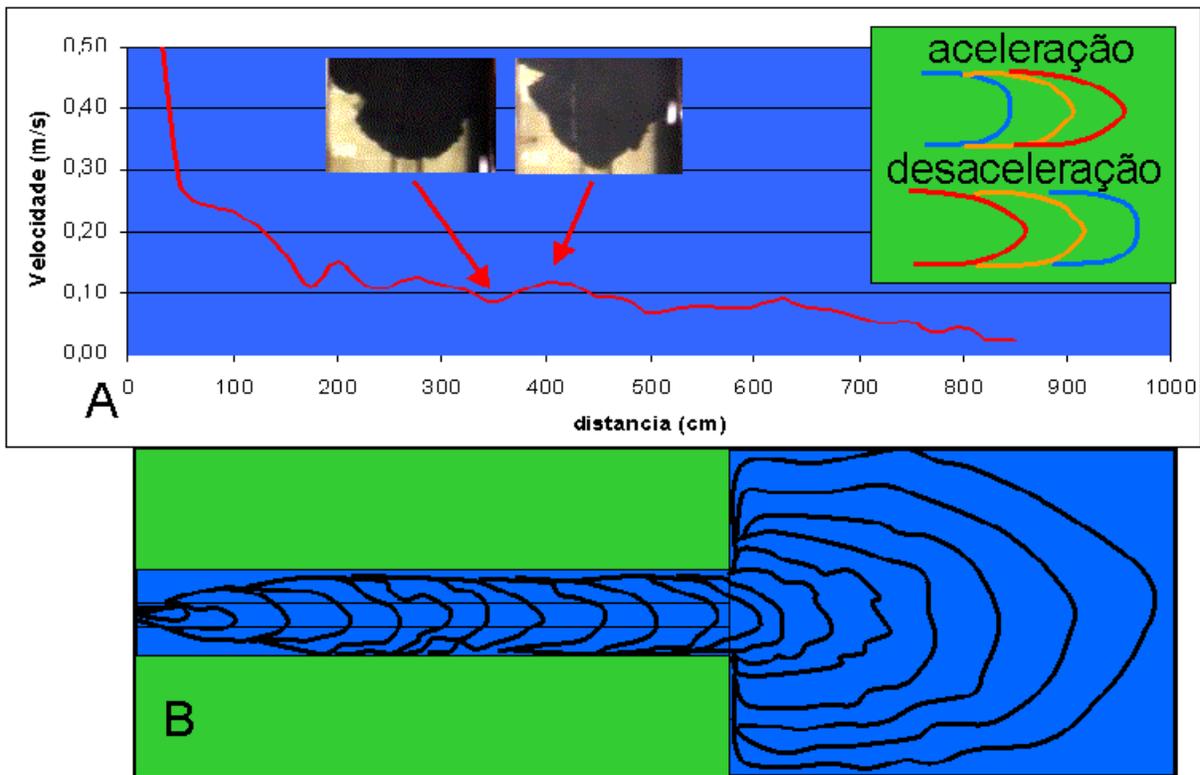
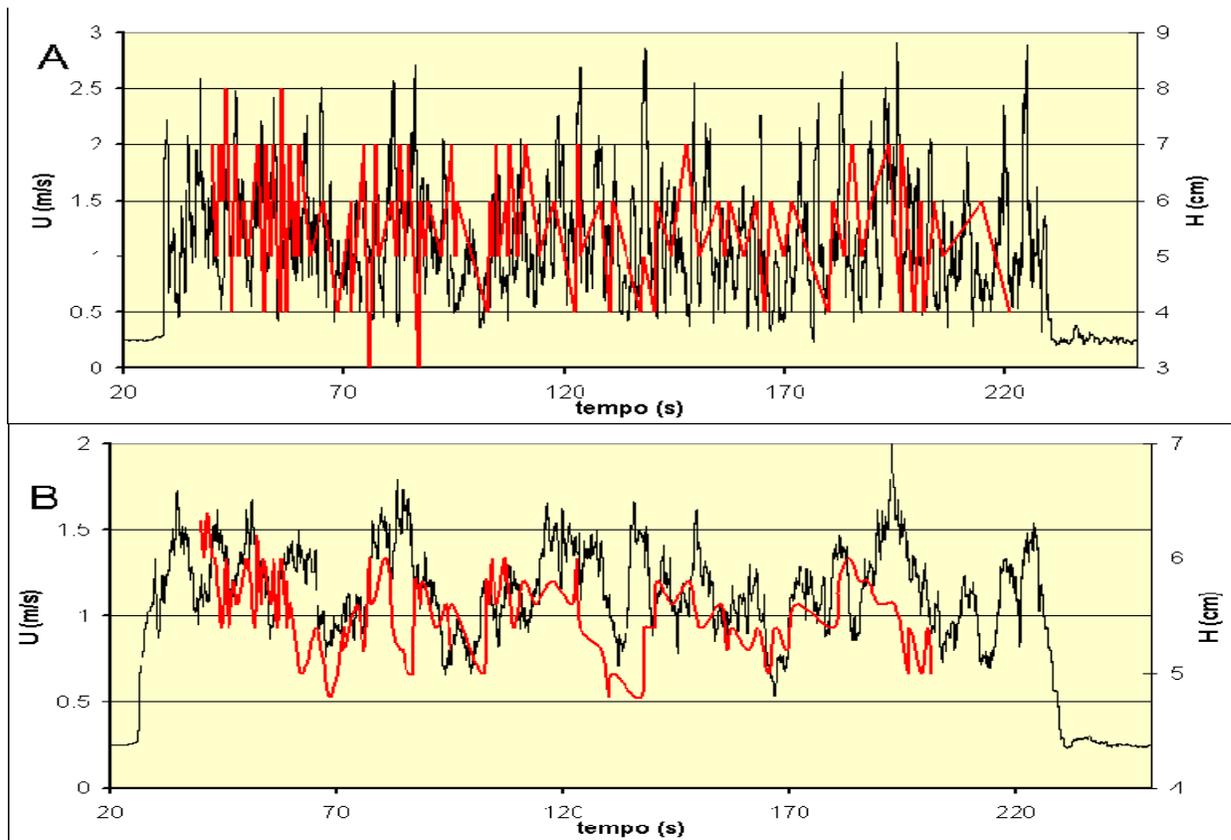


Figura 108 – Relação entre a velocidade da cabeça da corrente e sua forma. A- Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distancia. Fotos indicam a forma da corrente. B – Esquema indicando a variação da forma da cabeça da corrente durante o seu deslocamento.

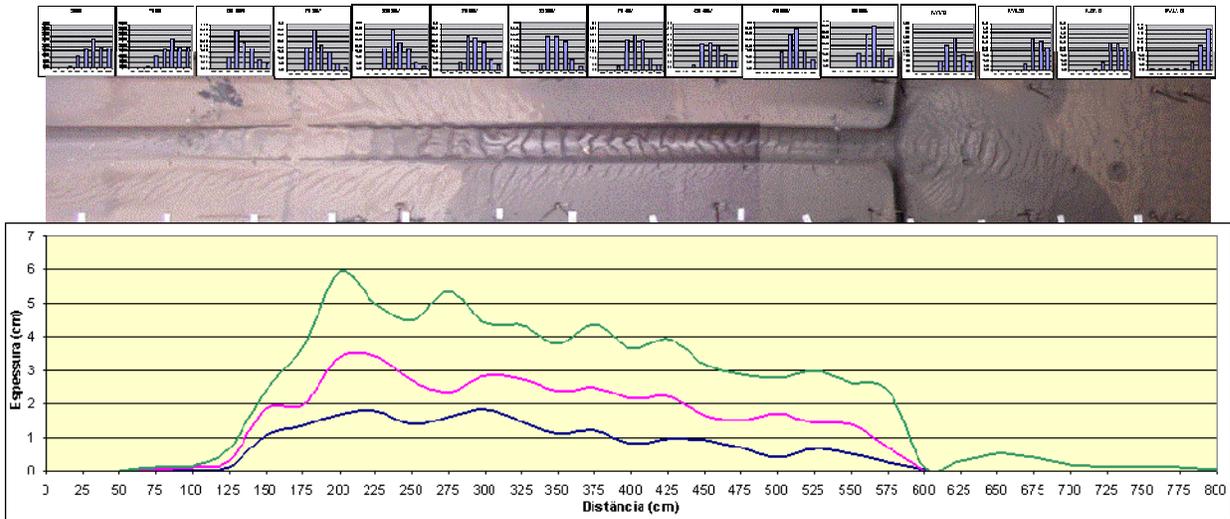
Na Figura 109A, são apresentadas as curvas de velocidade de fluxo em preto e da altura da corrente em vermelho sem nenhum tratamento ou filtragem. Nesta figura, pode-se verificar uma razoável concordância tanto em frequência quanto em amplitude entre as duas curvas. Na Figura 109B, foi aplicado um filtro de frequência às duas curvas, possibilitando uma melhor visualização da correlação entre elas. É digno de nota que as duas informações foram geradas de forma independentes e que a altura da corrente, muitas vezes, é interpretativa e menos precisa que a velocidade de fluxo. Em ambos os gráficos, as curvas mostram episódios cíclicos de aceleração e desaceleração de baixa, média e alta frequências e que guardam uma correlação bastante significativa com as ondulações da interface entre a camada densa basal e a diluída superior da corrente.



**Figura 109** –Gráficos apresentando os valores de velocidade de fluxo (U-curva preta) e da altura da camada basal da corrente (H-curva vermelha), com (A) e sem (B) filtro de frequência.

**Propriedades dos depósitos:** Com a aprendizagem adquirida nos experimentos anteriores foi possível neste ensaio se obter uma quantidade muito maior de informações sobre a evolução e as características dos depósitos. Na Figura 110, temos de forma resumida as principais informações sobre os depósitos. A principal característica dos depósitos deste ensaio foi o desenvolvimento de uma expressiva sedimentação ligada ao extravasamento do canal formando uma série de ripples lineares que apresentam uma distribuição que lembram a forma de uma pena. No canal, o depósito atingiu seu máximo em espessura (6 cm) a cerca de 200 cm do ponto de alimentação.

Da mesma forma que no anterior, a alta vazão de descarga parece ter imprimido na sedimentação os efeitos da quebra de declividade e do desconfinamento. No gráfico situado na porção inferior da Figura 110, pode se notar que a influência da mudança de declive a 330 cm foi mais importante no primeiro evento onde ocorre uma rápida variação de espessura neste ponto. Nos demais eventos, este efeito foi sendo obliterado e deslocado no sentido do fluxo pela própria sedimentação. Após o segundo evento, a diminuição da espessura está a 430 cm e, após o quarto, a 450 cm. Por outro lado, a zona de desconfinamento mostrou ser atuante durante todo o ensaio. O pico de sedimentação que ocorre a 200 cm foi, por sua vez, sendo cada vez mais importante tornando-se mais proeminente a cada evento e provocando um crescimento dos depósitos à montante. A granulometria dos sedimentos mostra uma tendência geral de afinamento no sentido do fluxo, sendo, contudo, possível dividir esta em cinco seguimentos: zona inicial de baixa deposição com baixa seleção (0 –100 cm), zona do pico de deposição com boa seleção (100-300 cm), zona de transição com baixa seleção (300-450 cm), zona de baixo declive com boa seleção ( 450-600 cm) e zona não-confinada com rápido afinamento dos grãos. As formas de leito no canal mostram um aumento tanto na distância entre as cristas como na amplitude até o pico de deposição. Passa por uma tendência inversa após aquele ponto, ou seja, ripples vão diminuindo suas dimensões. Na zona não-confinada, forma-se um leque tripartido cuja descrição detalhada faremos mais adiante.



**Figura 110 – Uma vista geral do Ensaio Janeiro de 2003 Pulso mostrando as relações entre a granulometria do depósito, a variação da espessura (medição com ultra-som) e a distância percorrida pela corrente (escala em cm). No gráfico inferior é apresentada a espessura dos sedimentos após o primeiro (azul), o segundo (rosa) e o quarto evento (verde).**

Na Figura 111, pode-se observar a área onde ocorre o espessamento inicial dos depósitos. Nesta zona, são identificadas formas de leito com cristas côncavas que vão aumentando suas dimensões no sentido do fluxo até 200 cm. A partir deste ponto (Figura 112), as ripples apresentam cristas retas que se mantêm até 300 cm (Figura 112) quando assumem a formas irregulares. Entre 375 e 400 cm, voltam a apresentar crista reta. De 400 cm até o final do canal estão presentes formas de crista sinuosas (Figura 113). As análises granulométricas indicam que os depósitos apresentam a razoável gradação no sentido do fluxo e pouca ou nenhuma na vertical (Figura 111 a Figura 113). Nota-se uma sutil mudança na seleção granulométrica na área de variação na inclinação do canal. Os depósitos de extravasamento desenvolveram formas de leito desde 50 cm do ponto de alimentação até o final do canal. Como podem ser vistas nas Figura 111 a Figura 113, estas formas de leito são ripples com cristas retas oblíquas formando um ângulo de 30° a 40° com a direção de fluxo. O arranjo espacial destas ripples oferecem a ele um aspecto que lembra a forma de uma pena, onde se verifica um aumento do comprimento das cristas destas ripples até o pico de deposição e que, posteriormente, vão reduzindo suas dimensões até o final do canal. Na Figura 112, fica evidente uma zona de não-deposição paralela à borda do canal que é seguida ao desenvolvimento de um alto deposicional não tão evidente na foto. Esta feição desaparece após o máximo de sedimentação no canal.

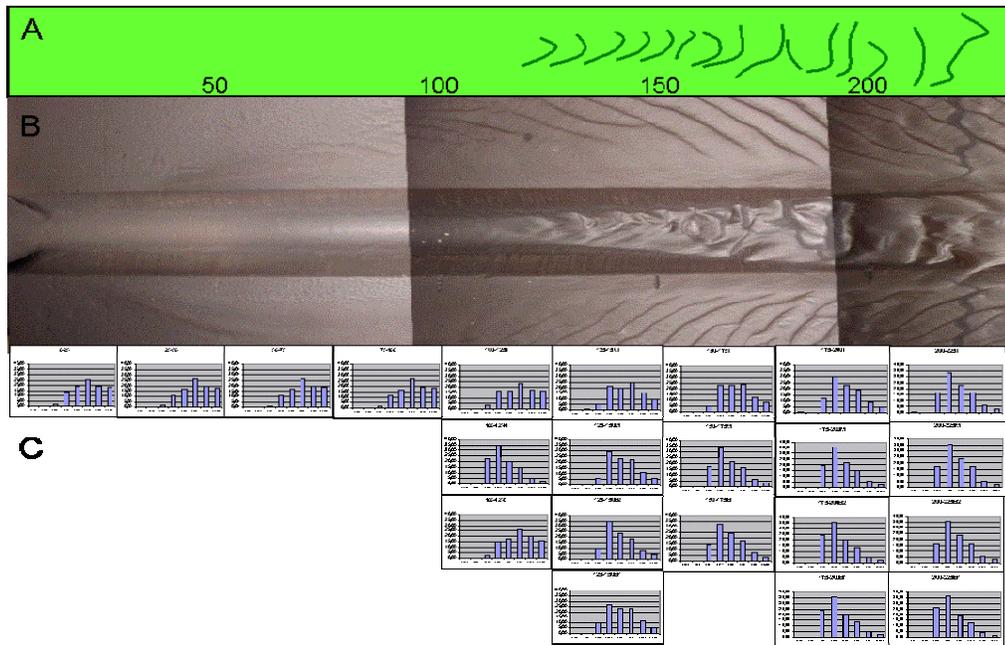


Figura 111 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica (C) amostras de topo, meio superior, meio inferior e base, dispostas na vertical do alto para baixo.

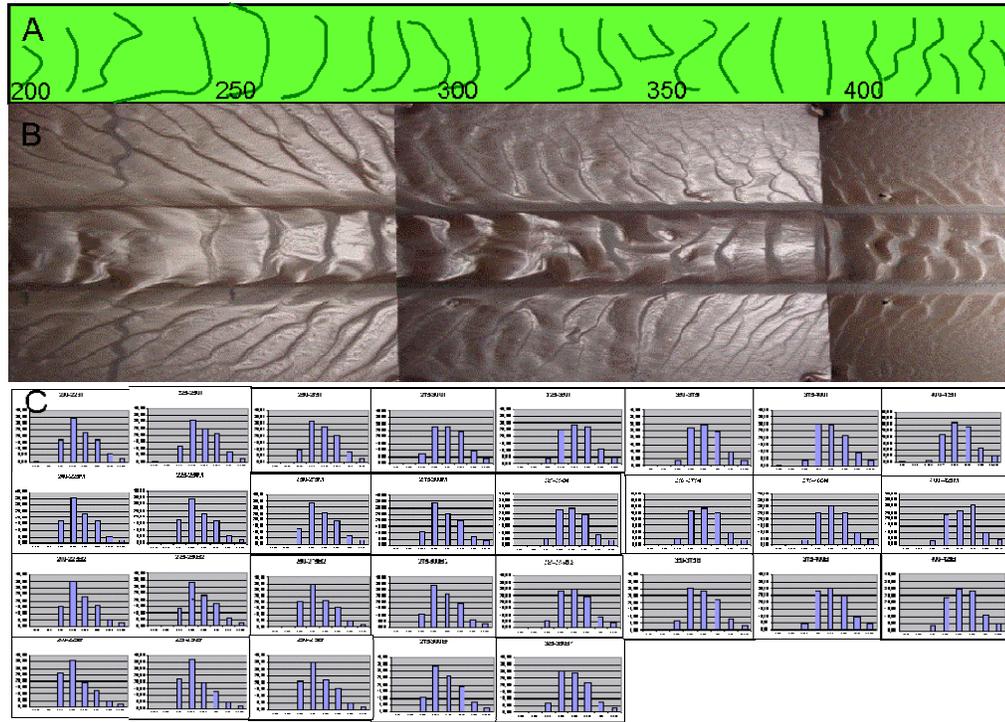
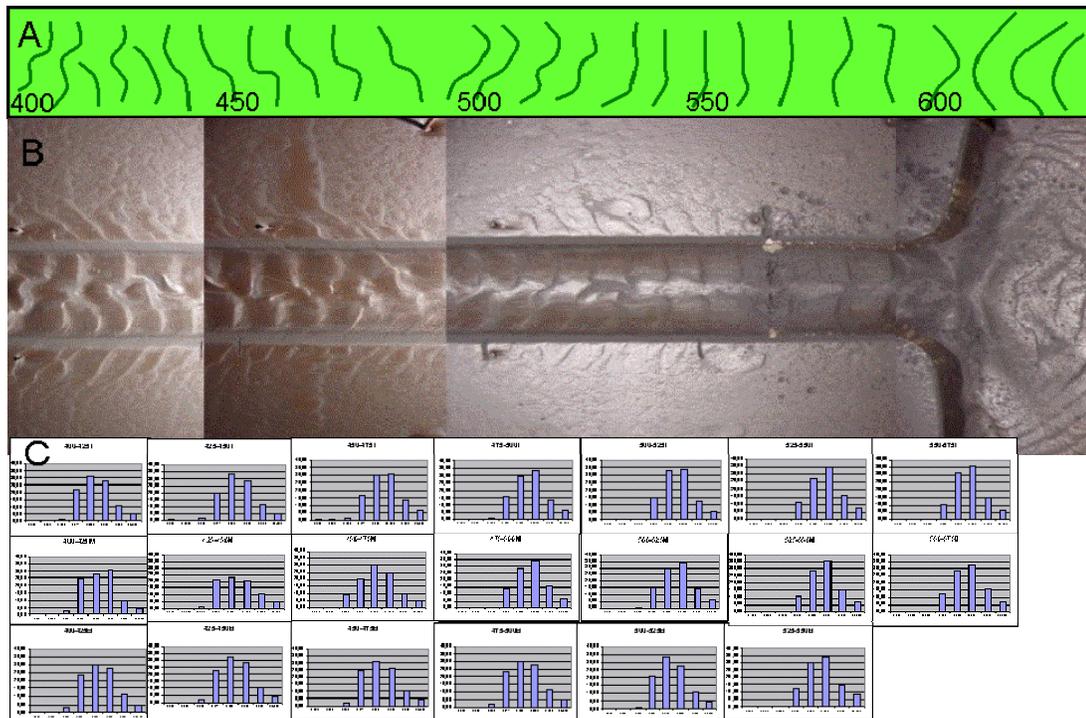


Figura 112 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica (C) amostras de topo, meio superior, meio inferior e base, dispostas do alto para baixo.



**Figura 113 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica. (C) amostras de topo, meio e base, dispostas do alto para baixo.**

Na área não-confinada se desenvolveu um sistema de lobos em forma de pétalas com ripples de crista reta/levemente côncava (Figura 114). Estes depósitos indicam que o fluxo, ao atingir a desembocadura do canal, foi dividido em três porções: uma central, mais proeminente e que se projeta bacia a dentro e duas laterais à direita e à esquerda do canal formando um ângulo de aproximadamente  $45^\circ$  com a direção preferencial. A cerca de 30 cm do fim do canal, os dois lobos laterais não mais se desenvolveram predominando a sedimentação no lobo central que passa a desenvolver uma feição côncava que desaparece a 150 cm após o término do canal. As análises granulométricas indicam uma acentuada granodecrescência no sentido do fluxo.

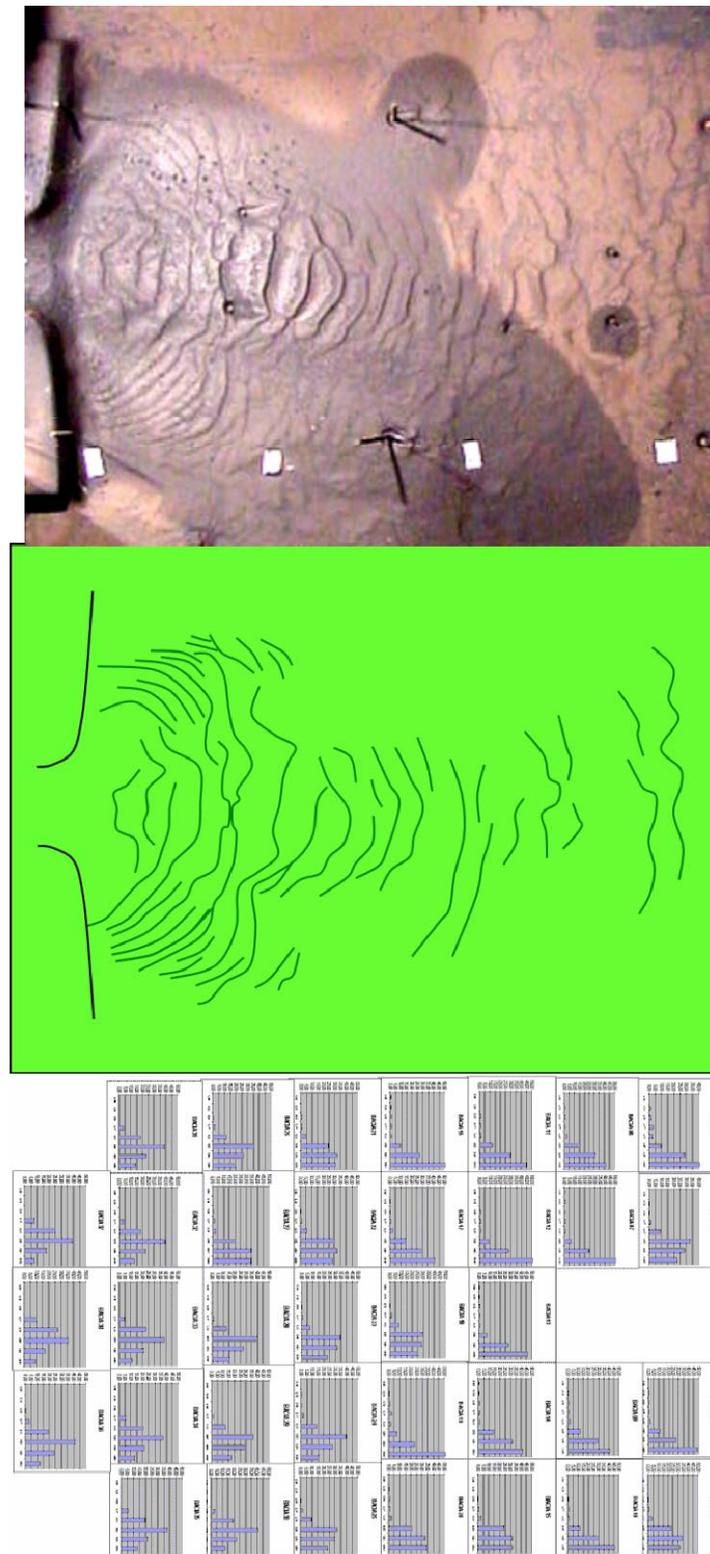
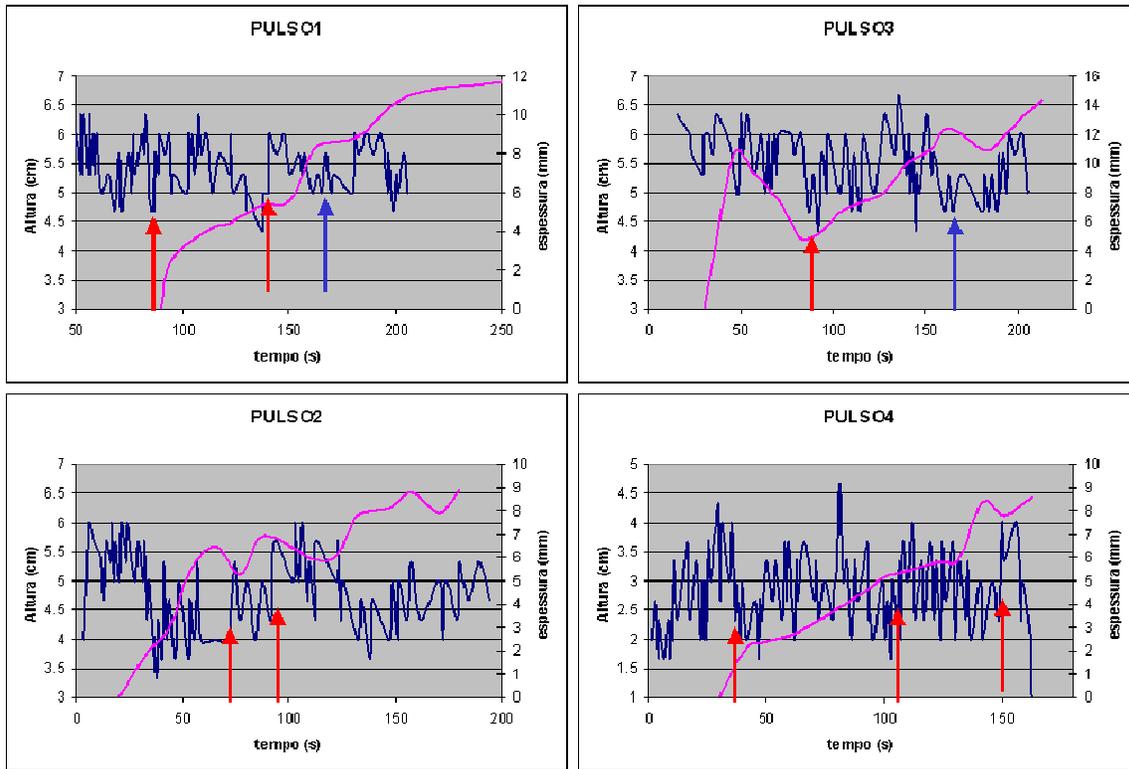


Figura 114– Imagem indicando as características dos depósitos na área não confinada. Esquema das formas de fundo (a direita), imagem fotográfica (centro) e análises granulométricas (a esquerda).



**Figura 115 – Gráficos indicando a espessura dos depósitos (roxo) e a altura da camada basal da corrente em função do tempo. As setas vermelhas indicam pontos onde há concordância entre os dados e azuis onde não há.**

Buscando entender a relação entre a altura da corrente e a taxa de deposição foram construídos os gráficos da Figura 115. Pela correlação encontrada na Figura 109 entre a velocidade de fluxo e a altura da corrente, esperava-se que, ao aumentar a altura da corrente haveria uma diminuição na taxa de deposição, ou mesmo erosão. Na Figura 115 pode-se constatar que esta correlação ocorre na maioria das vezes (setas vermelhas), havendo, no entanto, situações divergentes (setas azuis). Apesar desta divergência, verificou-se neste ensaio que a corrente, nas condições em que foi realizado este experimento, pode ter momentos em que há deposição ou erosão que podem se alternar durante um simples evento.

**Síntese:** Neste experimento foi possível se obter evidências das principais fatores que controlam a sedimentação das correntes como o caráter cíclico da velocidade de fluxo da corrente. Foi possível verificar a formação de lobos na bacia e caracterizar os sedimentos aí depositados.

## 6.12 ENSAIO DE DEZEMBRO DE 2004 PULSO:

**Tipo:** contínuo

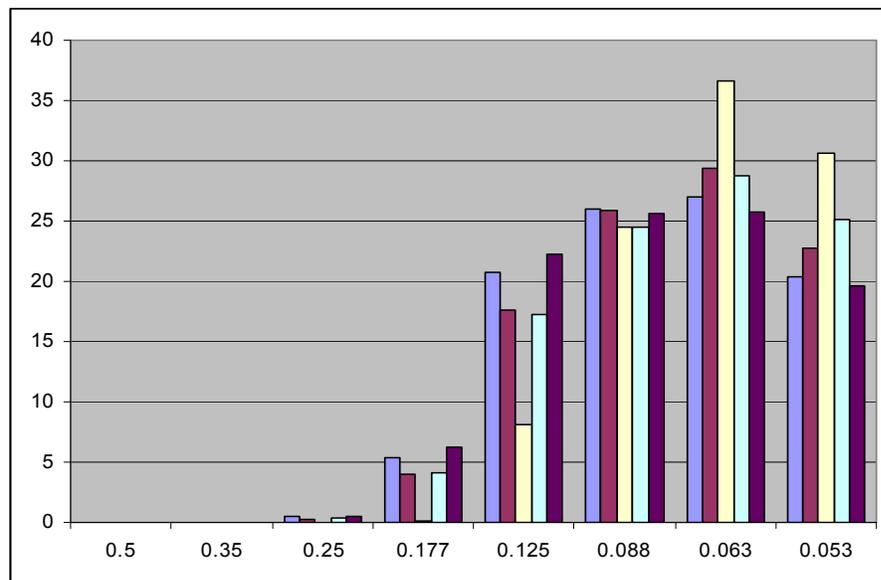
**Volume injetado:** 120 litros em 3 eventos de 40 litros cada.

**Vazão:** 10 litros/minuto.

**Material em suspensão:** Carvão 205 (15% 0,074, 35% 0,105, 35% 0,149,15% 0,210 mm) a distribuição granulométrica do material em suspensão encontra-se na Figura 116.

**Massa Específica da Mistura:** 1,039 g/cm<sup>3</sup>

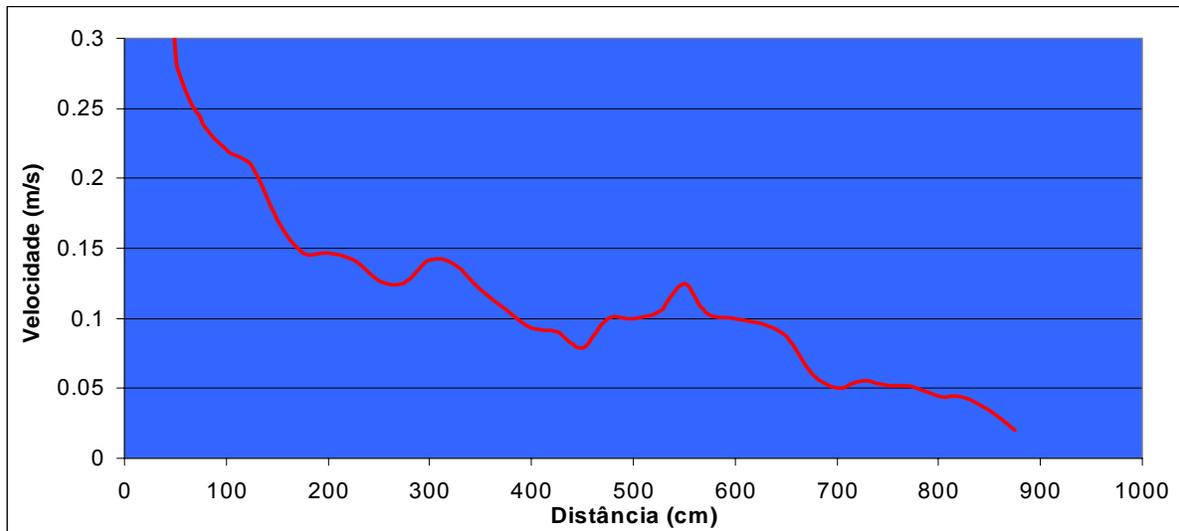
**Documentação:** registro da espessura dos depósitos por ultra-som e ponta linimétrica, análises granulométricas a cada 25 cm, registro das formas de leito fotografias digitais.



**Figura 116 – Histograma da distribuição granulométrica carvão presente da mistura em 6 amostras coletadas antes e após os três primeiros eventos. O eixo horizontal indica o valor da malha da peneira em milímetros e o eixo vertical a porcentagem em peso do volume retido em cada peneira.**

**Alimentação:** 3 eventos com alimentação contínua a partir do reservatório de preparação da mistura com a calibração da vazão controlada por dois registros, um à montante (gaveta) e o outro à jusante (esfera) do medidor de vazão.

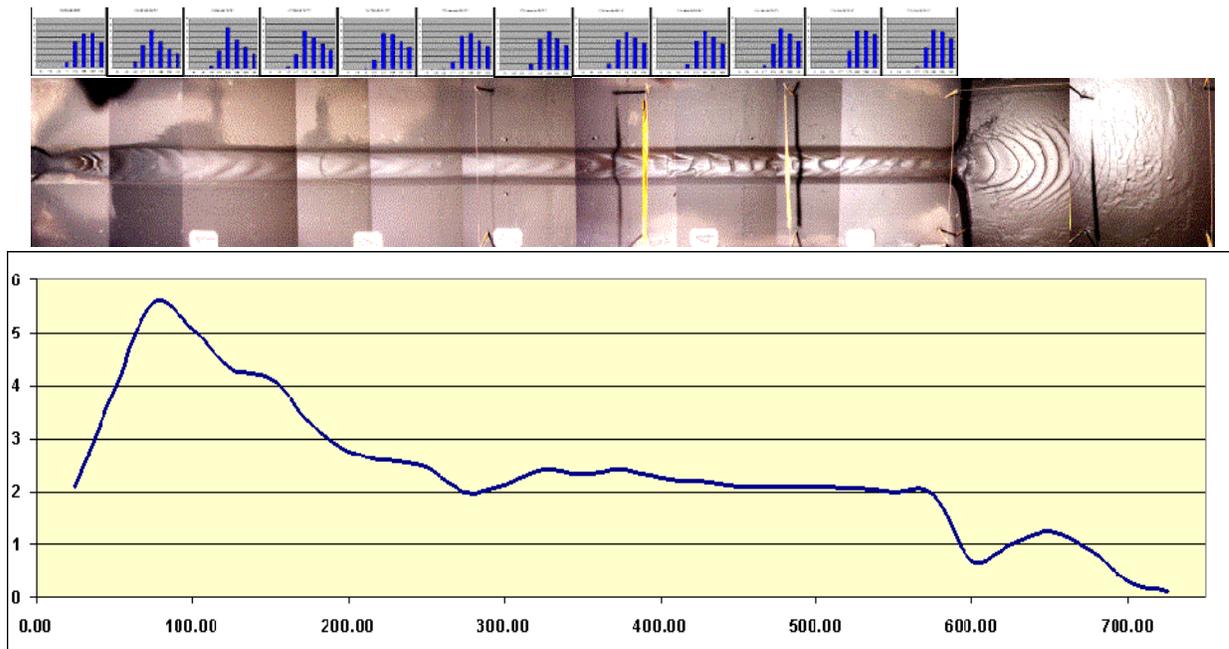
**Característica do fluxo:** Ocorre uma rápida desaceleração do fluxo ao liberar a corrente até 170 cm. A partir deste ponto a corrente passa a perder velocidade em uma taxa menor apresentando episódios bem definidos de aceleração e desaceleração em alta e baixa frequência (Figura 117). No ponto onde há quebra de declividade da calha a 330 cm ocorre uma aceleração da corrente. Este fato se repete quando a corrente perde o confinamento a 590 cm.



**Figura 117 – Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distancia.**

**Propriedades dos depósitos:** Na Figura 118, temos, de forma resumida, as principais informações sobre os depósitos. A característica mais marcante dos depósitos deste ensaio foi o desenvolvimento de uma expressiva sedimentação na zona não-confinada onde se desenvolveu uma série de ripples em forma de ogiva. No canal, o depósito atingiu em seu máximo em espessura (5,5 cm) a cerca de 90 cm do ponto de alimentação. Com a menor vazão de descarga utilizada neste experimento em relação ao anterior, provocou um deslocamento do pico de deposição para um ponto mais próximo da área fonte. No gráfico situado na porção inferior da Figura 118, pode se notar que a influência da mudança de declive a 330 cm implicou um afinamento do depósito, fato que se repete ao término do canal.

A granulometria dos sedimentos mostra uma tendência geral de afinamento no sentido do fluxo, sendo, contudo, possível dividir esta em quatro seguimentos: zona inicial de baixa deposição com baixa seleção (0 –90 cm), zona do pico de deposição com boa seleção com enriquecimento das frações maiores que 0,125 mm (90-150 cm), zona de com menor seleção com aumento progressivo de frações mais finas (150-300 cm) e zona com baixa seleção e aumento progressivo de frações granulométricas finas (300-600 cm). As formas de leito no canal mostram uma baixa amplitude no intervalo entre o pico de deposição (90 cm) até a quebra de declive da calha (330 cm). A partir deste ponto passa a apresentar uma maior amplitude com ripples de crista reta com diminuição da distância entre as cristas como na amplitude até o final da calha. Na zona não-confinada forma-se um leque bem estruturado cuja descrição detalhada faremos adiante.



**Figura 118 – Uma vista geral do Ensaio Janeiro de 2003 Pulso mostrando as relações entre a granulometria do depósito, a variação da espessura (medição com ultra-som) e a distância percorrida pela corrente (escala em cm). No gráfico inferior é apresentada a espessura dos sedimentos após o primeiro (azul), o segundo (rosa) e o quarto evento (verde).**

As Figura 119 e Figura 120 apresentam o intervalo dos depósitos onde se pode observar a área em que está incluído o ponto em que se encontra mais espesso (90 cm). Neste intervalo, são identificadas formas de leito com cristas côncavas que vão aumentando as suas dimensões e reduzindo a amplitude no sentido do fluxo até 330 cm. Neste ponto em que ocorre a quebra de declive, as ripples passam a apresentar cristas retas que, inicialmente, são perpendiculares ao fluxo e que passam gradativamente a um ângulo próximo a  $45^\circ$  no final da calha (Figura 121). As análises granulométricas indicam que os depósitos apresentam a razoável gradação no sentido do fluxo e pouca ou nenhuma na vertical (Figura 119 a Figura 121). Os depósitos de extravasamento desenvolveram formas de leito entre 75 e 200 cm do ponto de alimentação. Como podem ser vistas na Figura 119 estas formas de leito são ripples com cristas retas pouco proeminentes e oblíquas a direção de fluxo um ângulo entre  $60^\circ$  a  $80^\circ$  com a direção de fluxo.

Na área não-confinada se desenvolveu um leque alongado no sentido do fluxo em forma ogiva com ripples de crista côncava. Estes depósitos indicam que o fluxo ao atingir o término do canal manteve-se focado na direção de fluxo se projetando bacia a dentro. Este é fato mais marcante deste ensaio, pois, foi o primeiro realizado com uma vazão intermediária (10 l/min) em que se desenvolveram depósitos expressivos na zona não-confinada. Isto parece estar relacionado à maior concentração utilizada neste experimento associada a uma expressiva quantidade de material com granulometria inferior a 0,063 mm.

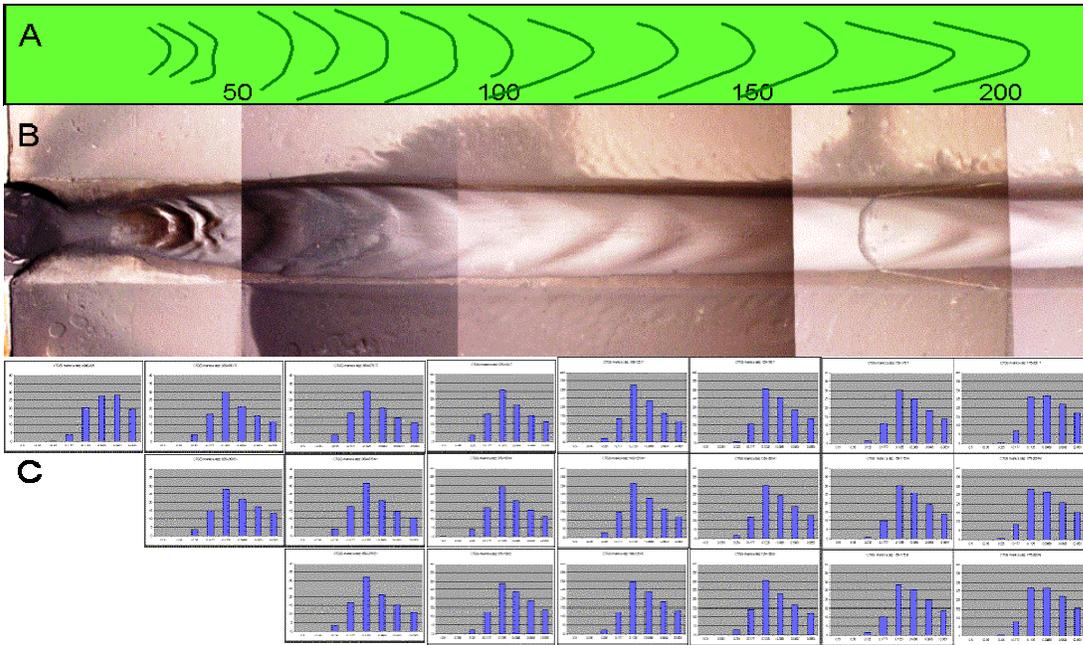


Figura 119 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica (C) amostras de topo, meio superior, meio inferior e base, dispostas na vertical do alto para baixo.

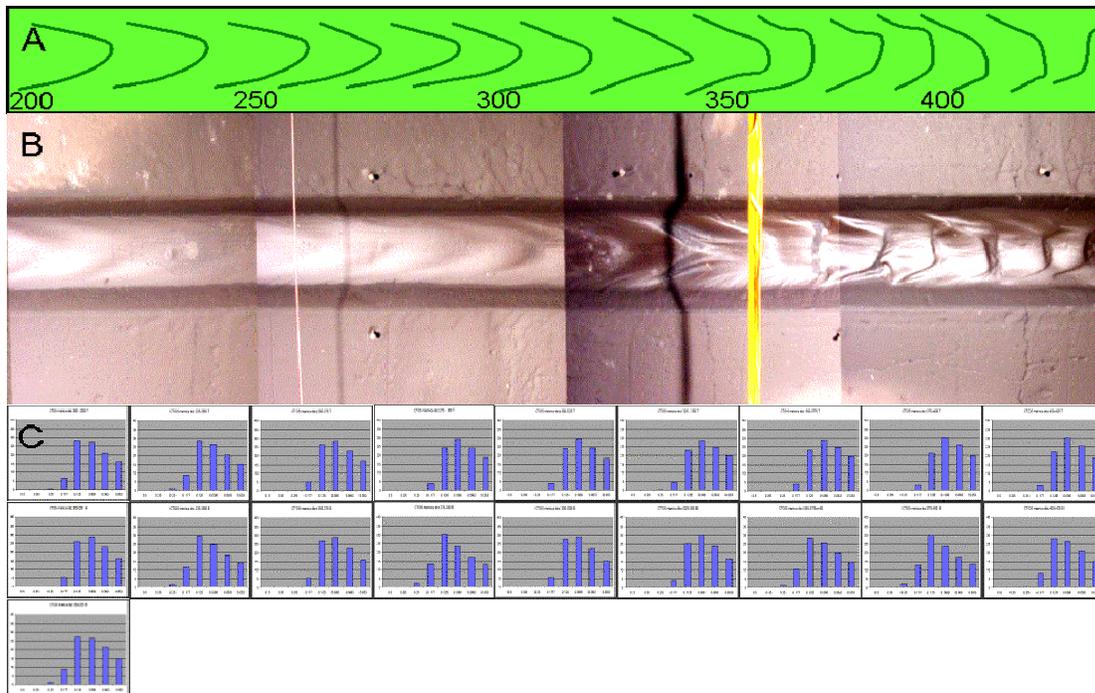


Figura 120 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica (C) amostras de topo, meio superior, meio inferior e base, dispostas do alto para baixo.

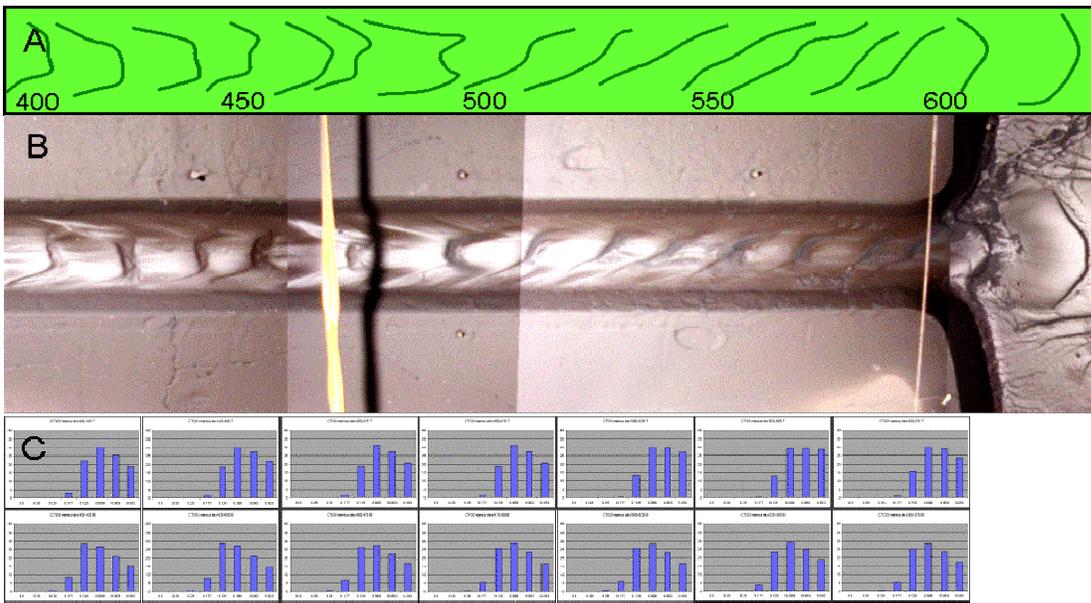


Figura 121 – Detalhe do depósito mostrando de forma mais clara as formas de leito observadas (A e B) e o comportamento da variação granulométrica. (C) amostras de topo, meio e base, dispostas do alto para baixo.

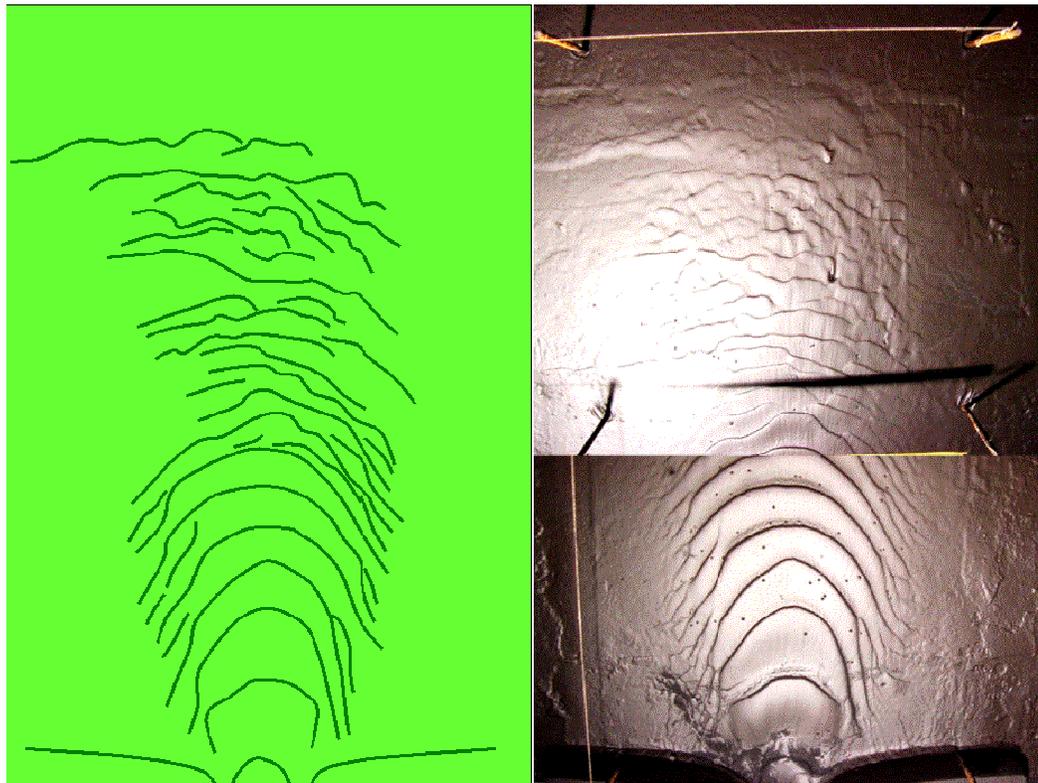


Figura 122 – Imagem indicando as características dos depósitos na área não confinada. Esquema das formas de fundo (a direita) e imagem fotográfica (a esquerda).

### 6.13 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE QUEDA DE PARTÍCULAS DE CARVÃO

Existem na literatura (Khan e Richardson, 1987) fórmulas empíricas para determinação da velocidade de queda de partículas baseadas na diferença de densidade entre o fluido e a partícula e a viscosidade do fluido, no caso de partículas esféricas e somando-se à esfericidade, em caso de partículas irregulares. Mesmo considerando estes parâmetros, tais fórmulas não conseguem capturar todos os efeitos de interação entre as partículas e o fluido. Outro aspecto importante é a dificuldade operacional de utilizar em nossas análises um diâmetro absoluto de partícula, uma vez que o material experimentado normalmente representa uma faixa granulométrica. Para que se pudessem utilizar valores representativos da velocidade de queda das partículas de carvão foram realizados ensaios utilizando a técnica por Tarqui (2000) proposta para o siltômetro do Laboratório de Sedimentologia do NECOD/IPH.

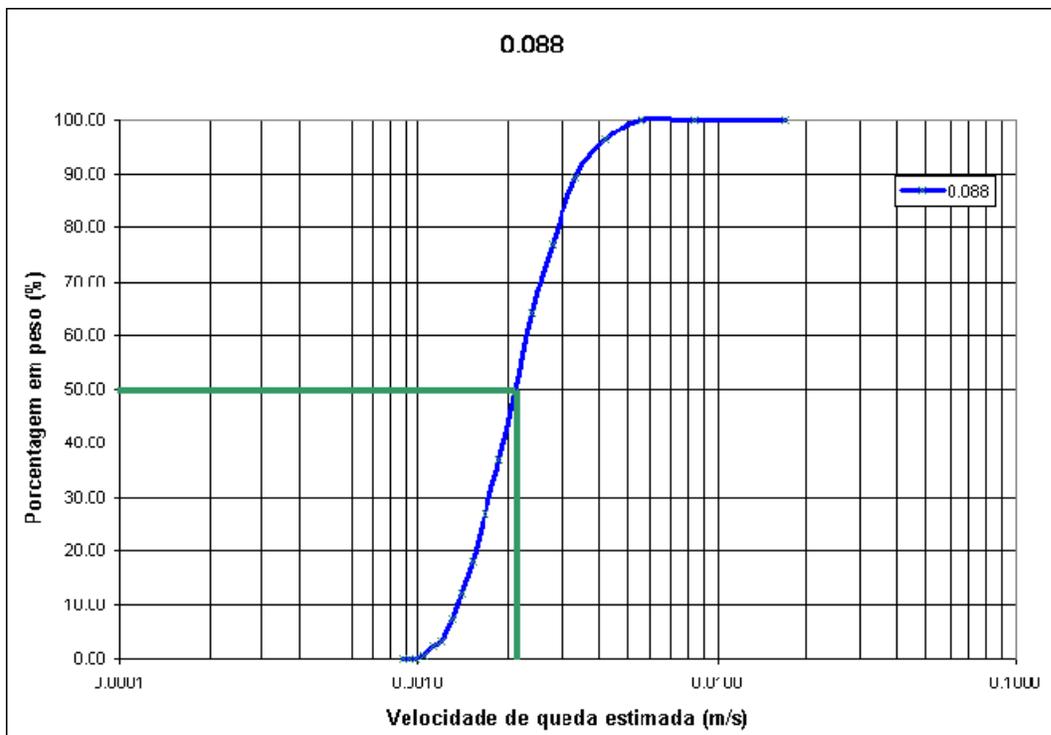


Figura 123 – Gráfico utilizado para estimar a velocidade de queda representativo da fração granulométrica ensaiada. A vinha verde determina o ponto onde 50 % do material colocado no ensaio atingiu a base da coluna.

**Tabela 3 - Valores medidos no ensaio de velocidade de queda de partículas para fração retida na peneira com malha 0,088 mm.**

Intervalo	Velocidade	N° Bandeja	Massa da	Massa	Massa (%)
de tempo (min)	de queda (m/s)		amostra (g)	Acumulada (g)	
2.0	<b>0.0168</b>	1	0.00	3.4700	<b>100.00</b>
4.0	<b>0.0084</b>	2	0.00	3.4700	<b>100.00</b>
6.0	<b>0.0056</b>	3	0.00	3.4700	<b>100.00</b>
8.0	<b>0.0042</b>	4	0.13	3.3400	<b>96.25</b>
10.0	<b>0.0034</b>	5	0.24	3.1000	<b>89.34</b>
12.0	<b>0.0028</b>	6	0.43	2.6700	<b>76.95</b>
14.0	<b>0.0024</b>	7	0.45	2.2200	<b>63.98</b>
16.0	<b>0.0021</b>	8	0.51	1.7100	<b>49.28</b>
18.0	<b>0.0019</b>	9	0.43	1.2800	<b>36.89</b>
20.0	<b>0.0017</b>	10	0.34	0.9400	<b>27.09</b>
22.0	<b>0.0015</b>	11	0.32	0.6200	<b>17.87</b>
24.0	<b>0.0014</b>	12	0.20	0.4200	<b>12.10</b>
26.0	<b>0.0013</b>	13	0.17	0.2500	<b>7.20</b>
28.0	<b>0.0012</b>	14	0.14	0.1100	<b>3.17</b>
30.0	<b>0.0011</b>	15	0.03	0.0800	<b>2.31</b>
32.0	<b>0.0010</b>	16	0.06	0.0200	<b>0.58</b>
34.0	<b>0.0010</b>	17	0.02	0.0000	<b>0.00</b>
36.0	<b>0.0009</b>	18	0.00	0.0000	<b>0.00</b>
38.0	<b>0.0009</b>	19	0.00	0.0000	<b>0.00</b>
		Massa total:	3.47		

O material ensaiado foi obtido através do peneiramento do carvão 205 utilizado nos experimentos com as malhas 0,177, 0,125, 0,088, 0,063 mm e fundo. Para cada ensaio, foi construída uma tabela onde foram catalogados o tempo após o início do ensaio e o peso do carvão acumulado em cada bandeja (para detalhes da metodologia ver item 4.3.7) que são apresentados na Tabela 3 para o material retido na peneira 0,088 mm.

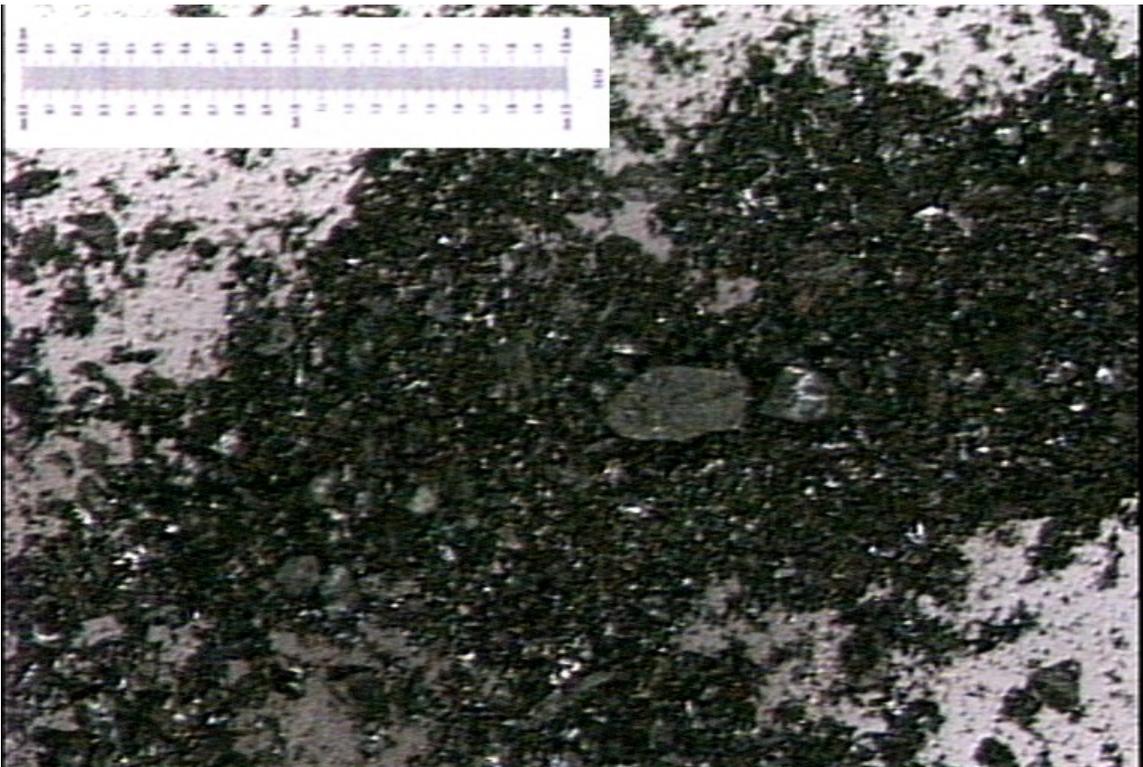
Com base nestes valores foi considerada a velocidade de queda representativa da fração granulométrica estudada aquela que corresponde a chegada de 50% da massa de carvão utilizada no ensaio. Este número foi estimado no gráfico da Figura 123.

**Tabela 4 - Valores de velocidade de queda e características granulométricas do carvão utilizado nos experimentos.**

MATERIAL =	0.177	0.125	0.088	0.062	Fundo
TEMPO (S)=	90	90	120	180	300
VELQUEDA =	0.0066	0.0045	0.0024	0.0014	0.0013
MEDIA	0.2135	0.151	0.1065	0.0629	0.051
CURTOSE	0.738828	0.738398	0.738449	0.737705	0.737631
ASSIM.	0	0	0	-0.083333	0
GRAU_SEL	0.0523	0.0367	0.0259	0.0112	0.0117
D05	0.2464	0.1749	0.1235	0.0854	0.0609
D16	0.2383	0.169	0.1193	0.0797	0.0585
D25	0.2318	0.1643	0.1159	0.075	0.0565
<b>D50</b>	<b>0.2135</b>	<b>0.151</b>	<b>0.1065</b>	<b>0.062</b>	<b>0.051</b>
D75	0.1953	0.1377	0.0971	0.051	0.0455
D84	0.1887	0.133	0.0937	0.047	0.0435
D95	0.1806	0.1271	0.0895	0.0422	0.0411
RUBEY =	0.0044	0.0023	0.0012	0.0004	0.0003
VAN RIJN =	0.0201	0.0169	0.0142	0.0004	0.0003
STOKES =	0.0048	0.0024	0.0012	0.0004	0.0003
CHENG =	0.0032	0.0017	0.0009	0.0003	0.0002

Foram também realizadas análises granulométricas com granulômetro a laser para cada fração retida nas peneiras para caracterizar mais precisamente este material e comparar os resultados com os previstos para partículas esféricas através de várias formulas empíricas previstas na literatura. Os resultados obtidos nestas análises são apresentados na Tabela 4. Nesta tabela, pode-se constatar que o material apresenta um baixo grau de seleção e baixa assimetria indicando que há uma boa representatividade da população de grãos no intervalo analisado. O diâmetro médio obtido é, desta forma, representativo da população de partículas analisadas. Comparando as estimativas de velocidade de queda baseada no diâmetro médio com a medida

verificamos que estes últimos são aproximadamente duas vezes superiores aos estimados para as frações retidas nas peneiras 0,177, 0,125 e 0,088 mm e cinco vezes superiores para 0,062 mm e o retido no fundo. Esta diferença pode ser consequência de dois fatores, ou seja, a forma do grão ou a variações da densidade dos grãos. Para se ter uma idéia das características geométricas dos grãos temos na Figura 124 uma microfotografia do carvão utilizado nos ensaios.



**Figura 124 – Imagem microscópica do carvão utilizado nos ensaios a escala acima corresponde a 2 mm.**

#### 6.14 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA REOLOGIA DAS MISTURAS COM CARVÃO

Na tentativa de caracterizar a reologia das misturas de carvão e água utilizadas em nossos experimentos foram realizadas duas tentativas para efetuar esta medição: uma usando um viscosímetro Sirley disponível no NECOD/IPH e outra realizada nas instalações do Centro de Pesquisas da Petrobras com um viscosímetro Couette. Em ambas as tentativas os resultados foram quase qualitativos uma vez que nenhum dos equipamentos foi construído para medições de viscosidade de misturas com partículas.

Os valores medidos foram de 1,7 cP para uma concentração volumétrica de carvão de 0,04 e 3,4 cP para uma concentração volumétrica de 0,17.

Na Figura 125, temos um gráfico da viscosidade da mistura estimada para misturas com base nas fórmulas de Einstein e Batchelor & Green discutidas no item 3.10 e os dados medidos em nossos ensaios. Nesta figura, temos a indicação de que as informações obtidas apontam para valores mais elevados que os previstos por estas fórmulas. Desta forma, para se conhecer melhor as características reológicas dos materiais utilizados, será necessário o desenvolvimento de equipamento específico para estas medições.

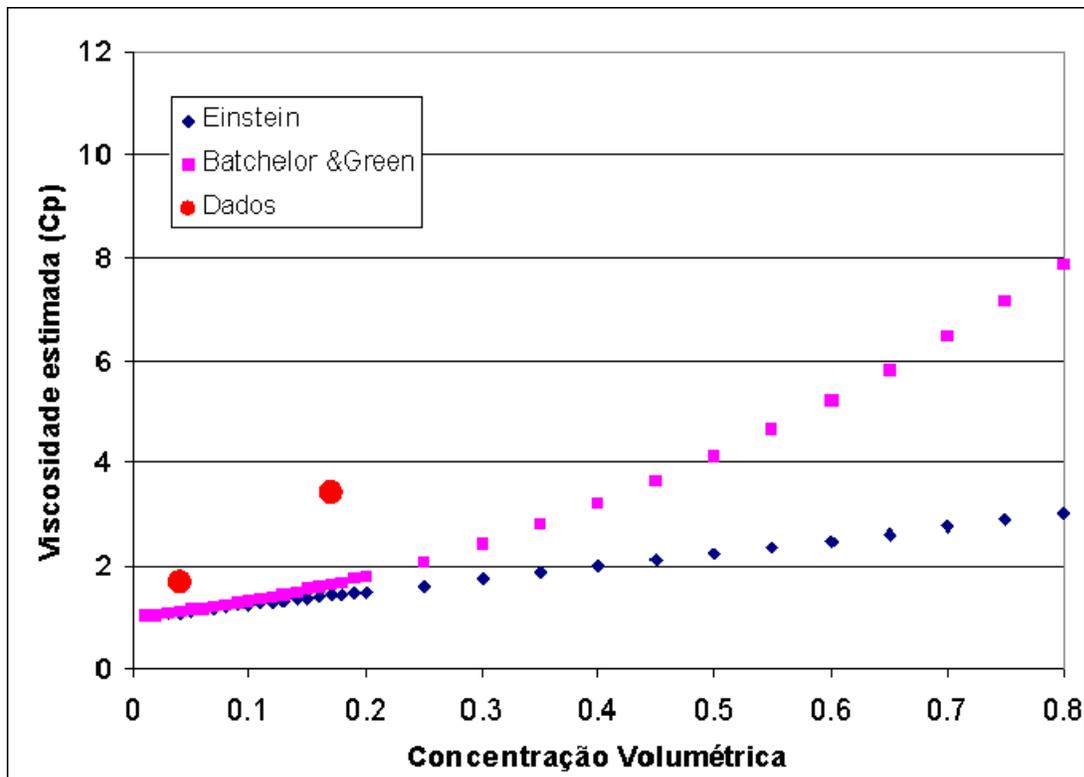


Figura 125 – Relação entre concentração de sedimento e viscosidade na mistura

## 7 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 7.1 CARACTERÍSTICAS DAS CORRENTES INVESTIGADAS E ANÁLISE DE SEMELHANÇA COM SISTEMAS NATURAIS

Sendo a proposta de nosso trabalho correlacionar os resultados obtidos nos experimentos efetuados com situações que ocorrem em sistemas turbidíticos naturais, é necessário conhecer as condições em que isto pode ser feito. Os princípios de semelhança que servem para nortear o projeto, a operação e a interpretação indicam a necessidade de se estabelecer a relações de transferência entre o modelo utilizado e o protótipo, ou seja, o sistema natural. Estes tipos de relações devem considerar as diversas grandezas intervenientes no processo a fim de se poder pesquisar sistematicamente os dados mais significativos, garantindo que geometria, cinemática e dinâmica do modelo apresentem relações de escala com o fenômeno natural.

Segundo Middleton (1966b) para garantir que os ensaios sejam representativos dever-se-ia ter a similaridade no número de Froude densimétrico e na velocidade de queda adimensionalizada entre o modelo e o protótipo.

O número de Reynolds, embora não semelhante, deve apresentar um valor mínimo que caracterize um escoamento turbulento. Neste caso, há uma semelhança entre as macroestruturas turbulentas que são responsáveis pela distribuição da energia no fluxo por serem da mesma ordem da geometria do escoamento.

No limite inferior do fluxo, ocorrem microestruturas denominadas vórtices de Kolmogorov. Embora a semelhança neste nível não seja possível, isto não implica alterações significativas na dinâmica interna da corrente, pois as estruturas de microescala são homogêneas e isotrópicas, logo são semelhantes entre modelo e protótipo.

Visando suportar os critérios de semelhança em nossos experimentos, apresentamos na Tabela 5, modificada de Zeng & Lowe (1997), os valores característicos dos números adimensionais observados em correntes de densidade não-conservativas que ocorrem em sistemas naturais.

Na tabela, pode-se verificar que o número de Froude varia entre 0,003 para correntes desenvolvidas em lagos com baixa concentração de sedimentos a 0,658 para correntes mais densas desenvolvidas em cânions submarinhos, sendo, porém, mais característicos, valores entre 0,20 e 0,05.

Tabela 5 - Números adimensionais característicos de sistemas turbidíticos atuais.

Caso	Número de Foudé	Número de Reynolds	Velocidade de queda adimensional	Concentração de sedimento	Volume do fluxo (m³)
Monterey1	0.127736	4.00E+08		0,05 – 0,1	
	0.063868	2.00E+08			
Monterey2	0.638681	2.00E+09		0,003 – 0,1	
	0.063868	2.00E+08			
Navy 1	0.063868	2.50E+07	0.062413	0,001 –0,01	15000
	0.151477	1.50E+07			
Navy 2	0.201969	2.00E+07		0,01-0,02	
Navy sec1	0.028626	5.25E+07			
Navy sec2	0.052127	1.46E+07		0,00175	15000
Navy sec3	0.044708	1.75E+07		0,001	14000
Navy sec4	0.026385	4.80E+06		0,00042	38000
Navy sec5	0.004425	9.00E+06		0,00038	38000
	0.120494	1.67E+09			
Grand Bank	0.149645	2.08E+09		0,35	
Setor H-I	0.544164	7.56E+09			
Setor I-J	0.217666	3.02E+09			
Setor J-K	0.155476	2.16E+09			
Setor K-L	0.11855	1.65E+09			
Orleanavill					
Setor 3-5	0.398406	5.54E+09			
Setor 4	0.048586	6.75E+08			
Setor 5	0.099116	1.38E+09			
Silver Ab	0.161935	1.05E+08		0,07	
Leque Nitinat				0,0001	
Lago Walenstadt	0.006059	6.00E+05		0,0001-0,0002	
	0.003193	1.00E+07			
Leque Laurentiano	0.006387	2.00E+07	0.016979	0,002	
Leque Hueneme	0.06184	1.13E+07		0,004	
Lago de Zurique	0.12984	9.20E+06		0,03	
	0.087455	4.50E+07			
Cadeia Mesoatlantica	0.233213	1.20E+08		0,03-0,12	
Bute Inlet					
Estação 1-2	0.180828	1.17E+08	0.018070	0,01-0,005	
Estação 2-3	0.051063	1.65E+07	0.029224	0,005-0,003	
	0.04302	1.89E+07			
Estação 2	0.079894	3.51E+07	0.016860		10600
	0.02414	1.40E+06			
Estação 3	0.03621	2.10E+06	0.073060		50000
	0.542221	2.79E+08			
Var Canyon - 42km	0.658828	3.39E+08			
	0.343228	3.80E+08			
45 km	0.420003	4.65E+08			
59 km	0.18074	7.44E+08			
95 km	0.116607	6.00E+07			
122.5 km	0.114251	3.20E+07			

O número de Reynolds , que caracteriza o grau de turbulência do fluxo apresenta valores entre  $6 \times 10^5$  e  $2 \times 10^9$  variando em quatro ordens de grandeza. Na literatura, considera-se que valores superiores a  $10^3$  causam pouca influência nas características de fluxo porque eles passam a apresentar condições de turbulência plenamente desenvolvidas.

Seguindo os critérios de Middleton (1966b), foram calculadas as velocidades de queda adimensional para os eventos naturais. Este valor foi estimado pela velocidade de queda do sedimento depositado considerando a fórmula de Rubey (item 4.3) adimensionalizada pela velocidade da corrente de turbidez. Os valores obtidos variam entre 0,017 e 0,073.

Em nossos experimentos estes números adimensionais foram calculados considerando as variações das características do fluxo ao longo do modelo. O gráfico da Figura 126 apresenta os valores do número de Froude para os experimentos realizados em função da distância do ponto de alimentação.

No gráfico, pode-se constatar que o número de Froude calculado varia entre 0,1 e 0,4 com exceção do trecho inicial. Neste trecho, os altos valores observados estão ligados a uma forte influência nas condições de fluxo durante a iniciação da corrente (0 a 250 cm). Nele, são atingidos valores superiores a 6. Nas porções distais, onde a corrente começa a se dispersar, foram registrados valores de 0,02. Estes resultados mostram que os ensaios realizados apresentam similaridades com sistemas naturais em relação a este número adimensional.

Quanto aos números de Reynolds calculados para os experimentos que são apresentados na figura 6.12 se pode verificar que os valores variam entre  $2 \times 10^3$  e  $4 \times 10^4$ . Estes dados são de três a cinco ordens de grandeza inferiores aos observados em sistemas naturais. Contudo, como já frisamos anteriormente, valores de Número de Reynolds superiores a 2000 indicam condições de fluxo plenamente turbulentas garantindo semelhança a nível de macro-estrutura .

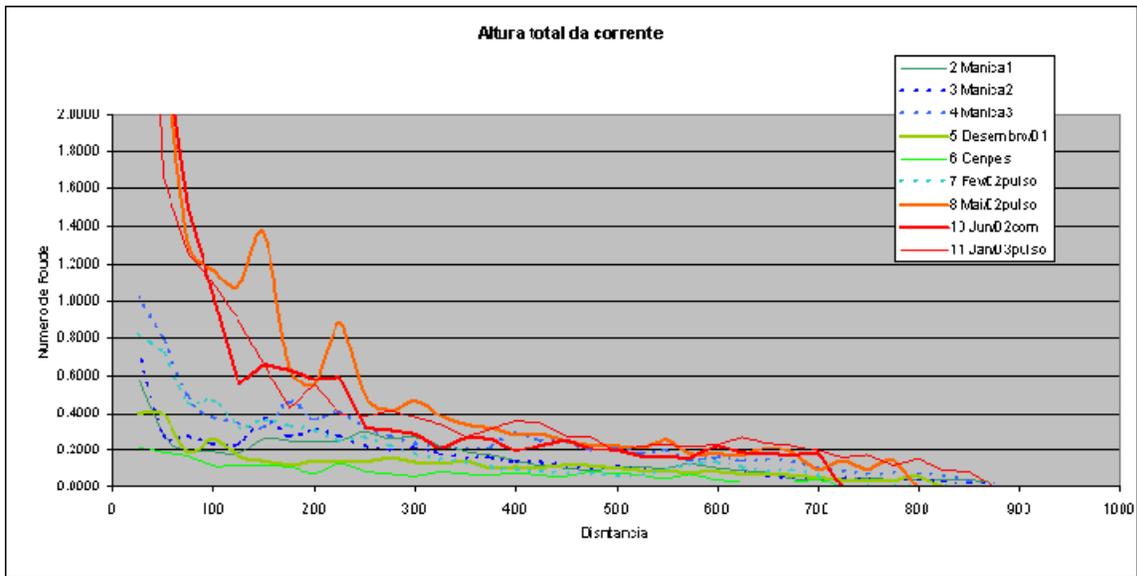


Figura 126 – Gráfico dos valores do numero de Froude em função da distância do ponto de alimentação dos ensaios realizados.

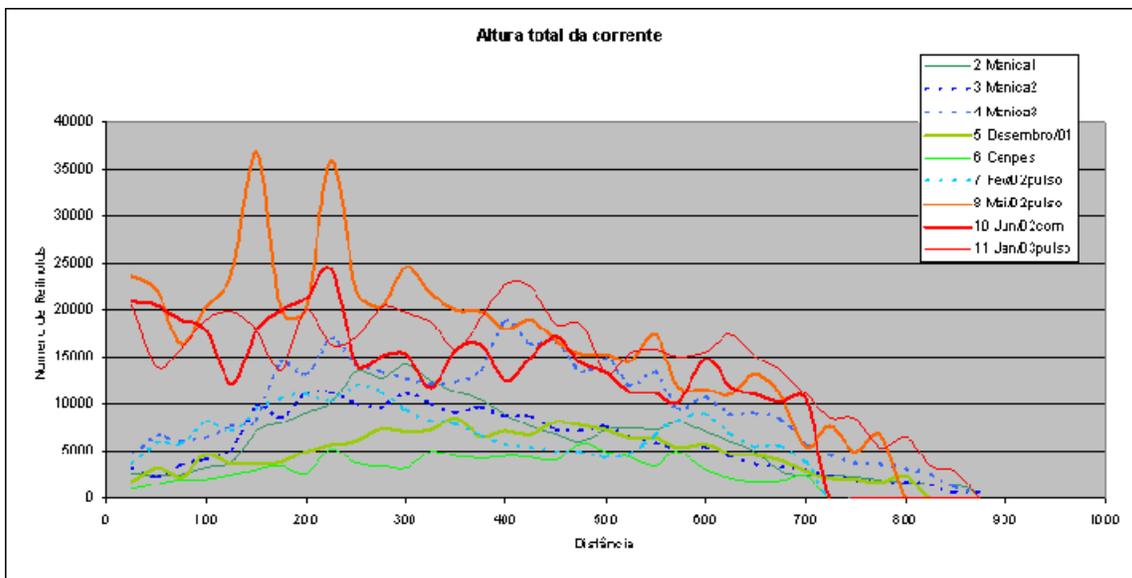


Figura 127 – Gráfico dos valores do numero de Reynolds em função da distância do ponto de alimentação dos ensaios realizados.

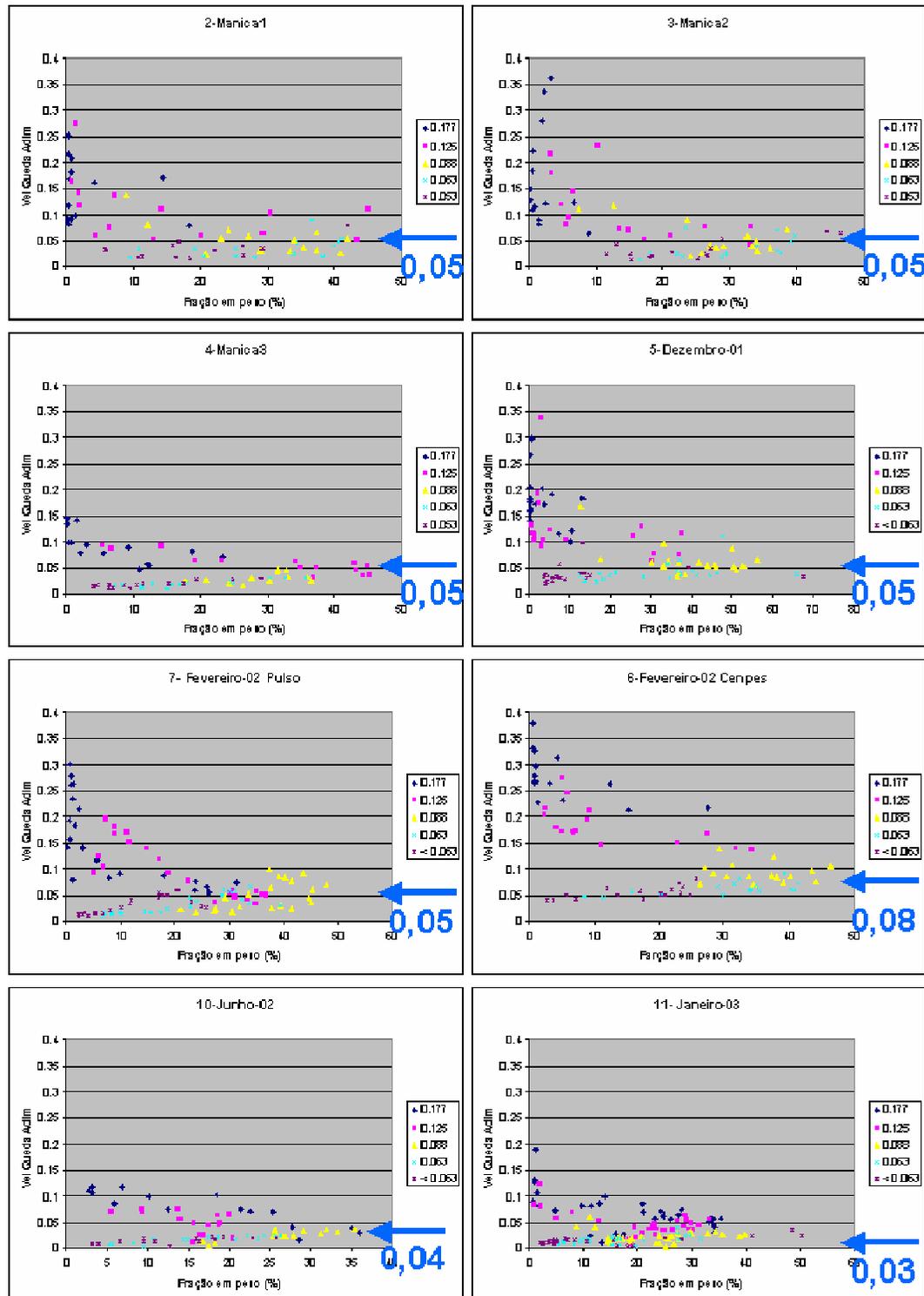


Figura 128 -Gráficos correlacionando a velocidade de queda adimensional com a fração volumétrica em peso nos depósitos para as diversas faixas granulométricas identificadas pela escala de cor apresentada na legenda (valores em mm). No alto dos gráficos estão identificados os ensaios.

A velocidade de queda adimensional da partícula nos sistemas turbidílicos naturais foi calculada com base no diâmetro das partículas mais grossas encontradas no registro sedimentar e na velocidade de propagação das correntes de densidade investigadas. No caso de nosso modelo, calculamos a velocidade de queda das frações granulométricas retidas nas peneiras com malha 0,177, 0,125, 0,088, 0,062 e menores que 0,062 mm e dividimos estes valores pela velocidade de propagação da corrente. Na Figura 128, são apresentados os gráficos para oito experimentos onde é correlacionada a velocidade de queda adimensional de uma fração granulométrica com a porcentagem desta fração presente no depósito. Nesses gráficos, é possível se verificar que há um aumento da porcentagem de cada fração granulométrica analisada quando a velocidade de queda adimensional das partículas está em uma faixa entre 0,03 e 0,08 com moda de 0,05. Esta constatação está em inteira concordância com os valores observados nos sistemas naturais.

## 7.2 DINÂMICA E ESTRUTURA INTERNA DAS CORRENTES DE DENSIDADE NÃO CONSERVATIVAS

Os ensaios realizados nos possibilitaram investigar uma vasta gama de fatores que incluem as características de iniciação, propriedades físicas e a dinâmica interna das correntes de densidade não conservativas. Inicialmente será feita uma análise das características da propagação da corrente, seguida de uma abordagem sobre a sua estrutura interna e, finalmente, será analisada a correlação entre estes fatores.

### 7.2.1 Características da propagação da corrente

A informação sobre a dinâmica da corrente melhor determinada nos ensaios foi a sua velocidade de avanço. Este parâmetro foi medido através de programa de tratamento de imagens em intervalos de 0,25 m, a partir das filmagens da evolução da corrente. Para análise destes dados, foi construído um gráfico dos valores de velocidade em função da distância medida a partir do ponto de alimentação da corrente (Figura 129). Neste, pode-se verificar que a velocidade de propagação da corrente apresenta uma tendência exponencial de diminuição da velocidade com o deslocamento. Este comportamento pode ser melhor visualizado no gráfico da Figura 129B, onde a velocidade é plotada em escala logarítmica. Ele ressalta uma constante perda de quantidade de movimento da corrente ao longo de seu percurso, que se processa pela desaceleração e pela decantação do material inicialmente colocado em suspensão na corrente. Comportamento similar foi verificado por Huppert e Simpson (1980) estudando o movimento de correntes de densidade conservativas. Estes autores observaram

que o fluxo passa por três estágios: 1-redução rápida da velocidade de deslocamento da corrente logo após o ponto de alimentação da corrente que é motivado pela ação do contrafluxo formado pelo deslocamento do fluido ambiente; 2- estágio puramente inercial onde as forças gravitacionais são balanceadas pelas forças inerciais; e 3- durante o desenvolvimento da corrente ao longo do canal, as forças gravitacionais são equilibradas pelas forças viscosas.

Dois fatores que variamos em nossos experimentos influenciam diretamente a velocidade de avanço da corrente: a vazão de alimentação e a densidade inicial da corrente. Pela análise do gráfico da Figura 129, é possível se verificar que a vazão de descarga da corrente influencia diretamente na velocidade de avanço. Maiores vazões (tons quentes - altas vazões, tons azuis – baixas vazões) implicam maiores velocidades. Para melhor representar esta tendência elaboramos gráficos da média harmônica das velocidades (variação exponencial no gráfico da Figura 129) em função da vazão de alimentação (Figura 130A) e da concentração volumétrica de carvão na corrente (Figura 130B). Nestas figuras pode-se observar que embora seja possível se verificar uma tendência de aumento da velocidade de avanço da corrente tanto com a vazão como com a variação de concentração volumétrica há uma baixa correlação entre elas individualmente com base em nossos ensaios. Na Figura 130, estão identificados três pontos que representam situações de maior discrepância. Os ensaios 11-Jan03 (alta vazão, alta concentração) e 12-Dez04 (média vazão, alta concentração) indicam a importância da concentração na velocidade. Buscando uma melhor correlação com a velocidade de avanço foi utilizada uma combinação entre estas duas variáveis obtida pela multiplicação da vazão pela raiz quadrada da concentração (Figura 131). Esta combinação procura estimar a quantidade de movimento da corrente nas condições de iniciação da corrente. A utilização da raiz quadrada da concentração se justifica pela relação existente entre a velocidade de uma corrente de densidade com a raiz quadrada da sua altura multiplicada pela aceleração da gravidade relativa (densidade da corrente \* g).

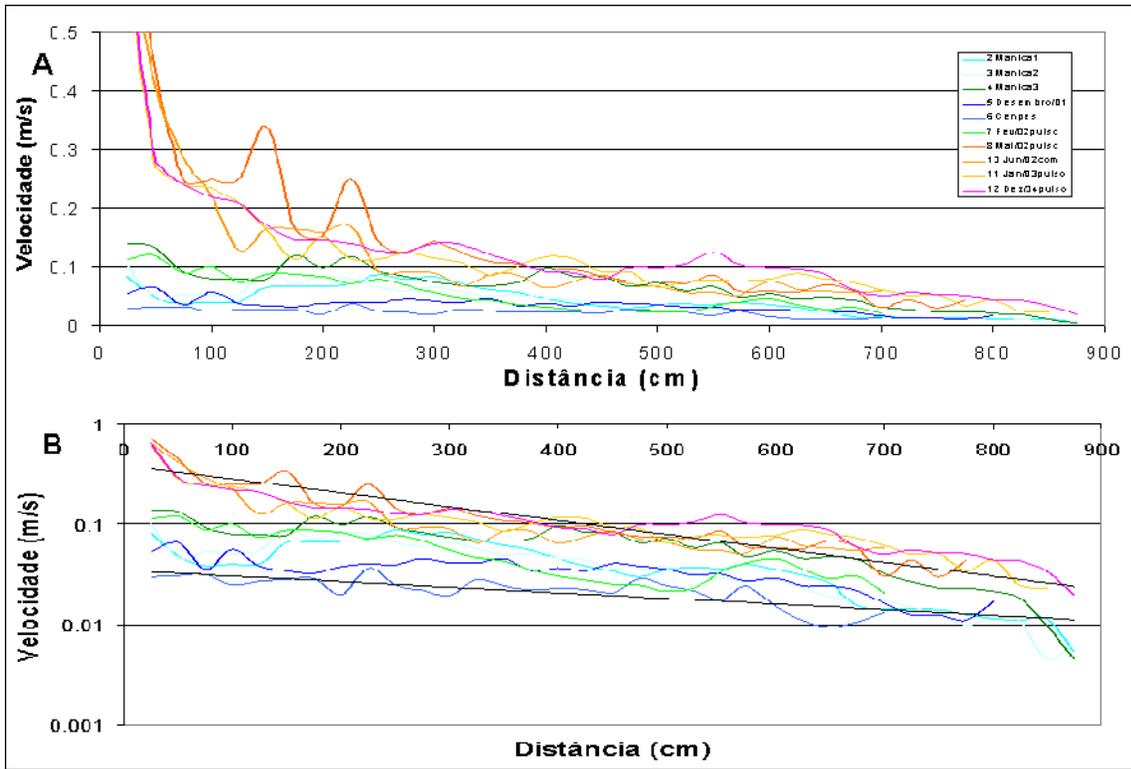


Figura 129 -Curva da velocidade média de propagação da corrente em função distância.

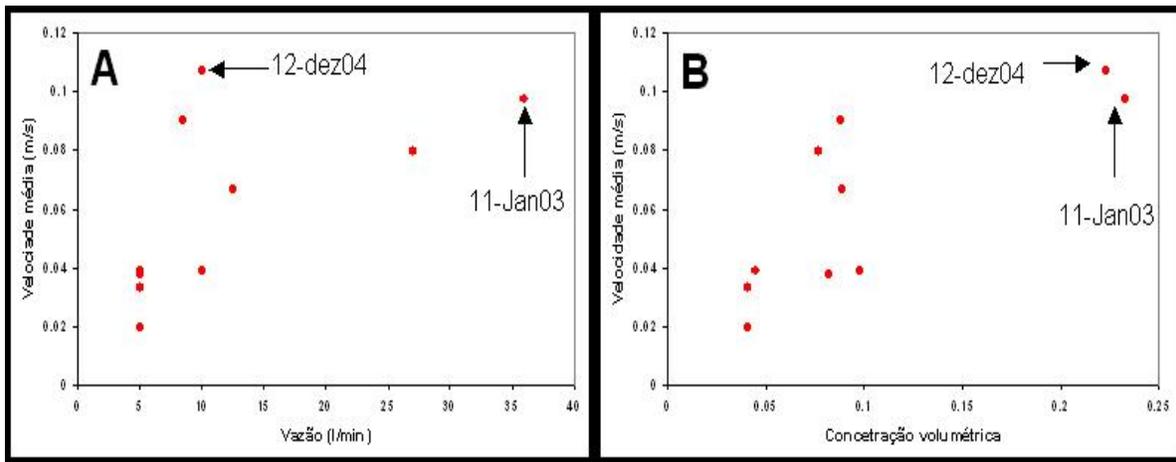
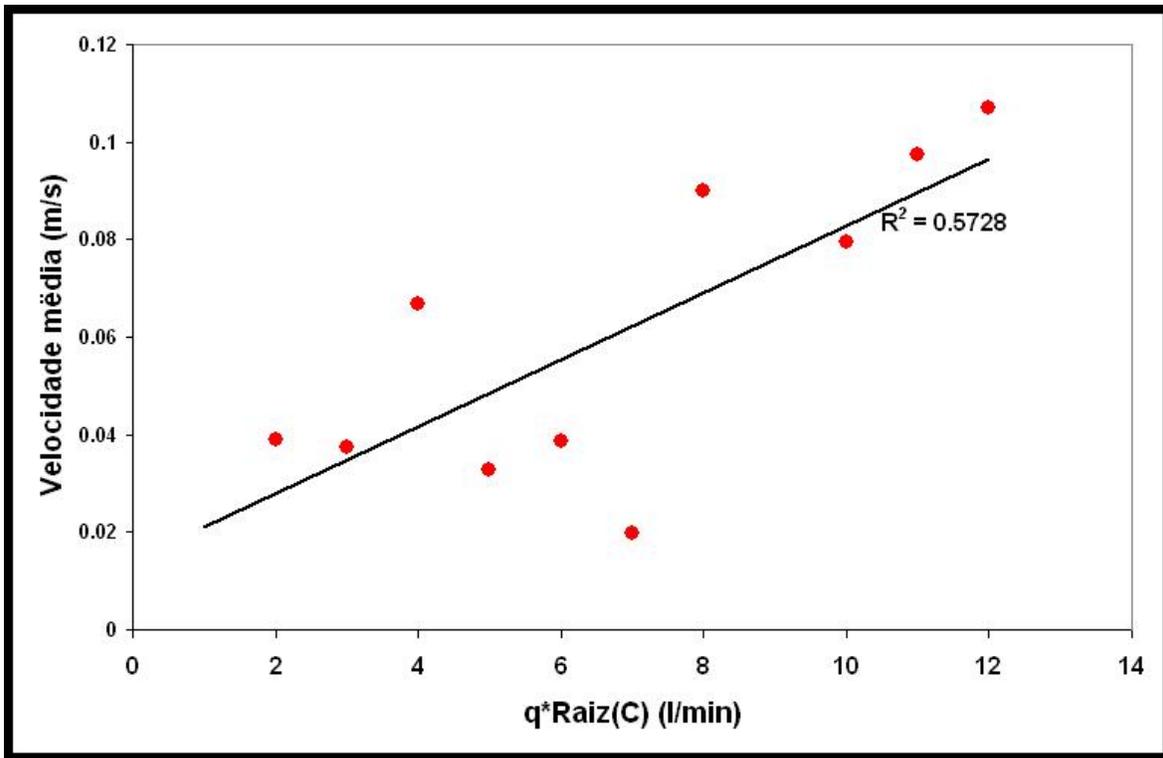


Figura 130 - Graficos correlacionando a média harmônica da velocidade da corrente ao longo do canal com (A) Vazão de alimentação da corrente e (B) Concentração volumétrica de carvão .



**Figura 131 - Gráfico correlacionando a média harmônica da velocidade da corrente ao longo do canal com a quantidade de movimento da corrente nas condições de iniciação (vazão vezes a raiz quadrada concentração volumétrica de carvão-C)**

Além da característica geral de desaceleração da corrente foram verificadas oscilações na velocidade de propagação que podem ser vistas na Figura 129. Para salientar estas oscilações foram extraídos resíduos dos valores medidos a partir de uma tendência de declínio exponencial ajustada aos dados. Estes resíduos foram plotados na Figura 132. Nesta figura, constatam-se oscilações residuais na velocidade observada de alta e baixa freqüência que podem ser relacionadas a outros fatores.

De forma geral, podem ser reconhecidos três ciclos de baixa freqüência e maior intensidade ao longo do canal na maior parte dos ensaios. O primeiro ciclo, entre 0 e 250-300 cm mostra uma rápida desaceleração da corrente que estaria relacionada a uma busca de equilíbrio entre a quantidade de movimento (momentum) do jato de saída da corrente e o contrafluxo gerado pela perturbação do fluido ambiente. No início do segundo ciclo ocorre uma aceleração que estaria associada a uma mudança do declive do canal que está a 330 cm. A corrente passa então a apresentar uma lenta desaceleração com redução da velocidade até 550 cm. No terceiro ciclo a corrente novamente se acelera até 650 cm voltando a perder velocidade até atingir o final do

tanque. Este último ciclo parece ter ligação com o desenvolvimento de uma aceleração no ponto onde ocorre o desconfinamento da corrente (600 cm).

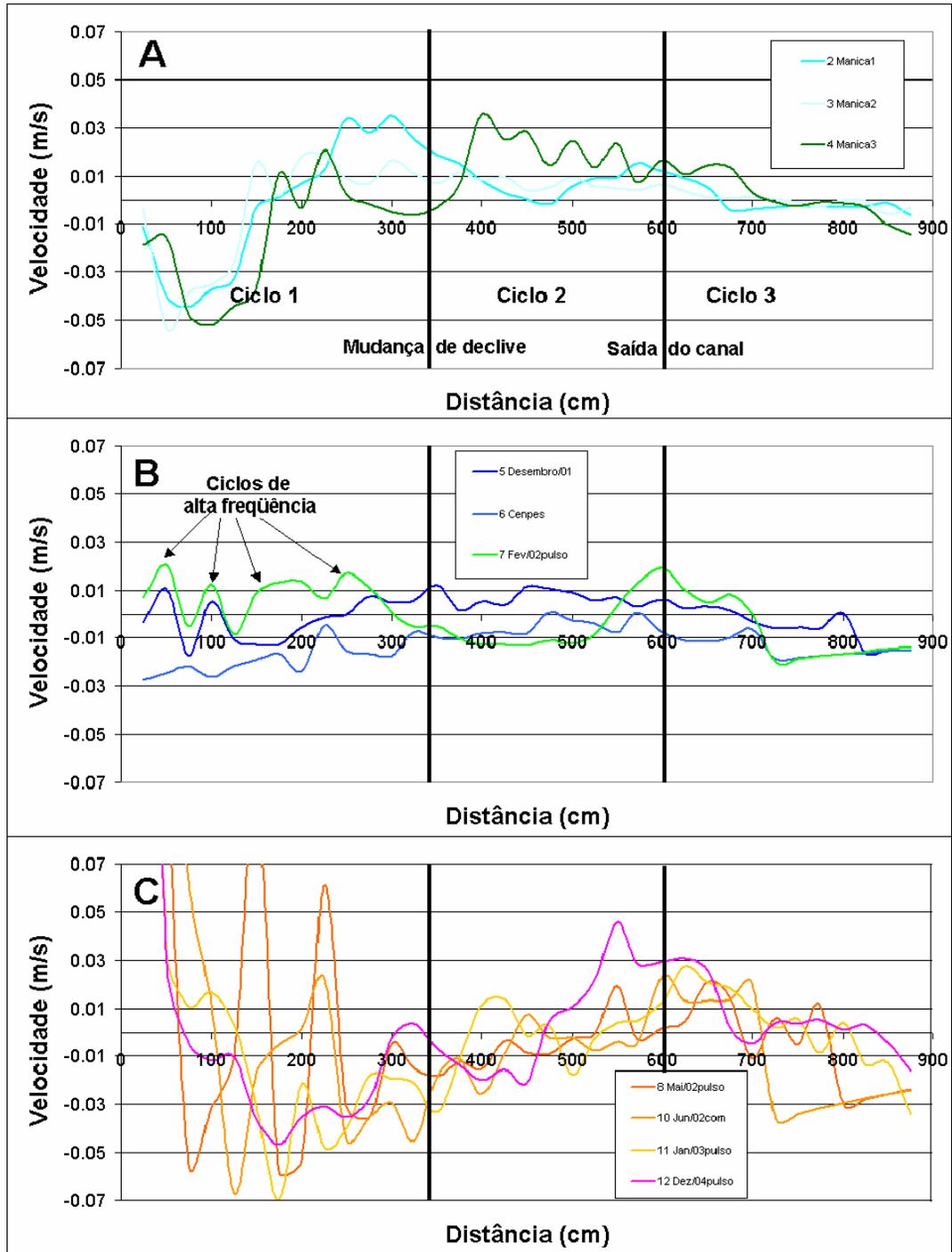
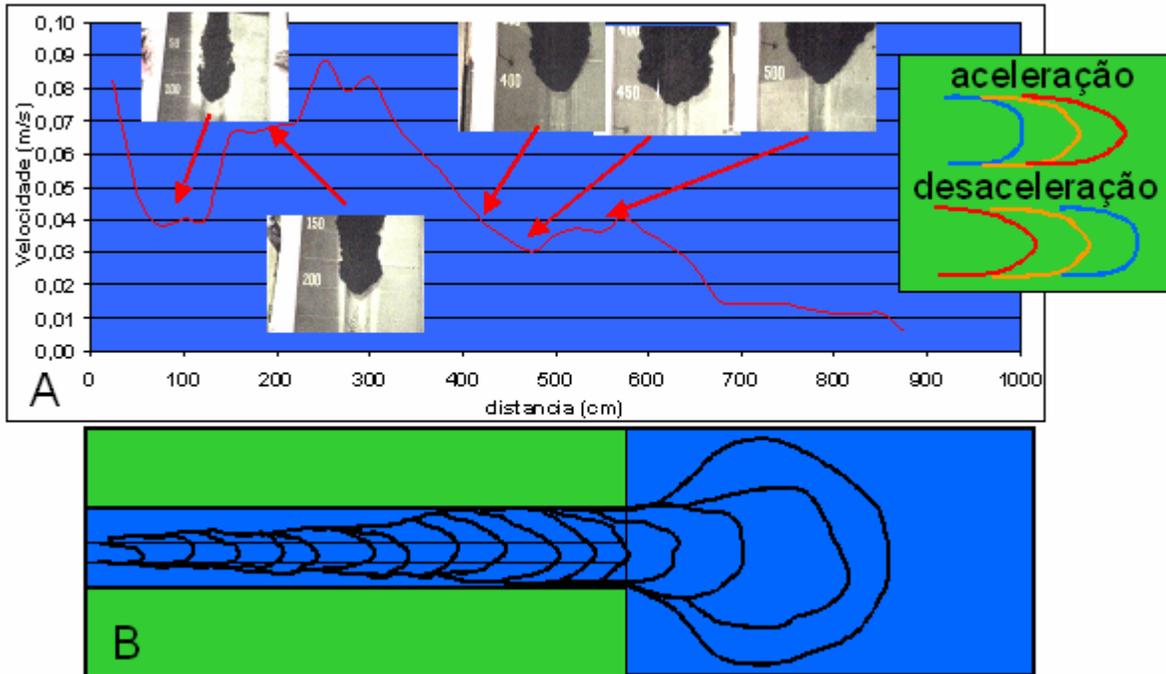


Figura 132– Gráficos correlacionando as variações da velocidade de deslocamento da corrente em relação a uma tendência de decaimento exponencial média e à distância a partir do ponto de alimentação.

Além do declínio exponencial e das variações de velocidade associadas a configuração do modelo, ocorrem flutuações cíclicas de velocidade de alta frequência onde são observadas acelerações e desacelerações da corrente (Figura 132B). Através do tratamento e análise das imagens obtidas nas filmagens foi possível constatar que, de uma forma geral, há uma mudança no formato da cabeça da corrente associada a estas acelerações e desacelerações.



**Figura 133– Relação entre a velocidade da cabeça da corrente e sua forma. A- Gráfico representando a velocidade de deslocamento da cabeça da corrente em função da distância. Fotos indicam a forma da corrente e quadro ao lado mostra de forma esquemática a variação da forma da cabeça: vermelha – alongada e azul – arredondada. B – Esquema indicando a variação da forma da cabeça da corrente durante o seu deslocamento.**

Para exemplificar este fenômeno foi construída a Figura 133 a partir das imagens da corrente durante o seu deslocamento através do modelo. A Figura 133A apresenta o gráfico da velocidade de propagação da corrente 2-Manica1 com algumas fotografias que ilustram a forma da cabeça da corrente. Nesta figura é possível se verificar que pontos onde a corrente se desacelera sua cabeça assume uma forma arredondada e onde há aceleração ela se torna mais alongada. Para uma maior clareza deste raciocínio é apresentado um esquema no lado direito da figura onde é representada a evolução da forma da cabeça da corrente em momentos onde ocorre a aceleração e a desaceleração da mesma. Nas acelerações a cabeça da corrente

passa de uma forma mais arredondada (linha azul) para alongada (linha vermelha) e nas desacelerações ocorre o processo inverso.

Na Figura 133B são apresentadas as formas da cabeça da corrente a cada 25 cm (linhas pretas) onde se pode ter uma idéia da dinâmica da forma da cabeça durante o desenvolvimento da corrente ao longo do canal e na bacia.

Estas observações evidenciam a ação de fenômenos internos à corrente que se desenvolvem de forma cíclica. No item 6.2.2, procurar-se-á explicar que a forma da cabeça, mais ou menos alongada, tem correlação direta com a relação da velocidade do corpo em relação à da cabeça. Quando esta é mais alongada, a cabeça é “empurrada” pelo corpo e, no inverso, o corpo é “puxado” pela cabeça.

Instabilidades semelhantes em correntes conservativas e não-conservativas foram observadas em trabalhos anteriores. Kneller & Buckee (2000), Best, Kirkbride & Peakall (2001) atribuíram estas variações à turbulência interna da corrente e Fabian (2002) relacionou este fenômeno ao desprendimento de vórtices interface superior da corrente.

As imagens da evolução do fluxo mostraram também que a corrente apresentou em seu deslocamento oscilações laterais na direção em relação ao eixo do canal em que ela se desenvolvia (Figura 134). Este tipo de oscilação em correntes canalizadas indica o desenvolvimento de fluxo helicoidal na corrente.

Conforme constatou-se nos experimentos (itens 5.1 à 5.11), pela ação do fluxo helicoidal, a deposição de sedimentos se processou preferencialmente em um dos lados da calha. Isto propiciou a modificação na forma da calha para uma geometria sinuosa. Este fato é relevante principalmente considerando-se que a calha tenha sido construída com geometria linear. Este processo pode ser observado tanto no acompanhamento da sedimentação através das imagens de ultra-som durante os fluxos (item 5.7) quanto nas formas de leito observadas ao longo do canal (item 5.1).

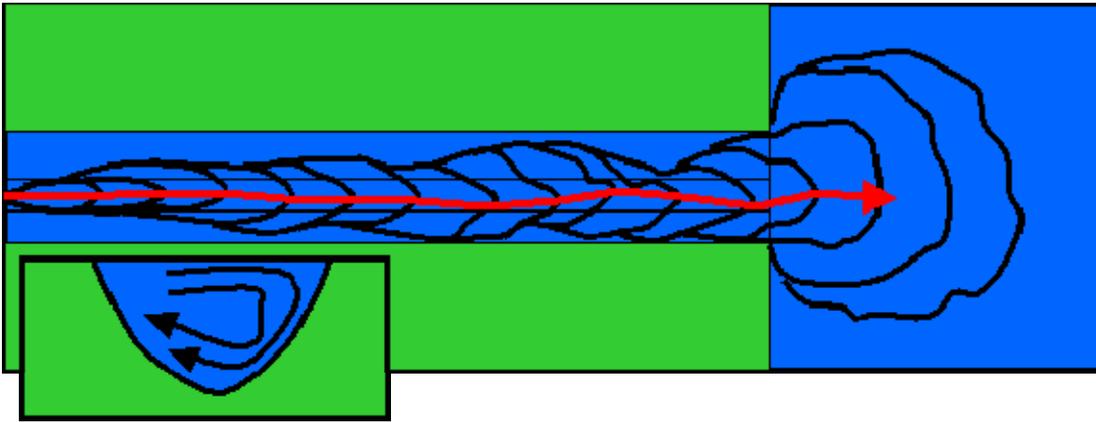


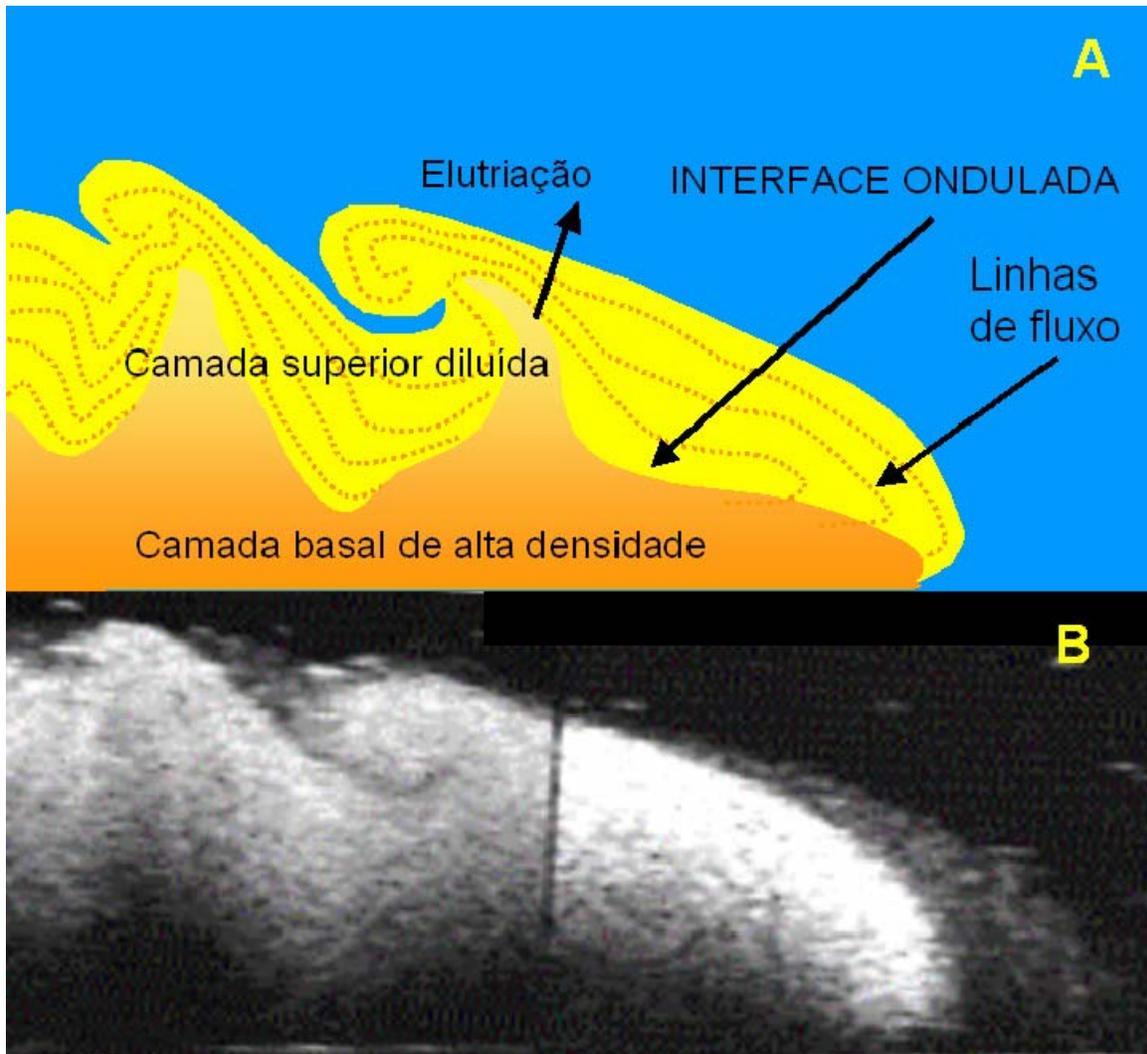
Figura 134 - Esquema mostrando o desenvolvimento de fluxo helicoidal na calha.

### 7.2.2 Estrutura Interna da Corrente

A visualização da estrutura interna da corrente foi muito facilitada pela utilização do scanner de ultra-som. Esta tecnologia possibilitou também uma avaliação qualitativa das variações internas de densidade. Brito et al. (2002) propôs uma metodologia com base na observação tanto de medidas da densidade como na análise da imagem ultra-sônica da corrente para fazer esta estimativa.

A Figura 135 mostra uma destas imagens em que se pode observar que a corrente se organiza internamente por meio de uma gradação de densidade onde os tons claros indicam as baixas densidades e os escuros, as mais elevadas. Esta gradação nos possibilita interpretar duas zonas distintas: uma superior, onde se verifica uma menor densidade e uma inferior, mais densa. Na zona superior, onde a corrente é mais diluída pela entrada de fluidos pela interface com o fluido ambiente predominam sedimentos mais finos (tons brancos a cinza claro; Kneller & Buckee, 2000). Na porção inferior, há uma maior concentração de sedimentos ocasionada pela decantação das partículas mais grossas que não foram mantidas em suspensão pela turbulência interna da corrente (Garcia, 1994). Esta interpretação nos permite inferir que as correntes ensaiadas apresentaram segregação gravitacional formando um fluxo bipartido, conforme proposto por Fisher (1983).

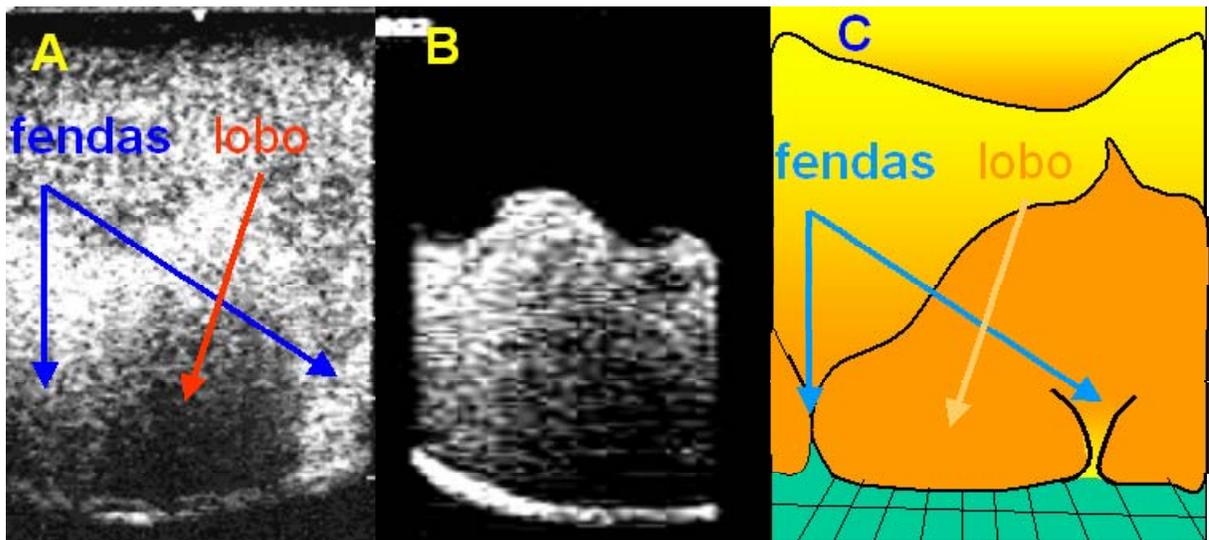
Outra constatação, baseada nas imagens obtidas, é a de que a interface que separa as duas porções do fluxo apresenta ondulações. A origem destas parece estar associada ao despreendimento de vórtices na porção superior da corrente. Este fenômeno resulta da aceleração vertical que se desenvolve pela expansão do fluxo durante este despreendimento.



**Figura 135 – Imagem onde pode se constatar instabilidades internas a corrente de densidade longitudinais ao fluxo. (A) corte longitudinal esquemático, (B) imagem ecográfica,**

Na Figura 135, notam-se duas dessas ondulações que apresentam amplitudes crescentes do nariz para o corpo. Entre estas ondulações, se vê claramente um adelgaçamento da camada basal e a ascensão de material mais denso pelo desprendimento do vórtice até praticamente a interface superior da corrente. Este processo de remobilização do material da camada basal por fluxo ascendente é denominado elutriação. Em fluxos mais vigorosos que possuem números de Reynolds mais altos, a aceleração vertical gerada pelo desprendimento de vórtices poderá induzir à geração de pressões negativas no substrato em que se desenvolve a corrente provocando erosão junto ao fundo.

Além da visão longitudinal da corrente, foi possível observar seções transversais da corrente (Figura 136). Nestas imagens se pode capturar a formação de lobos e fendas (“clefts e lobes”) próxima à passagem da cabeça. Estas feições são causadas pelas instabilidades gravitacionais de segunda ordem que ocorrem na interface inferior da corrente (Simpson, 1972;). São formadas quando a corrente passa sobre uma lâmina de fluido menos denso que, pela ação do empuxo, inicia o seu deslocamento para cima. Simpson (1972), visualizando as feições de lobos e fendas, verificou que elas se prolongam por uma distância significativa atrás da cabeça.



**Figura 136 - Imagem onde pode-se verificar as instabilidades internas as correntes transversais ao fluxo. A e B imagens ecográficas em seções transversais ao fluxo onde se pode verificar variações internas de densidade associadas ao desenvolvimento de fendas e lobos. C modelo para fendas e lobos modificado de Simpson (1972).**

Em hidráulica, é comum a utilização das denominações estruturas de turbulência internas e estruturas externas. As primeiras são características das microestruturas turbulentas na região interna da camada-limite (junto à parede), os vórtices de Kolmogorov são um exemplo clássico deste tipo de estrutura. As estruturas externas (região externa da camada-limite) são macroestruturas de dimensões da ordem do escoamento principal. É possível avaliá-las pela frequência de um grande vórtice com dimensões geométricas da ordem da espessura da camada como um todo e velocidade periférica da ordem da velocidade do escoamento. Apesar de serem totalmente desacopladas em termos de frequências, a energia das macroestruturas é dissipada pelas microestruturas.

Na Figura 137B, apresenta-se uma composição das imagens obtidas com ultra-sonografia com Doppler. Esta técnica possibilita que se obtenham estimativas da velocidade de fluxo internas à corrente durante o ensaio através de uma escala de cores. Na imagem, esta informação pode ser visualizada nos pequenos quadrados de cor azul situados na base da figura que, no caso de nosso experimento, indicam velocidades compatíveis com a registrada nos outros métodos de estimativa. Além desta informação, a técnica possibilita inferir a variação interna de densidade da corrente indicada pelos tons amarelos a avermelhados. O tom vermelho-escuro desta imagem indica baixa densidade e o amarelo-claro alta densidade. Foi feita uma composição de fotografias da mesma corrente em tempos e posição similares ao obtido pela imagem de ultra-som (Figura 137A).

Analisando as imagens de ultra-sonografia, é possível fazer algumas inferências a respeito da dinâmica interna da corrente. Inicialmente, pode-se verificar que a zona basal mais densa é mais espessa próxima à cabeça da corrente. Na porção intermediária (corpo), é mais delgada e vai se diluindo ao final do fluxo. Por outro lado, constata-se na cabeça um tom mais alaranjado indicando uma menor densidade, no corpo tons amarelos-claros a brancos indicando uma alta densidade e na cauda tons alaranjados a vermelho indicando densidades muito baixas.

Associando estas observações, constata-se que a cabeça mostra uma expansão da zona basal. Esta expansão é ocasionada, segundo Middleton (1966a), pela divergência do fluxo para cima que se processa pelo choque da corrente com o fluido ambiente. Há, também, um aumento do volume pela intensa entrada de fluido ambiente. Comparando a imagem de ultra-som com a fotografia, verifica-se que, na cabeça, a aparência externa da corrente é a de um fluxo mais concentrado com ondulações de alta frequência e que não há ainda a separação nítida entre as zonas basal e a superior menos densa.

No corpo, nota-se um aumento da segregação da corrente com a formação de uma zona basal densa. Verifica-se também uma expansão do fluxo na porção superior que pode ser observada na fotografia. A aparência externa da corrente é a de um fluxo mais diluído com ondulações de baixa frequência em sua interface superior. As interfaces entre o fluido ambiente e a zona superior do fluxo e entre a zona superior a zona basal apresentam ondulações de Kelvin-Helmoltz.

A cauda da corrente marca o término do suprimento de material para ela e é mantida pelo sedimento que foi colocado em suspensão durante a alimentação.

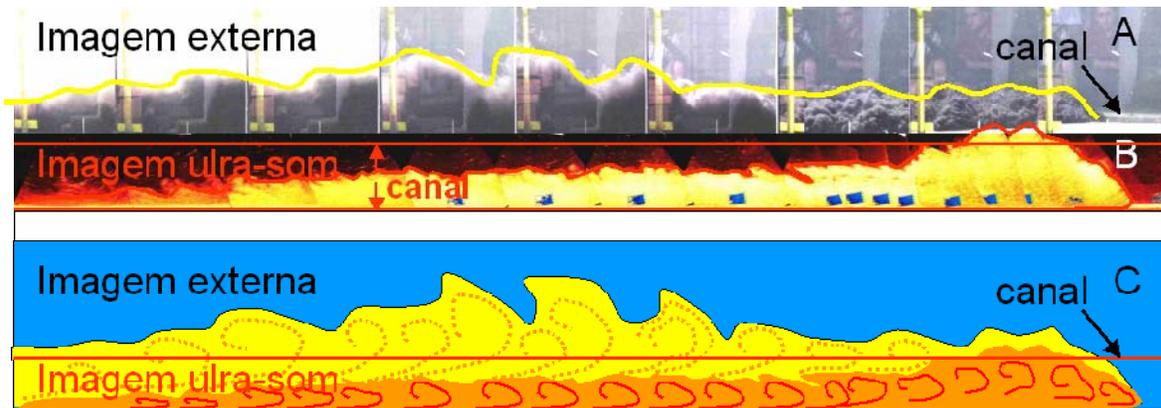


Figura 137– Imagens da corrente durante um experimento. A - imagem fotográfica a partir de uma janela lateral ao tanque. B - composição de imagens de ultra-som com Doppler do mesmo fluxo apresentado na imagem A. C – esquema indicando a interpretação das imagens A (cor amarelo) e B (cor laranja) onde é possível se verificar um espessamento da zona superior do fluxo da cabeça para o corpo. (maiores detalhes no texto)

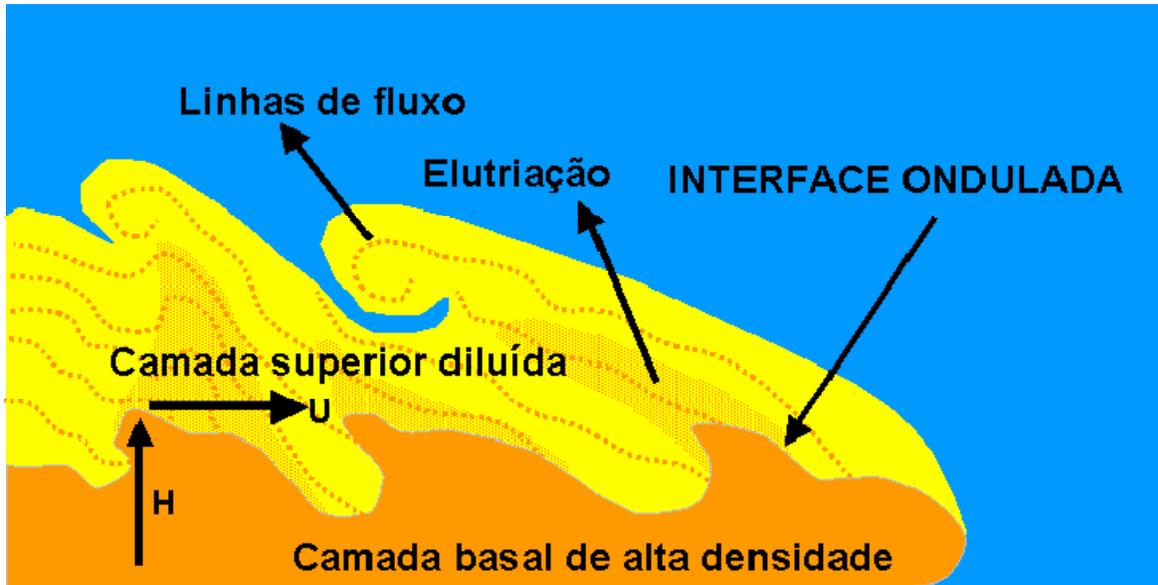
### 7.2.3 Correlação entre a estrutura interna da corrente e as características da propagação da corrente

As ondas internas à corrente, geradas pelo desprendimento de vórtices na interface superior, parecem estar na gênese das flutuações na velocidade de deslocamento da cabeça observadas na Figura 132. Este fenômeno, denominado instabilidades de Kelvin-Helmoltz, provoca um espessamento da camada basal no ponto onde se desprende o vórtice (Figura 138).

Quando se processa esse espessamento, há um aumento da energia potencial gerando um uma onda solitária que se propaga em direção à cabeça da corrente. A intensidade deste pulso pode ser estimada pela relação  $U=(gH)^{1/2}$  (Simpson,1997), onde U é a velocidade de deslocamento do pulso, g a força da gravidade e H a altura do pulso.

Esse processo de aceleração da corrente se repete a cada novo desprendimento de vórtices. Isto gera um trem de ondas que começa a se propagar no sentido de avanço da corrente com velocidade superior à de deslocamento velocidade da cabeça. Ao atingirem o nariz, estas ondas imprimem acelerações a cabeça que modificam a sua forma. Este fenômeno pode ser claramente verificado pela observação da corrente através de imagens ultra-sônicas durante os ensaios.

Como foram observadas variações de velocidade de deslocamento da corrente com alta e baixa frequência, atribuímos as de alta frequência à chegada destas ondas no nariz da corrente. As de baixa frequência ocorreriam pela interferência de ondas de maior e menor amplitudes que se propagam com velocidades diferentes e que estariam associadas ao desprendimento de vórtices de diferentes tamanhos observados na camada superior do fluxo.

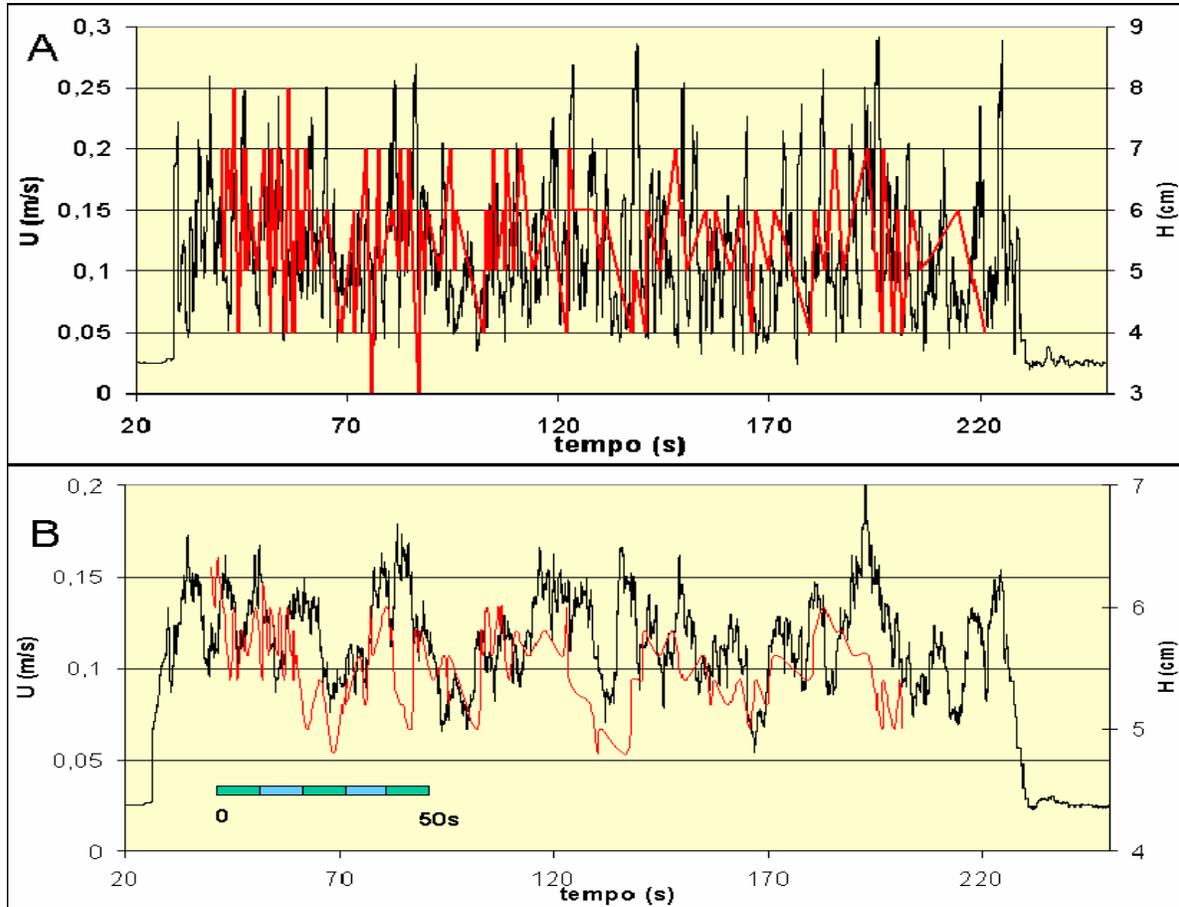


**Figura 138–** Esquema indicando a estrutura interna da corrente e o processo que provoca as oscilações no seu deslocamento.

Para avaliar este fenômeno, foram realizadas medidas tanto da altura da camada basal quanto da velocidade da corrente. A altura da corrente foi medida diretamente nas imagens de ultrassom com auxílio de um programa de tratamento de imagens. Já a velocidade foi medida por um anemômetro de filme quente.

Na Figura 139A, são apresentadas as curvas de velocidade de fluxo, em preto, e da altura da corrente, em vermelho, medidas no ensaio 11-Janeiro de 2003. Nesta figura, pode-se verificar que, embora estas medidas tenham sido realizadas de forma independente, há uma razoável concordância tanto da frequência (1 a 2 segundos) quanto da amplitude entre as duas curvas. Construiu-se também o gráfico da Figura 140, onde temos a informação cruzada entre a altura e a velocidade da corrente de todas as medidas realizadas. A dispersão verificada neste gráfico deve ser analisada considerando que existem imprecisões tanto inerentes à avaliação da altura da camada basal como nos métodos de cronometragem utilizados. Mesmo assim, podemos verificar que há uma correspondência entre o aumento na altura da corrente e o incremento de

velocidade. Isto nos permite inferir uma associação entre estes dois parâmetros como prevê a nossa hipótese.

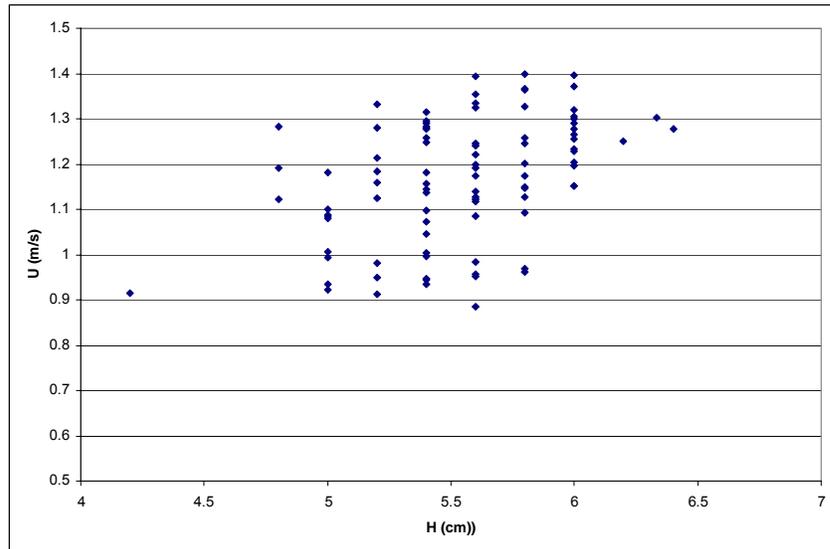


**Figura 139 –Gráficos apresentando os valores de velocidade de fluxo (U-curva preta) e da altura da camada basal da corrente (H-curva vermelha), sem (A) e com (B) filtro de frequência.**

Para entender melhor esta relação, foi aplicado um filtro de frequência nas duas curvas possibilitando uma melhor visualização da correlação entre elas (Figura 139B). Nas curvas filtradas se visualizam episódios cíclicos de mais baixa frequência. Estes ciclos de 10 a 50s parecem estar relacionados à interação periódica dos ciclos menores intercalando momentos de mais alta energia a eventos onde esta é reduzida.

Estas constatações têm implicações muito importantes no processo sedimentar desenvolvido pela corrente conforme será exposto no item 6.3. Uma observação mais atenta do gráfico da Figura 139B, revela que, em alguns pontos, a correlação acima referida é inversa, ou seja, com uma redução na altura da camada basal, há um aumento da velocidade. Este fato pode ser

analisado pela observação das imagens dinâmicas de ultra-som da corrente. Nestas imagens, pode-se constatar que nos pontos onde há divergência entre a altura e a velocidade de fluxo da corrente verifica-se a ocorrência pulsos acelerados, onde a corrente se mostra bem mais densa e delgada que no fluxo “normal”.



**Figura 140 - Gráfico correlacionando a velocidade de fluxo (U) e da altura da camada basal da corrente (H) dos dados da Figura 12.**

Na Figura 141, representa-se a segmentação do fluxo com a geração de pulsos acelerados. Na Figura 141A, são apresentados os registros de sonar obtidos por Best, et al. (2002) em um fluxo hiperpical no Lago Lilloet no Canadá, onde eles afirmam terem constatado o mesmo fenômeno. Na Figura 141B, é apresentada uma composição de imagens obtidos pelo scanner de ultra-som durante a passagem da corrente. A linha vermelha representa de forma esquemática o limite entre as camadas de alta e baixa densidade do fluxo interpretada a partir das observações de Brito et al. (2002).

A Figura 141C é uma representação esquemática da corrente observada na Figura 141B onde são identificados os pulsos acelerados e uma distribuição da velocidade interna da corrente. A Figura 141D é um gráfico esquemático que representa as relações entre velocidade de fluxo e a altura da corrente da Figura 141C. Portanto, podemos dizer que as observações realizadas nos sugerem que, mesmo com suprimento constante, a corrente parece se dividir em pulsos que se repetem em ciclos bastante regulares. Essa divisão cíclica da corrente indica estar relacionada à sua dinâmica interna imposta pelo desprendimento de vórtices na porção superior do fluxo.

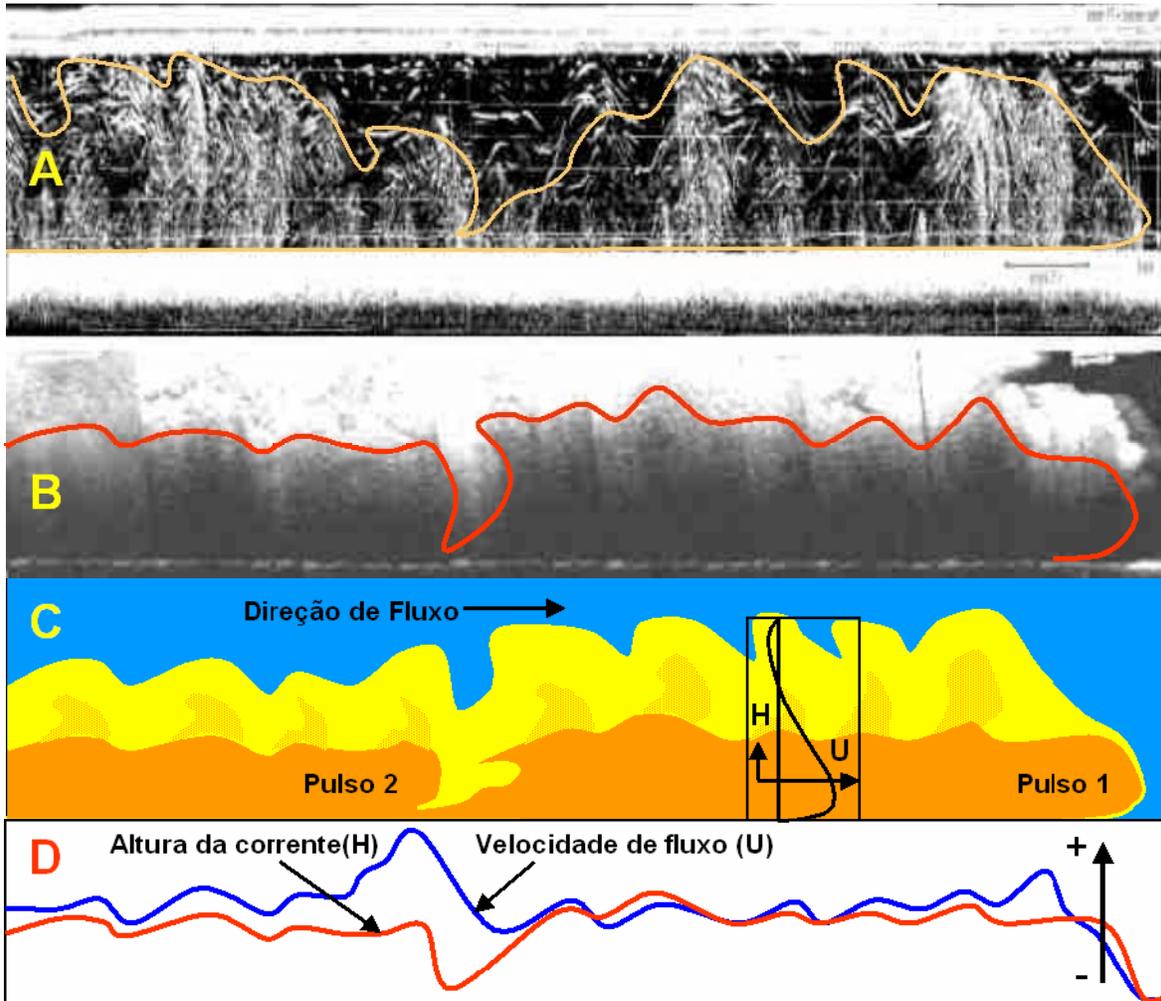


Figura 141 – (A) Imagem longitudinal de corrente de densidade obtida através de sonar no Lago Lilloet - Canada (Best, Peakall, Franklin & Kostaschuk, 2002). A linha amarela representa o limite superior da corrente. (B) Imagem longitudinal ao fluxo composta de scanner de ultra-som em experimento de corrente de densidade realizado no IPH. (C) Interpretação das imagens A onde se procura representar a formação de pulso em um único evento de corrente de densidade. O gráfico interno representa a distribuição vertical de velocidades de fluxo no interior da corrente. (D) Gráfico esquemático da distribuição de velocidades e altura da corrente da Figura C ao longo do tempo.

### 7.3 IMPLICAÇÕES DA DINÂMICA DA CORRENTE NAS CARACTERÍSTICAS DOS DEPÓSITOS.

A observação da corrente através das imagens de ultra-som possibilitou que, além do acompanhamento da dinâmica interna da corrente, fosse monitorada a sedimentação que se

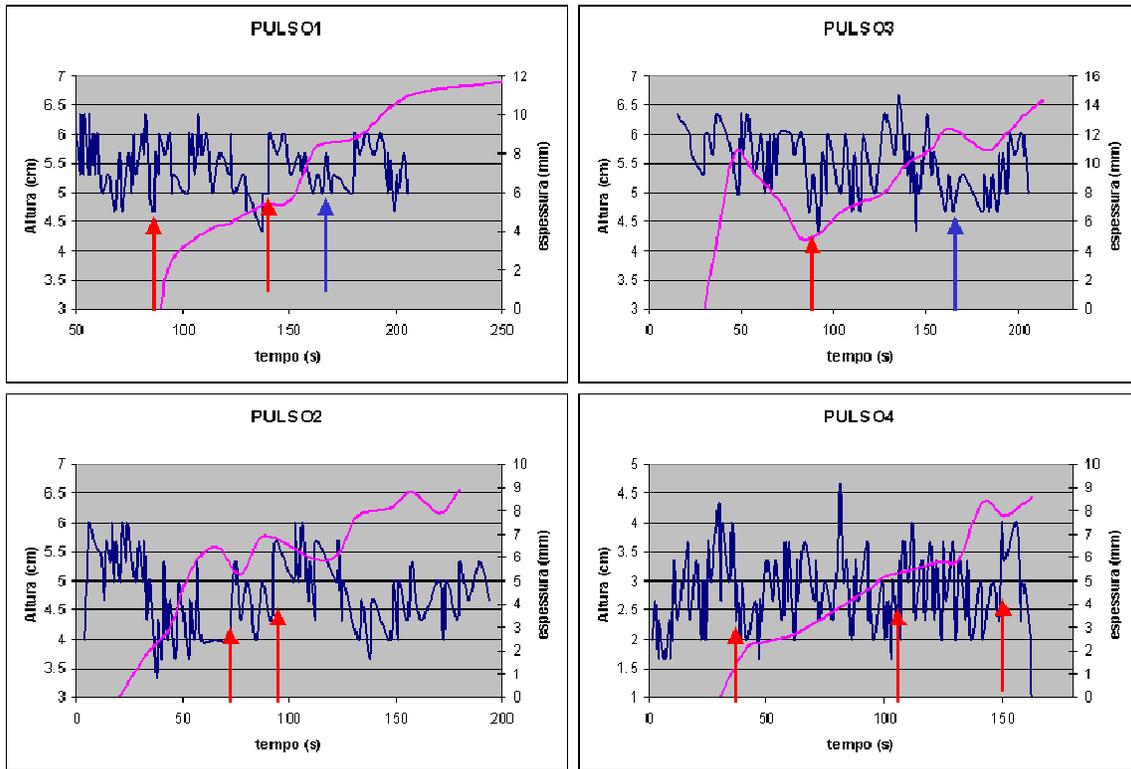
processava durante o fluxo. Nos itens 5.5, 5.7, 5.8 e 5.11 apresentaram-se diversas observações que foram feitas com esta técnica. Nestas observações foi possível detectar variações na taxa de sedimentação e a possibilidade de que o fluxo durante seu desenvolvimento alternasse fases de maior ou menor taxa de deposição, não deposição ou mesmo erosão.

A análise conjunta das informações sobre a altura da zona basal da corrente com a evolução da deposição (altura depósito), obtidas através das imagens de ultra-som, tornou possível também realizar inferências quanto à correlação entre estes parâmetros. Esta análise nos possibilitou constatar que as variações na altura da camada interna da corrente implicam mudanças na taxa de sedimentação (variação da altura do depósito com o tempo).

Para melhor documentar esta constatação e considerando a correlação encontrada entre a velocidade de fluxo e a altura da zona basal da corrente, foram construídos os gráficos da Figura 142. Neles, podem ser analisadas estas informações para o ensaio 11–Janeiro de 2003 que foi realizado com quatro eventos sobrepostos com 120 l cada, uma vazão de 36 l/min e 1,042 g/cm<sup>3</sup> de densidade da mistura, que foi feita com carvão 205 com moda granulométrica de 0,088 mm. As observações foram feitas a 200 cm do ponto de alimentação dentro do canal.

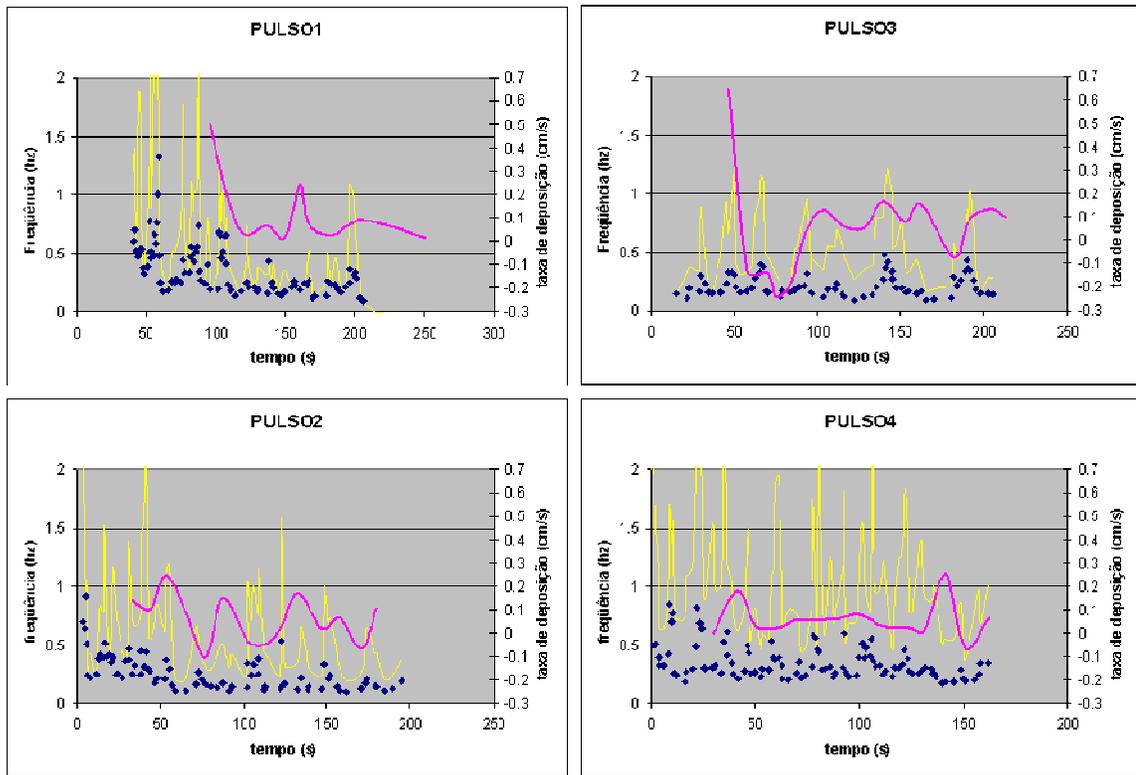
Nos gráficos, pode-se verificar que, na maioria dos eventos, ao aumentar a altura da corrente, há uma diminuição na inclinação da curva de espessura do depósito em função do tempo (taxa de deposição) ou uma diminuição da espessura do depósito com o tempo que implica em erosão.

Apesar de haverem algumas divergências nesta correlação (setas azuis na Figura 142), ocasionadas pelos fenômenos de aceleração interna da corrente já discutidos no item 6.1.2, pode-se dizer que a corrente, durante um simples evento, apresenta momentos de deposição alternada a erosão associada a variações da altura da camada basal. Esta informação é relevante pois se trata de um princípio de causa e consequência. Se os depósitos fossem uma consequência da altura da corrente (supondo mais ou menos permanente a mesma), deveriam ser maiores quando as velocidades fossem menores (menor velocidade em relação a velocidade de queda). Por outro lado, se a altura da camada basal é uma consequência da maior erosão, quanto maior ela for maior será a quantidade de material levantado do fundo e maior a espessura da camada basal.



**Figura 142 – Gráficos indicando a espessura dos depósitos (roxo) e a altura da camada basal da corrente em função do tempo observados no ensaio 11–Janeiro de 2003. As setas vermelhas indicam pontos onde há concordância entre os dados, e as setas azuis onde não há concordância.**

Para analisar este fenômeno através de uma abordagem complementar, foram construídos outros gráficos que correlacionam à frequência das ondulações da camada basal da corrente (pontos azuis), razão entre a amplitude-comprimento de onda destas oscilações (linha amarela) e taxa de deposição em função do tempo (Figura 143). Numa primeira análise destes gráficos, pode-se observar uma certa ciclicidade nas frequências das ondas da camada basal (pontos azuis), que são macroestruturas do fluxo, em função do tempo e, que estas ocorrem em ciclos de aproximadamente 25 segundos. Esta constatação sugere novamente que há um controle da cinética interna do fluxo e da sua interação com as interfaces superior e frontal da corrente provocando esta ciclicidade que se torna mais importante pelo fato de se verificar também nestes gráficos que nos momentos em que há altas frequências, há uma tendência de o fluxo ser deposicional, enquanto os de baixas frequências a serem não-deposicionais ou erosionais. Esta relação fica mais evidente quando é feita a correlação com a razão amplitude-comprimento de onda (linha amarela).



**Figura 143– Gráficos correlacionado as características das macro-estruturas do fluxo: frequência das variações de altura da camada basal da corrente (pontos azuis), razão amplitude-comprimento de onda destas variações (linha amarela) e taxa de deposição em função do tempo.**

Lowe (1982) atribui a um único fluxo a deposição de uma camada de cerca de 3 metros de espessura de turbidito na porção proximal do Arenito Thunderhead. Este depósito apresenta uma seqüência de camadas com 10-15 cm de espessura, com gradação inversa, por ele denominadas S2- depósitos de carpete de tração. Sua teoria para explicar a formação desta estruturação sedimentar foca-se na atuação da pressão intergranular dispersiva em correntes turbidíticas de alta densidade. Por outro lado, a nossa constatação de uma ciclicidade na velocidade de fluxo poderia explicar este tipo depósito pela dinâmica interna da corrente. Estas observações realizadas sobre a dinâmica das correntes de densidade induzem novas considerações sobre sua capacidade de erosão, transporte e deposição.

A variação granulométrica interna a depósitos turbidíticos tem trazido muita controvérsia sobre a dinâmica das correntes de densidade e que normalmente recaem em discussão sobre a sua reologia (Mulder and Alexander, 2001; Kneller and Buckee, 2000; Shanmugam, 2002). As observações realizadas indicam que pela alternância de aceleração e desaceleração verificada na dinâmica interna ao fluxo é possível se explicar a geração depósitos contínuos de arenitos

com variações internas de granulometria. Por este mecanismo, em fases de aceleração haveria a deposição de sedimentos mais grossos e, nas de desaceleração, mais finos, possibilitando todo tipo de gradação interna em uma mesma camada.

.As variações na velocidade da corrente mais intensa, que ocorrem em frequências mais baixas, indicam a possibilidade de, em um único evento, ocorrer alternância cíclica de erosão e deposição durante a evolução tanto espacial como temporal do fluxo.

#### 7.4 PADRÕES DEPOSICIONAIS VERIFICADOS NOS ENSAIOS.

Neste item serão apresentadas as principais características dos depósitos desenvolvidos em nossos ensaios e sua associação com as variáveis que foram mensuradas durante os mesmos. Nas análises que serão realizadas são utilizadas algumas características representativas tanto dos fluxos como dos depósitos apresentadas na Tabela 6.

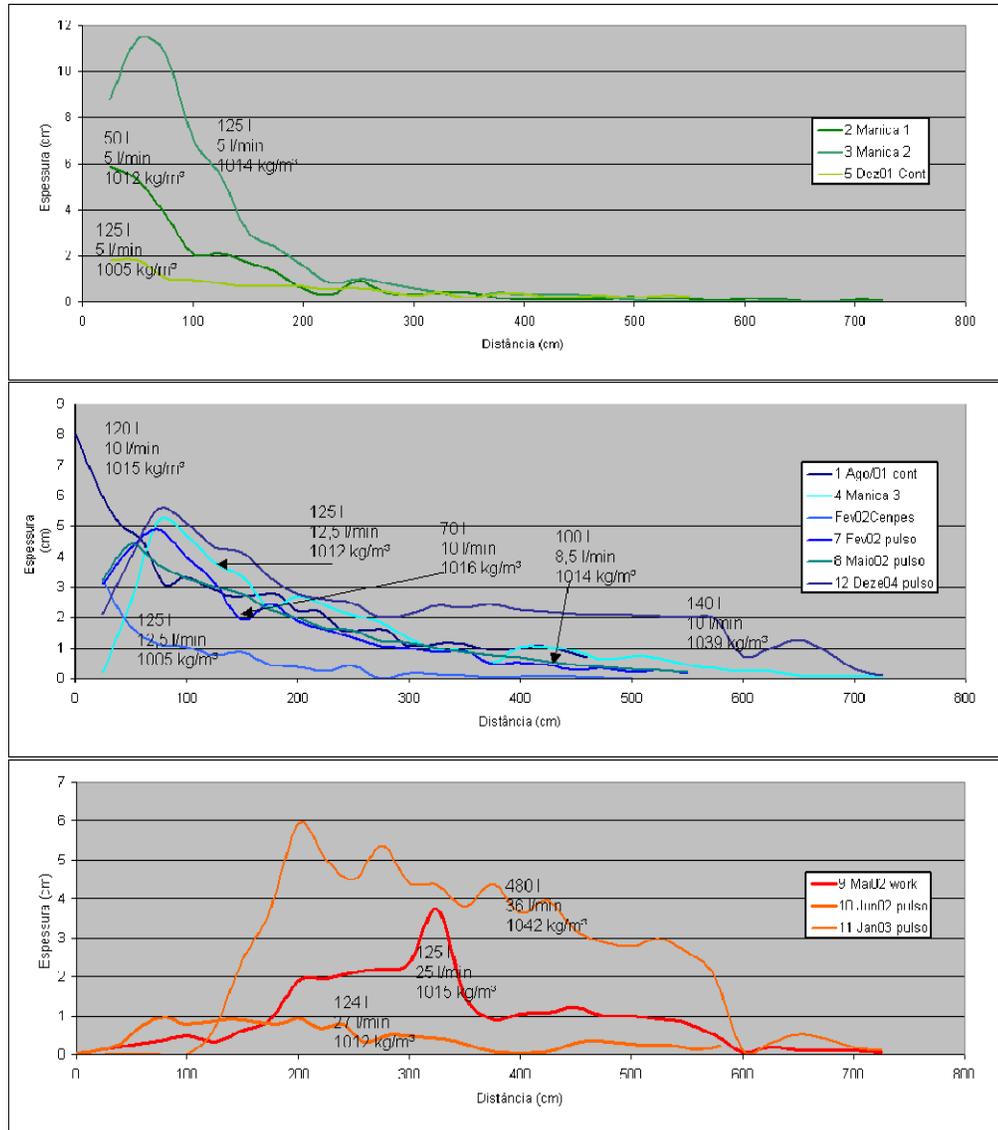
##### 7.4.1 Distribuição espacial dos depósitos

Foram utilizadas várias técnicas para estudar a distribuição espacial dos depósitos: fotografias, medições com ponta linimétrica e imagens ultra-sônicas. As fotografias dos depósitos nos fornecem uma idéia da sua distribuição em área e da sua geometria. Medidas com ponta linimétrica oferecem estimativas da espessura. As imagens ultra-sônica oferecem visões em cortes verticais. As medições da espessura dos depósitos no eixo do canal com ponta linimétrica nos fornecem uma boa estimativa de como o material em suspensão na corrente foi sendo sedimentado.

Na Figura 144 temos gráficos onde são representadas as espessuras do deposito ao longo de cada experimento. Nesta abordagem, buscou-se individualizar famílias de experimentos com padrões similares de vazões: baixa (cores verdes), média (cores azuis) e alta vazão (cores avermelhadas). Desta forma, foi possível verificar os diversos padrões de distribuição dos sedimentos ao longo da trajetória da corrente.

De um modo geral, nota-se que o aumento da vazão desloca o depósito como um todo no sentido de propagação da corrente. As vazões menores formam depósitos espessos próximos ao início da corrente. As vazões maiores deslocam-nos para o meio do canal. Para facilitar a visualização desta correlação construiu-se o gráfico da Figura 145A onde são plotadas as distâncias em que ocorre o pico de deposição em função da vazão de alimentação da corrente. Nessa figura, apresenta-se a nuvem de pontos obtida para os 12 ensaios onde é possível se

constatar a boa correlação entre esses parâmetros. Há apenas um ponto deslocado da tendência que corresponde ao ensaio 9-maio02-Work onde ocorreu um pico de deposição na quebra do declive do canal a 375 cm. Procurou-se estabelecer esta correlação com os outros parâmetros que variaram nos ensaios como a concentração volumétrica de carvão na corrente e a o diâmetro médio do sedimento em suspensão na corrente, não tendo sido observada uma boa correlação com eles.



**Figura 144–** Espessuras dos depósitos no eixo do canal medidas com ponta linimétrica. Os números associados às curvas indicam o volume, a vazão de alimentação e a densidade da corrente.

Tabela 6 - Características representativas dos ensaios realizados.

ensaio	1 Ago/01 cont	2 Manica 1	3 Manica 2	4 Manica 3	5 Dez01 Cont	6 Fev02 Cenpes	7 Fev02 pulso	8 Maio02 pulso	9 Mai02 work	10 Jun02 pulso	11 Jan03 pulso	12Dez04 cont
Vazão (l/min)	7-12	5	5	12.5	5	5	10	8.5	25	27	36	10
Volume da mistura (l)	120	50	125	125	125	100	70	100	125	124	480	120
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1.015	1.005	1.012	1.014	1.005	1.005	1.016	1.014	1.015	1.012	1.042	1.040
Concentração volumétrica (v/v)	0.093	0.045	0.082	0.089	0.041	0.041	0.098	0.088	0.093	0.077	0.233	0.223
Volume de carvão na corrente (l)	11.19	3.89	11.02	9.72	5.18	5.18	6.89	8.8	11.65	9.64	111.92	26.24
Volume do Depósito (l)	5.73	2.34	10.90	4.92	0.89	0.90	4.23	4.13	2.63	0.60	10.40	8.84
Fração retida (v/v)	0.51	1.00	0.99	0.51	0.17	0.82	0.13	0.47	0.23	0.06	0.09	0.33
Distância do pico de deposição (cm)	20	25	50	75	50	25	75	50	375	225	200	75
Centro de massa do depósito (cm)	50	33	44	112	70	25	75	87	283	185	290	160
Espessura média do depósito (cm)	2.16	1.16	2.44	1.76	0.57	0.48	1.52	1.55	1.18	0.44	2.98	2.82
Coefficiente de Variação de espessura	0.0137	0.0111	0.0231	0.0138	0.0044	0.0035	0.0126	0.0074	0.0159	0.0068	0.0313	0.0117
Diâmetro médio do grão (mm)	0.092	0.076	0.072	0.090	0.079	0.091	0.078		0.109	0.091	0.102	
Velocidade média (m/s)		0.0388	0.0375	0.0668	0.0329	0.0196	0.0385	0.0900		0.0794	0.0975	0.1069
Vazão *raiz(Conc)	3.0495	1.0606	1.4317	3.7291	1.0124	3.1304	1.0124	2.5215	7.6239	7.4921	17.377	4.7222
Vazão* Concentração	0.93	0.23	0.41	1.11	0.21	0.21	0.98	0.75	2.33	2.08	8.39	2.23

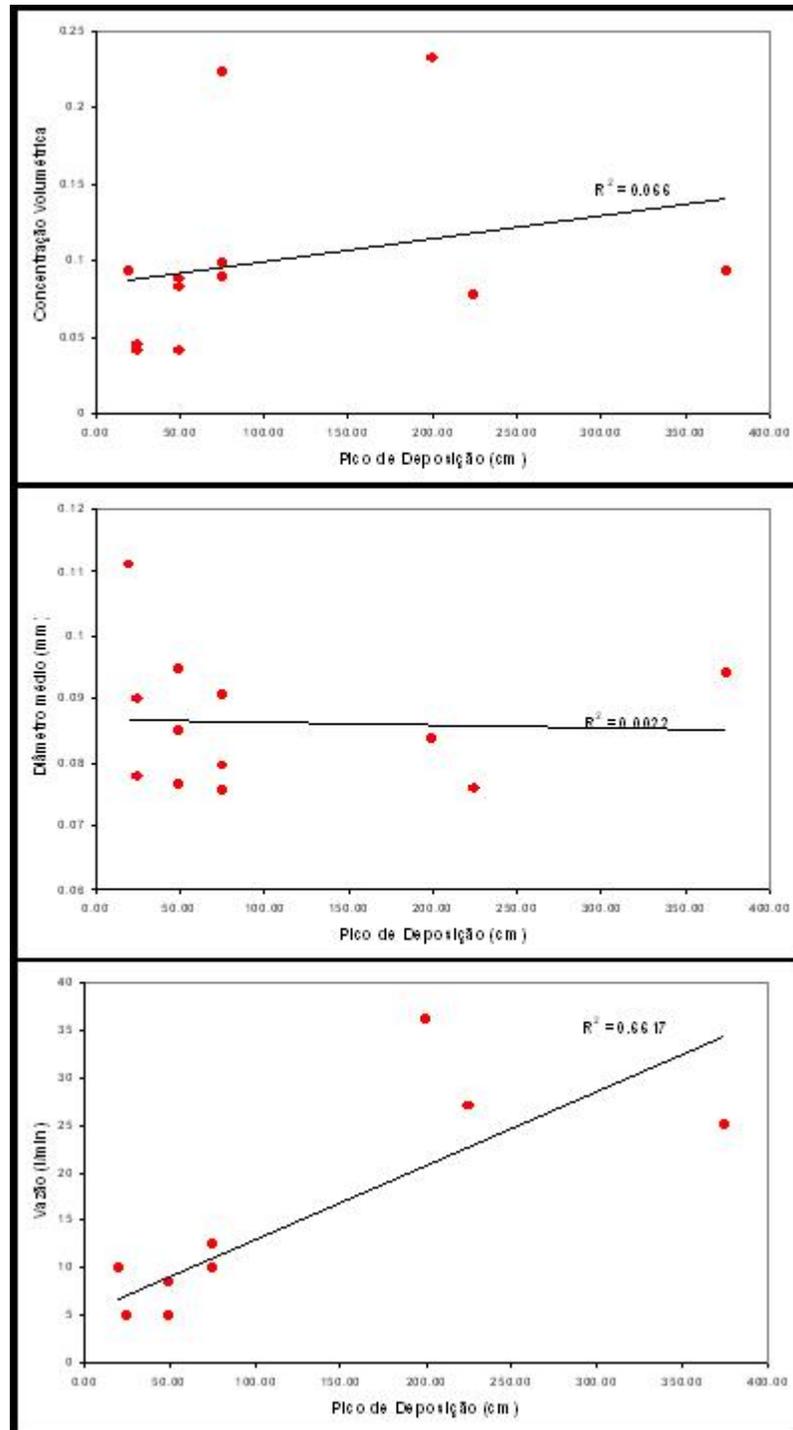


Figura 145 - Gráficos correlacionando a distância em que ocorre o pico de maior espessura do depósito com: a vazão de alimentação da corrente ( $R^2=0,66$ ), o diâmetro médio do grão no depósito e a concentração volumétrica de carvão na corrente.

Estimaram-se os volumes de material sedimentado ao longo do canal nos diversos ensaios pela integração da área da seção do canal determina pelas medidas de espessura realizadas no seu centro. Este cálculo considerou a variação da geometria parabólica do canal para cada espessura medida e distância entre os pontos de medição que foi de 25 cm. O resultado da integração do volume sedimentado é mostrado na Figura 146. Neste gráfico, utiliza-se a mesma escala de cores da Figura 144 e verifica-se que a distribuição volumétrica dos depósitos ao longo do canal depende de outros fatores além da vazão.

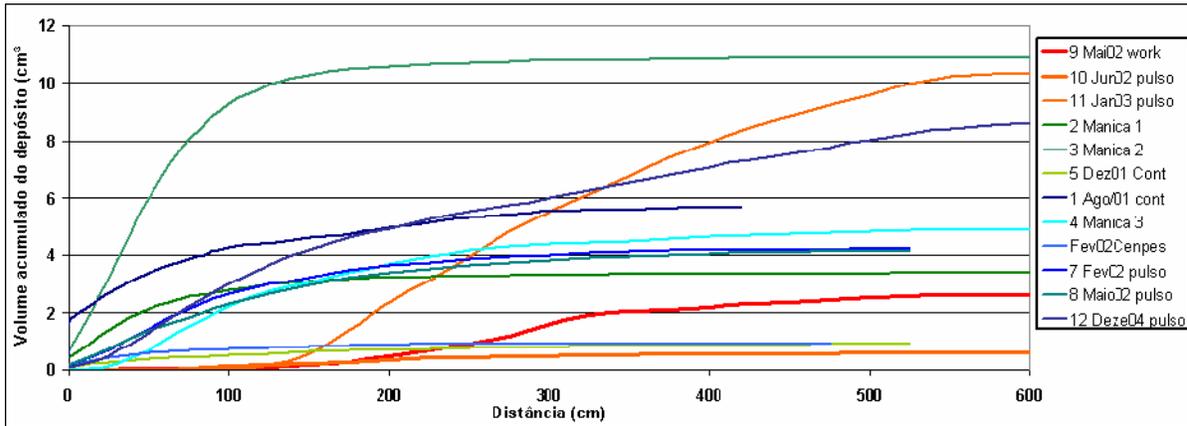


Figura 146 - Gráfico correlacionando o volume depositado no canal em função da distância do ponto de alimentação.

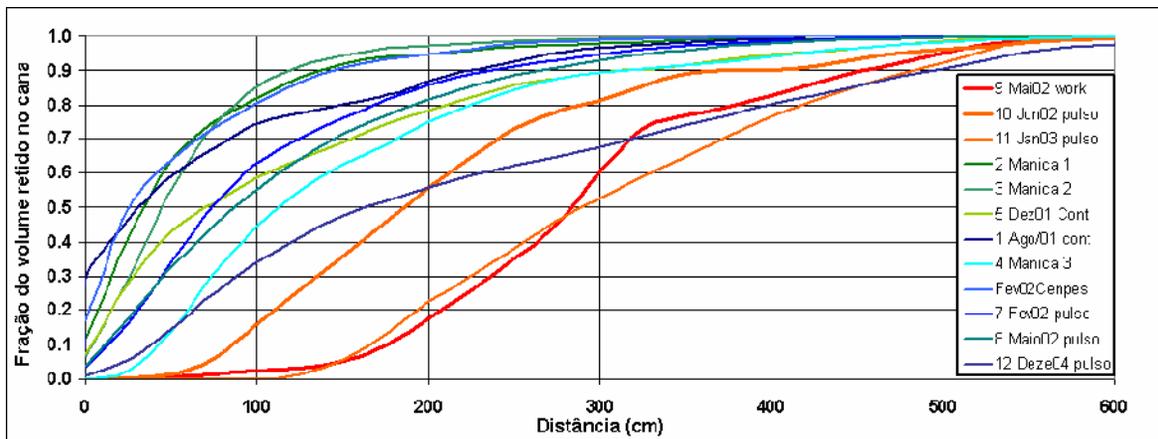


Figura 147 - Gráfico da fração volumétrica do depósito retida no canal em função da distância do ponto de alimentação.

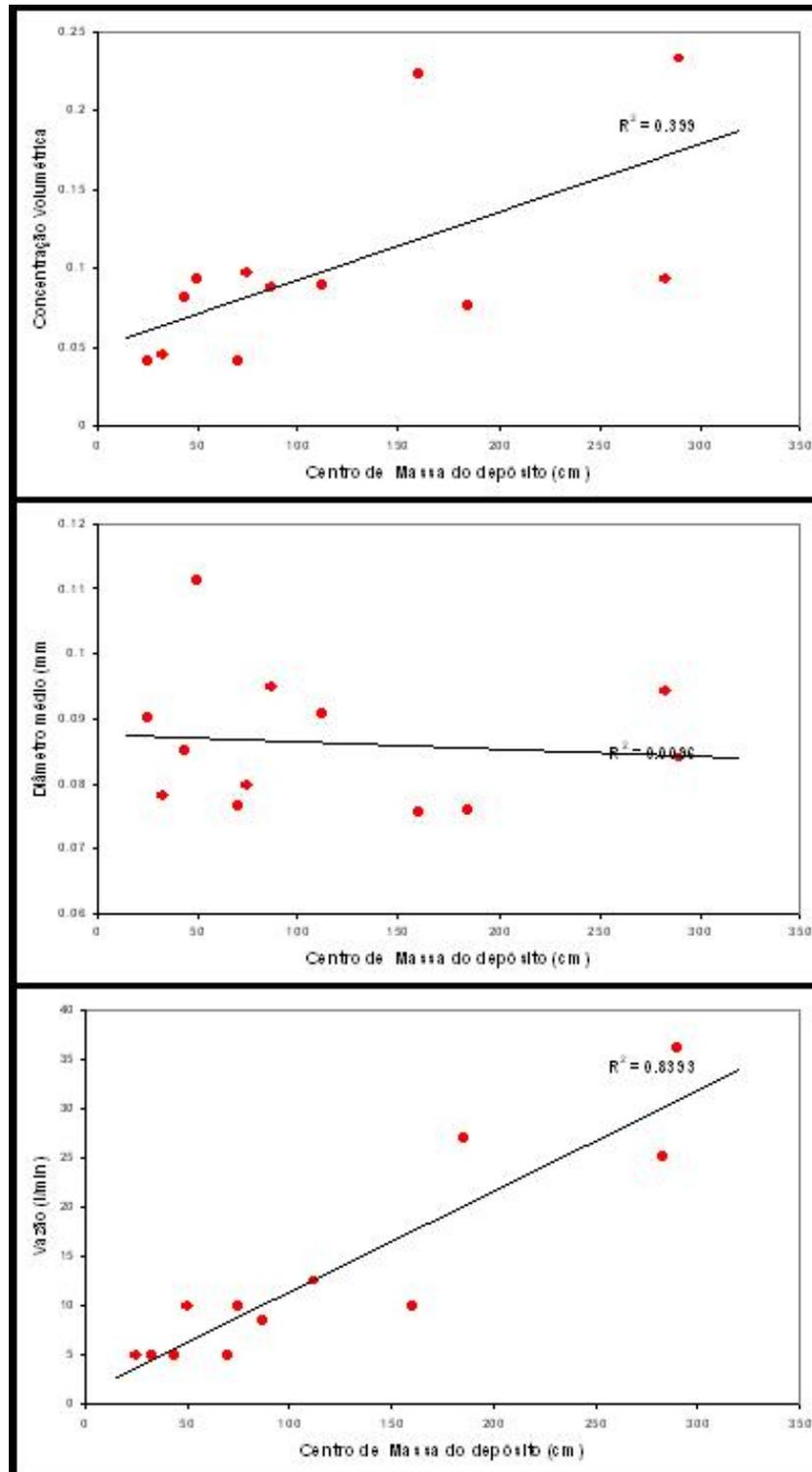


Figura 148 - Gráficos da distância do ponto de alimentação até o centro de massa do depósito em função: da vazão de alimentação da corrente ( $R^2=0,83$ ), do diâmetro médio do grão no depósito e da concentração volumétrica de carvão na corrente.

A fim de retirar das curvas o efeito do volume de material disponibilizado na corrente, foi calculada a fração volumétrica dividindo o valor total acumulado no canal pelo volume acumulado no ponto. Estes valores que variam entre 0 e 1 são apresentados na Figura 147. Com base nestes cálculos, foi possível estimar o centro de gravidade do depósito que é considerado, quando a fração depositada no canal corresponde a 50% do volume total. Este valor estimado para cada ensaio foi plotado em função da vazão de alimentação da corrente, da concentração volumétrica de carvão na corrente e do diâmetro médio do sedimento depositado no gráfico da Figura 148.

Nos gráficos da Figura 148, é possível se comprovar uma boa correlação entre o centro de massa dos depósitos com a vazão e uma baixa correlação com a concentração volumétrica e com o diâmetro médio do sedimento em suspensão.

Procurou-se uma correlação entre o volume de material depositado no canal com os parâmetros que variaram nos ensaios. A melhor correlação foi constatada pelo produto da multiplicação do volume da mistura que alimentou a corrente ( $V$ ) pela concentração volumétrica de carvão ( $C$ ) dividido pela vazão ( $Q$ ). Ou seja, há uma correlação direta entre o volume de sedimento disponibilizado na corrente ( $V * C / Q$ ) com o volume do depósito no canal e, inversa com a vazão. Esta correlação é apresentada na Figura 149.

Analisando os gráficos da Figura 144 é possível também notar que as vazões maiores tendem a formar depósitos com mais variação da espessura ao longo do canal (tons vermelhos). Para melhor evidenciar este fato é apresentado no gráfico da Figura 150 onde é apresentada a taxa de variação de espessura do depósito média em função da vazão. A taxa de variação de espessura foi calculada pelo valor absoluto da diferença entre a espessura entre dois pontos de medição dividida pela distância entre os pontos. A média foi calculada no intervalo entre 100 e 600 cm.

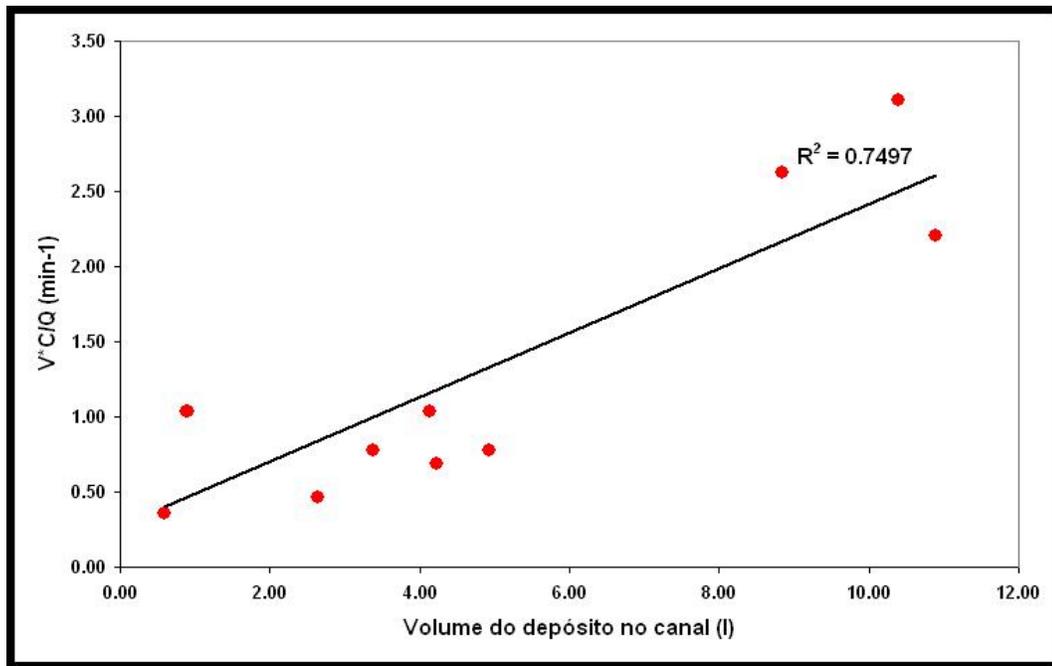


Figura 149– Gráfico da multiplicação do volume da mistura que alimentou a corrente (V) pela concentração volumétrica de carvão (C) dividida pela vazão (Q) em função do volume de sedimento depositado no canal ( $R^2=0,78$ ).

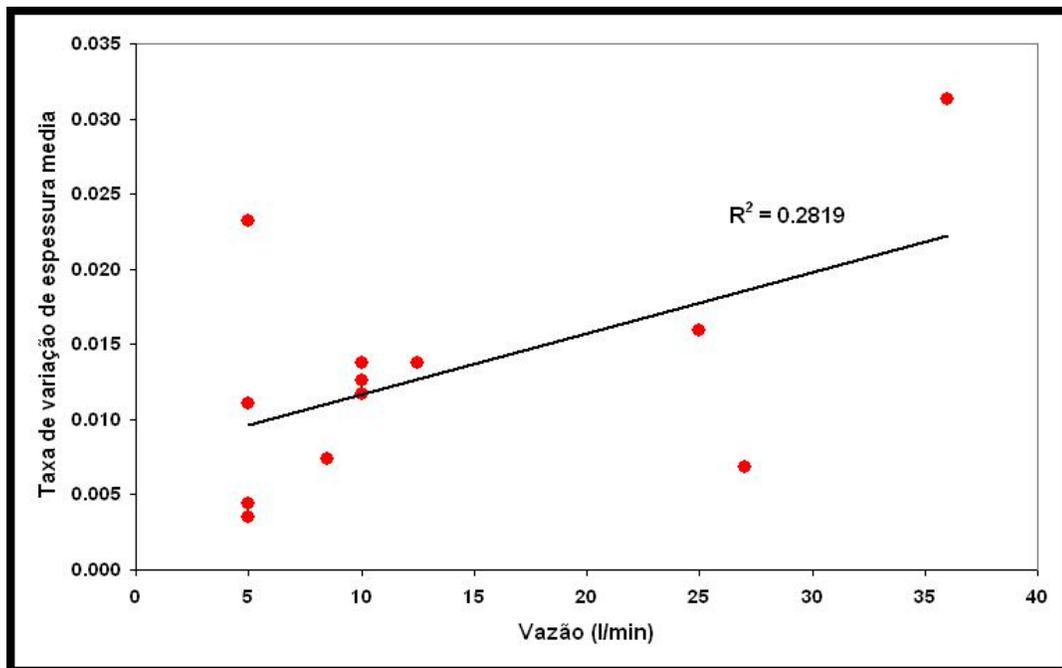
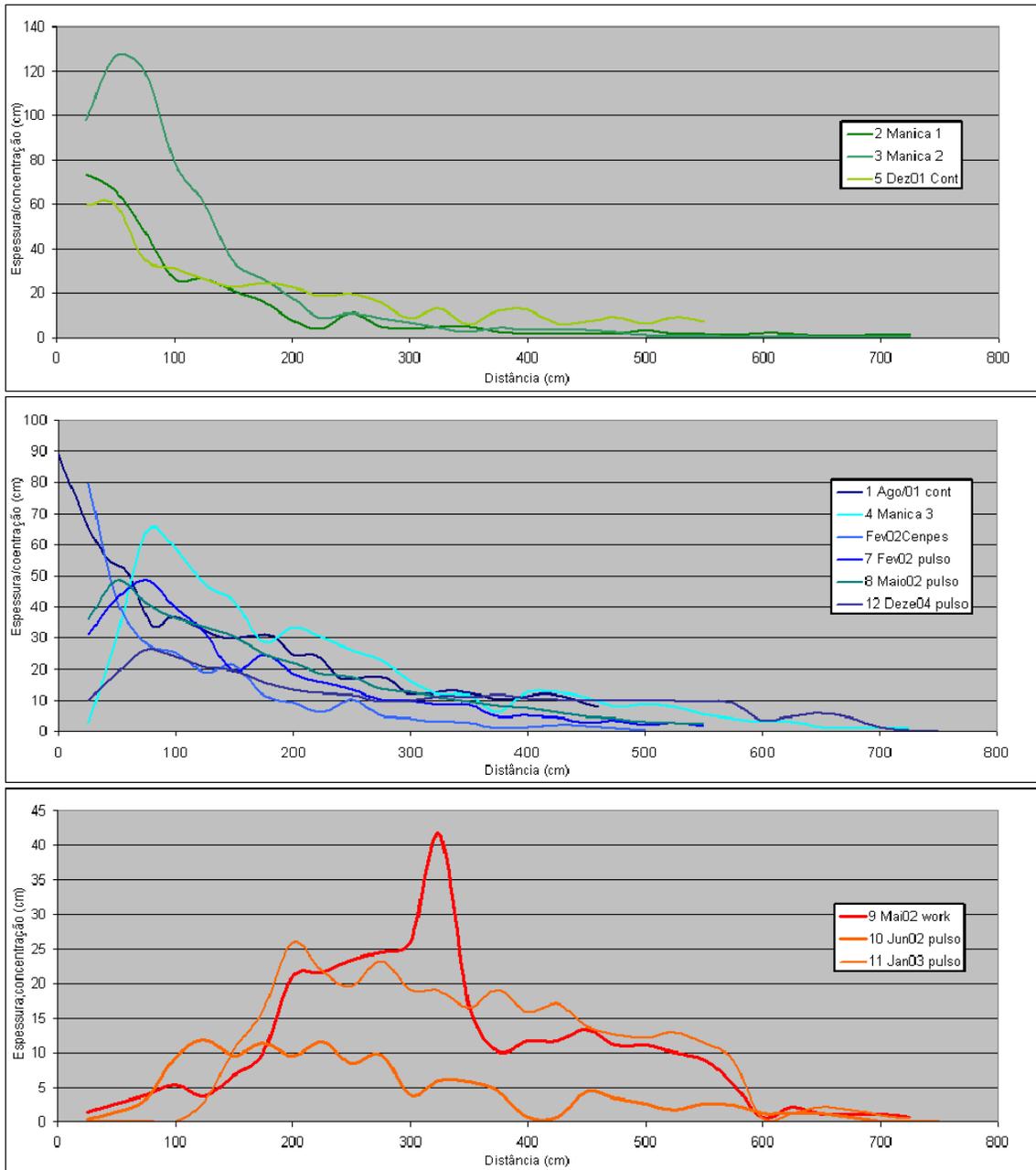


Figura 150 - Gráfico da taxa de variação de espessura do depósito média em função da vazão ( $R^2=0,28$ ).



**Figura 151– Gráficos dos valores da espessura dos depósitos normalizados pela concentração volumétrica em função da distancia do ponto de alimentação.**

Para analisar a influência da concentração volumétrica de carvão na mistura no padrão deposicional, foram elaborados os gráficos da Figura 151 onde foi plotada a espessura dos depósitos dividida pela concentração volumétrica da corrente. Esta nova variável possibilita que, havendo influência da densidade da corrente na espessura dos depósitos, haja uma redução da diferença entre as curvas observada na Figura 144. Este fato realmente pode ser comprovado,

mas há ainda uma variação entre os gráficos que não se explica totalmente pela concentração de carvão na corrente nos ensaios 3- Manica 2 e 10 – Junho/02. Mesmo assim, pode-se considerar que há uma dependência entre a espessura dos depósitos com a densidade da corrente.

Por meio da análise das espessuras dos depósitos, é possível ainda verificar que, no ponto em que há mudança de declive e no término do canal onde a corrente perde o seu confinamento, ocorre uma variação localizada na espessura dos depósitos. Esta foi bastante amplificada no ensaio 9 – maio02-work. Nele, é possível se constatar um forte espessamento do depósito a 330 cm (quebra do declive) que é seguido por um mais acentuado afinamento. Verificou-se também praticamente a ausência de sedimentação a 600 cm no término do canal. Apesar de ocorrerem estas mesmas variações nos outros ensaios, elas são menos pronunciadas por vários fatores. O principal deles é a redução da vazão de alimentação da corrente e, secundariamente, a sobreposição de eventos. O primeiro implica uma redução do efeito do ressalto hidráulico e o segundo pela suavização.

#### 7.4.2 Distribuição granulométrica dos depósitos

Os ensaios apresentaram uma tendência geral de redução da granulometria dos depósitos no sentido do fluxo conforme foi descrito no item 5. Foi também possível observar variações na seleção e da distribuição granulométrica dos depósitos.

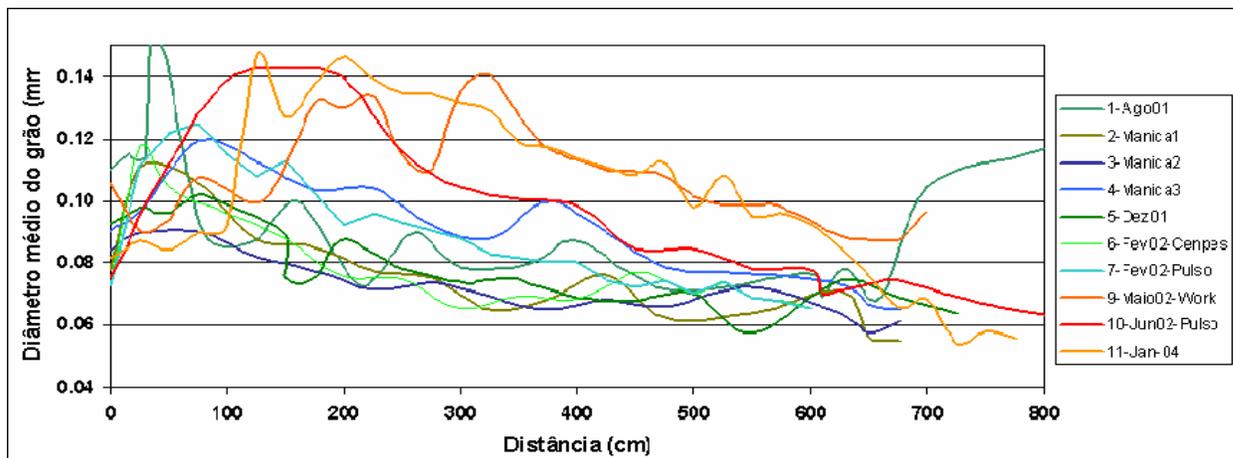


Figura 152 - Gráfico do diâmetro médio dos depósitos em função da distância do ponto de alimentação.

Para uma análise conjunta do resultado dos ensaios, elaborou-se o gráfico do diâmetro médio dos depósitos ao longo do canal e na área não-confinada que é apresentado na Figura 152. Nela, evidencia-se bem a tendência geral de redução granulométrica dos depósitos, desde de o ponto de alimentação até à área da bacia. É possível ainda se observar que ensaios com maiores vazões de alimentação da corrente (cores quentes) apresentam diâmetros médios maiores dos depósitos que os com baixas vazões (tons de verde). Em dois ensaios, 1-Ago01 e 9-Mai02-Work, verificou-se uma inversão na tendência de redução granulométrica a partir dos 650 cm na área em que o fluxo não é confinado (Figura 152).

Na Figura 153, apresenta-se a correlação entre a vazão de alimentação da corrente e o diâmetro característico dos grão dos depósitos (média de todas as amostras entre 100 e 600 cm) para os ensaios realizados. Nesta figura, é possível se constatar a boa correlação entre a vazão de alimentação e a granulometria dos sedimentos depositados ao longo do canal, independente das características iniciais dos sedimentos colocados em suspensão na corrente. Isto indica que a característica granulométrica dos depósitos é fortemente controlada pela velocidade do fluxo da corrente nas condições em que foram realizados os ensaios.

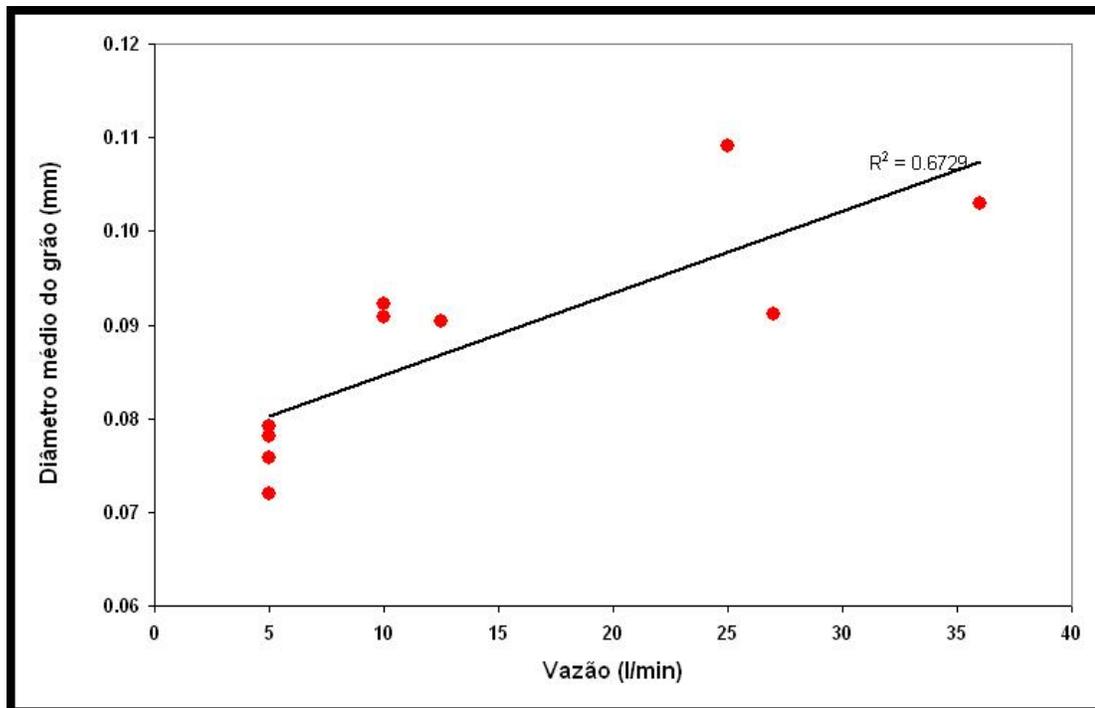


Figura 153- Gráfico correlacionando o diâmetro médio em função da vazão de alimentação da corrente ( $R^2=0.67$ ).

Analisou-se também a possibilidade de correlação entre diâmetro característico dos grãos nos depósitos e a concentração volumétrica de carvão na corrente, procurando alguma indicação deste parâmetro que pudesse influenciar as condições de sedimentação, porém não foi encontrada.

Para detalhar as características granulométricas dos depósitos, construíram-se gráficos (Figura 154) onde a fração em peso de cada faixa granulométrica analisada nos depósitos é normalizada pela concentração inicial da mistura e plotada em função da distância do ponto de alimentação.

A utilização do valor normalizado no gráfico possibilita que se investigue o balanço dos sedimentos em suspensão na corrente em cada faixa granulométrica. Valores de fração normalizada igual a 1 indicam que a corrente está mantendo a concentração inicial do material colocado em suspensão da faixa granulométrica analisada. Se, por outro lado, ela for maior que 1 na corrente, sua concentração será menor (está havendo deposição) nesta faixa granulométrica. Finalmente, se o valor for maior que 1, a concentração da faixa granulométrica está aumentando proporcionalmente na corrente pela deposição das faixas granulométricas mais grossas.

Nos gráficos da Figura 154, é possível se constatar que, para grãos maiores que 0,125 mm ocorre uma forte depleção nas áreas proximais. Isto ocorre principalmente para as correntes alimentadas por baixas vazões. Se as vazões são mais elevadas, esta ação é mais atenuada (cores vermelhas). Para grãos entre 0,088 e 0,125 mm, este fenômeno é menos acentuado, porém se mantém. Nas frações menores, ou seja, aquelas que não foram retidas na peneira de 0,088 mm, há pouca deposição nas áreas proximais com um aumento significativo dos depósitos na área não-confinada. É digno de nota a presença de variações nos valores de fração volumétrica normalizada em torno de uma tendência média obedecendo a uma certa periodicidade, o que pode indicar que o fenômeno de pulso identificado do no fluxo pode influenciar nos depósitos.

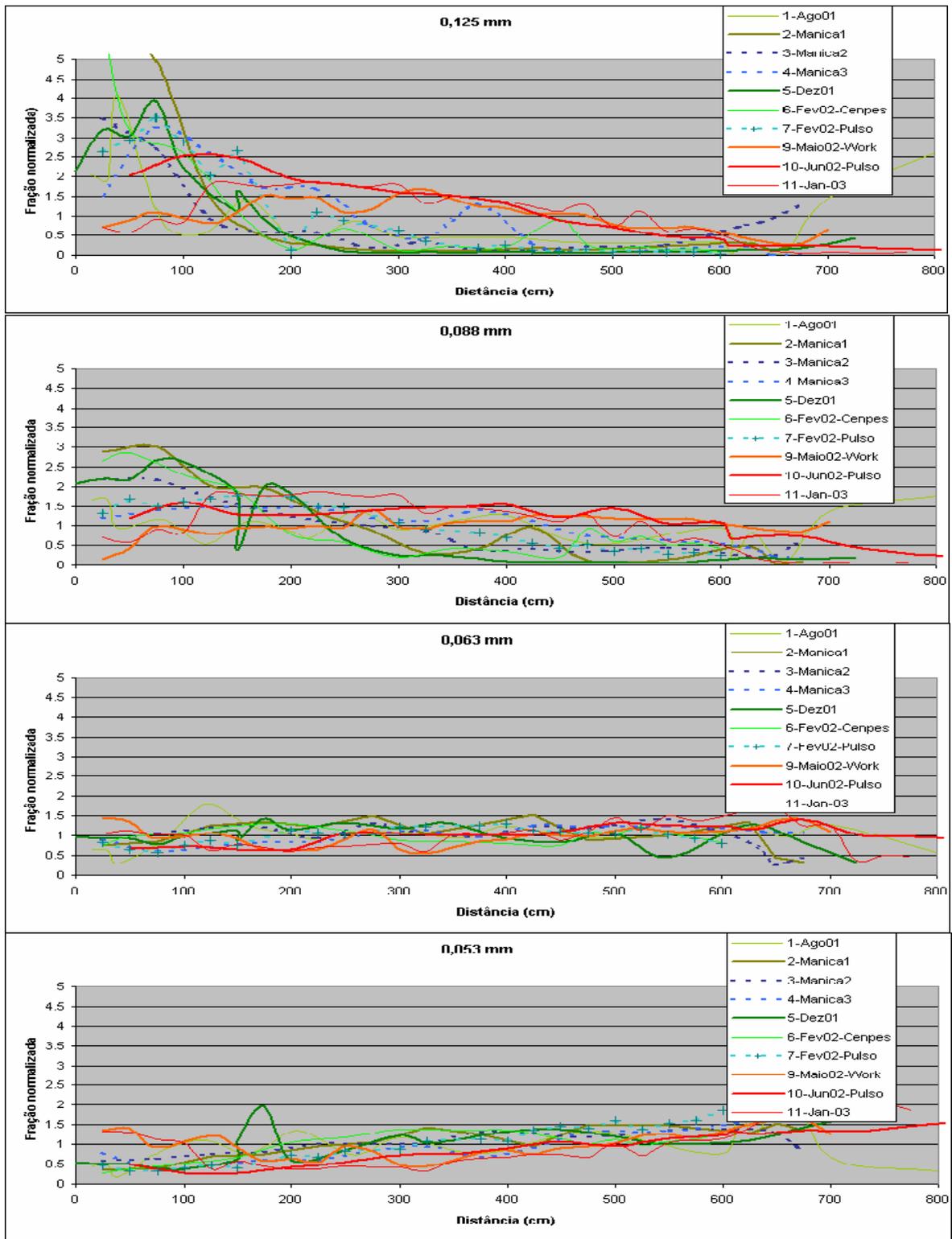


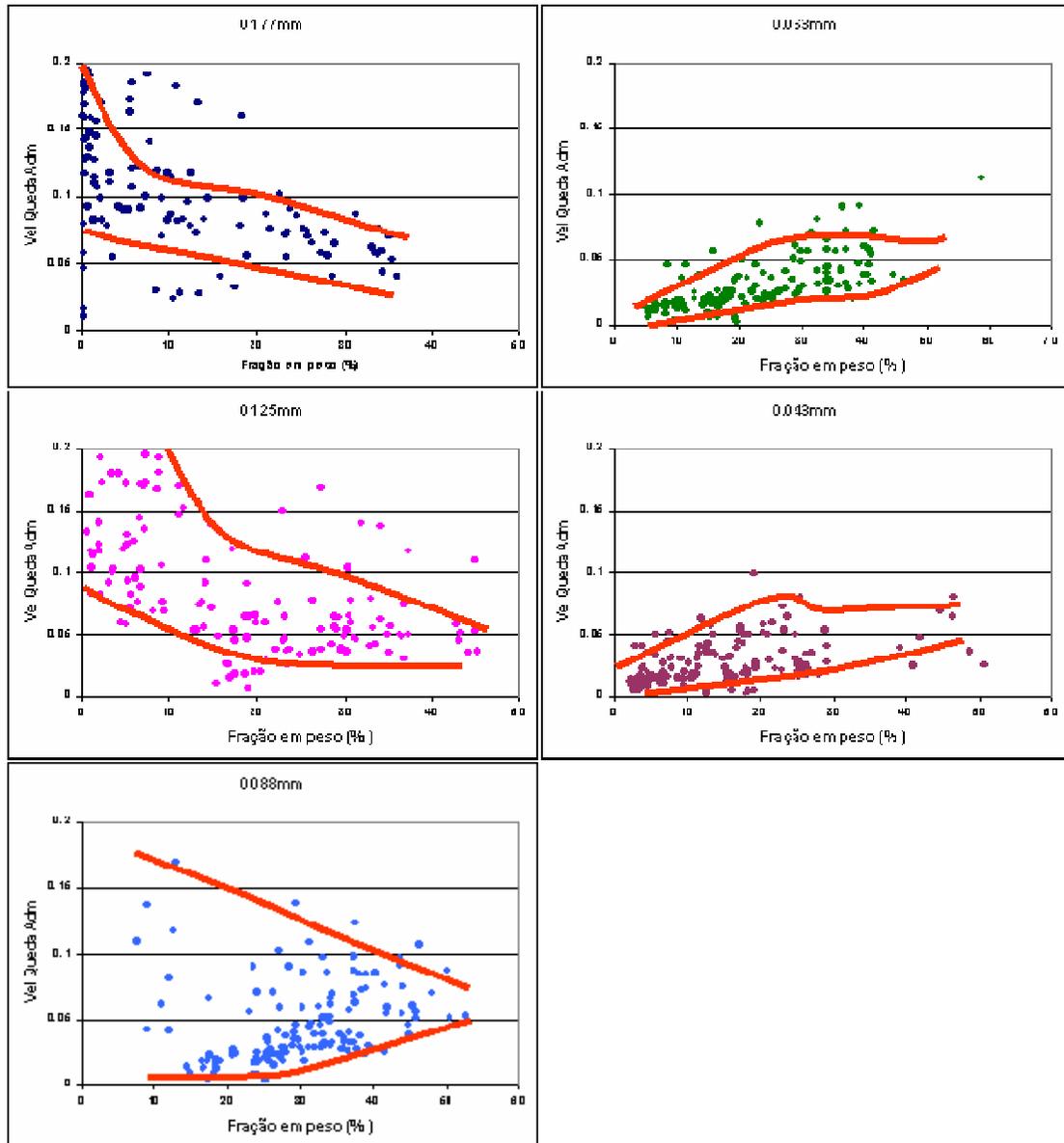
Figura 154– Gráficos da fração depositada de uma granulométrica normalizada pela concentração desta faixa do sedimento em suspensão em função da distância do ponto de alimentação. Os números no alto dos gráficos correspondem ao diâmetro mínimo de grãos retido na peneira em mm.

Para analisar a distribuição granulométrica dos depósitos construíram-se também os gráficos da Figura 128 que correlacionam a percentagem volumétrica de cada faixa granulométrica analisada em função do principal fator que a determina: a sedimentação que é a velocidade de queda de grãos adimensionalizada pela velocidade de fluxo. Nestes gráficos, observa-se uma forte dispersão de dados para baixas porcentagens em peso das faixas granulométricas presentes nos depósitos. Por outro lado, valores mais elevados convergem para um único valor de velocidade de queda adimensional que independe da faixa granulométrica investigada.

No geral, estes valores variam entre 0,03 e 0,08 sendo que há um predomínio em 0,05. Eles correspondem aos observados em sistemas turbidíticos naturais (Tabela 5). Esta constatação possui uma grande importância para fazermos a extrapolação das informações observadas nos modelos para sistemas naturais. Desta forma, uma vez que, sejam estabelecidas as características granulométricas dos depósitos naturais que queremos estudar, pode-se estimar a velocidade de fluxo das correntes que os geraram.

Confeccionaram-se gráficos similares ao da Figura 128, porém os valores não foram agrupados por ensaio, mas por faixa granulométrica (Figura 155). Estes gráficos buscam uma abordagem de maior detalhe quanto à forma como se comportam dinamicamente as diversas faixas granulométricas analisadas nos depósitos. Nos gráficos, podemos verificar que, nas maiores (0,177 e 0,125 mm), há uma tendência de aumento da fração depositada com a diminuição da velocidade de queda adimensional. Já nas frações mais finas (0,063 e 0,053 mm), há uma situação inversa. Este comportamento pode ser explicado pelos mecanismos de transporte e sedimentação que ocorrem nas correntes de densidade não-conservativas.

Como foi discutido no item 6.1.2, a corrente é formada por um fluxo bipartido, no qual podem ser identificadas duas porções: uma superior, mais diluída com sedimentos mais finos e uma inferior, mais densa com sedimentos mais grossos. As frações mais grossas, que estão numa corrente em que a velocidade de queda adimensional é superior a 0,05, tendem a se concentrar na base e se depositar. As frações mais finas, por sua vez, ficam em suspensão na camada superior da corrente até que haja condições de se depositarem. Como a maior parte das frações finas é carregada pela corrente, o seu pico de deposição tende a ocorrer onde a velocidade de fluxo é mais baixa nas porções distais do modelo.



**Figura 155– Gráficos correlacionando a velocidade de queda adimensional com a fração volumétrica em peso para as diversas faixas granulométricas investigadas nos depósitos. No alto dos gráficos estão identificadas faixas granulométricas em mm que cada um representa. As linhas vermelhas**

### 7.4.3 Formas de leito desenvolvidas no canal.

Na Figura 156, apresentam-se os registros das formas de leito identificadas no canal. Estes registros mostram uma certa constância na seqüência das formas de leito desenvolvidas. A variação na posição das formas de leito ao longo dos depósitos deve-se principalmente à capacidade de transporte e a velocidade da corrente que são dependentes da vazão de alimentação.

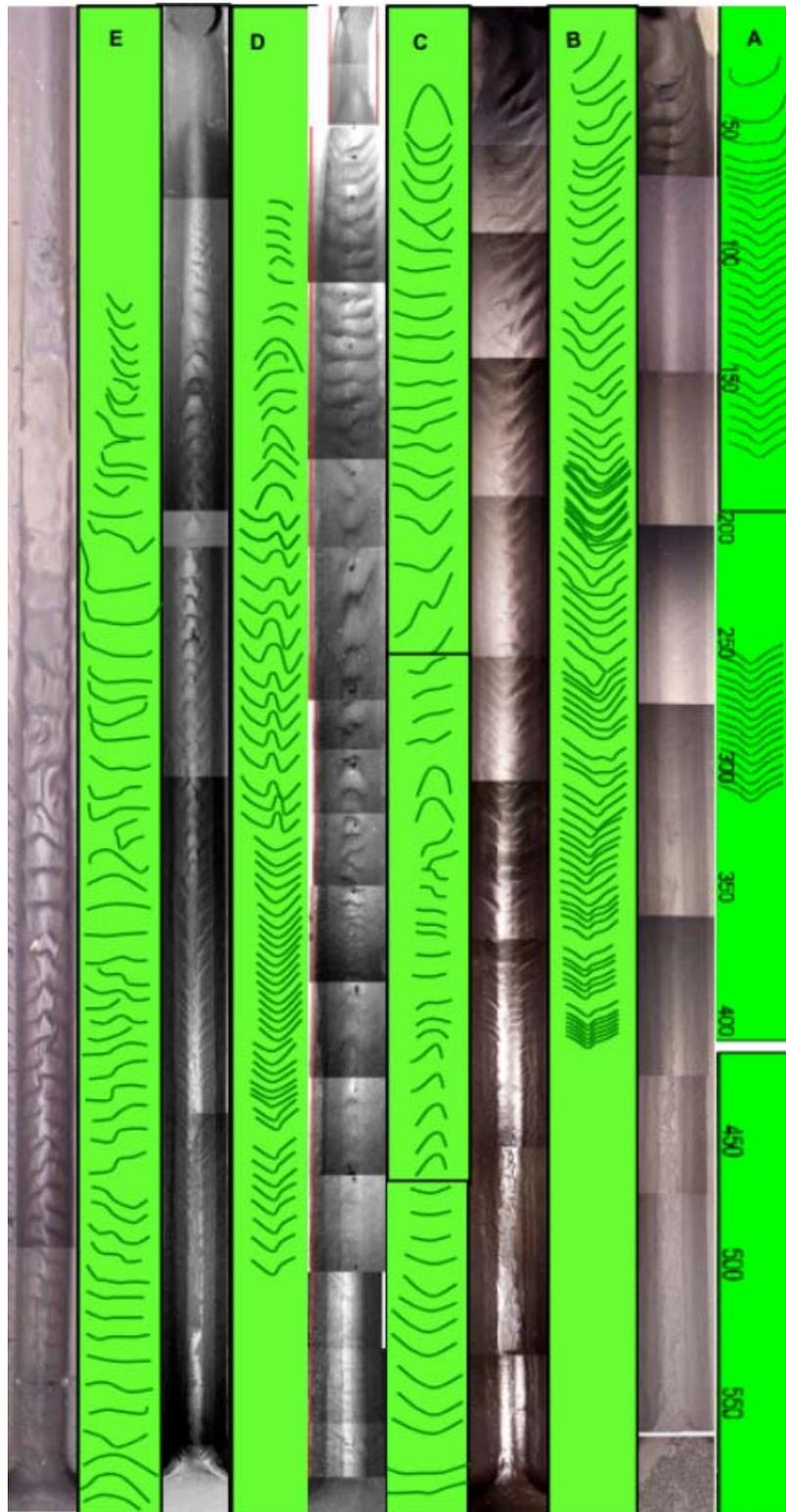


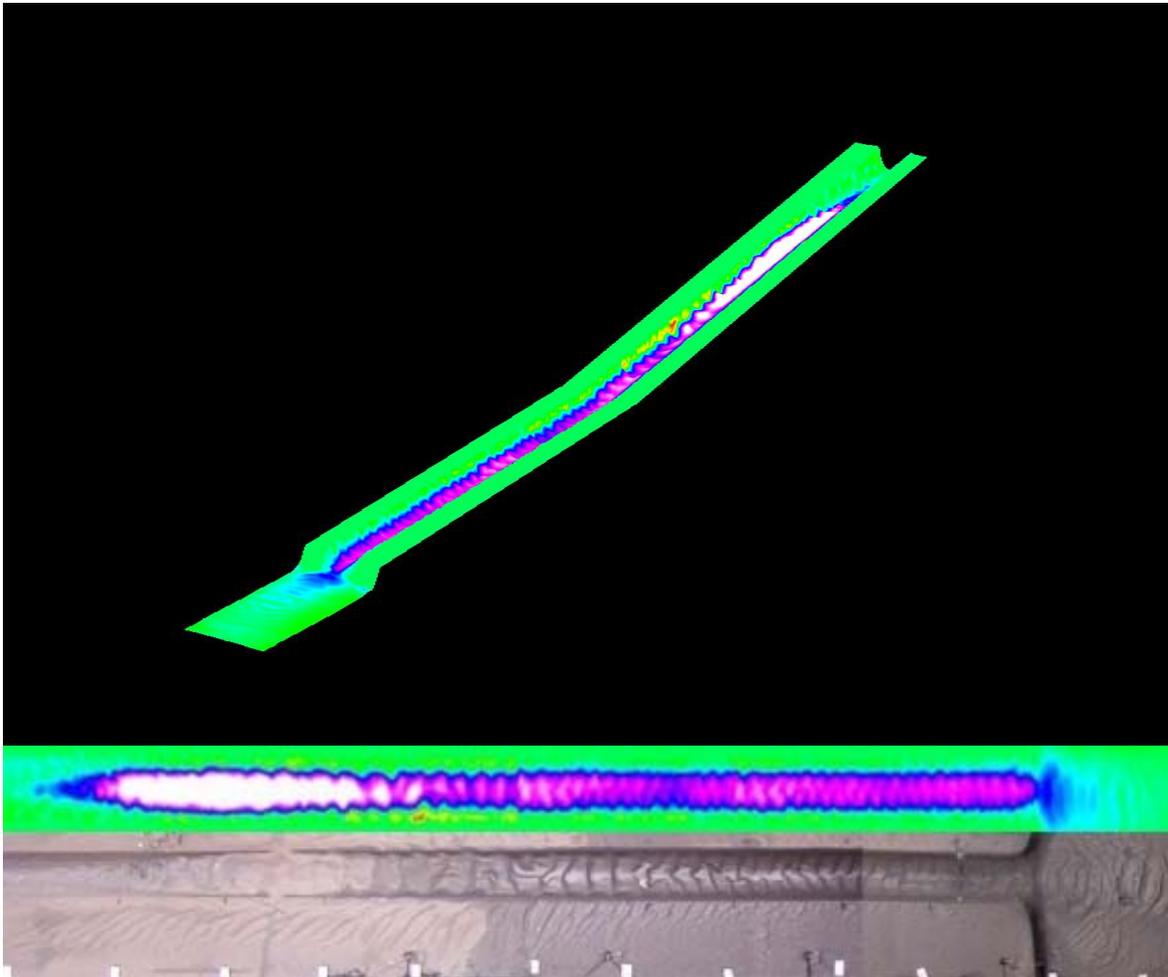
Figura 156– Padrões de formas de leito apresentados pelos depósitos. A) 05-dez01 – vazão=5 l/min, B) 07-fev02-pulso – vazão=10 l/min, C) 04-Manica03 – vazão=12,5 l/min, D) 10-jun02-pulso – vazão=27 l/min, E) 11-jan03-pulso – vazão=36 l/min.

Em altas vazões (D, E) não há praticamente deposição na área proximal. Neste caso, o depósito inicia apresentando ripples lineares que, progressivamente, vão se deformando até se tornarem ripples com crista sinuosa no pico de deposição, que ocorre em torno de 200 cm (Figura 144). Após este ponto, elas voltam a apresentar crista reta e, na direção do fluxo, passam a assumir a forma de lingüóide diminuindo tanto a distância entre as cristas como a amplitude. Nos ensaios com menor vazão (A, B e C), como o pico de deposição se localiza próximo à área de alimentação (Figura 144), esta seqüência se mostra truncada só se verificando as estruturas que ocorrem após o pico de deposição nos ensaios com maior vazão. Na Figura 157, apresenta-se uma seqüência tipo de formas de leito observadas nos ensaios que mostram uma diminuição progressiva de amplitude e comprimento das ripples.



**Figura 157– Seqüência ideal de formas de leito constatadas nos ensaios da esquerda para direita, inicialmente na linha superior passando a linha inferior. São elas ripples lineares que progressivamente vão se deformando até se tornarem com crista sinuosa, no sentido do fluxo passam a assumir a forma lingüóide diminuindo tanto a distância entre as cristas como a amplitude.**

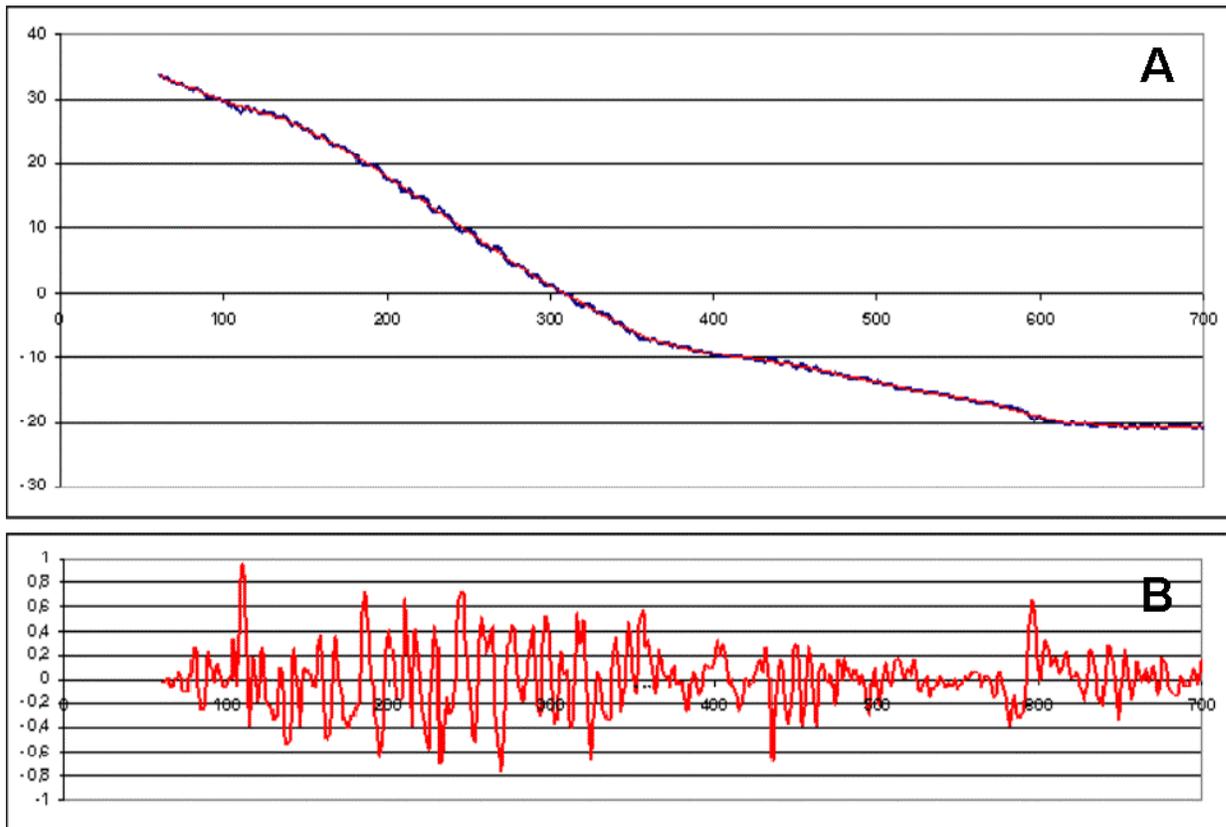
No ensaio representado na Figura 156E (Janeiro de 03-pulso), realizou-se um levantamento com distanciômetro a laser, o que possibilitou a reconstrução da superfície dos depósitos como pode ser vista na Figura 158, na qual se verifica que há uma grande semelhança entre a imagem fotográfica e a virtual. Com base neste levantamento, realizou-se um estudo mais detalhado das formas de leito, fazendo-se estimativas tanto do comprimento das formas de leito como de sua amplitude.



**Figura 158– Imagem 3D da reconstituição da superfície dos depósitos do ensaio Janeiro03-pulso com o programa GOCAD. Espessura do depósito**

Na Figura 159, mostram-se os gráficos de uma seção vertical longitudinal dos depósitos no centro do canal (A) e da amplitude das formas de leito (B). O gráfico da Figura 159B foi obtido pela diferença entre as linhas vermelha e a linha azul do gráfico da Figura 159A, ou seja, representa as amplitudes das formas de leito ao longo do depósito. Nele, é possível se verificar que as formas de leito inicialmente aumentam sua amplitude até o pico de deposição situado a

200 cm (Figura 144), e depois passam por um período de redução da amplitude até a quebra de declive da calha (330 cm). Neste ponto, as formas de leito apresentam uma perturbação voltando a aumentar a amplitude até 430 cm. A partir deste ponto, volta a diminuir até a saída do canal onde há o desconfinamento da corrente. A partir de então, observa-se um aumento repentino da amplitude das formas de leito, cujas dimensões são reduzidas no sentido da corrente. Esta constatação denota uma forte influência da quebra de declividade do canal nas formas de leito.



**Figura 159– Gráficos representando as forma de leito em seção longitudinal ao canal. A- gráfico da cota do depósito em cm (linha azul- escala vertical) em função da distancia da fonte de alimentação em cm(escala horizontal). B- gráfico da amplitude das formas de fundo extraídas a partir da uma curva média em cm (linha vermelha - escala vertical) em função da distância a partir do ponto de alimentação em cm (escala horizontal).**

Na Figura 160, pode-se inferir uma certa correlação entre a amplitude e o comprimento das formas de leito: a um aumento de amplitude corresponde um aumento no comprimento da forma. A fim de testar esta observação foi construído o gráfico da Figura 161 no qual estas informações são cruzadas. Neste gráfico, é possível verificar que esta correlação, embora exista, não é bem definida. As relações entre amplitude e comprimento da forma variam em

uma ampla faixa entre 1:10 e 1:120, mas, há uma predominância ente 1:10 e 1:60 e há uma tendência de esta relação diminuir com o aumento da amplitude. De uma forma geral, estes valores estão compatíveis com os descritos na literatura (Leader, 1999).

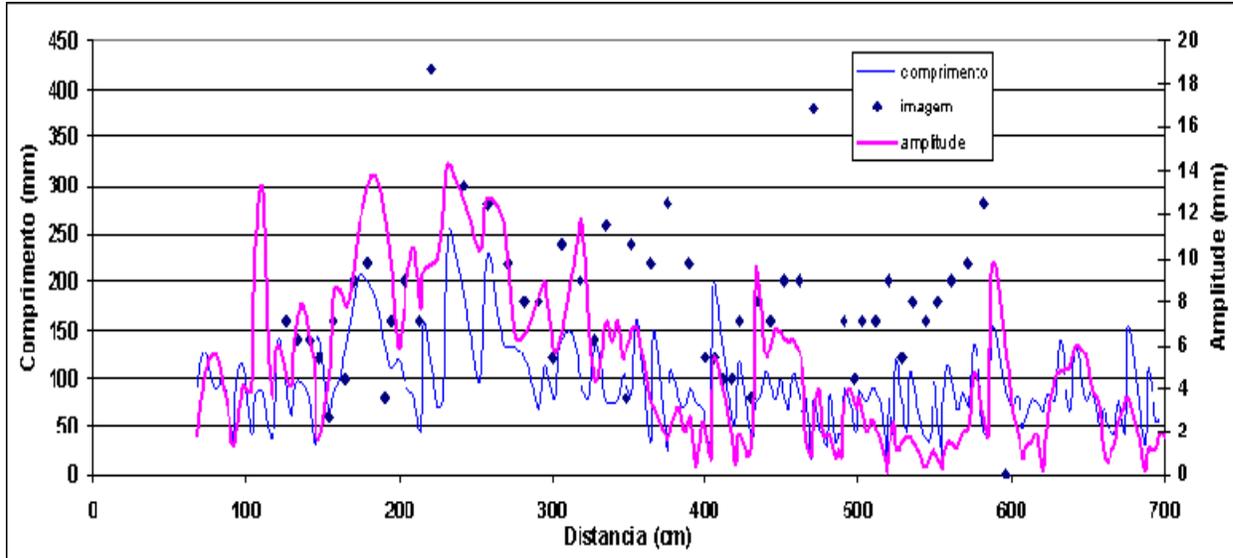


Figura 160 – Gráfico da amplitude e comprimento das formas de leito. Os pontos representam o comprimento das formas de leito interpretadas da imagem fotográfica.

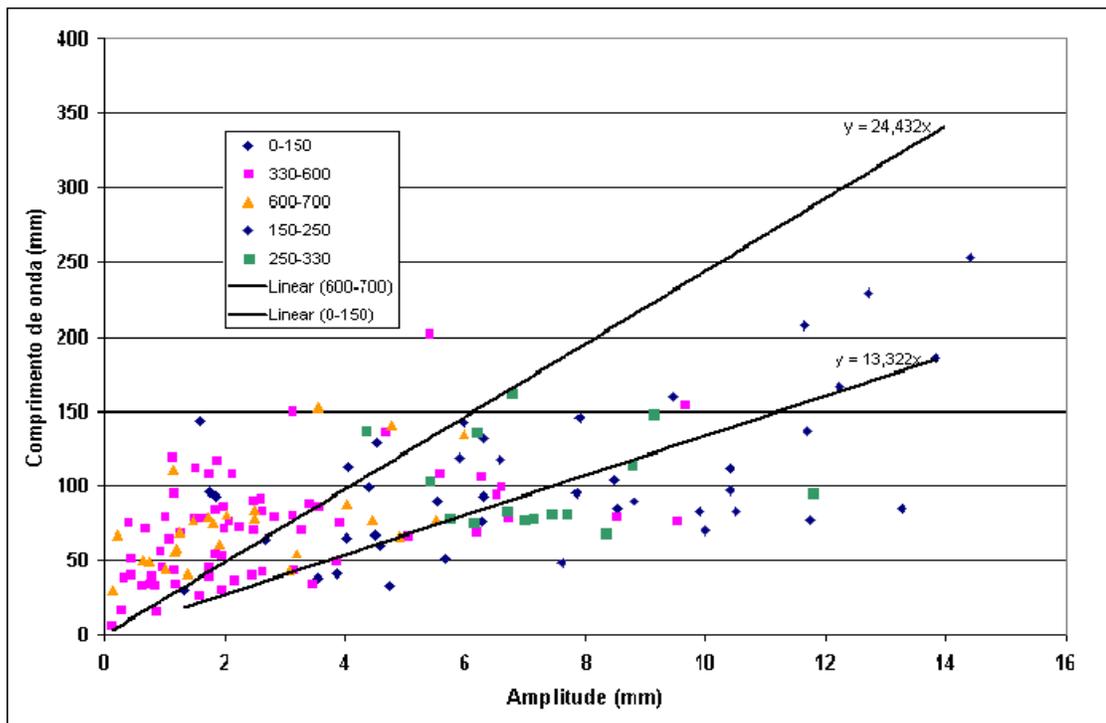


Figura 161– Correlação entre amplitude e distância entre cristas das formas de leito.

Na Figura 162, pode-se constatar que razão entre comprimento e amplitude aumenta após a quebra de declive no canal (330 cm). A fim de favorecer uma melhor visualização das relações descritas são apresentadas imagens do modelo digital dos depósitos na Figura 163.

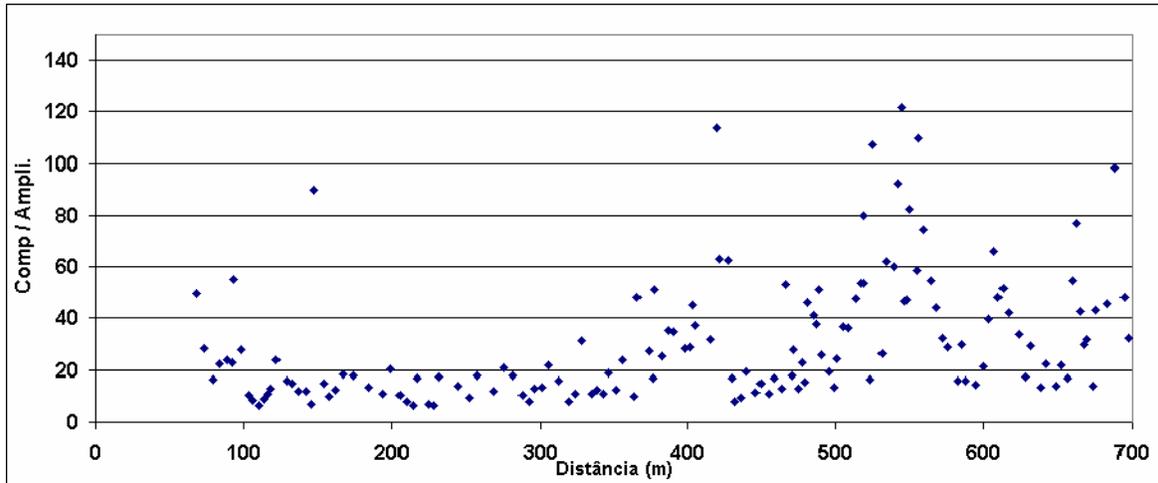


Figura 162 – Variação da razão entre comprimento e amplitude entre cristas das formas de leito ao longo dos depósitos.

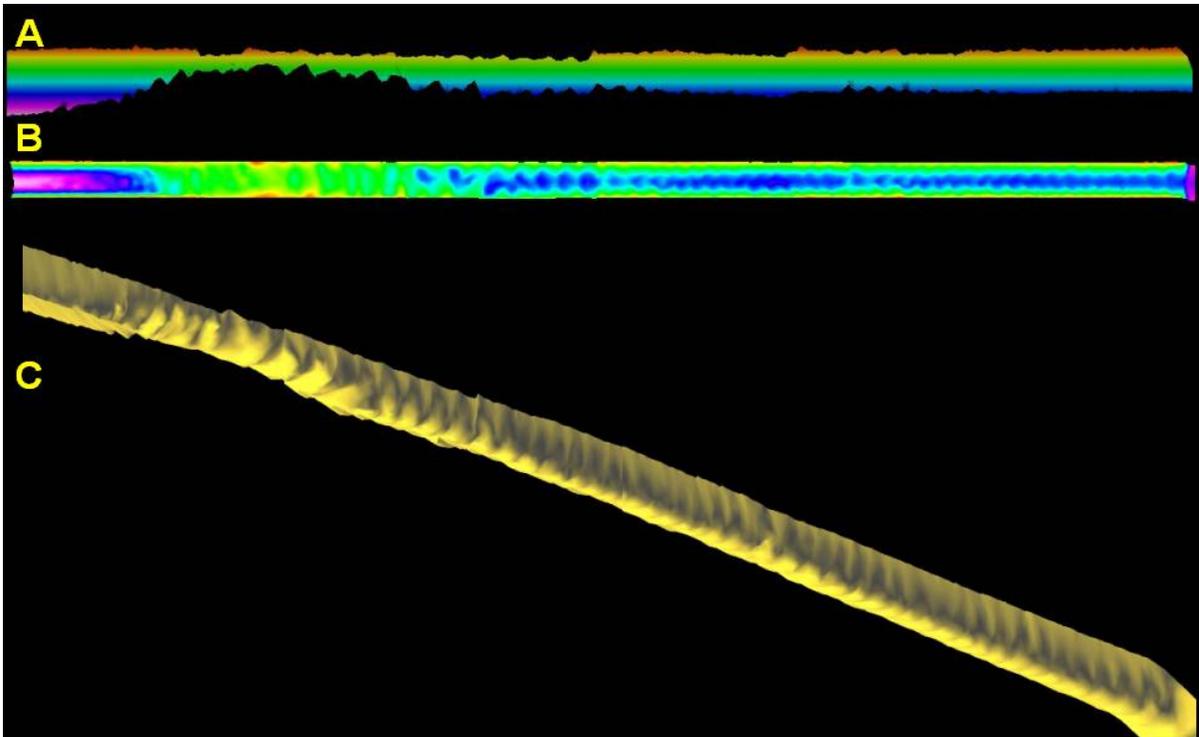


Figura 163 - Imagens digitais das formas de leito desenvolvidas no ensaio 11-Jan03-pulso. (A) Visão lateral, (B) Visão de topo e (C) Perspectiva.

Para estudar as relações de assimetria entre as faces das formas de leito confeccionou-se o gráfico da Figura 164, que procura correlacionar a razão entre o comprimento da face voltada ao fluxo (leeside) e a posterior (stoss-side) a ele e as suas amplitudes. Neste gráfico, não é possível se verificar uma grande variação de valores com um predomínio entre 0,5 e 2. Os baixos valores de assimetria apresentados pelas ripples indicam que o processo de deposição possa ter alguma influência de movimentos orbitais gerados pela propagação de ondas.

Os fenômenos orbitais, apesar de serem mais conhecidos em ambientes dominados por ondas de gravidade – superfície, também são freqüentemente relatados em ambientes profundos, e podem ser gerados por diferentes mecanismos como ondas internas a corrente como as constatadas em nossos experimentos. Mutti (1992) sugere, sem comprovações teóricas, que o movimento orbital seria conseqüência da expansão do fluxo que ocorreria nas mudanças de declive pelo ressalto hidráulico pela geração de uma corrente combinada. As alterações na relação comprimento de onda por amplitude que ocorrem após a quebra de declive do modelo (330 cm – Figura 162) sugerem esta possibilidade.

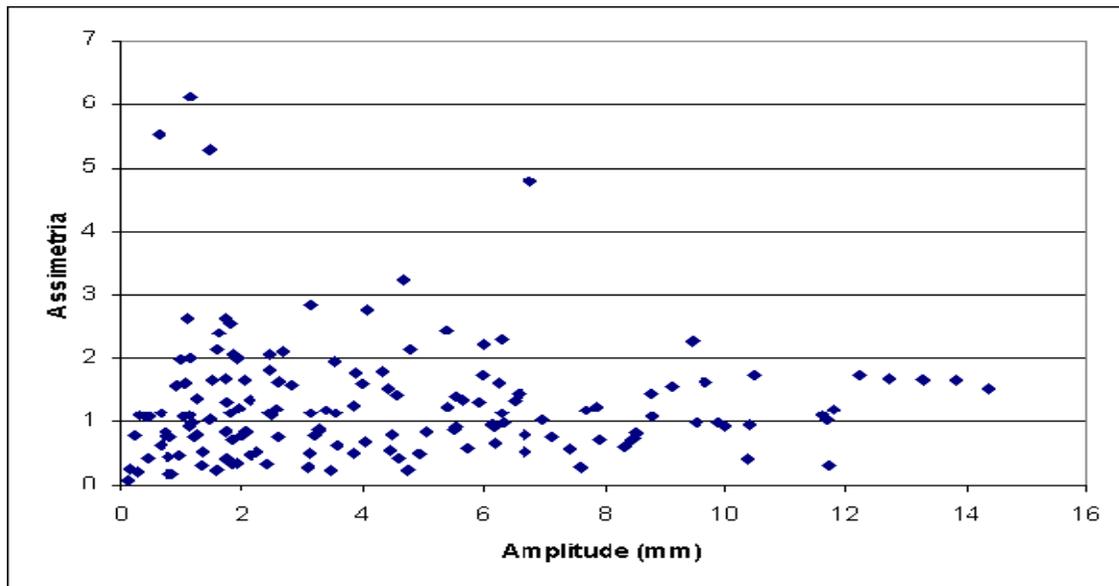


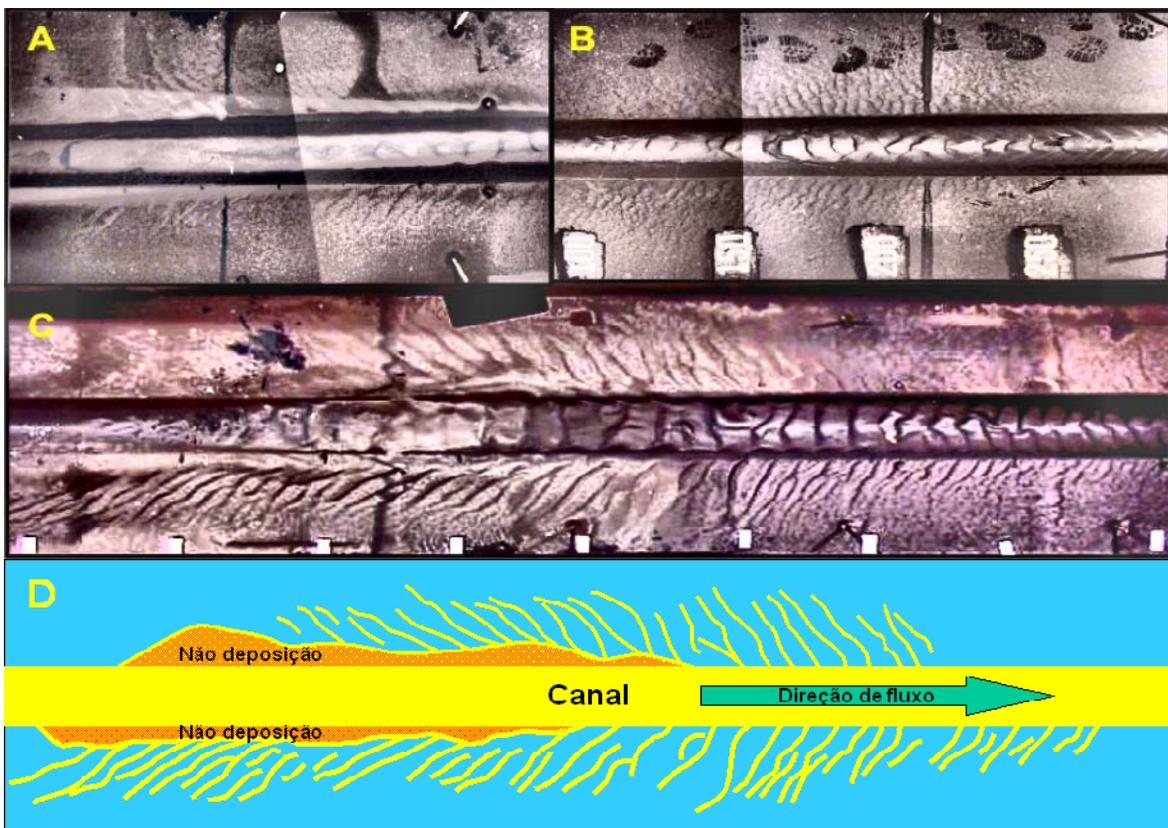
Figura 164 – Correlação entre assimetria de formas de leito e suas amplitudes.

#### 7.4.4 Formas de leito desenvolvidas na área de extravasamento do canal.

Em três ensaios foram gerados depósitos significativos nas zonas laterais ao canal. Nestes depósitos observou-se o desenvolvimento de formas de leito associadas ao extravasamento do canal (Figura 165). Em todos os casos, foi possível a identificação de estruturas semelhantes a

ripples com cristas lineares de orientação oblíqua n,a direção do eixo do canal. Isto sugere uma forte relação entre estes depósitos e o fluxo que se desenvolve dentro do canal.

Analisando o ensaio de Janeiro de 2003 (Figura 165C e D) onde as formas de leito se apresentaram mais proeminentes, pode-se verificar que na região próxima à zona de alimentação do fluxo, situada à direita da imagem, forma-se uma zona de não-deposição nos flancos externos do canal que é maior nas porções proximais e menor nas mais distais. Isto indica que as condições de fluxo nesta região são suficientes para manter as partículas em suspensão.



**Figura 165–** Imagens dos depósitos de extravasamento de canal do ensaios (A) Maio 2002 - Workshop, (B) Junho 2002, (C) Janeiro 2003 e (D) Interpretação da imagem C. Na Figura 165B as cristas das ripples são mais sinuosas que nos dois outros ensaios indicando condições de fluxo diferentes.

Mais afastadas da lateral do canal, junto à zona de não-deposição, formam-se ripples com cristas que apresentam um ângulo de 30 a 45° com a direção de fluxo. Este ângulo aumenta no sentido do fluxo, indicando uma certa correlação entre a largura da zona de não-deposição e a inclinação das cristas das ripples. Esta relação parece estar associada tipo de divergência que

a corrente sofre quando perde o confinamento. A divergência parece ser mais acentuada quanto maior for a energia associada à corrente.

Seguindo mais adiante no sentido do fluxo, as formas de leito na área de extravasamento vão apresentando um aumento no ângulo da crista em relação a direção de fluxo. Passam então a apresentar praticamente a mesma orientação das ripples internas ao canal. Isto indica uma forte associação das mesmas com a direção de fluxo dentro do canal. Porém, esta associação pode estar ligada à inércia da corrente que extravasa ou a inclinação da superfície onde há o extravasamento que é a mesma do canal. Embora não se disponha de dados suficientes que nos possibilitem optar por uma destas hipóteses, acreditamos que ambos fenômenos estão presentes.

A análise visual dos depósitos nos possibilita verificar que o comprimento de onda das ripples é menor na zona de extravasamento do que no canal. Isto está relacionado às condições de fluxo nas duas regiões, pois espera-se que na, zona fora do canal, a altura do fluxo seja menor que a interna a ele. Isto implica alterações importantes na tensão de cisalhamento que a corrente aplica junto ao fundo. Associado a este fator, as análises granulométricas realizadas nestes depósitos indicaram que eles são de granulação mais fina que os encontrados dentro do canal fato que influencia fortemente a geometria das formas de leito.

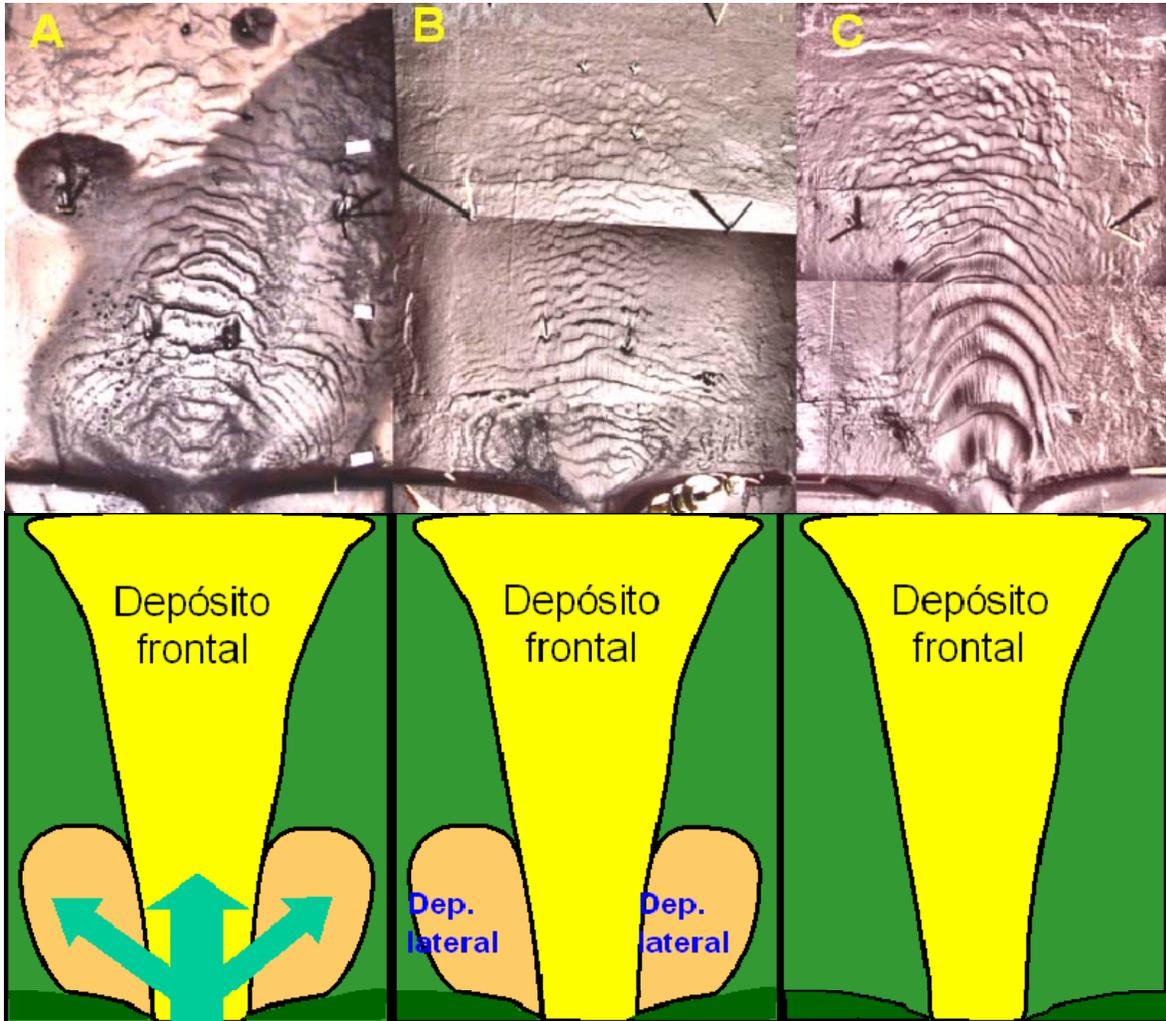
#### **7.4.5 Formas de leito desenvolvidas na área de não confinada.**

Os depósitos na área não-confinada com desenvolvimento de com grande quantidade de formas de leito ocorreram em três ensaios: Janeiro de 03, Junho de 202 e Dezembro de 04. Em todos os casos, predominaram a formação de ripples alongadas e transversais ao fluxo.

Uma das principais características destes depósitos é sua concentração em uma faixa alongada no sentido do fluxo do canal que confinava o fluxo observadas Na Figura 166, apresentam-se imagens onde se observa esta característica. Este fato sugere que a corrente apresenta pouca expansão lateral quando sai do canal mantendo-se concentrada em uma faixa que preserva a quantidade de movimento que o fluxo continha quando confinado. Isto pode explicar a formação de canais construtivos que são encontrados em leques turbidílicos.

No ensaio Dezembro de 2004 (Figura 166C) este tipo de depósito foi mais proeminente. Nele, as cristas dos ripples nas porções próximas à saída do canal apresentam uma forte curvatura.

Estas ripples apresentam no centro do depósito uma maior amplitude e comprimento de onda que na lateral formando uma geometria que lembra a forma de canais.



**Figura 166 -** Imagens dos depósitos da área não confinada do ensaios (A) Janeiro 2003, (B) Junho 2002 e (C) dezembro de 2004 que apresentaram intenso desenvolvimento de formas de leito.

Nos ensaios Janeiro de 2003 (Figura 166A) e Junho de 2002 (Figura 166B) há a formação de dois depósitos laterais ao sistema principal. Eles parecem ter origem em uma divisão do fluxo em três direções preferenciais com ângulo de  $60^\circ$  entre si gerada logo após o desconfinamento. O depósito frontal é mais proeminente que os laterais. Há a formação de dois padrões de ripples: um mais proximal, com cristas mais contínuas e um mais distal, com cristas segmentadas indicando mudança nas características de fluxo.

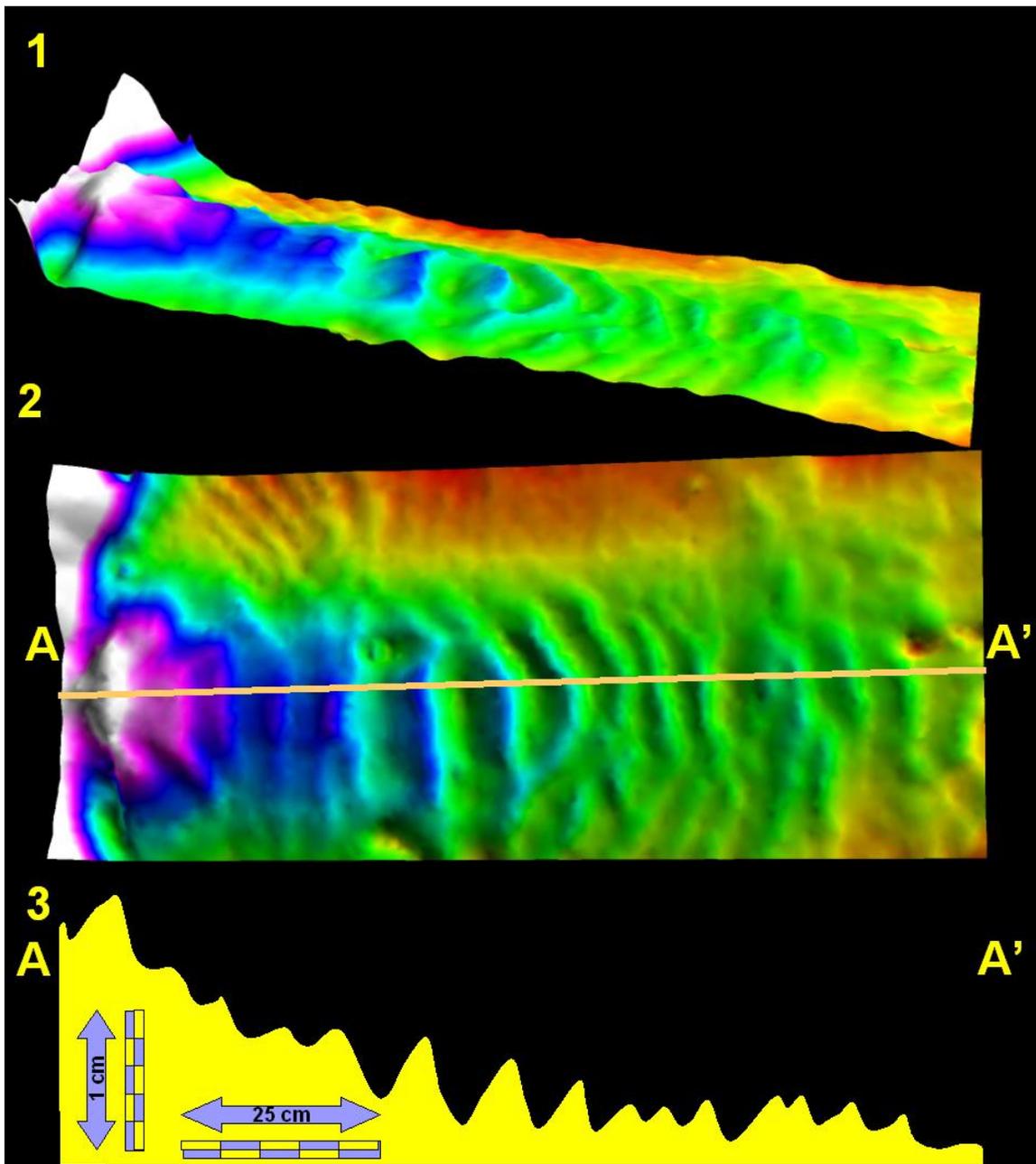


Figura 167 - Imagem tridimensional do depósito da área não confinada do ensaio Janeiro 03-pulso. 1) Visão lateral , 2) Visão de topo e 3) Seção longitudinal ao depósito com exagero vertical de 25 vezes.

Na Figura 167, mostra-se uma visão tridimensional dos depósitos gerada a partir dos dados levantados na área não-confinada do ensaio Janeiro de 2003, em que é possível fazer um detalhamento das formas de leito no depósito frontal à corrente. Na área próxima ao término do canal, estes depósitos são mais espessos do que nas áreas mais distais, indicando que há uma

perda significativa de sedimentos da corrente. Além desta observação, verificou-se que as ripples apresentam uma variação significativa na razão comprimento de onda/amplitude nos depósitos da área não-confinada. Constataram-se valores em torno de 50 nas áreas proximais e 20 em áreas afastadas cerca de 50 cm da saída do canal (Figura 162).

#### 7.4.6 Formas de leito sobrepostas as feições maiores.

Além das formas de leito já descritas, observaram-se sulcos longitudinais (furrows) ao fluxo que se sobrepõe às ripples descritas nos itens anteriores. Estes sulcos podem ser identificados tanto na ripples desenvolvidas dentro do canal, como nas de extravasamento e nas que ocorrem bacia. Estas feições, já descritas na literatura, indicam que elas são geradas pela ação de fluxos internos que se desenvolvem junto à camada-limite basal da corrente denominados estrias de alta e baixa velocidade. Na Figura 168, apresentam-se várias situações onde foram observados os sulcos longitudinais sobrepondo a ripples.

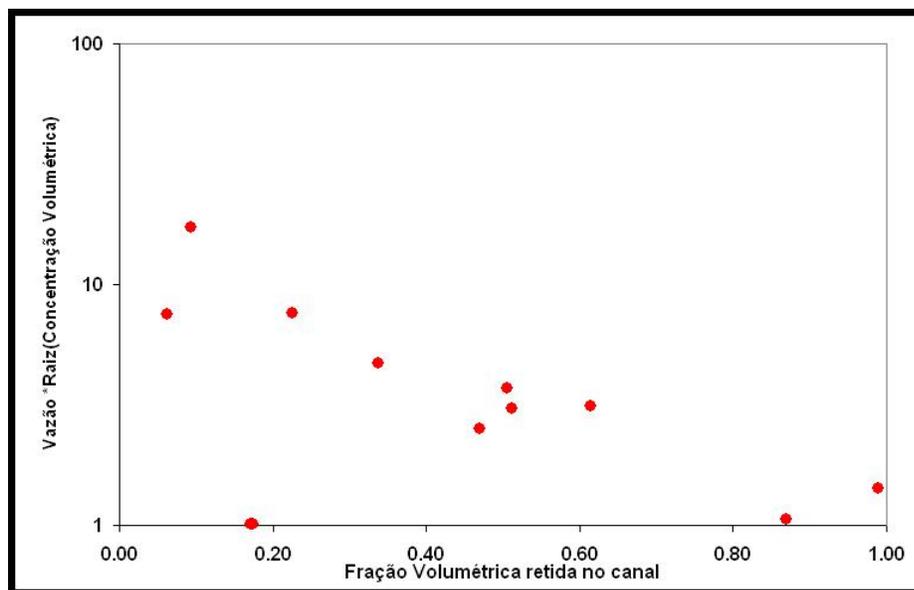


Figura 168 - Imagens de depósitos onde é possível identificar sobrepostos as ripples sulcos longitudinais (furrows).

## 7.5 CAPACIDADE DE DISPERSÃO DE SEDIMENTOS PELA CORRENTE

Visando analisar a capacidade das correntes de dispersar os sedimentos foram feitas estimativas dos volumes de sedimento colocados em suspensão e do sedimentado ao longo do canal. O primeiro fator foi calculado com base na concentração volumétrica inicial da mistura e, o segundo, pelo volume da calha preenchida por sedimento calculado com base na espessura do depósito medida e estimando-se uma porosidade em 0,35. O resultado destas estimativas é apresentado na Tabela 6.

Com base nestes valores, é difícil se perceber uma possível correlação entre a fração depositada no canal com a vazão de alimentação ou a densidade da corrente individualmente. Só foi possível se estabelecer uma correlação quando calculamos o produto da vazão pela raiz quadrada da concentração volumétrica de carvão na corrente, conforme pode ser visto na Figura 169.

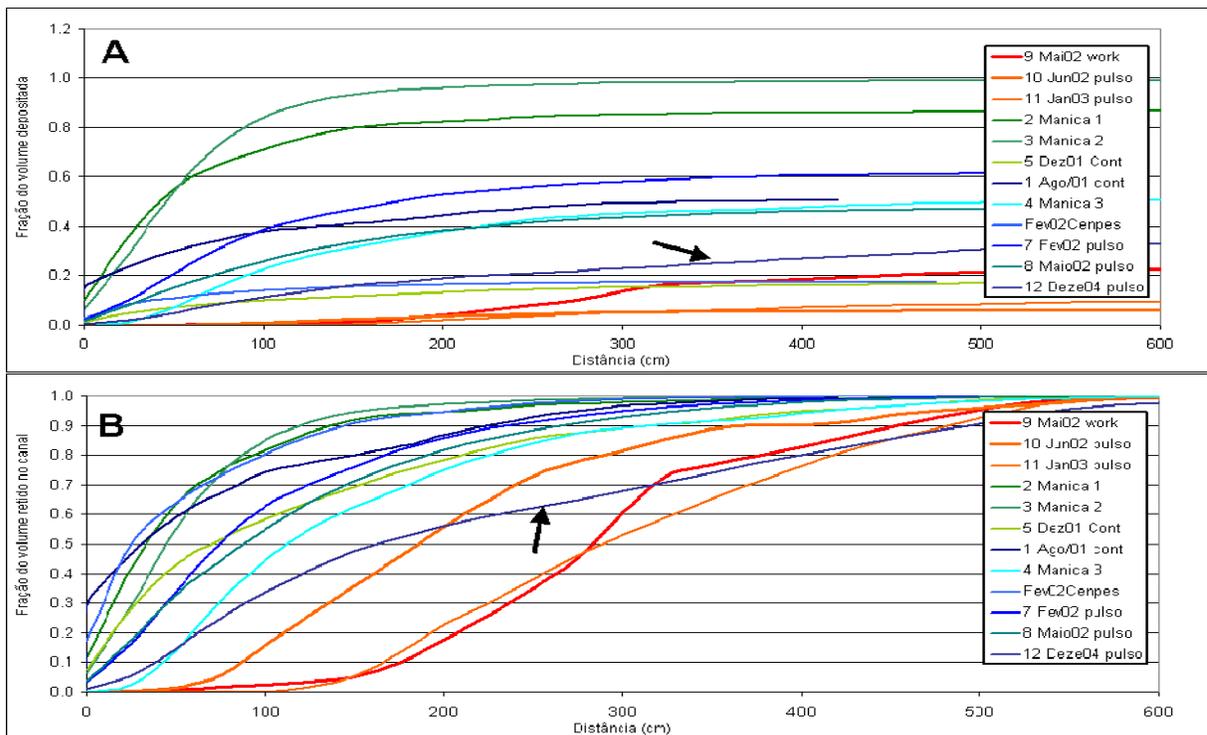


**Figura 169– Gráfico mostrando a correlação inversa entre o produto da vazão pela concentração volumétrica de carvão e a raiz quadrada da fração do volume de sedimento colocado em suspensão pela corrente de densidade.**

Esse valor é uma aproximação da quantidade de movimento imposta ao sedimento em suspensão nas condições iniciais da corrente e mostra uma correlação inversa entre os dois fatores. Isto indica que a capacidade de dispersão de sedimentos pelas correntes de densidade está ligada à quantidade de movimento imposta ao sedimento que está em suspensão. Há um ponto neste gráfico que se descola da tendência dos demais pontos. Ele corresponde ao ensaio

5-dez01-cont no qual o sedimento colocado em suspensão apresentava uma maior proporção das frações mais finas (<0,088 mm) que as presentes nos demais ensaios. Isto indica uma possível influência dos sedimentos mais finos na dispersão de sedimentos.

Para aprofundar esta análise, construíram-se os gráficos da Figura 170 onde estão representadas as frações do volume de sedimento colocado em suspensão já depositadas em função da distância percorrida pela corrente (Figura 170A). Também nesta figura mostra-se como o sedimento foi sendo acumulado no canal através do gráfico da fração do volume retido no canal em função da distância percorrida pela corrente (Figura 170B). Estes dois gráficos fortalecem a hipótese de que o aumento da quantidade de movimento (aumento da vazão e concentração) amplia a capacidade de dispersão da corrente rapidamente. Um aumento da quantidade de movimento propicia um incremento tanto o volume depositado por extravasamento do canal como na zona não-confinada implicando um forte condicionamento da geometria dos corpos sedimentares.



**Figura 170– Gráficos mostrando a capacidade de dispersão de sedimentos pela corrente. A - Fração do sedimento colocado em suspensão depositada em função da distância percorrida pela corrente. B-Fração do volume retido no canal em função da distancia.**

No gráfico dos valores da fração depositada normalizada (Figura 170B), verificamos que as curvas mostram um perfil côncavo para as vazões de alimentação menores passando a

convexo nas vazões mais elevadas. Este comportamento se justifica pela migração do pico de deposição no sentido de fluxo e de uma menor variação da espessura da camada depositada. Este último fator parece estar correlacionado a uma menor variação da concentração de sedimento na corrente durante o fluxo.

O Ensaio 12-Dezembro de 2004 foi assinalado com uma seta em ambos os gráficos para salientar o seu comportamento um pouco divergente em relação aos demais. Este ensaio apresentou uma maior capacidade de dispersão de sedimentos que mostra ser consequência de dois parâmetros: uma maior concentração de sedimento e de uma maior proporção de sedimento mais fino colocado em suspensão. Estes dois parâmetros implicam em uma redução da velocidade de queda do sedimento em suspensão possibilitando o seu transporte a maiores distâncias.

## 7.6 EFEITOS DAS VARIÇÕES DAS CARACTERÍSTICAS CORRENTES NO PADRÃO DEPOSICIONAL DOS ENSAIOS

Neste item, serão analisadas as influências das variações das características correntes de densidade não-conservativas no padrão deposicional. Estudar-se-ão as influências da vazão de alimentação do fluxo, da concentração de sedimento na mistura, composição granulométrica dos depósitos e a ocorrência de variações da inclinação do fundo e no confinamento do fluxo .

### 7.6.1 Efeito da vazão de alimentação

As vazões menores formam depósitos espessos próximos ao início da corrente, indicando que a energia interna da corrente não é capaz de manter o sedimento em suspensão. Isto provoca uma grande perda de massa logo no início de seu deslocamento até que seja atingido um equilíbrio interno da energia da corrente. Situação contrária ocorre no caso de altas vazões nos quais os depósitos só começam a se desenvolver quando a corrente sofreu uma forte desaceleração.

No intervalo entre 300 e 400 cm, em todos ensaios, a corrente passa a apresentar uma taxa de deposição com menos variação lateral (Figura 144) indicando que ela atingiu um maior equilíbrio interno entre as forças que mantêm a partícula em suspensão.

Através da análise ao número de Reynolds foi possível ter algumas informações sobre o reflexo nos depósitos das condições das correntes ensaiadas com relação às suas forças viscosas e inerciais. No gráfico da Figura 127, é possível se verificar que, nos experimentos com vazões

mais altas, os valores do número de Reynolds são elevados desde o ponto de alimentação desenvolvendo um fluxo em regime francamente turbulento que deslocou o ponto de maior espessura dos depósitos no sentido do fluxo. Este fato não se repetiu nas vazões menores onde o número de Reynolds apresenta inicialmente valores relativamente mais baixos, próximos ao limite entre condições de fluxo laminar e turbulento, onde há uma forte deposição. Há, então, aumento gradual deste número até atingir o pico de deposição que se situa a cerca de 150 cm do ponto de alimentação (Figura 144).

O número de Froude densimétrico que indica as relações entre as forças gravitacionais e as forças inerciais é apresentado na Figura 126. Uma análise dos gráficos indica que os ensaios realizados com vazões mais elevadas mostram regime de fluxo superior até cerca de 100 cm do ponto de alimentação. Nota-se também que as maiores vazões implicam números de Froude densimétrico maiores que podem explicar as relações observadas nas formas de leito discutidas no item 7.4.3. Neste item, foi apresentada uma seqüência de formas de leito que guarda uma correlação com a vazão de alimentação das correntes (Figura 156).

Outro aspecto importante, associado à vazão de alimentação, é a distribuição granulométrica dos depósitos. Constatou-se que as maiores vazões implicam depósitos com aumento de frações mais grossa cujos grãos seriam carregados pela turbulência do fluxo a maiores distâncias (Figura 152, Figura 153 e Figura 154).

Finalmente pode-se definir que há uma correlação direta entre a vazão e a dispersão de sedimentos pela corrente.

Para transferirmos estas nossas constatações a eventos turbidíticos naturais, devemos associar as vazões mais elevadas a situações onde o suprimento sedimentar ao sistema turbidítico é mais elevado. Isto ocorre, segundo o paradigma de estratigrafia de seqüências, em momentos em que o nível relativo do mar está baixo. Por outro lado, as vazões mais baixas estariam associadas um menor fornecimento de sedimentos ao sistema pela elevação eutática do nível do mar.

A influência da vazão pode assim ser relacionada com a aproximação ou o afastamento do nível do mar da quebra do talude continental. Desta forma, podemos inferir que, em momentos de nível de mar alto (baixas vazões), os depósitos tendem a se formar com maiores espessuras nas áreas próximas às cabeceiras do cânion que alimenta o sistema turbidítico. Já em

condições de nível de mar baixo, a maior energia do sistema deslocaria as maiores espessuras de depósitos para regiões mais distantes da bacia.

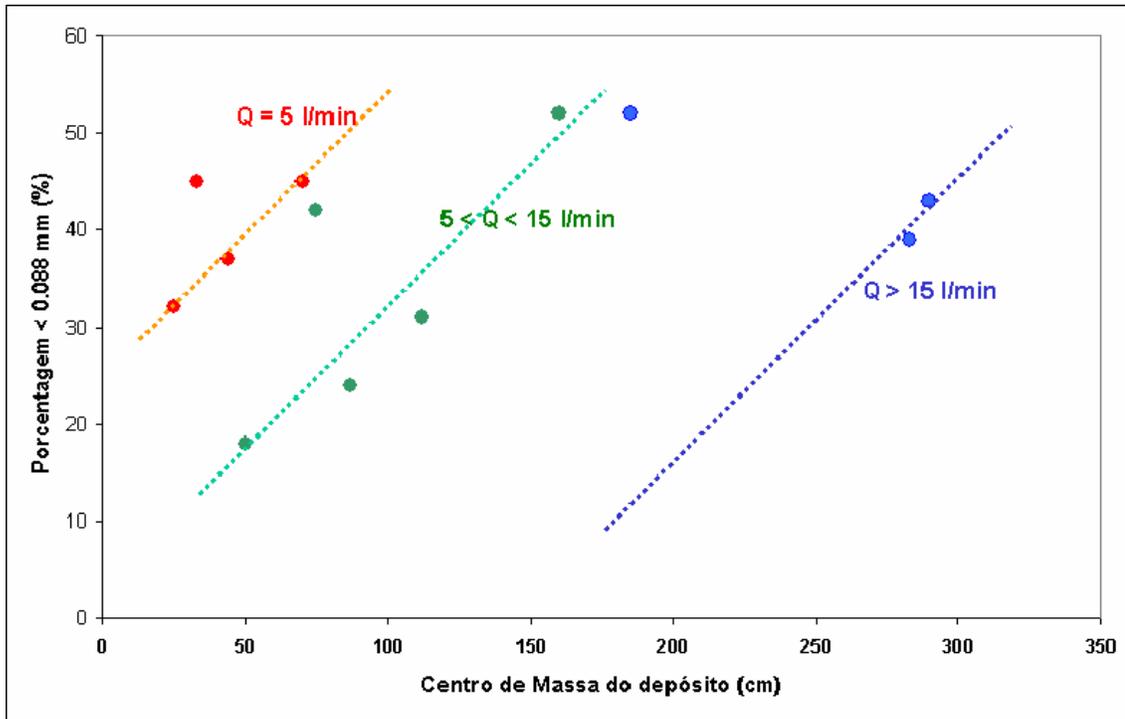
### **7.6.2 Efeito da densidade da corrente**

A densidade da corrente ou a concentração volumétrica de carvão tem uma clara importância nas características de fluxo das correntes de densidade uma vez que ela é um dos principais fatores que dirigem seu movimento. Isto fica claro na Figura 130B, onde é possível se constatar uma relação direta com a velocidade média de deslocamento da corrente. Outro ponto importante é a sua implicação nas características reológicas do fluxo, conforme foi discutido no itens 4.11 e 6.14. Nestes itens, foram abordados os efeitos que o aumento na concentração de sedimentos em suspensão na corrente provocam na capacidade de transporte de sedimentos pela corrente.

Como regra geral podemos inferir de nossos ensaios que um aumento na densidade das correntes implica em um aumento proporcional da espessura dos depósitos e, conseqüentemente, do volume de sedimento depositado (Figura 149 e Figura 151). Pode-se constatar também um ligeiro aumento da capacidade de transporte da corrente com o incremento da densidade. (Figura 148).

### **7.6.3 Efeito da granulometria do sedimento em suspensão**

Os ensaios caracterizaram-se por uma variação nas características granulométricas do material colocado em suspensão. Esta característica possibilitou avaliar a influência deste parâmetro nos depósitos. No geral, fluxos com grãos mais finos tendem a dispersarem e deslocar os depósitos na direção do fluxo. A Figura 171 apresenta uma das possíveis relações com a percentagem de finos (<0.088 mm) na corrente e distribuição de sedimentos nos ensaios, onde pode-se verificar que a concentração de finos favorece o transporte de materiais pela corrente.



**Figura 171 - Gráfico correlacionando a percentagem de finos na mistura com a distância do centro de massa do depósito em relação ao ponto de alimentação agrupando os ensaios pela vazão de alimentação da corrente.**

#### 7.6.4 Efeito das variações na geometria do modelo

Outro aspecto importante dos depósitos é a influência das variações na geometria do modelo. Estas mudanças ocorrem em dois pontos, a primeira situada a 330 cm do ponto de alimentação da corrente onde acontece uma mudança abrupta na inclinação do fundo e a segunda na saída do canal (600 cm). Nestes pontos, ocorre um espessamento seguido de um afinamento dos depósitos (Figura 151). Este efeito é mais proeminente quando a vazão de alimentação da corrente é mais elevada e quando não há sobreposição de eventos.

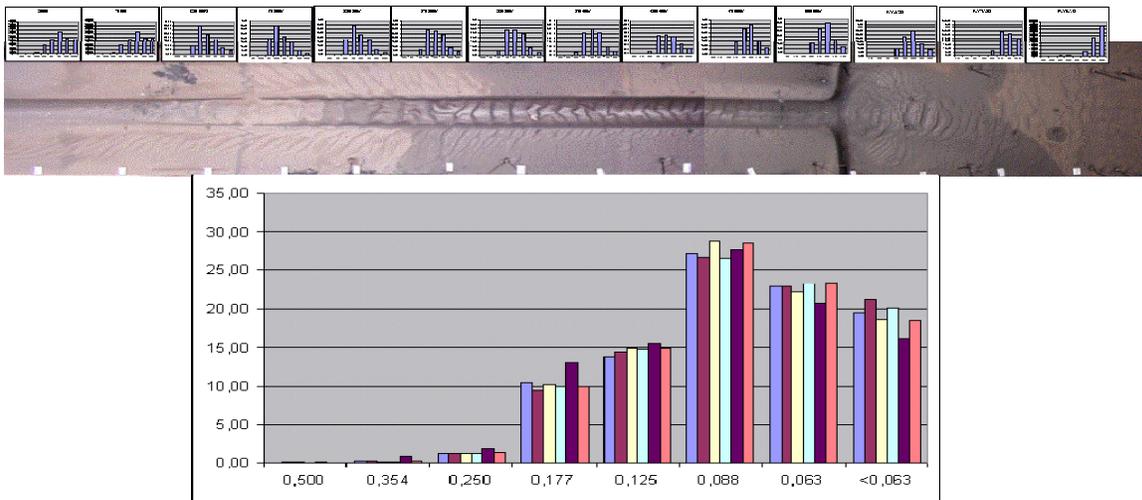
Notou-se também a variação nas características das formas de leito (item 7.4.3), na seleção granulométrica e na variação da espessura dos depósitos (itens 6.9 a 6.12) após os pontos onde ocorre a expansão da corrente associada a mudanças na configuração do modelo.

#### 7.7 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS DEPÓSITOS

Nos ensaios realizados foi possível se verificar as duas grandes tendências descritas na literatura, ou seja, afinamento granulométrico dos sedimentos tanto na vertical como do sentido

do fluxo (Figura 172). Este fato é explicado pela dinâmica de desaceleração da corrente tanto no tempo como no sentido da corrente e representa a tendência geral dos depósitos.

Além desta variação de caráter mais geral, análises detalhadas dos revelaram outros padrões deposicionais. O primeiro deles diz respeito a variações da granulometria internas ao depósito e que estão relacionadas as flutuações de velocidades da corrente devido ao desprendimento de vórtices. Embora a amostragem realizadas em nosso estudo não puderam indicar estas variações, outros experimentos realizados no NECOD (Núcleo de Correntes de Densidade – IPH-UFRGS) as documentaram. Avila (2003) realizou experimentos com sobreposição de pulsos internos a corrente onde foi possível reproduzir os fenômenos constatados em nossos ensaios. Neles foram observados depósitos com granocrescência ascendente e a formação de camadas maciças sem seleção granulométrica como citado no item 7.2.3. Outro ponto citado nas descrição dos ensaios item 6 é a menor variação granulométrica observada nos depósitos após as quebras de declive no modelo.



**Figura 172–** Figura representando os histogramas de distribuição granulométrica ao longo do depósito e a distribuição granulométrica inicial da corrente.

## **8 DISCUSSÕES SOBRE A CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS COM SISTEMAS TURBIDITICOS NATURAIS**

Neste item, inicialmente, apresentaremos as semelhanças entre os resultados obtidos nos experimentos com os registros presentes no protótipo abordando, essencialmente, a relação entre a geometria e a distribuição de volumétrica de sedimentos grossos ao longo do eixo da

calha deposicional do protótipo. De forma complementar faremos uma comparação com as formas de leito observadas em nossos experimentos e suas relações com aquelas descritas na literatura. Serão também bordadas as relações das estruturas sedimentares identificadas com as características de fluxo e, finalmente, procuraremos estudar as variações internas dos depósitos em relação com os fenômenos associados a correntes de densidade não conservativas.

### 8.1 Espessuras dos depósitos

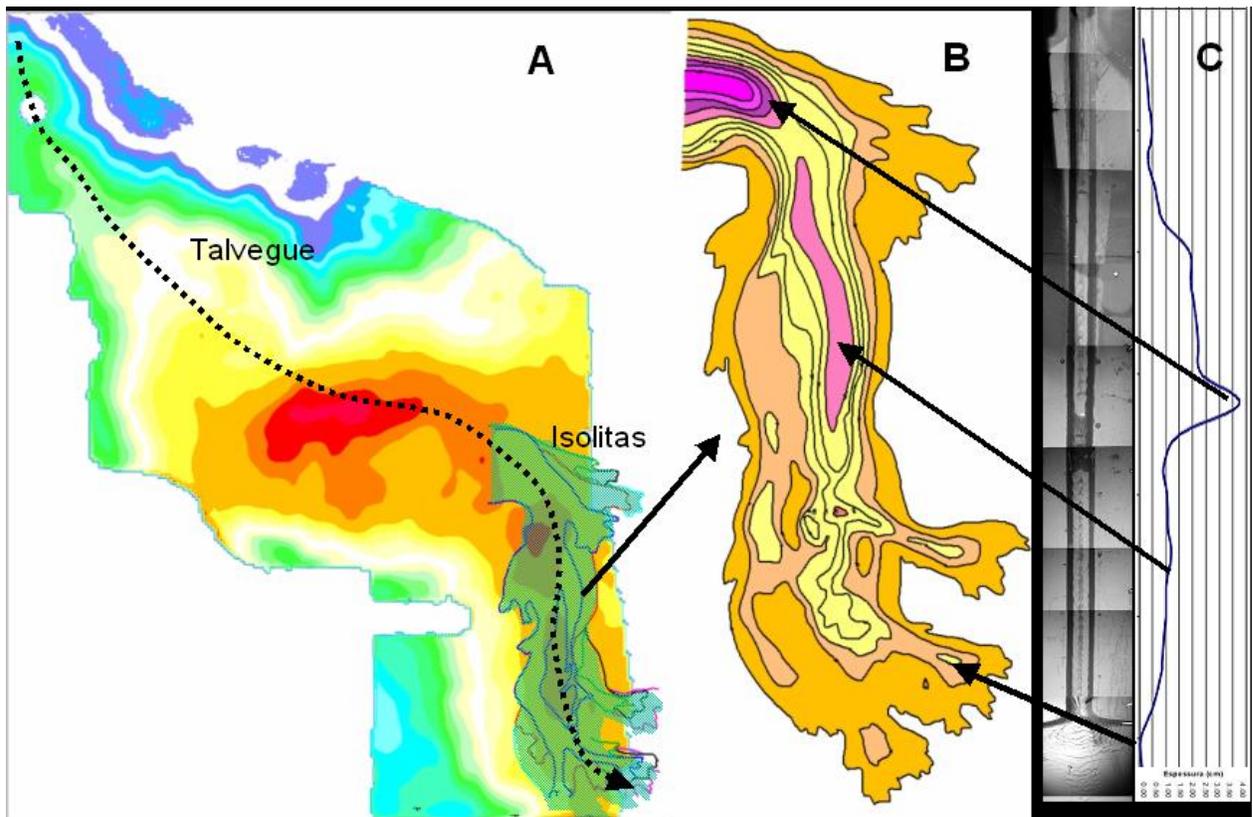
O protótipo utilizado para a construção do modelo em nossa pesquisa se trata de um paleocânion cuja geometria foi interpretada com base em levantamentos sísmicos tridimensionais. Este paleocânion está localizado na Bacia do Espírito Santo da qual estão disponíveis dados de inúmeros poços perfurados para exploração de petróleo.

Baseado nas informações disponíveis, Palhares (1986) construiu mapas de isólitais dos arenitos turbidíticos depositados sobre a superfície do paleocânion mapeada nos dados sísmicos. Estes mapas procuram reproduzir a geometria e a distribuição volumétrica dos depósitos de correntes de turbidez que se desenvolveram no protótipo. Devido a distribuição espacial das informações estes mapas que foram construídos a partir da metade inferior do paleocânion como apresentado na Figura 173.

A principal característica que pode se verificar no mapa de isólitais é a presença de um espesso pacote de areia, na porção intermediária do paleocânion, e confinado ao seu talvegue, que se adelgaça continuamente, formando, nas partes terminais, lobos alongados com pequena espessura. Nossos ensaios, na sua grande maioria, apresentaram um perfil deposicional similar ao observado no protótipo. Apesar de não estarem disponíveis informações sobre a distribuição das areias nas áreas mais proximais do protótipo, pode-se inferir, com base nas características do sinal sísmico (Figura 28), que as maiores espessuras de areia ocorrem após o terço inicial do paleocânion. Dentre todos os ensaios realizados o que apresentou maior similaridades com este perfil deposicional foi o experimento 9–maio02-Work (item 6.9). Neste experimento ocorreu um espessamento dos depósitos a partir do terço inicial canal do modelo, que corresponde aproximadamente ao inferido no protótipo.

O experimento indicado foi realizado com vazão elevada (25 l/min) e com concentração volumétrica intermediária (9 %) de sedimento em suspensão. Se for procurada uma correlação destas condições com as encontradas em sistemas turbidíticos naturais deve se esperar que os

depósitos tenham sido gerados por correntes com alta energia inicial e com suprimento sedimentar moderado (item 7.4.1). Estas condições seriam características de períodos de nível relativo do mar baixo, dentro do modelo de estratigrafia de seqüências. Isto porque, nestes períodos, os rios teriam acesso à cabeceira do cânion e forneceriam uma maior quantidade de energia e sedimento ao sistema alimentando os fluxos de turbidez. Dados bioestratigráficos destes depósitos indicam idade paleocena inferior que corresponde a um período de mar baixo pela curva eustática de Haq et al. (1987).



**Figura 173 - Imagem do protótipo utilizado como modelo de nossos experimentos. A) imagem da topografia do paleocânion onde as cores quentes representam os pontos mais baixos e as cores frias os pontos mais elevados. A área destacada representa o mapa de isólitas . B) Isólitas de areia turbidítica onde as maiores espessuras (140 m) são representadas por cores roxas e as menores (<20 m) em cor laranja. C) Imagem dos depósitos do ensaio 9–maio02-Work. As setas indicam os pontos correspondentes entre modelo e protótipo.**

## 8.2 Formas de leito

Desde o primeiro ensaio realizado foi possível se constatar uma enorme variedade de feições sedimentares cujo caráter inicialmente nos intrigou bastante. Isto se devia principalmente ao fato de que a literatura até então publicada pouco nos informava sobre estruturas interna a corpos turbidíticos associadas à tração ou a formação de canais sinuosos em sistemas

turbidíticos. Contudo, durante o período em que estivemos elaborando este trabalho, surgiram inúmeras publicações (Wynn et al., 2002; Kenyon et al., 2002 e Smith et al. 2005) relatando uma grande quantidade de feições deposicionais ligadas a correntes de turbidez, tanto no que concerne, a geometria das formas de leito, como na estruturas sedimentares internas a elas, muitas delas similares às contatadas nos ensaios, tanto em depósitos recentes quanto no registro geológico.

Pelas teorias mais aceitas existentes sobre correntes de turbidez até meados dos anos 90 os depósitos mais grossos (seqüência Ta Bouma, 1962 e S e R de Lowe, 1982) gerados por estas correntes deveriam resultar de processos predominantemente ligados pela decantação de grãos. Desta forma, os sedimentos deveriam apresentar somente um arranjo interno de grãos dado principalmente pela redução de seu diâmetro em sentido ascendente. Esta cultura estava tão impregnada no meio geológico que Mutti (1992) afirmava que, “a despeito dos problemas teóricos, as observações de campo indicavam a presença relativamente comum de estratificação cruzada de mesoescala e megaripples em depósitos de corrente de turbidez”. Acentuava ainda que “desafortunadamente a idéia preconcebida de que estas feições não existem levavam muitos autores a não registrá-las ou interpretá-las como feições de acreção lateral de canais meandranes”. Contudo, a partir dos anos 90, estruturas de tração em turbiditos de granulação grossa passaram a ser registradas pela literatura de uma forma mais intensa tanto em depósitos antigos como recentes.

Em Del Rey et al (2003) foram apresentadas as primeiras idéias a respeito das estruturas tratativas observadas em nossos ensaios. Naquele trabalho, observaram-se formas de leito desenvolvidas na seguinte seqüência: planar, ripple linear, ripple sinuosa (1 e 2) (Figura 27).

As formas de leito planas são associadas aos depósitos proximais mais espessos apresentando relevo suave. Em alguns ensaios, estão associadas a esta forma de leito feições que lembram anti-dunas indicando regime de fluxo superior. No registro geológico, estas feições deveriam ocorrer como pacotes de arenitos de laminação plano paralela, maciços ou como estratificação cruzada com direção de mergulho inversa ao sentido do fluxo.

Seguindo no sentido de deslocamento da corrente, ainda onde são formados os depósitos mais espessos, são identificadas ripple linear que apresentam comprimento de onda praticamente constante e que passam gradualmente a ripple sinuosas indicando uma mudança no fluxo dado pela desaceleração da corrente. Estas formas de leito devem ser preservadas no registro

geológico como arenitos com estratificação cruzada tabular e acanalada de médio à grande porte.

Quando as forças inerciais começam a entrar em equilíbrio com as forças gravitacionais, inicia-se a formação de depósitos mais delgados com o desenvolvimento de ripples menores. No registro geológico, estes depósitos devem se apresentar como estratificação cruzada de baixo ângulo de médio a pequeno porte.

A seguir serão discutidas as relações de semelhança que devem nortear a mudança de escala das formas de leito observadas no modelo com as presentes no protótipo. Nos itens subseqüentes serão abordadas as situações onde as formas de leito observadas podem ocorrer em sistemas turbidíticos.

### 8.2.1 Lei de semelhança para formas de leito

Um dos principais questionamentos que pode ser levantado em nossos experimentos é quanto à relação direta entre as formas de leito observadas nos experimentos e aquelas constatadas em sistemas turbidíticos naturais. As ripples que identificamos nos depósitos representarão ripples ou dunas na escala de protótipo?

Maestri (2005) faz uma revisão das relações de semelhança para utilizar em modelos físicos de correntes de densidade onde deduz a seguinte expressão para o transporte de sedimentos submetidos a um escoamento:

$$f(\text{forma\_de\_fundo}, \frac{u}{\sqrt{g'h}}, I_E, \frac{w}{u}) = 0$$

onde a forma de fundo seria função do Número de Froude densiométrico ( $\frac{u}{\sqrt{g'h}}$ ), da perda de energia do escoamento ( $I_E$ ) e da velocidade de queda adimensional das partículas ( $\frac{w}{u}$ ).

O Número de Froude densiométrico e a velocidade de queda adimensional utilizados em nossos ensaios são similares aos observados em sistemas naturais. A perda de energia do escoamento é função basicamente da rugosidade do fundo e da energia do fluxo. Desta forma, podemos considerar que há uma relação entre as dimensões e características do fluxo e as dimensões das formas de leito, implicando relações de escala entre as feições observadas no modelo e no protótipo.

São apresentados, a seguir, exemplos de formas de leito observadas, tanto em sedimentos recentes, como no registro geológico, onde as formas de leito observadas apresentam dimensões desde de alguns centímetros até dezenas de metros

### 8.2.2 Similaridades com sedimentos recentes

A presença de ondas de sedimentos (sediment waves) grossos em cânions no talude e fundo de bacias marinhas foi amplamente estudada por Wynn et al. (2002). Neste trabalho os autores apresentam inúmeros exemplos da ocorrência destas estruturas trativas que, segundo nossa interpretação, guardam uma grande similaridade com o resultado de nossos experimentos.

Na Figura 174, pode-se constatar a semelhança entre as ondas de sedimentos observadas no Canal de Icod, nas Ilhas Canárias, com as formas de leito observadas no experimento do item 6.7. A relação de escala observada entre estas feições é de aproximadamente 1:6000. O comprimento de onda da forma de leito no modelo apresenta de 7 a 16 cm e na natureza 0,4 a 1,2 km. Quanto a altura das formas foi observado 6 m no depósito natural e 1 a 2 mm no modelo. Este experimento foi desenvolvido com vazão e densidade inicial intermediárias.

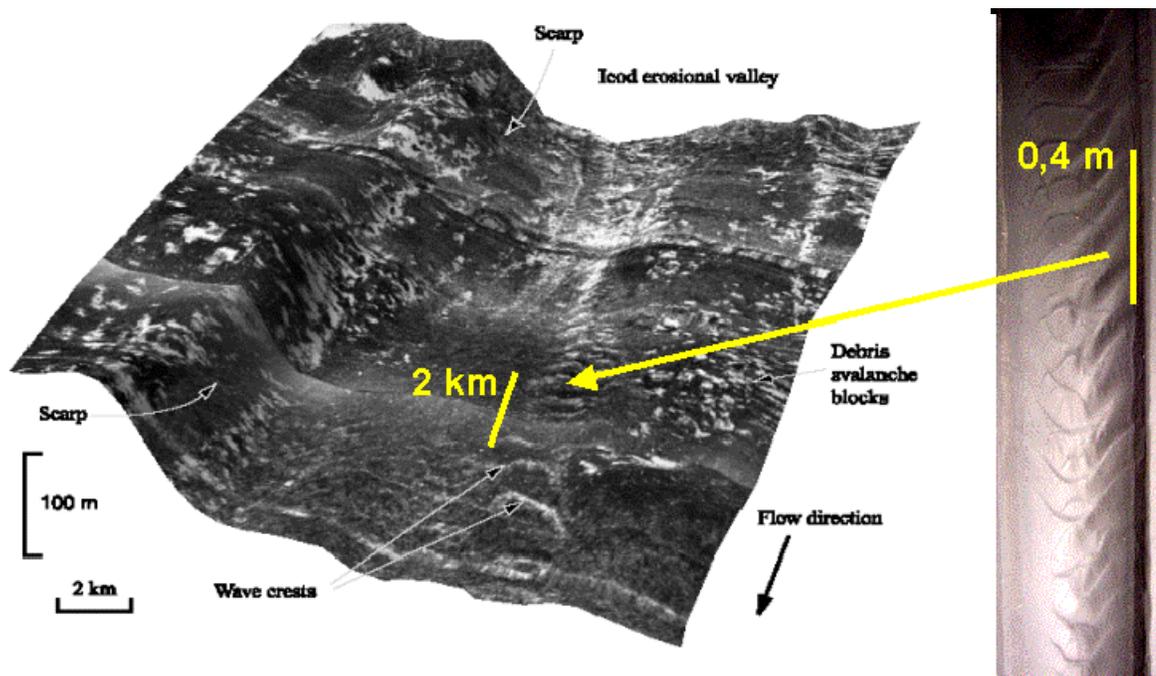
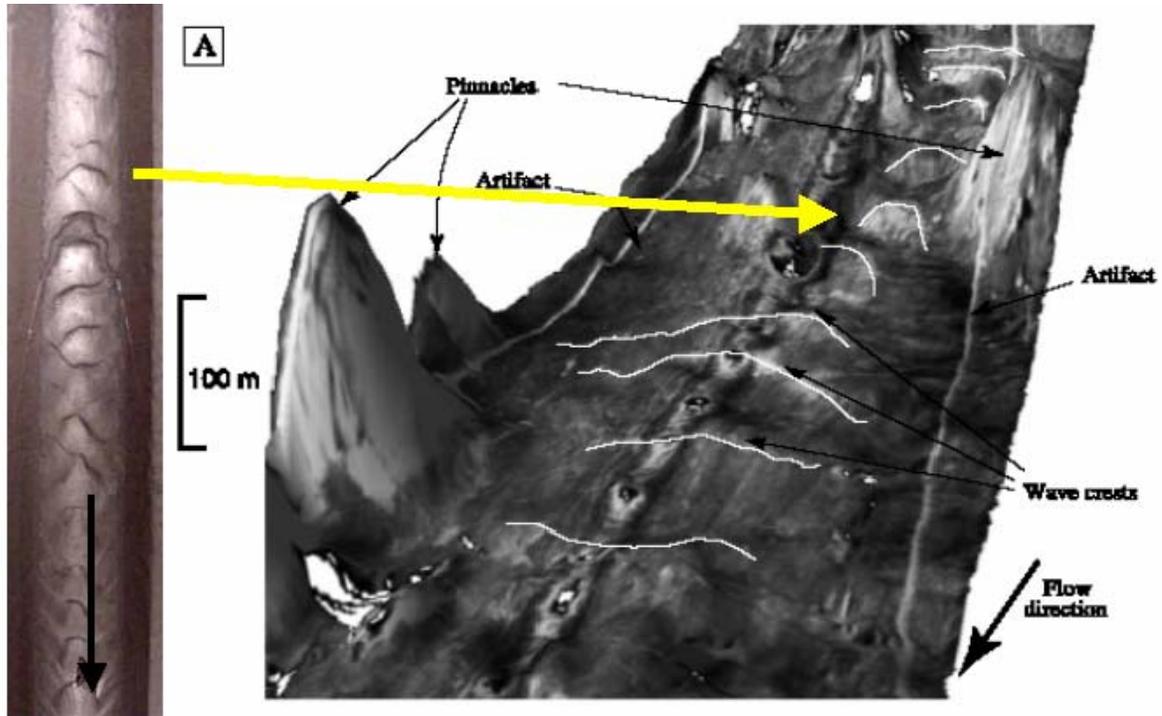


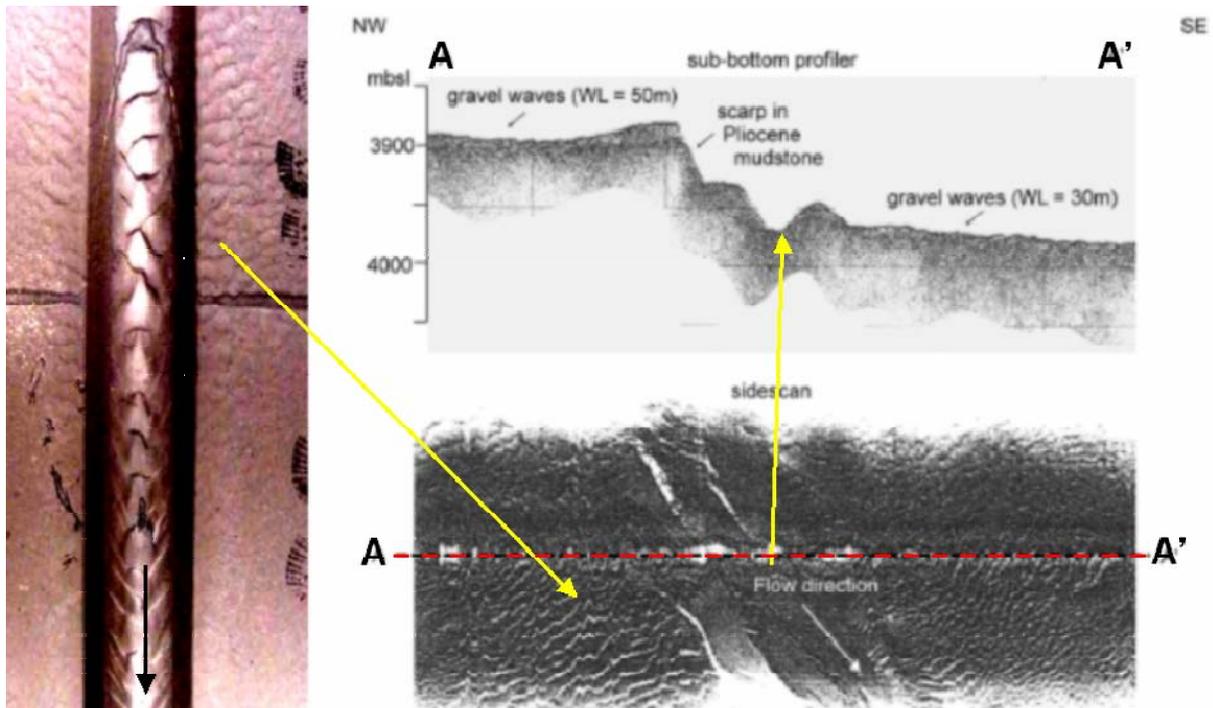
Figura 174- Imagem de sonar sidescan mostrando um campo de ondas de sedimentos no Canal de Icod no flanco norte da Ilha de Tenerife nas Ilhas Canárias (Wynn et al. ; 2002) e imagem do ensaio 7-Fev2002-Pulso (item 5.7).

Da mesma forma, a Figura 175 compara ondas de sedimento no Canal El Julian com formas de leito do experimento do item 6.10 realizado com alta vazão e densidade intermediária. Comparando ambas imagens, podemos verificar similaridades de geometria entre as formas de leito do modelo e as observadas em turbiditos canalizados. O comprimento de onda observado no Canal El Julian é de 0,6 a 1.5 km com altura de 3 a 6 m, no experimento temos 7 a 21 cm de comprimento de onda e 1 a 2 mm de altura mantendo a relação de escala 1:6000 .



**Figura 175-** Imagem de sonar sidescan mostrando um campo de ondas de sedimentos no Canal de El Julian no flanco norte da Ilha de El Hierro nas Ilhas Canárias (Wynn et al., 2002) e imagem do ensaio 10-Jun2002-Pulso (item 5.10).

A Figura 176 mostra a semelhança nas formas de leito em áreas de extravasamento do canal do observada modelo com aquelas constatadas no vale leste do Leque Laurentiano. As estruturas observadas em ambos os casos indicam que direção fluxo que as gerou é similar a observada no canal. Situação similar tem sido observada em depósitos de extravasamento de sistemas turbidíticos antigos, como nos que ocorrem em afloramentos do Karoo na África do Sul, Brushy Cânion, no Texas, EUA, e em Itajaí, Santa Catarina (Moraes, 2004, Gardner et al., 2005). Pelas observações realizadas durante os experimentos, podemos correlacionar este fato à manutenção da quantidade de movimento que o fluxo retém após perder o confinamento, possibilitando que a corrente mantenha a mesma direção que possuía dentro do canal.



**Figura 176-** Imagem de sonar sidescan mostrando um campo de ondas de sedimentos no Vale leste do Leque Laurentiano (Wynn et al. 2002) e imagem do ensaio 10-Jun2002-Pulso (item 5.10).

Observações recentes realizadas no Cânion de Monterrey, situado a oeste da Califórnia, EUA (Smith et al. 2005) mostram processos sedimentares bastante similares aos observados em nossos experimentos. Neste Cânion, contatou-se o desenvolvimento de ondas de sedimento grossos (silte a cascalho) que puderam ser observadas em imagens de batimetria de alta resolução do fundo oceânico. Estas ondas são assimétricas e apresentam amplitude de 2 m e comprimento 35m. Segundo os autores, foram constatadas modificações na morfologia das formas de leito em duas imagens, realizadas com um lapso de seis meses. Estas modificações foram atribuídas a atuação de fluxos turbidíticos que descem o cânion periodicamente.

Na Figura 177 comparamos, em planta, a forma destas ondas com as observadas no experimento 11-Jan2003-pulso (item 5.11). Nela é possível se constatar a semelhança nas formas de leito entre o experimento e as do Cânion de Monterrey. Para salientar esta semelhança são apresentadas na Figura 178, além da imagem em planta, seções longitudinais ao cânion e ao canal onde fica visível a assimetria observada nas formas de leito e a relação entre amplitude e comprimento que é discutida em detalhe no item 7.4.3. De uma forma geral as ondas de sedimento possuem um comprimento de onda variando 30 e 70 m na seção A (Figura 178) com 4 a 5 m de altura. Na seção B as dimensões são 15 a 50 m e 2 a 3 m,

respectivamente. No modelo foi constatada a dimensão de 10 a 25 cm para o comprimento de onda e 0,8 a 1,4 cm para a altura. Nesta comparação a relação de escala é de aproximadamente 1:200.

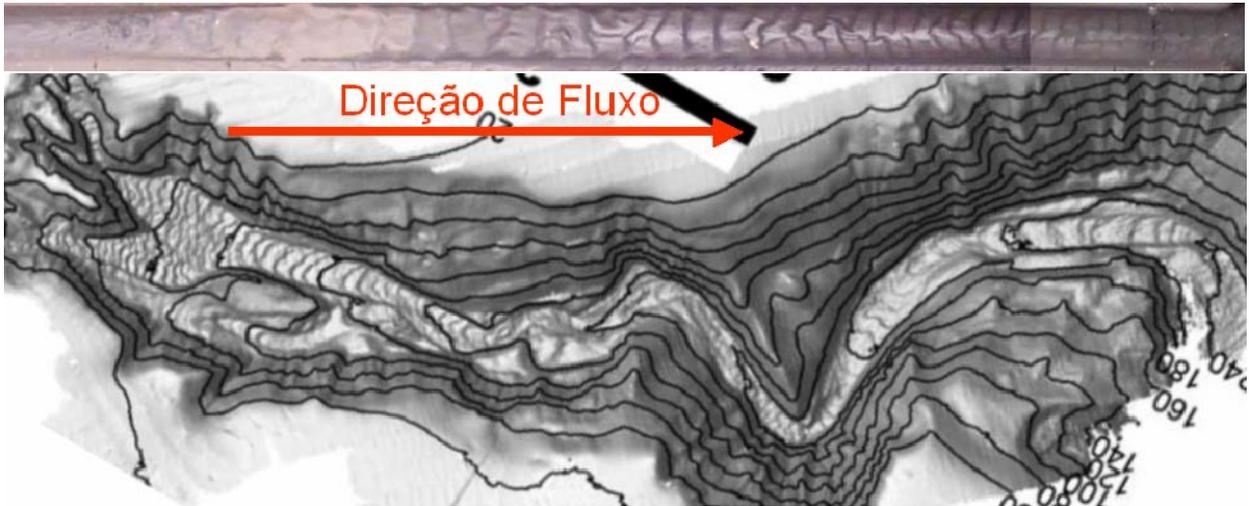


Figura 177 – Imagem da batimetria da porção superior (primeiros 5 km) do Cânion de Monterey oeste da Califórnia EUA com resolução de 3 m (Smith et al. 2005) e imagem dos depósitos do experimento 11-Jan2003-pulso (ao topo).

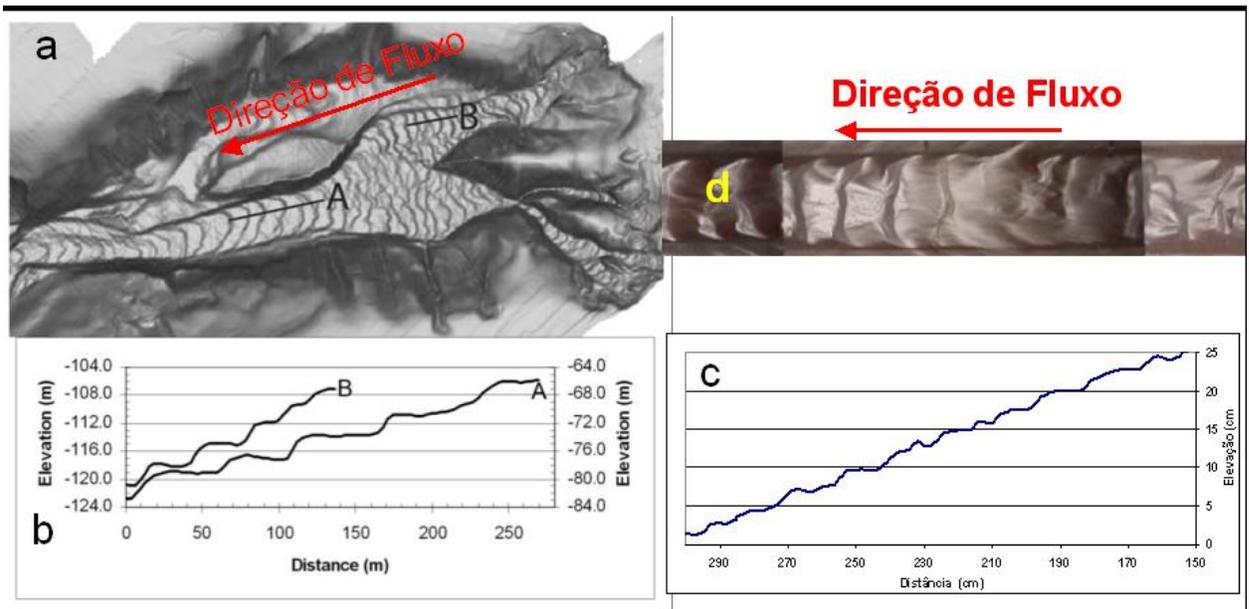


Figura 178 – (a) Imagem em planta das formas de leito no Cânion de Monterey e (b) seção longitudinal ao cânion (Smith et al. 2005). (d) Imagem em planta dos depósitos do experimento 11-Jan2003-pulso e (c) seção longitudinal ao canal.

### 8.2.3 Similaridades com depósitos antigos

A fim mostrar alguns exemplos de estruturas sedimentares similares às observadas em nossos experimentos são apresentadas algumas feições observadas por nós em afloramentos de sistemas turbiditos antigos nas bacias de Itajaí (SC), Grupo Itajaí, de Delaware (TX EUA) Formação Brushy Cântion e de Almada (BA) Formação Urucutuca.

Inicialmente iremos abordar a preservação de formas de onda de sedimentos no registro sedimentar. Estas formas tem sido descritas no registro sedimentar como feições exclusivas de situações em que há passagem de sedimento (by pass) e correspondem ao que Mutti (1992) denominou fácies F6 (megaripples). Em nossas observações pudemos verificar que, de acordo com as observações de Mutti (1992), elas parecem ser feições bastante freqüentes nos depósitos turbidífticos.

Na Figura 179 temos vários exemplos da ocorrência destas feições em escalas variadas e em diferentes contextos de sistemas turbidífticos. Elas ocorrem com dimensões de alguns centímetros (Figura 179B) a até dezenas de metros (Figura 179E) em arenitos finos a grossos, porém guardam sempre a mesma feição geométrica de uma onda assimétrica. Esta geometria apresenta uma grande similaridade entre as observadas nos experimentos (Figura 178C), em depósitos recentes (Figura 178B) e fósseis (Figura 179).

A Figura 179A, apresenta uma forma de onda assimétrica com cerca de 2 m de comprimento e 0,3 m de altura em arenito médio que internamente apresenta-se maciço observada no Afloramento Apiuna1 na Bacia de Itajaí SC. Este depósito é interpretado como sendo de lobos distais onde a direção de fluxo é longitudinal ao afloramento. Na Figura 179B é apresentada uma outra forma de leito observada em depósitos de extravasamento de canal no Afloramento Bergamota, Bacia do Itajaí. Esta forma com cerca de 0,8 m de comprimento e 0,15 m de altura em arenito fino, é assimétrica e indica direção de fluxo paralela à constatada aos sedimentos canalizados que ocorrem no mesmo afloramento.

As figuras Figura 179 C, D e E apresentam formas de leito observadas em depósitos distais da Fm Brushy Cântion , Bacia de Delaware, Texas EUA . Na Figura 179C é apresentada uma forma de onda com 6 m de comprimento e 1 m de altura em arenito médio maciço. Esta forma está inserida numa feição canalizada na região de lobos distais da bacia, na camada denominada leque 6, localizada na seção Terminator. Este afloramento é orientado longitudinalmente à direção de fluxo das correntes. A forma de onda apresentada na Figura 179D está situada na mesma seção no leque 7, posicionado estratigraficamente acima do leque 6.

Esta forma guarda semelhança com a anterior tanto quanto às dimensões como a granulometria e estruturação interna.

A forma de leito apresentada na Figura 179E possui dimensão similar àquelas observadas em depósitos recentes com cerca de 70 m de comprimento de onda e 6 m de altura. Está situada estratigraficamente no leque 4, na seção denominada Rock Horn Cânion, desenvolvida em arenitos médios com estratificação cruzada de baixo ângulo. Internamente são visíveis superfícies descontínuas que parecem estar ligadas a flutuações do fluxo durante a deposição. Próximo a base são encontradas estruturas de fluidização.

Nos exemplos apresentados acima se pode constatar que, as correntes de densidade não conservativas, são capazes de gerar as formas de leito que, embora sejam similares em sua geometria, podem variar sua dimensão desde de alguns centímetros até dezenas de metros. Esta similaridade geométrica sugere que, fatores inerentes a características do escoamento internas a corrente, promovem o seu desenvolvimento. Esta inferência pode ser reforçada por não haver, aparentemente, uma dependência direta entre a granulometria do sedimento depositado e a geometria da forma de leito.

No item 8.2.1 foram apresentados os números adimensionais que controlam a formação das formas de leito. Destes pode-se considerar que o Número de Froude densiométrico é o mais importante em nosso caso, uma vez que velocidade de queda das partículas varia pouco (areia fina à média) e, a rugosidade do fundo é pequena relativamente as dimensões do escoamento. Como o Número de Froude densiométrico é função da altura e da velocidade do escoamento podemos considerar que as formas de leito deve ter uma relação com estes parâmetros. Esta correlação parece ocorrer de fato, porque as menores formas, foram identificadas em depósitos de extravasamento de canal, onde são esperadas menores velocidade e altura de fluxo, e maiores, foram identificadas em feições canalizadas do sistema onde são esperados fluxos mais espessos e velozes.

Associada ou não a preservação de formas de leito foi observada, principalmente na Formação Brushy Cânion, uma abundante presença de estratificação cruzada de baixo ângulo nos sedimentos arenosos associados a feições canal. Esta estratificação, embora menos constante, pode ser observada em arenitos turbidíticos das Bacias de Almada (Bruhn e Moraes, 1989 – Foto 9) e Itajaí. Como a alta taxa de sedimentação associada ao processo deposicional das correntes de densidade não conservativa torna a estratificação por vezes sutil, em fotografias fica difícil de registrá-las. Na Figura 180 apresentamos alguns exemplos onde foi possível um

registro razoável destas estruturas que por vezes se mostram tabulares e outras acanaladas indicando a presença de geometria linear e lingüóide como observado nos experimentos.

Finalmente, apresentamos uma fácies descrita como resultado da transformação de fluxo supercrítico para subcrítico em correntes de turbidez, por Mutti (1992). Esta fácies está presente nos afloramentos por nós visitados nas bacias de Itajaí, Delaware e Almada. Na Bacia Delaware estes sedimentos são descritos como estruturas de corte e preenchimento (Gardner et al., 2005) e, estão situadas fisiograficamente na base do paleotalude continental da bacia. O aspecto mais interessante apresentado por esta fácies é a alternância de sedimentos grossos (areia muito fina) e finos (silte / argila) em lâminas variam sua espessura desde alguns milímetros a máximo 1 cm que apresentam truncamentos internos em várias escalas (Figura 181 A e B). Neste trabalho esta estrutura é interpretada como uma feição similar a estratificação cruzada Hummocky . Esta similaridade sugere que, as feições observadas no campo, são resultantes de processos sedimentares com uma forte associação com fluxo combinado, unidirecional e ondulatório, que seria originado pelo desprendimento de vórtices na interface superior da corrente observado durante os nossos experimentos.

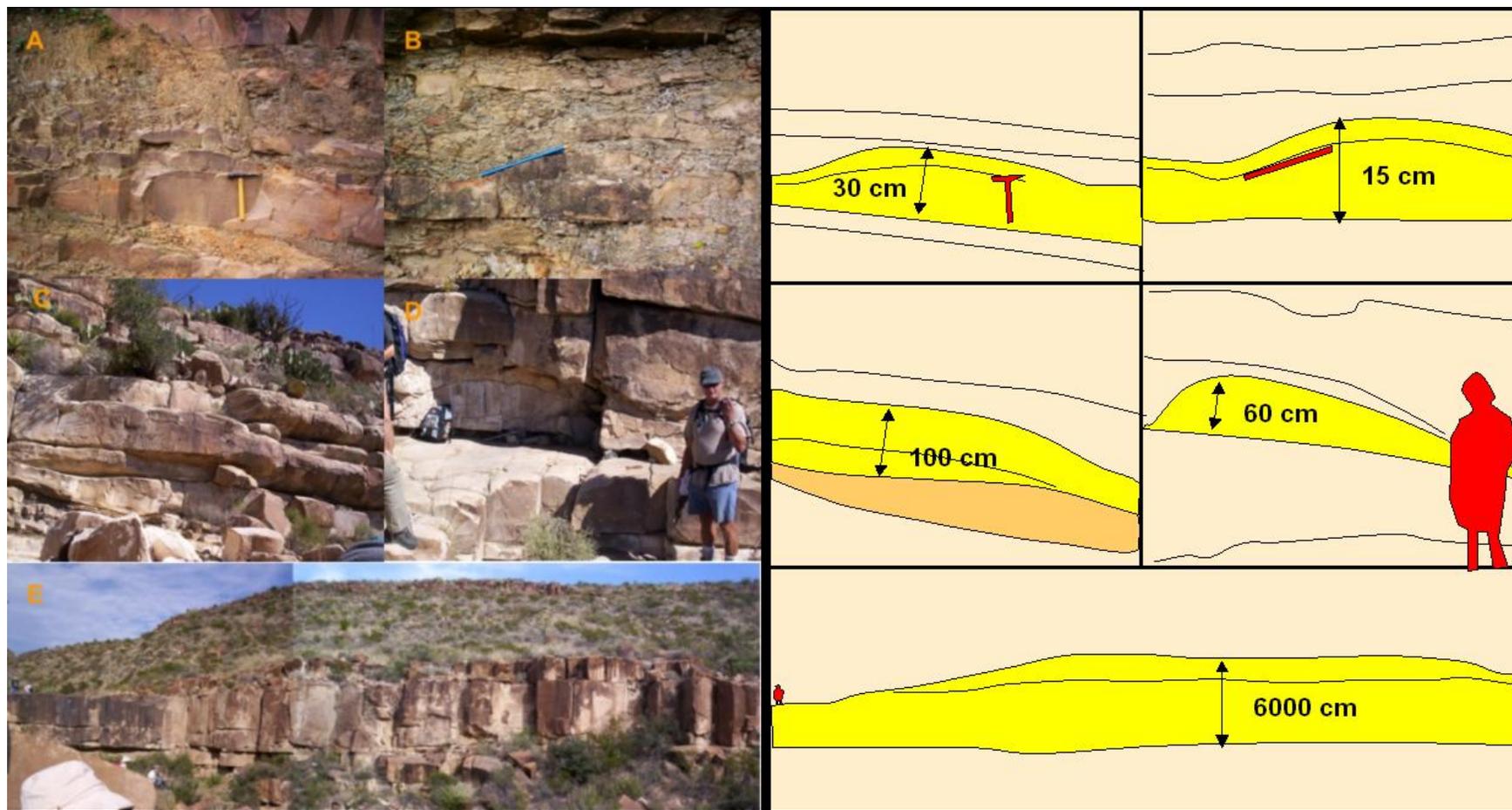


Figura 179 – Imagens de formas de onda em diferentes escalas em afloramentos de turbiditos arenosos. (A) Forma de onda com cerca de 2 m de comprimento e 0,3 m de altura em arenito médio no Afloramento Apiuna 1, Bacia do Itajaí. (B) Forma de onda com cerca de 0,8 m de comprimento e 0,15 m de altura em arenito fino no Afloramento Bergamota, Bacia do Itajaí. (C) Forma de onda com cerca de 6 m de comprimento por 1 m de altura no Leque 6 na região da paleobacia, Fm Brushy Cântion, Bacia de Delaware. (D) Forma de onda com cerca de 4 m de comprimento por 0,6 m de altura no Leque 7 na região da paleobacia, Fm Brushy Cântion, Bacia de Delaware. (E) Forma de onda com cerca de 70 m de comprimento por 6 m de altura no Leque 7 na região da paleobacia, Fm Brushy Cântion, Bacia de Delaware.



Figura 180– Imagens de afloramentos de turbiditos com estratificação cruzada. (A) Detalhe de forma de leito em onda com 10 m de extensão lateral com 0,6 m de altura com estratificação cruzada de baixo ângulo- Afloramento Apiuna 2, Bacia do Itajai. (B) Detalhe de estratificação cruzada acanalada com 0,4 m de altura – afloramento no paleotalude no Leque 6 em feição canal confinado, Fm Brushy Cânion, Bacia de Delaware. (C) Detalhe de estratificação cruzada de baixo ângulo no Afloramento Bergamota, Bacia do Itajai. (D) Delatlhe de estratificação cruzada acanalada com 1 m – afloramento no Leque 7 em feição de canal distributário, Fm Brushy Cânion, Bacia de Delaware. (E) Visão geral de feição canalizada no Leque 6 na região da paleobacia, Fm Brushy Cânion, Bacia de Delaware. (F) Detalhe da estrutura interna do depósito da figura F com estratificação cruzada.

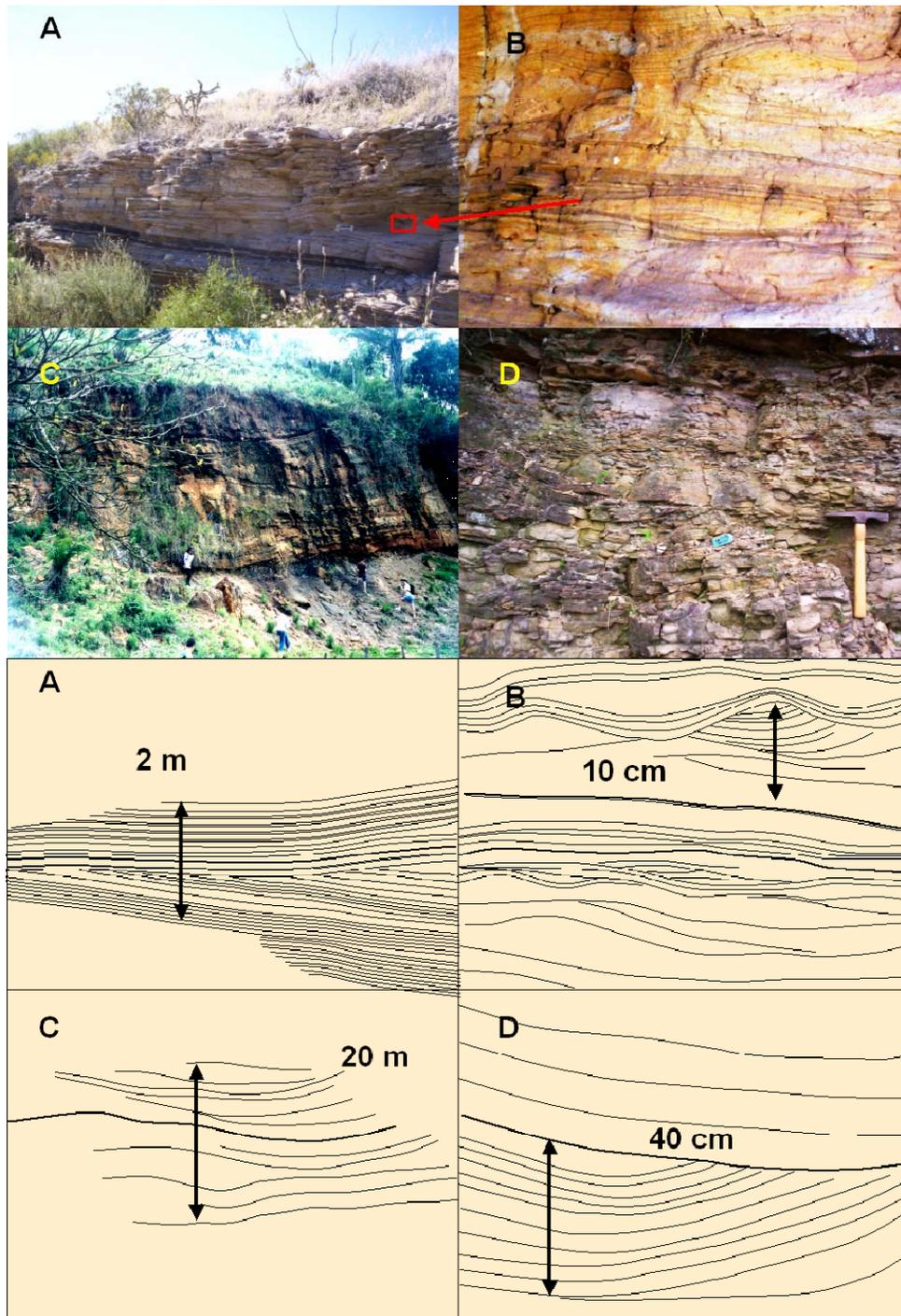


Figura 181– Feições de corte e preenchimento em várias escalas que indicam terem sido formadas por ondas internas a correntes de densidade. (A) Macrofeição de corte e preenchimento em arenito muito fino e siltito com 10m de comprimento por 2 m altura no Leque 3 na região da base do paleotalude, Fm Brushy Cânion, Bacia de Delaware. (B) Detalhe da estrutura interna dos sedimentos da Foto A onde se pode observar a mesma feição de corte e preenchimento na escala 0,25 m de comprimento 0,05 m de altura. (C) Macrofeição de corte e preenchimento em arenito de granulação média a siltito com 25 m de comprimento e 3m de altura na Fm Urucutuca, Bacia de Almada. (D) Detalhe de macrofeição de corte e preenchimento em arenito granulação média a siltito com 5 m de comprimento e 1m de altura no Afloramento Bergamota, Bacia de Itajai.

## 9 CONCLUSÕES

O objetivo principal do trabalho de avaliar o potencial do método de simulação física de correntes de turbidez foi plenamente alcançado. Através dele foi possível se prever e explicar feições deposicionais encontradas em depósitos sedimentares naturais atuais e antigos.

Além do objetivo principal foi possível a observação de aspectos importante quanto a metodologia, características dos fluxos e dos depósitos associados aos ensaios realizados.

### 9.1 Quanto a metodologia

A utilização do scanner de ultra-som foi a principal ferramenta na identificação das características de fluxo e de mecanismo de deposição da corrente.

Foi possível através dos experimentos realizados não só reproduzir padrões deposicionais já descritos na literatura como prever novos elementos que puderam ser identificados em sistemas naturais durante o desenvolvimento do trabalho.

Foi conseguido o estabelecimento de procedimentos experimentais e de análises de resultados que se mostraram eficazes para o estudo em escala reduzida dos padrões de depósitos para as correntes de densidade não conservativas.

### 9.2 Quanto as características do fluxo

Identificou-se com os experimentos novos aspectos das características geométricas e dinâmicas das correntes de densidade não-conservativas.

Estabeleceu-se uma abordagem da estrutura interna das correntes ainda pouco explorada nas pesquisas até aqui realizadas.

Constatou-se um caráter ondulatório no fluxo de correntes de densidade não conservativas. Este caráter teve sua origem associada à geração de ondas internas à corrente que são associadas ao desprendimento de vórtices na porção superior da corrente.

Ficou clara a divisão da corrente em duas camadas que comportam características de fluxo diferentes: uma superior mais diluída com sedimentos mais finos onde a turbulência é mais intensa e uma inferior mais densa com sedimentos mais grossos onde se espera que a turbulência seja controlada pela concentração dos sólidos em suspensão.

As análises das imagens ecográficas da corrente permitiram identificar que as correntes de densidade apresentam uma variação no seu perfil vertical de concentração durante o desenvolvimento do fluxo. Na cabeça verifica-se uma distribuição homogênea de sedimento em suspensão desde a base até o topo da corrente. No corpo a corrente se divide em duas camadas e verifica-se uma expansão do fluxo na camada superior e um adensamento na camada basal, que apresenta então uma concentração mais elevada que a observada na cabeça.

Verificou-se uma tendência de declínio exponencial de velocidade da corrente ao longo do tempo e do seu percurso.

Nas quebras de declive do modelo que ocorrem no meio do canal e no ponto em que a corrente perde o confinamento foram observadas acelerações localizadas no fluxo.

Constatou-se o desenvolvimento de fluxo helicoidal nas correntes de densidade confinadas com a formação de uma calha com geometria sinuosa.

Notaram-se variações na taxa de sedimentação associadas à oscilação da velocidade de fluxo gerada pela sua dinâmica interna. Esta constatação acena para a possibilidade de que o fluxo durante seu desenvolvimento alterne fases de maior ou menor taxa de deposição, não-deposição ou mesmo erosão.

Constataram-se variações cíclicas na altura da camada interna da corrente que implicam mudanças na taxa de sedimentação. As variações ocorrem em pulsos de frequência variável que se sucedem a aproximadamente cada 25 segundos. Esta característica foi atribuída a um controle da cinética interna do fluxo e da interação desta com as interfaces superior e frontal da corrente. Nos momentos em que há altas frequências, há uma tendência de o fluxo ser deposicional, enquanto nos de baixas frequências, a de ser não-deposicional ou erosional.

### 9.3 Quanto às características dos depósitos

Entre os parâmetros analisados nos experimentos constatou-se a vazão de alimentação como aquele que tem grande influência nas características dos depósitos.

De um modo geral, um aumento da vazão implica um deslocamento do pico deposicional no sentido da corrente.

Constatou-se que fluxos com vazões altas promovem depósitos com um maior conteúdo de frações mais grossas. Este aumento de vazão acarreta uma maior turbulência do fluxo que lhe permite carregar os grãos a maiores distâncias.

Pode-se estabelecer uma correlação direta entre a capacidade de dispersão de sedimentos pela corrente com a vazão de descarga.

Constatou-se, nos sedimentos depositados no canal, uma distribuição seqüenciada de formas de leito que varia entre ripples de crista reta e ripples lingüóides.

Reconheceu-se uma correlação entre a amplitude e o comprimento das formas de leito. Esta relação varia em uma ampla faixa entre 1:10 e 1:120. Contudo, há uma predominância ente 1:10 e 1:60 e há uma tendência da relação diminuir com o aumento da amplitude. Os valores de assimetria apresentados pelas ripples variam entre 0,5 e 2. Esta baixa assimetria foi atribuída à influência de movimentos oscilatórios internos à corrente durante o processo de deposição; esses movimentos seriam gerados pela propagação de ondas internas oriundas do despreendimento de vórtices na cabeça.

Identificou-se em todos os casos em que houve o extravasamento da corrente a formação de ripples na lateral do canal com cristas lineares que indicam uma direção do fluxo próxima a que ocorre no canal. Isto foi atribuído a transferência de parte da quantidade de movimento do fluxo que se desenvolve dentro do canal para zona de extravasamento.

Foram desenvolvidos depósitos alongados no sentido do fluxo na área onde a corrente perde o confinamento.

Foram confirmadas nos ensaios as duas grandes tendências na distribuição granulométrica, ou seja, afinamento dos sedimentos tanto na vertical como do sentido do fluxo.

Verificou-se que há um pico deposicional de cada fração granulométrica analisada quando a velocidade de queda adimensional das partículas está em uma faixa ente 0,03 e 0,08 com moda de 0,05. Esta constatação está em inteira concordância com os valores observados nos sistemas naturais.

#### 9.4 Considerações finais e sugestões

Observou-se uma grande similaridade entre os depósitos gerados nos experimentos e aqueles identificados em sistemas turbidíticos atuais e do registro geológico tanto em afloramentos como em dados de subsuperfície.

Apesar de terem sido obtidos avanços em nossa pesquisa, temos a certeza de que foi apenas iniciado um rico processo de aprendizado sobre as correntes de densidade não-conservativas. Desta forma, sugerimos a continuação da linha de pesquisas que foi iniciada por Manica 2002 e continuada em nosso trabalho abordando os seguintes aspectos:

- Estudar melhor as características internas das correntes de densidade através de uma melhor instrumentação dos experimentos como a utilização de múltiplos anemômetros ultrassônicos Doppler, coletores de amostras para estudar a distribuição interna de sedimentos da corrente e uma distribuição mais ampla de scanner de ultra-som ao longo do modelo.
- Investigar detalhadamente o efeito do ressalto hidráulico constatado em nossos ensaios através da instrumentação nos pontos em que ele ocorre.
- Desenvolver um reômetro específico para o estudo da reologia das correntes de densidade investigadas e melhor entender os processos associados a sedimentação.
- Realizar um estudo detalhado sobre as leis de semelhança entre as formas de leito observadas nos experimentos e nos depósitos naturais para refutar ou não as semelhanças que foram observadas.
- Avançar na pesquisa sobre a sobreposição de eventos de correntes de turbidez.

## 10 Referências Bibliográficas

- ALEXANDER, J. & MULDER, T. 2000 Experimental quasi-steady density currents. *Mar. Geol.*, 186, 195–210.
- ALLEN, J.R.L. 1982 *Sedimentary structures, their character and physical basis*, v1. Elsevier, Amsterdam, 593pp.
- BAAS, J.H.; KESTEREN, W.V.; POSTMA, G. 2004 Deposits of depletive high-density turbidity currents: a flume analogue of bed geometry, structure and texture. *Sedimentology* 51, 1053-1088.
- BAGNOLD, R. A. 1962. Auto-suspension of transported sediment: turbidity currents. Proceedings of the Royal Society of London, London, n. 265, p. 315-319.
- BOUMA, A.H. (1962) *Sedimentology of Some Flysch Deposits: a Graphic Approach to Facies Interpretation*. Elsevier, Amsterdam, 168 pp.
- BRITTER, R. E.; LINDEN, P. F. 1980. The motion of the front of a gravity current travelling down a incline. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, v.99, pt 3, p. 531-543.
- BRITTER, R.E. & SIMPSON, J.E. 1978 Experiments on the dynamics of a gravity current head. *J. Fluid Mech.*, 88, 223– 240.
- BRUHN, C.H.L. 1998 Deep-water reservoirs from the eastern Brazilian rift and passive-margin basins: Course n. 6- Part 2, AAPG International Conference and Exhibition, Rio de Janeiro.
- CELLINO, M. & GRAF, W.H. 2000 Experiments on suspension flow in open channels with bed forms. *Journal de Recherches Hydrauliques*. v. 38 n. 4 p 289-298.
- COUSSOT, P. 1997. *Mudflow Rheology and Dynamics – IAHR Monograph Series*. A. A. Balkema. Rotterdam 255p
- ÁVILA, M. D. 2003 Modelagem física de correntes de densidade no estudo de depósitos turbidíficos. [manuscrito]. 2003. [106 f.] : il. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS, 2000.
- DEL REY, A.C., VIANA, A.R., MANICA, R., MAESTRI, R.D. & BORGES A.L.O. 2003 Impact of Flow Oscillations in the Depositional Geometry and Architectural Elements Distribution of Sand-Rich Density Current-Driven Deposits – Abstracts – AAPG Annual Meeting, Salt Lake City, Utah CD-ROM.
- DREW, D. A. & PASSMAN, S.L.. 1999. *Theory of multicomponent fluids*. Springer-Verlag 308p New York
- DOTT JR., R.H., 1963. Dynamics of subaqueous gravity depositional processes. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 47, 104–128.
- EINSTEIN, H.A. & CHIEN N., 1955. effects of heavy sediment concentration near the bed on the velocity and sediment distribution. M.R.D. Sediment series 8, Missouri River Division, U.S.Corps of Engineers
- FABIAN, S. 2002 Modelagem física de correntes de densidade em canal bidimensional de declividade variável. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre., 130p.
- FISHER, R. V. 1983 Flow transformations in sediment gravity flows. *Geology*, v. 11 p. 273-274.

- GARCIA, M.H. 1994 Depositional turbidity currents laden with poorly sorted sediment. *J. Hydr. Eng.*, 120, 1240–1263.
- GARCIA, M.H. & PARKER, G.A. 1989 Experiments on hydraulic jumps in turbidity currents near a canyon-fan transition. *Science*, 245, 393–396.
- GARDNER, M., BORER, J., CARR, M., KLING, E., MELICK, J. & AMERMAN, R. 2005 Decade synthesis of a complete sandy deep-water system – Permian Brushy Canyon Formation – Delaware and Guadalupe mountains, West Texas. *Field Guide. Slope & Basin Consortium – Colorado School of Mines V 1-2*. 176 pp.
- GOVERS, G. 1990, Empirical relationships for the transport capacity of overland flow. IAHS publication 189, pp. 45-63
- HAMPTON, M.A., 1972 The role of subaqueous debris flows in generating turbidity currents. *Journal of Sedimentary Petrology* 42, 775–793.
- HAQ, B.U, HARDENBOL, J. & VAIL, P.R. 1987 Chronology of fluctuating sea level since the Triassic. *Science*, v. 235, p.1156-1167
- HARTLEY & D.J. PROSSER (Eds) *Characterization of Deep Marine Clastic Systems*. *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, 94, 31–49.
- HEEZEN, B.C. & EWING, M. 1955 Orleansville earthquake and turbidity currents. *AAPG Bull.*, 39, 2505–2514.
- KENYON, N.H, KLAUCKE, I., MILLINGTON, J. & IVANOV, M.K. 2002 Sandy submarine canyon-mouth lobes on the western margin of Corsica and Sardinia, Mediterranean Sea. *Marine Geology* 184, p 69-84.
- KNELLER, B.C. 1995 Beyond the turbidite paradigm: physical models for deposition of turbidites and their implications for reservoir prediction. In: A.J. KNELLER, B. & BUCKEE, C. 2000 The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological implications. *Sedimentology*, 47, 62–94.
- KUENEN, P.H. 1950 Turbidity currents of high density. 18<sup>th</sup> Intern. Geol. Congr. London, Reports, pt. 8, pp. 44-52.
- KUENEN, P.H. 1966 Experimental turbidite lamination in a circular flume. *The Journal of Geology* 74(5), 523-545.
- KUENEN, P.H. & MIGLIORINI, C.I. 1950 Turbidity currents as a cause of graded bedding. *Journal of Geology*, v. 58, no.2, 91-128.
- LAVAL, A.; CREMER, M.; BEGHIN, P.; RAVENE, C. 1988 Density surges: two-dimensional experiments. *Sedimentology* 35, 73-84.
- LEADER, M. 1999 *Sedimentology and Sedimentary Basins: From Turbulence to Tectonics*. Blackwell, Oxford.
- LIN, J. & LEBLOND, P.H. 1993 Numerical Modeling of an Underwater Bingham plastic Mudslide and the Waves Which it Generates. *Journal of Geophysical Research* v98 No C6, p 10303-10317.
- LOMAS, S.A. & JOSEPH, F. 2004 *Confined Turbidite Systems*. Geological Society, London, Special Publications, 222.
- LOWE, D. R. 1979 *Sediment Gravity Flows: Their Classification and Some Problems of Applications to Natural Flow Deposits*. SEPM Spec. Public. No 27, p. 75-82.

- LOWE, D. R. 1982. Sediment gravity flows: II. Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. Journal of Sedimentary Petrology, Tulsa, v.52, n.1, p. 279-297.
- LUTHI, S. 1980a Die Eigenschaften nichtkanalisierter Trubestrome: eine experimentelle Untersuchung. Eclogae Geol. Helv., 73, 881–904.
- LUTHI, S. 1980b Some New aspects of Two-dimensional Turbidity Currents. Sedimentology 28, p. 97-105.
- LUTHI, S. 1981. Experiments on non-channelized turbidity currents and their deposits. Marine Geology, Amsterdam. V.40, p. M<sub>59</sub>-M<sub>68</sub>.
- MAESTRI, R. D. 2003 Anotações do Curso de Reologia de Misturas. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MAESTRI, R. D. 2005 Uso de modelos físicos e a escolha de materiais granulares não coesivos para o estudo de modelagem física de correntes de densidade. Relatório Técnico. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 54p
- MANICA, R. 2002. Modelagem física de correntes de densidade não conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada, 161p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MENARD, H. W. & LUDWICK, J.C. 1951 Applications of Hydraulics to the Study of Marine Turbidity Currents. SEPM Spec. Public. No 2 p. 2-13
- MIDDLETON, G.V. 1966a Small-scale models of turbidity currents and the criterion for auto-suspension. Journal of Sedimentary Petrology 36 (1), 202-208.
- MIDDLETON, G.V. 1966b Experiments on density and turbidity currents I. Motion of the head. Canadian Journal of Earth Sciences 3, 523-546.
- MIDDLETON, G.V. 1967 Experiments on density and turbidity currents III. Deposition of sediment. Can. J. Earth Sci., 4, 475-505.
- MIDDLETON, G.V. 1993 Sediment deposition from turbidity currents. Annu. Rev. Earth Sci., 21, 89–114.
- MIDDLETON, G.V., HAMPTON, M.A., 1973. Sediment gravity flows: mechanics of flow and deposition. In: MIDDLETON, G.V., BOUMA, A.H. (Eds.), Turbidites and Deep-water Sedimentation. Pacific Section Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Los Angeles, pp. 1–38.
- MIDDLETON, G. V.; HAMPTON, M. A. 1976. Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity flows. In: Marine Sediment Transport and Environmental Management. New York, Wiley, p. 197-218.
- MIDDLETON, G. V.; SOUTHARD, J. B. 1984. Mechanics of sediment transport. 2ed. Tulsa: Society of economic Palaeontologists and Mineralogists 401p. (SEPM Short Course, v.3).
- MORAES, M.A. 2004 Viagem de campo aos afloramentos da Bacia do Karoo. Relatório Interno RT TRO 003/2004. Petrobras/CENPES/TRO. 59pp
- MOTTA, V. F. 1972. Curso de Teoria da Semelhança. Porto Alegre, Ed. UFRGS. 154p.
- MULDER, T.; ALEXANDER, J. 2001 The physical character of subaqueous sedimentary density currents and their deposits. Sedimentology 48, 269-299.

- MULDER, T., MIGEON, S., SAVOYE, B., FAUGERES, J.-C., 2001 Inversely graded turbidite sequences in the deep Mediterranean: a record of deposits from flood-generated turbidity currents? *Geo-Marine Letters* 21, p 86–93.
- MUTTI, E. 1985 Turbidite Systems and their relations to depositional sequences. In ZUFFA G.G. (ed.), *Provenance of Arenites*. NATO-ASI Series, Reidel Public. Co., p 65-93
- MUTTI, E. 1992 Turbidite sandstone. Agip – Instituto di Geologia Universit`a di Parma, Mil~ao. 275p
- 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).
- MUTTI, E., & RICCI LUCCHI, F. 1972, Le torbiditi dell'Apennino settentrionale: introduzione all'analisi di facies: Memorandum of the Geological Society, Italy, v. 11, p. 161–99. (1978 English translation by T. H Nilsen: *International Geological Review*, v. 20, p. 125–166).
- NORMARK W. R. 1970 Growth Patterns of Deep-sea Fans. *AAPG Bull n* 54, p. 2170-2195
- PALHARES JR, A. 1996 Correlações de detalhe na delimitação de reservatórios turbidíticos nos campos da porção sul do Paleocanion de Fazenda Cedro. *Boletim Interno - Petrobras/EP-ES/GERET* 74pp
- PARKER, G., FUKUSHIMA, Y. & PANTIN, H.M. (1986) Self accelerating turbidity currents. *J. Fluid Mech.*, 171, 145–181.
- PEAKALL, J., FELIX, M., MCCAFFREY, B. & KNELLER, B. 2001 Particulate gravity currents: perspectives. In: W.D. MCCAFFREY, B.C. KNELLER & J. PEAKALL (Ed.), *Particulate Gravity Currents*. IAS Spec. Publ., 31, 1–8.
- PIPER, D.J.W., SHOR, A.N. & HUGHES CLARKE, J.E. 1988 The 1929 \_Grand Banks\_ earthquake, slump, and turbidity current. In: . H.E. CLIFTON (Ed.) *Sedimentologic Consequences of Convulsive Geologic Events*, GSA Spec. Paper, 229, p 77–91.
- PIPER, D.J.W., COCHONAT, P. & MORRISON, M.L. 1999 The Sequence Of Events Around The Epicentre Of The 1929 Grand Banks Earthquake: Initiation Of Debris Flows And Turbidity Current Inferred From Sidescan Sonar. *Sedimentology*, 46, p 79–97.
- PIPER, D. J. W., HISCOTT, R. N., & NORMARK, W. R. 1999 Outcrop-Scale Acoustic Facies Analysis And The Latest Quaternary Development Of Hueneme And Dume Submarine Fans, Offshore California. *Sedimentology*, 46, p 47–78.
- POSAMENTIER, H.W., JERVEY, M.T. & VAIL, P.R. 1988 Eustatic Controls on Clastic Deposition I – Conceptual Framework. In WILGUS, C.K., HASTINGS, B.S., POSAMENTIER, H.W., VAN WAGONER, J., ROSS, C.A. & KENDALL C.G.S.C. (Ed.), *Sea Level Changes: An Integrated Approach*, SEPM Spec. Publ. No42, p 109-124.
- POSTMA, G.; NEMEC, W.; KLEINSPEHN, K.L. 1988 Large Floating Clasts In Turbidites: A Mechanism For Their Emplacement. *Sedimentary Geology* 58,p 47-61.
- PRATSON, L.F., IMRAN, J., PARKER, G., SYVITSKI, J.P.M. & HUTTON, E. 2000 Debris Flows Vs. Turbidity Currents: A Modeling Comparison Of Their Dynamics And Deposits. In BOUMA, A.H. and STONE C.G.: *Fine-Grained Turbidite Systems*, AAPG Mem., 72, p 57–72.
- SAVOYE, B., NELSON, H., UNTERSEH, S., PIPER, D., REHAULT, J.P. 1998 The Var Fan Distal Lobe (Ligurian Sea. Mediterranean): Sidescan Facies, Seismic Architecture, Nature Of Deposits. I.A.S. 15<sup>th</sup> International Sedimentoligical Congress, Alicante, avril 1998, Book of Abstracts, p. 701.

- SHANMUGAM, G. 2000. 50 years of the turbidite paradigm 1950s-1990s. Deep-water processes and facies models: a critical perspective. *Marine and Petroleum Geology*, Guilford, v.17. p.285-342.
- SHEPARD, F.P. 1961 Deep-sea Sands. 21<sup>st</sup> Internat. Geol. Congr. Repts., pt 23, p 26-42.
- SIMPSON, J.E. 1972 Effects of lower boundary on head of a gravity current. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge v.94 p. 447-495
- SIMPSON, J.E. 1997 *Gravity Currents in the Environment and the Laboratory*, Second Edition. Cambridge University Press, 244p.
- SIMPSON, J.E. & BRITTER, R.E. (1979) The Dynamics Of The Head Of A Gravity Current Advancing Over A Horizontal Surface. *J. Fluid Mech.*, 94, p 477-495.
- SMITH, D.P., RUIZ, G., RIKK, K. & IAMPIETRO, P.J. 2005 Semiannual patterns of erosion and position in upper Monterrey Canyon from serial multibeam bathymetry. *GSA Bulletin* v.117, no9/10, p 1123-1133
- STOW D.A.V. 1985 Deep-sea Clastics : Where Are We and Where Are We Going. In BRENCHLEY P.J. & WILLIAMS B.P.J (Ed.), *Sedimentology: Recent Developments and Applied Aspects*, Geol. Soc. London Spec. Publ., n18, p 76-93
- STOW, D.A.V.; READING, H.G.; COLLINSON, J.D. 1996 Deep seas. In: H. G. READING (ed.), *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*, 3<sup>rd</sup> Edition,
- SWIFT, D.J.P. & LUDWICCK, J.C 1976 Substrate response to hydraulic process: Grain-size frequency distributions and bed forms. In: *Marine Sediment Transport and Environmental Management*. New York, Wiley, p. 159-196.
- TINTERRI, R., DROGO, M., CONSONNI, A., DAVOLI, G. & MUTTI, E. 2003 Modelling Subaqueous Bipartite sediment Gravity Flows on the Basis of Outcrop Constraints: First Results. *Marine and Petroleum Geology*, 20, p 911-933.
- TORRI, D. & BORSELLI, L., 1991 Overland flow and soil erosion: some processes and their interactions. *Catena supplement* 19, pp. 129-137
- VAN WAGONER J.C., POSAMENTIER H.W., MITCHUM R.M.Jr, VAIL P.R., SARG J.F, LOUITT T.S. & HARDENBOL J. 1988 An Overview of the Fundamentals of Sequence Stratigraphy and Key Definitions. In WILGUS, C.K., HASTINGS, B.S., POSAMENTIER, H.W., VAN WAGONER, J., ROSS, C.A. & KENDALL C.G.S.C. (Ed.), *Sea Level Changes: an integrated approach*, SEPM Spec. Publ. No42, p 39-45.
- VIANA, A. R., & J. C. FAUGÈRES, 1998 Upper Slope Sand Deposits: The Example Of Campos Basin, A Latest Pleistocene/Holocene Record Of The Interaction Between Along And Across Slope Currents, in M. S. STOKER & D. EVANS, (ed) *Geological Processes On Continental Margins: Sedimentation, Mass-Wasting And Stability: Geological Society (London)*, no. 129, p. 287- 316.
- WAN, Z, & WANG, Z., 1994,. *Hyperconcentrated Flow*. IAHR Monograph Series, A. A. Balkema. Rotterdam 290p
- WALKER, R. G. 1978 Deep-Water Sandstone Facies And Ancient Submarine Fans: Models For Exploration For Stratigraphic Traps. *AAPG Bulletin*, 62, p 932-966.
- WYNN, R.B., MASSON, D.G., STOW D.A.V. & WEAVER P.P.E. 2000 Turbidity Current Sediment Waves on the Submarine Slopes of the Western Canary Islands. *Marine Geology* 163, p 185-198

WYNN, R.B, PIPER, DJW & GEE, M.J.R. 2002 Generation and migration of coarse-grained sediment waves in turbidity current channels and channel-lobe transition zones. *Marine Geology* 192, p 59-78.

WYNN R.B. & STOW D.A.V 2002 Classification and Characterisation of Deep-water Sediment Waves. *Marine Geology* 192, p7-22.

ZENG, J., LOWE, D.R., PRIOR, D.B., WISEMAN,W.J. & BORNHOLD, B.D. (1991) Flow properties of turbidity currents in Bute Inlet, British Columbia. *Sedimentology*, 38, p 975–996. 28.

ZENG, J. & LOWE, D.R. 1997 Numerical Simulation Of Turbidity Current Flow And Sedimentation: I. Theory. *Sedimentology* 44, 67-84.