

Pesquisas em Geociências

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias>

Modelagem Física de Correntes de Turbidez: Descrição do Processo e Implicações no Estudo dos Depósitos Turbidíticos

Rafael Manica, Rogerio Dornelles Maestri, Ana Luiza de Oliveira Borges

Pesquisas em Geociências, 33 (2): 19-33, maio/ago., 2007.

Versão online disponível em:

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/19510>

Publicado por

Instituto de Geociências



Portal de Periódicos UFRGS

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

Informações Adicionais

Email: pesquisas@ufrgs.br

Políticas: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/editorialPolicies#openAccessPolicy>

Submissão: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#onlineSubmissions>

Diretrizes: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#authorGuidelines>

Data de publicação - maio/ago., 2007.

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

Modelagem Física de Correntes de Turbidez: Descrição do Processo e Implicações no Estudo dos Depósitos Turbidíticos

RAFAEL MANICA, ROGERIO DORNELLES MAESTRI &
ANA LUIZA DE OLIVEIRA BORGES

Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS
Caixa Postal 15029 , Cep 91501-970, Porto Alegre, Brasil. rmanica@portoweb.com.br

(Recebido em 04/05. Aceito para publicação em 05/07)

Abstract - The turbidity currents are responsible for the formation of the major hydrocarbon reservoirs around the world; however the fundamentals of such currents, both in theory and practice, are still unexplored to exhaustion nowadays. The description of initialization, transportation and deposition mechanisms of this process is surrounded by uncertainty. These uncertainties had inspired the accomplishment of a three series of experiments, in order to investigate it using two different physical models. It were analyzed the geometrical, dynamical and depositional features of a turbidity current attempting to match the results of physical modeling to those found in natural outcrop. Granular materials are tested and grain size ranges for simulation are evaluated. Density currents with different densities, grain sizes, fluid injection rate and volume were generated. Therefore density current evolution, current velocity, geometric features, and bed forms were registered. The results show that velocity increases for larger current densities or smaller grain sizes and that the height of the current head increases when the current density decreases. The deposition volumes present a general tendency of exponential decline; the grain size range of the deposits decreases towards the distal portion of the channel. The results also show that advancing velocity and bed forms (it was observed the successive development of planar upper flow regime surfaces, low sinuous-ripples, middle sinuous-ripples, meandering channels and linear channels) depend basically of the flow oscillations identified in the fluid injection rate. The simulations presented intended to collaborate with the understanding of the natural phenomena, relating the current behaviour (flow parameters) with the generated deposit (turbidites), as well as indicated the applicability of physical modelling on the field of deep-water sedimentation and its reliability as a tool for hydrocarbon reservoir prediction.

Keywords - turbidity currents, physical simulation, turbidites.

INTRODUÇÃO

As correntes de turbidez podem ser definidas como o movimento relativo que ocorre entre camadas de fluido que possuem uma diferença de massa específica causada pela presença de partículas sólidas em suspensão. Na escala geológica de tempo estes fluxos são o principal mecanismo de dispersão de sedimentos nos ambientes de águas profundas (Kneller e Buckee, 2000; Baas *et al* 2004).

As correntes de turbidez são um dos principais mecanismos de formação dos sistemas deposicionais turbidíticos e, conseqüentemente, de rochas sedimentares. Estes sistemas, por sua vez, contêm os principais reservatórios de hidrocarbonetos sendo o principal alvo de interesse da indústria de petróleo. No Brasil, destacam-se os trabalhos de Bruhn e Moraes (1989), de caracterização dos turbiditos brasileiros através do estudo em afloramentos, apontando cinco tipos principais de reservatórios tur-

bidíticos e de Bruhn (1998) que demonstra que esses sistemas deposicionais representam quase 90% das reservas de petróleo brasileiro.

O estudo de correntes de densidade não conservativas, ainda hoje não é bem fundamentado, tanto na sua teoria, quanto na prática. A dificuldade encontrada pelos pesquisadores reside no monitoramento desses fenômenos em escala natural levando a uma série de incertezas quanto aos processos de iniciação, transporte e deposição destas correntes. Baas *et al.* (2004) comentaram que estas correntes são eventos raros e fortemente inacessíveis. Conseqüentemente, a sua dinâmica é menos compreendida do que a dinâmica de canais de superfície livre.

A dificuldade de ligar a dinâmica das correntes de turbidez com as características dos turbiditos garante o uso de métodos alternativos como simulação física em laboratório ou numérica. A simulação deste fenômeno em modelo reduzido, permite o total

controle nas condições de contorno dos ensaios e de seus resultados, mas que exige o conhecimento de leis de semelhança que permitam transferir os resultados do modelo para o protótipo (sistema real).

Middleton (1970) destacou que as vantagens da investigação experimental são que o processo pode ser diretamente observado e que as condições do experimento podem ser controladas diretamente pelo investigador, permitindo correlacionar as características da corrente com o depósito gerado. Kneller e Buckee (2000) complementam que a vantagem de utilizar modelos físicos é contrabalançada pela dificuldade apresentada por estas simplificações.

Na prática, o processo experimental necessita uma série de testes e adaptações para estabelecer as condições ideais de ensaios. Uma das principais tarefas é encontrar materiais capazes de reproduzir a carga de sedimentos em suspensão de maneira a que se consiga simular seu desenvolvimento e, principalmente, detectar seus padrões deposicionais. Esses materiais precisam ser escolhidos, de tal forma, que se estabeleça às condições de semelhança dinâmica entre os escoamentos, ou seja, que os sistemas simulados no modelo (laboratório) apresentem as mesmas distribuições de forças com o protótipo (sistema natureza) e que seus módulos sejam relacionados, por um fator de escala constante (Motta, 1972). Devido a isso, nem sempre o material utilizado em laboratório será o mesmo material presente nos processos naturais, o que não inviabiliza a simulação em si.

A partir do trabalho pioneiro de Kuenen e Migliorini (1950) que uniu os trabalhos de campo com os de laboratório, a busca pelo entendimento do processo responsável pela formação dos depósitos turbidíticos se intensificou. Muitos estudos voltaram-se ao entendimento dos processos de inicialização das correntes (Kuenen, 1951; Huppert e Simpson, 1980; Mulder *et al*, 2003), aos processos de transporte de sedimentos das correntes (Middleton, 1966., Simpson, 1972; Postma *et al*, 1988; Fabian, 2002; entre outros), além da busca pelo entendimento dos mecanismos de deposição e a formação de depósitos turbidíticos. (Kuenen e Migliorini, 1950; Bouma, 1962; Middleton, 1967; Lowe, 1982, Kneller, 1995; Mutti *et al*, 1999).

Apesar do grande avanço do desenvolvimento teórico/analítico dos fenômenos envolvidos no processo de formação, desenvolvimento e depósito dos fluxos de turbidez, muito pouco tem sido estudado, a nível nacional, com relação à simulação física deste tipo de escoamento.

Assim, esse trabalho visa propor a caracterização das correntes de turbidez através da modelagem física deste processo em dois modelos de escalas distintas. Pretende-se assim, contribuir para um melhor entendimento sobre os processos de iniciação, transporte e deposição de sedimentos, e conseqüentemente, da formação dos sistemas deposicionais turbidíticos.

Para tanto, foram realizadas três séries de ensaios. Num primeiro momento, buscou-se selecionar e simular diferentes materiais granulares, visando avaliar sua capacidade em simular as correntes de turbidez e seus depósitos. Num segundo momento, foi realizada uma nova série de ensaios com o intuito de analisar qual a variação no padrão de deposição, na geometria e na dinâmica destas correntes em função da variação de três parâmetros, como a massa específica da mistura, a faixa granulométrica e o material utilizado. Por fim, foi realizada uma terceira série de ensaios visando o estudo das condições iniciais de aporte de sedimentos (quantidade de sedimentos que provocou o fluxo e como foi sua distribuição no tempo) na formação dos padrões de deposição das correntes de turbidez.

Com estas simulações, espera-se colaborar para o entendimento dos fenômenos naturais, buscando relacionar a formação das correntes (causa) com o depósito gerado (conseqüência), além de contribuir para o estudo da modelagem física de correntes de turbidez no Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade (NECOD) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

APARATO EXPERIMENTAL

Para a realização dos objetivos foram utilizadas duas instalações experimentais do Necod, são elas:

Canal de Pequeno Porte

O canal de pequeno porte retangular foi construído em acrílico e possui as seguintes dimensões: 300 cm x 12,5 cm x 15 cm (Fig. 1). Numa das extremidades (300 cm) existe um compartimento de dispersão de material (25 cm x 15 cm x 30 cm) para evitar a reflexão da corrente. Sua inclinação pode ser ajustada sendo mantida horizontal nos experimentos. Para os ensaios por alimentação de fluxo contínuo, foi utilizado um sistema de

alimentação independente ao canal, com um reservatório de alimentação em forma de funil. Na saída desse, há uma tubulação com um registro que controla a vazão de entrada de material e um difusor no fim que distribui o fluxo lateralmente no canal.

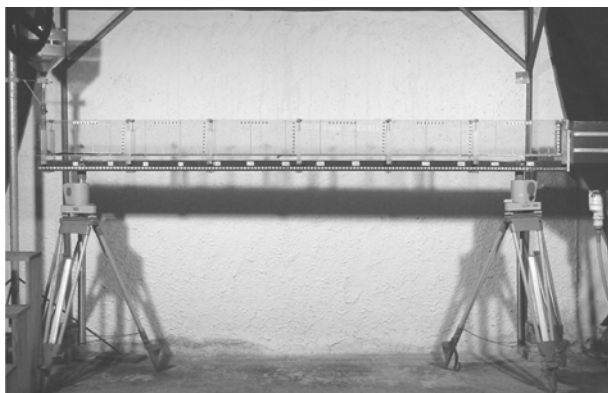


Figura 1 - Canal de pequeno porte .

Canal Tridimensional de Geometria Simplificada

O canal tridimensional de geometria simplificada foi construído em alvenaria e é composto de um canal retilíneo de 6,80 m x 0,97 m x 1,20 m, ligado a uma bacia de 7,00 m x 4,70 m x 1,20 m (Fig. 2). No seu interior, foi construído um cânion estilizado, caracterizado por uma calha parabólica de 6,00 m x 0,20 m x 0,08 m. 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 $8,3^\circ$ de 3,30 m e um seguimento final com 2,70 m e inclinação de $2,6^\circ$. A bacia tem o fundo plano. Dois reservatórios auxiliares, com capacidade de 2,0 m³ cada, eram responsáveis para armazenar a mistura a ser injetada



Figura 2 - Canal tridimensional de geometria simplificada.

no canal. Estes reservatórios estavam dispostos a uma altura de 4,0 m e possuía uma tubulação de saída ligada a um medidor de fluxo eletro-magnético até o canal principal. No seu interior, há um agitador eletro-mecânico, responsável pela homogeneização da mistura.

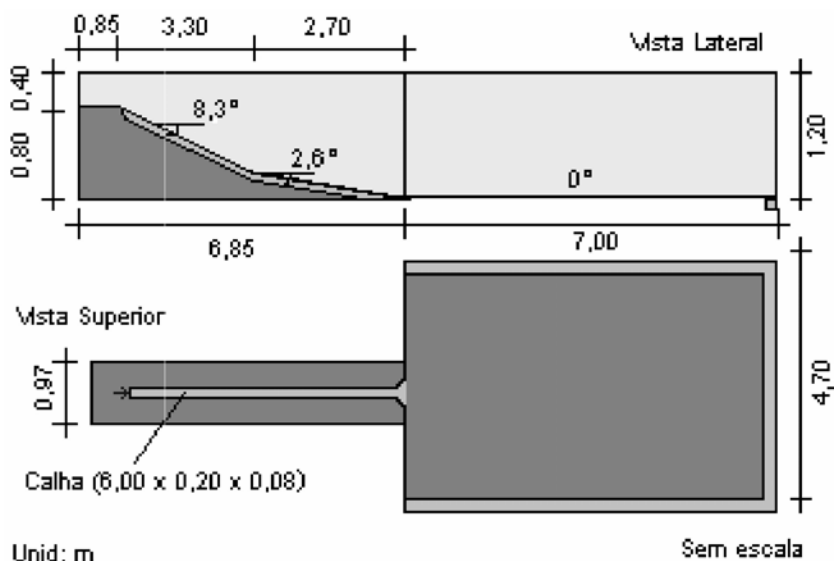
ENSAIOS E METODOLOGIA

Este trabalho foi dividido em três etapas de simulações cada uma abordando um aspecto específico a ser analisado. Nas duas primeiras etapas, foi utilizado o canal de pequeno porte e na terceira o canal tridimensional de geometria simplificada.

Primeira Série de Ensaios

Nesta primeira série de ensaios foram avaliados os materiais granulares utilizados nos ensaios de correntes de turbidez visando verificar quais deles eram capazes de formar as correntes, gerar seus depósitos e quais as faixas granulométricas que conseguiriam se desenvolver ao longo do comprimento do canal.

Para a avaliação do tipo de material granular a ser utilizado buscou-se procurar materiais distintos entre si, tanto no tamanho do grão quanto na massa específica, permitindo dessa forma, encontrar um material que apresentasse semelhança dinâmica com os materiais encontrados nos depósitos turbidíficos. Com base nisso, foram selecionados três tipos de materiais granulares comerciais de baixo custo: a areia quartzoza, o calcário dolomítico e o carvão mi-



neral. Outros materiais testados foram previamente descartados.

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

Foram considerados neste estudo seis ensaios, sendo três com o carvão mineral 207, dois com o calcário Dolomítico tipo B e um com a areia quartzosa, cujas características estão indicadas na tabela 1. Nesta primeira fase, o carvão 205 e calcário dolomítico tipo C não foram utilizados, pois os seus similares (carvão 207 e Calcário B) apresentavam condições mais extremas para a simulação. Nestes ensaios, a mistura (material + água) era colocada no reservatório de alimentação e agitada. Após a retirada de um pequeno tampão junto à região mais afilada do funil, a mistura entrava no canal formando a corrente de densidade. Este processo era filmado com a utilização de um vídeo-câmera digital. Após o ensaio, o canal era esvaziado lentamente visando não afetar o material que estava se depositando. Em seguida, com o canal completamente drenado, era realizada a amostragem do material depositado ao longo do comprimento do canal sendo para futura análise granulométrica.

Segunda Série de Ensaios

A segunda fase de ensaios visou avaliar a influência de três parâmetros envolvidos no processo nos padrões deposicionais, geométricos e dinâmicos

da corrente, são eles: a massa específica da mistura, a faixa granulométrica e o material utilizado. Para isso três tipos de materiais (carvão 205 e 207 e calcário C), com duas massas específicas da mistura (1010 e 1022 kg/m³) e duas composições granulométricas (0,297-0,125 mm e 0,125-0,053 mm) foram utilizados nas simulações (Tab. 2). Para cada grupo de ensaios foram realizadas duas repetições dos experimentos, totalizando 14 ensaios.

Os resultados foram determinados a partir da coleta do material depositado a cada 50 cm para a realização da análise quantitativa (granulometria e volume de depósito) e de técnicas de visualização (câmeras digitais) e tratamento de imagens, via métodos computacionais, dos ensaios para avaliação das características geométricas (altura da cabeça e do corpo) e dinâmicas da corrente (velocidade de avanço).

Terceira Série de Ensaios

Para a terceira fase do trabalho propôs-se avaliar qual a influência das condições iniciais (vazão e volume de mistura), na evolução/formação dos depósitos. Para isso, estabeleceram-se três simulações distintas: uma com uma vazão teoricamente baixa e um volume teoricamente baixo; outra com a mesma vazão baixa, mas um volume 2,5 vezes superior ao primeiro e; uma última com uma vazão e volume altos (2,5 vezes superior a primeira). Desta maneira, os resultados podem ser comparados relativamente. As características dos ensaios, desta fase, podem ser visualizadas na tabela 3.

A aquisição de resultados era realizada através de duas câmeras digitais, onde se estudava a geometria e a velocidade de avanço das correntes. Após as corridas, ao canal era esvaziado e o depósito resultante

Tabela 1 - Características dos materiais utilizados nas simulações.

Material	Diâmetro do grão ensaiado (mm)	Massa Específica (kg/m ³)
Carvão 207	Extensa (1,00 a 0,053)	1365,00
Calcário B	Extensa (0,250 a <0,063)	2823,90
Areia quartzosa	Extensa (0,500 a <0,063)	2650,00
Carvão 205	Extensa (1,00 a 0,053)	1190,00
Calcário C	Extensa (0,250 a <0,063)	2793,20

Tabela 2 - Características dos ensaios da segunda fase.

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

Tabela 3 -Características do ensaio da terceira fase.

Ensaio	Material Utilizado	Tamanho de grão (mm)	Massa Específica (kg/m ³)	Vazão (l/s)	Volume (l)
1				5,0	50
2	Carvão 205	0,300 – 0,053	1020,00	5,0	125
3				12,5	125

era analisado. Uma ponta linimétrica mecânica media a espessura dos depósitos em seções ao longo do canal e era realizado o registro fotográfico do depósito através do uso de uma câmera fotográfica digital. Após isso, amostras do material depositado eram recolhidas, também em seções conhecidas, para a determinação de sua granulometria.

RESULTADOS

Resultados dos Ensaios da Primeira Fase

Os resultados dos ensaios de simulação de correntes de turbidez foram obtidos após a avaliação das filmagens realizadas e das coletas do material depositado. Esta avaliação consistia na análise das características da corrente, desde a sua capacidade de formar a corrente, passando pela identificação de geometrias características (cabeça e corpo da corrente), e pela capacidade de formação de depósitos durante a realização dos ensaios. A figura 3 apresenta um exemplo da análise realizada através das filmagens, com a evolução de uma corrente formada com carvão 205 em duas posições distintas do canal (40 cm e 200 cm).

Nos seis ensaios realizados, houve a formação das correntes de densidades e de seus depósitos. A altura média da corrente foi estimada ficando em torno 8 cm para todos os materiais. As correntes percorreram todo o canal, atingindo a distância de 275 cm. Notou-se também que nas zonas mais proximais do canal há um acúmulo maior de sedimento depositado do que nas regiões mais distais.

Já a avaliação dos depósitos formados, foi realizada objetivando determinar quais as faixas gra-

nulométricas foram depositadas ao longo da extensão do canal, indicando assim, quais os tamanhos de grãos que possuíam capacidade de se manter no fluxo e atingir as zonas mais distantes da fonte de alimentação dos sedimentos (0 cm) do canal. Para tanto, foram coletadas três amostras do depósito ao longo o comprimento do canal para posterior à análise granulométrica. Uma amostra na zona proximal (até 50 cm da fonte), uma amostra na zona intermediária (entre 50 cm a 150 cm da fonte) e uma amostra na zona distal do canal (entre 150 cm a 275 cm da fonte). Estas amostras foram. A figura 4, mostra a porcentagem de material por faixa granulométrica para os ensaios com areia, carvão e calcário, respectivamente em diferentes zonas do canal.

Pela análise dos resultados expressados na figura 4, nota-se que na zona proximal do canal, os três materiais ensaiados apresentam uma distribuição granulométrica pobremente selecionada, com todos os tamanhos de grãos presentes no depósito. Porém, na zona intermediária, apenas o carvão mineral apresenta novamente essa tendencia de distribuição pobremente selecionada, enquanto que para a areia quartzosa e o calcário, apenas as frações menores (0.063 mm e <0.063 mm) conseguem atingir as zonas mais distantes da fonte de sedimentos. Já na zona distal do canal, os três materiais apresentam uma distribuição bem selecionada, com predominância das frações menores (90%) sem a presença significativa de sedimento mais grosso (>0.250 mm) no depósito. Através desta análise, pode-se concluir que, para a realização de correntes de turbidez com os materiais simulados, as frações maiores que 0.250 mm não são recomendadas a ser utilizadas pois não permitiram um estudo mais detalhado do fluxo e do

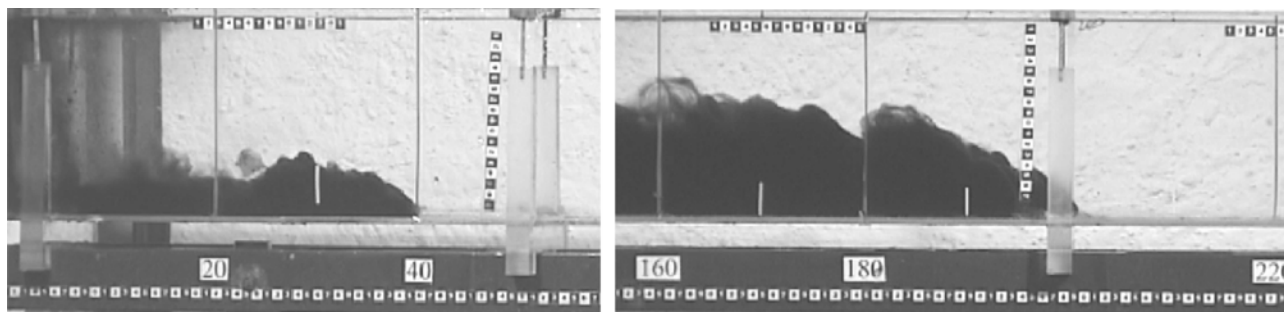


Figura 3 - Avaliação das características da corrente através do uso de video câmeras, mostrando a evolução da corrente de turbidez formada pela mistura de água e carvão 205 em duas posições do canal (a 40 cm e a 200 cm da fonte, respectivamente).

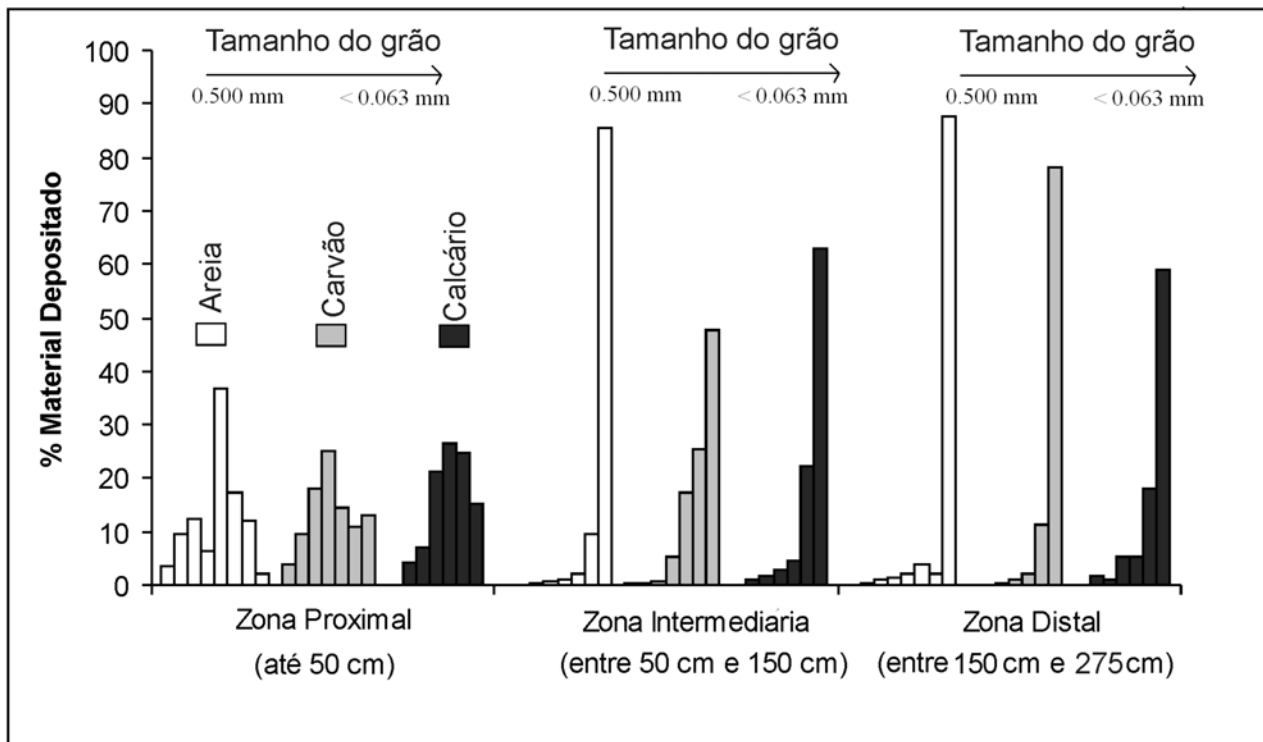


Figura 4 - Análises granulométricas dos depósitos gerados nas simulações ao longo do comprimento do canal para os três tipos de materiais utilizados.

seu depósito gerado, uma vez que, eles não atingem todas as zonas do canal (sua extensão), ficando depositadas junto a zona de alimentação de sedimentos. O mesmo não acontece para as frações menores (<0,088 mm), que aparecem ao longo de todo o depósito, indicando que estas frações são importantes na dinâmica da corrente.

Utilizando este critério de análise, ou seja, para garantir uma distribuição granulométrica na deposição ao longo de todo o canal, verifica-se quantitativamente que para a areia quartzosa, a faixa granulométrica de tamanho superior a 0,250 mm aparece em todos os segmentos do canal, porém nas duas últimas regiões do canal com quantidades abaixo de 1% em peso total da amostra. Nessas duas últimas regiões, aproximadamente 90% do material é composto pelas frações mais finas da areia, isto é, diâmetros inferiores a 0,063 mm. Sendo assim, analisando os dois extremos, a faixa granulométrica que deve ser utilizada para areia, nos ensaios por fluxo contínuo de material deve estar compreendida entre a passante na 0,177 mm até valores mais baixos que 0,063 mm. Com estes valores, fica garantido uma distribuição granulométrica na deposição ao longo de todo o canal.

Já para o carvão mineral, nas três zonas do depósito em que foram analisados os materiais, na primeira mais a montante (proximal), tem o predomí-

nio de faixas granulométricas entre 0,250 mm e 0,125 mm. Na zona intermediária, o material entre 0,088 mm e 0,063 mm foi o mais significativo, enquanto que na zona distal, o material passante na peneira mais fina <0,063 mm representou mais de 70% da amostra coletada, indicando que o tamanho do grão decresce com a distância. Sendo assim, a faixa granulométrica que deve ser utilizada para o carvão, nos ensaios por fluxo contínuo de material, deve estar compreendida entre a passante na 0,250 mm até valores abaixo 0,063 mm.

E, finalmente, para o calcário nota-se um comportamento muito similar ao apresentado pela areia. Nos experimentos, novamente, os diâmetros maiores do que 0,177 mm são encontrados somente na zona proximal do canal, enquanto que na segunda e terceira zonas a quantidade deste material fica reduzida a menos de 2% da amostra. Também nestes experimentos, a quantidade de material com diâmetro inferior a 0,063 mm é predominantemente significativa, na zona distal do canal, sobre as demais faixas granulométricas.

Resultados da Segunda Fase

A segunda fase de ensaios visou avaliar a influência da massa específica da mistura, faixa granulométrica e o material utilizado nas proprieda-

des da corrente de turbidez. Sendo assim, os ítems a seguir apresentarão estas análises, dividido-as com relação as suas características dinâmicas, geométricas e deposicionais.

Características Dinâmicas

As características dinâmicas das correntes de turbidez foram avaliadas através da velocidade de avanço da cabeça da corrente ao longo do canal. A figura 5a e 5b apresenta os resultados encontrados.

Pela figura 5a notamos que em todos os ensaios, a tendência da velocidade é a mesma, isto é, um decréscimo, tendendo a uma exponencial. Cabe salientar que os primeiros centímetros do canal, (0 – 25 cm), são caracterizados por uma zona de adaptação do fluxo, ou seja, de influência das condições de admissão da mistura e da quantidade de movimento do escoamento, as quais são controladas pelo registro que permite a entrada de material no canal.

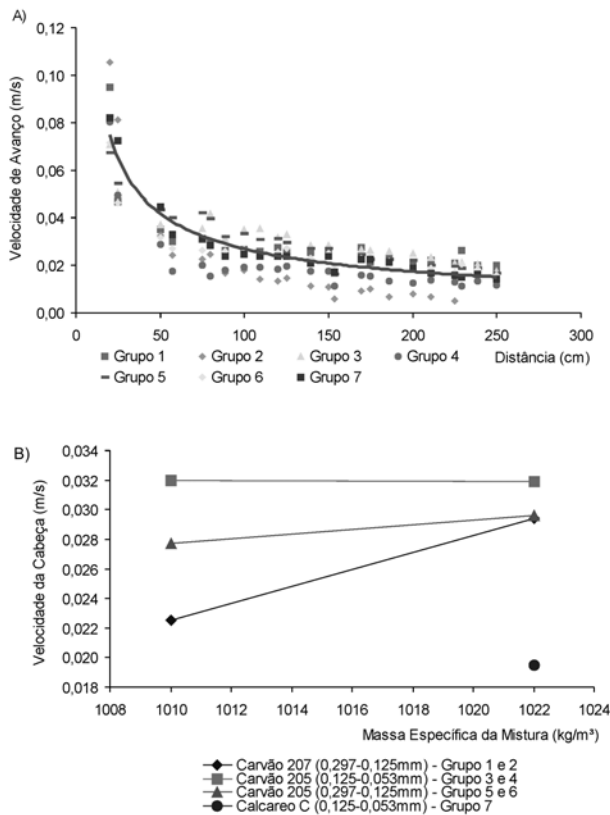


Figura 5 - a) Velocidade de avanço da cabeça para os sete grupos ensaiados (a linha indica a tendência média) e b) Correlação entre a massa específica da mistura e a velocidade média de avanço da cabeça.

Analisando a relação entre a velocidade de avanço da cabeça e a massa específica da mistura

(Fig. 5b), verifica-se que, para um mesmo material com a mesma granulometria, quanto maior a massa específica, maior é a velocidade. No caso do carvão 205 (0,125 – 0,053 mm) essa diferença foi pequena. Já para o mesmo material, porém com granulometria diferente (caso do carvão 205), o material com granulometria mais fina desenvolveu velocidade maior do que com granulometrias mais grossas, independentemente da massa específica da mistura. Neste último caso, a velocidade de queda das partículas influencia nessa velocidade, pois os grãos maiores tendem a se depositar primeiro, ocasionando perda da concentração durante a evolução da corrente e, com isso diminuição da velocidade da corrente.

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

Características Geométricas

Com relação às características geométricas das correntes de turbidez a figura 6a e 6b apresenta as alturas médias da cabeça e do corpo da corrente, respectivamente.

Com relação à altura da cabeça da corrente, pode-se notar na figura 6a, que excetuando o grupo 4, o comportamento das correntes foram muito similares, com crescimento na altura da cabeça até, aproximadamente, 125 cm e depois uma zona com alturas constantes até os 200 cm. Na zona distal (200-2 cm) há um decréscimo nos valores. A exceção ficou com o grupo 4 (carvão 205 de granulometria fina) que apresentou um comportamento da altura da cabeça diferenciado, com valores muito abaixo das outras correntes. Imprecisões na determinação da medida deste parâmetro podem ser uma das explicações para tal comportamento, uma vez que, as suas outras características (dinâmicas e deposicionais) são muito similares aos demais grupos que contêm este material (grupo 3, 5 e 6).

Já os valores da altura do corpo da corrente ao longo da distância (Fig. 6b), não apresentam um comportamento bem definido. Em alguns casos, essa altura diminui com a distância (grupos 1 e 2), enquanto que em outros ocorre um aumento até a metade do canal e uma diminuição no seu final (grupos 5, 6 e 7) e outros ainda, que se mantém quase constante com a distância (grupos 3 e 4). Os proces-

so hidrodinâmicos que ocorrem no interior da corrente, como o desprendimento de vórtices ao longo da interface e a formação de uma zona de mistura em todo o corpo, podem ser os fatores que influenciam nessa grande variação de valores da altura do corpo ao longo da distância (Fig. 7).

A figura 8a apresenta a correlação entre os valores médios da altura da cabeça da corrente com a massa específica da mistura. Nota-se numa análise isolada de cada material, que quanto menor a massa específica da mistura, maior é a altura da cabeça. Já comparando o mesmo material, porém com tamanhos de grãos diferentes (caso do carvão 205), nota-se, que independente da massa específica da

mistura utilizada, as correntes compostas por materiais com grãos mais grossos (grupos 5 e 6) possuem valores para a altura da cabeça maiores do que aqueles com grãos mais finos (grupos 3 e 4).

No caso para a correlação com os valores médios da altura do corpo e a massa específica da mistura (Fig. 8b), nota-se um comportamento um pouco diferenciado daquele observado para a altura da cabeça. Numa análise de cada material, isoladamente, foram notados dois comportamentos: para o carvão 207, com uma massa específica da mistura maior, houve a formação de corpo com altura maior; enquanto que para o carvão 205, foi ao contrário. Considerando a comparação entre o tama-

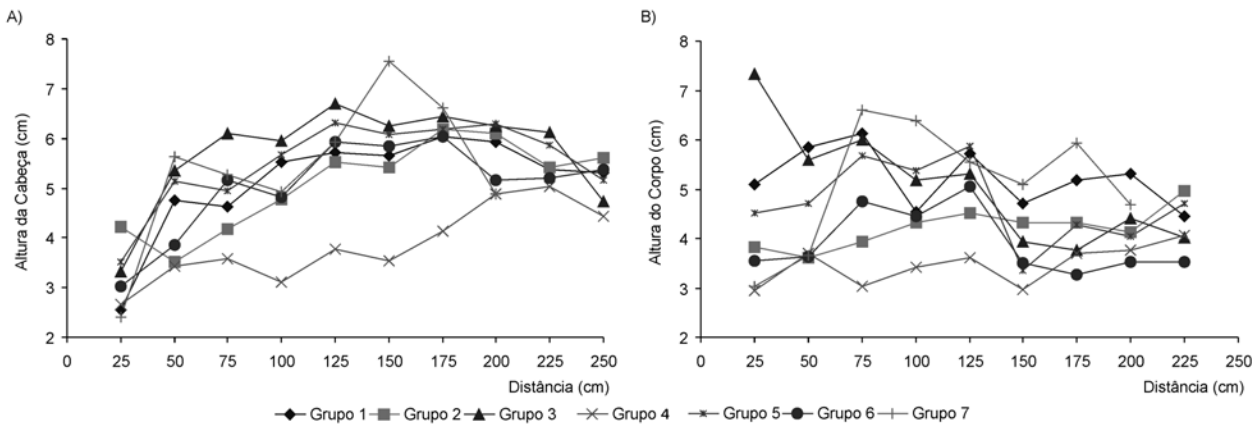


Figura 6 - Variação do parâmetro geométrico ao longo do comprimento. a) Altura da cabeça e b) Altura do corpo da corrente.

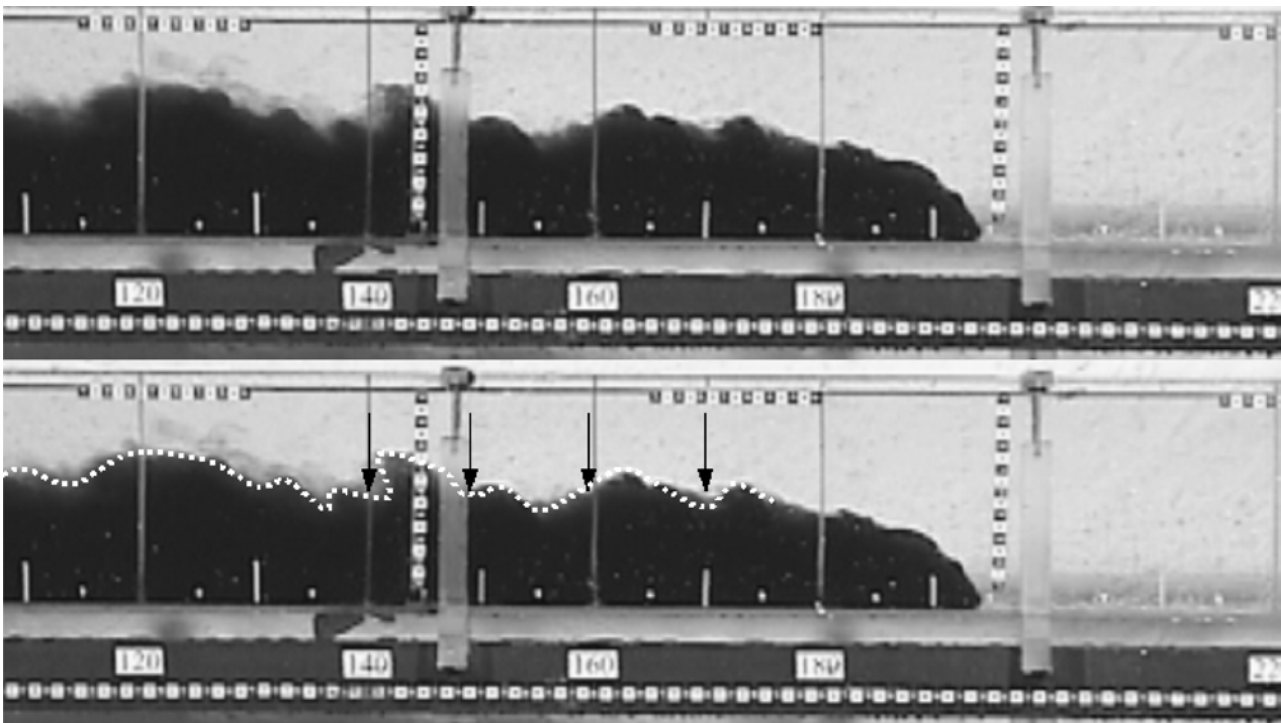


Figura 7 - Variações da altura do corpo ao longo do comprimento (linha tracejada) com a influência do desprendimento de vórtices nesta região (setas verticais).

nhos do grão com o mesmo material (carvão 205), os resultados não apresentaram a mesma tendência dos resultados da altura da cabeça.

Padrões Depositionais

A figura 9 apresenta uma imagem de um típico depósito gerado nas simulações. Em quase todos os grupos ensaiados o padrão de deposição apresentou a tendência de acúmulo de material (da ordem de 90%), nas regiões mais proximais do canal (0-50 cm) e uma distribuição delgada do depósito ao longo do seu comprimento até as regiões mais distais do canal. As únicas exceções foram os grupos 3 e 4 (carvão 205), que apresentaram um comportamento diferenciado, com os valores acumulados na zona proximal do canal em torno dos 65%, e depósitos mais espessos ao longo do restante do comprimento.

A distribuição dos diâmetros dos grãos presentes nos depósitos ao longo do canal, por faixas granulométricas, é apresentada na figura 10a, 10b e 10c.

Com relação à distribuição de grãos pertencentes à faixa da areia fina (Fig. 10a), os quatro grupos que possuem essas granulometrias (grupos 1, 2, 5 e 6), independente das condições de ensaio, apresentaram uma tendência única de depósito, ou seja, uma grande quantidade de material ficou acumulada nos primeiros 75 cm do canal. A partir deste ponto, a presença desta fração no depósito era insignificante.

A granulometria correspondente a areia muito fina – grupos 3, 4 e 7 - (Fig. 10b) apresentou dois comportamentos em função do material utilizado. Nos depósitos dos grupos 3 e 4 (carvão 205), essa fração predomina no depósito até os 175 cm de comprimento, o que representa mais da metade do canal, enquanto para o grupo 4 (calcário C) essa fração atinge apenas os primeiros 75 cm, apresentando um comportamento muito similar ao da fração areia fina. A diferença de massa específica entre esses materiais e, conseqüentemente, da velocidade de queda dos grãos explica essa grande diferença de comportamento.

Com relação à fração correspondente ao silte (Fig. 10c), o comportamento foi muito similar à da faixa de areia muito fina, porém com volumes de depósitos menores. Esta fração está presente ao longo de toda a extensão do canal.

Resultados da Terceira Fase

Os resultados da terceira segunda fase de ensaios serão divididos com relação ao parâmetro analisado.

Velocidade de Avanço

Considerando as características dinâmicas da corrente, ou seja, a velocidade de avanço da cabeça (Fig. 11), notou-se um comportamento geral tendendo de decaimento da velocidade (desaceleração) com algumas oscilações de alta frequência em

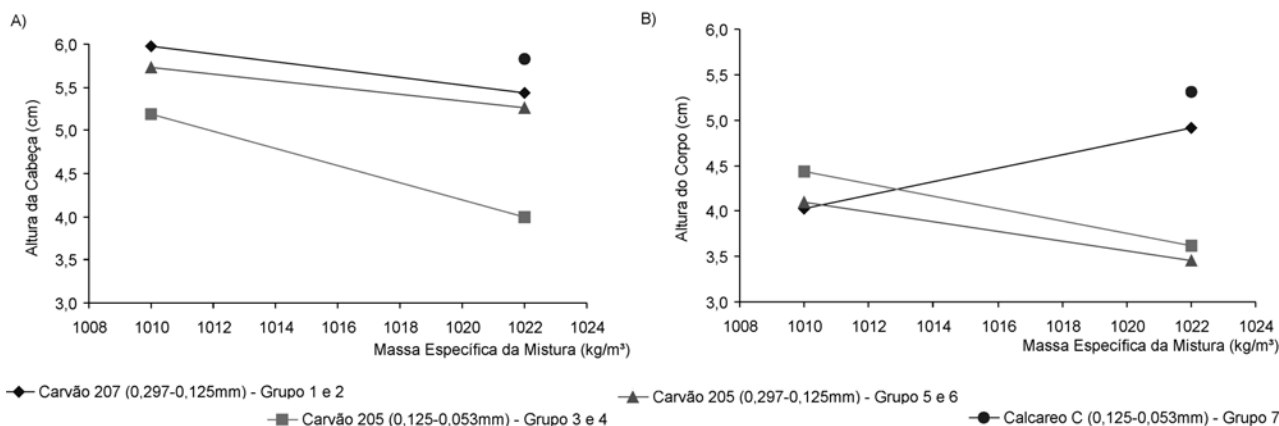


Figura 8 - Correlação entre a massa específica da mistura e a altura da: a) cabeça da corrente e b) do corpo.

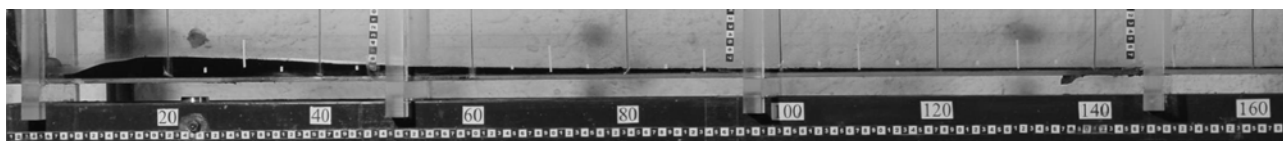


Figura 9 - Distribuição do depósito ao longo do comprimento.

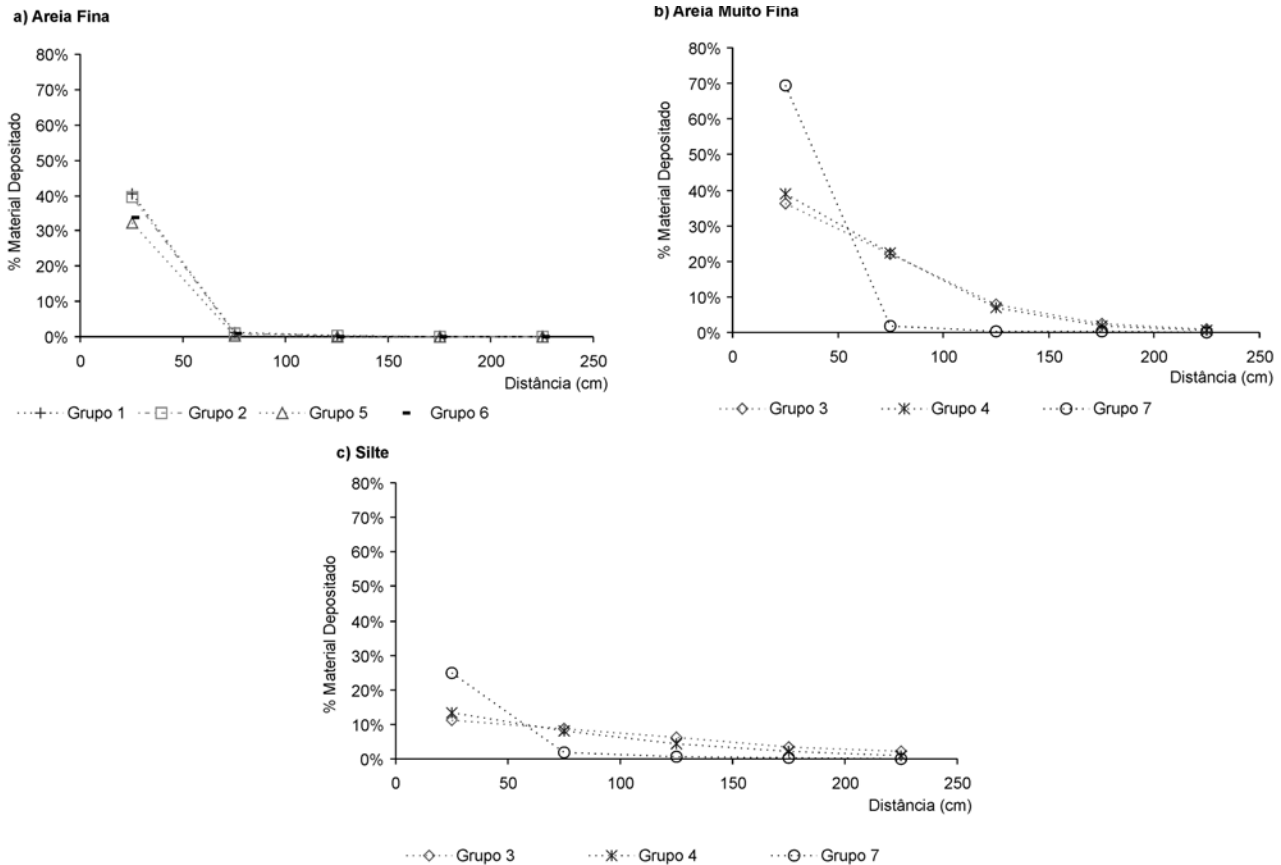


Figura 10 - Distribuição percentual ao longo do comprimento do canal dos grãos correspondentes a: a) areia fina; b) areia muito fina e c) silte.

torno de um valor médio. Essas oscilações podem estar atreladas ao desprendimento de vórtices atrás da cabeça, ou ainda, a perturbações internas na frente da corrente, provocadas pela turbulência do escoamento. De uma forma geral, notou-se uma mudança no formato da cabeça da corrente associada a estas acelerações e desacelerações (Fig. 12). Nos momentos onde há acelerações a cabeça assume uma forma mais alongada indicando a ação de fenômenos internos da corrente neste processo, conforme já foi notado em estudos de Kneller & Buckee (2000). A velocidade da corrente de turbidez, nos primeiros intervalos (0-75 cm) está sob a influência do jato hidrodinâmico que injetava a mistura no canal, assim os resultados desta região correspondem a uma situação particular que não foi considerada no trabalho, sendo apenas indicados os seus resultados. Não foram notadas modificações significativas nos valores da velocidade da cabeça, nas regiões de quebra de declividade e na saída da calha, onde o fluxo se torna não confinado. Cabe salientar que a discretização da velocidade foi realizada de 25 em 25 cm e algumas modificações podem não ter sido detectadas. Notou-se que o aumento da vazão em 2,5 vezes causou um aumento da velocidade média do

fluxo em 1,6 vezes.

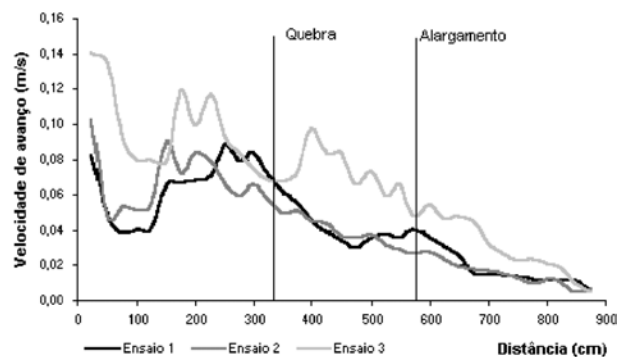


Figura 11 - Velocidade de avanço da corrente ao longo da distância.

Evolução da Corrente

A evolução da corrente (Fig.13) foi analisada através de imagens digitais do avanço do fluxo. Para baixas vazões (ensaio 1 e 2), o fluxo tende a ficar confinado na calha nas regiões mais proximais do canal. Ao atingir a primeira quebra de declividade (325 cm) o fluxo transbordou a calha, devido principalmente à modificação das condições de escoamento. Ao atingir a bacia o comportamento da corrente

evolui mais rapidamente na direção do fluxo do que na sua direção transversal, com as distâncias 2,4 vezes maior que a distância atingida lateralmente. A frente da corrente ficou mais achatada, não tendo um ponto mais frontal bem definido, concordante com os resultados descritos por Luthi (1981).

Ao aumentar a vazão (ensaio 3) nota-se uma diferença, pois logo nos primeiros intervalos de comprimento (225 cm), o fluxo não está mais confinado, permanecendo assim até a entrada na bacia. A partir daí, a frente da corrente apresenta uma região um pouco menos achatada evoluindo segundo uma forma aproximadamente circular e com uma relação de comprimento/largura da ordem de 2,0.

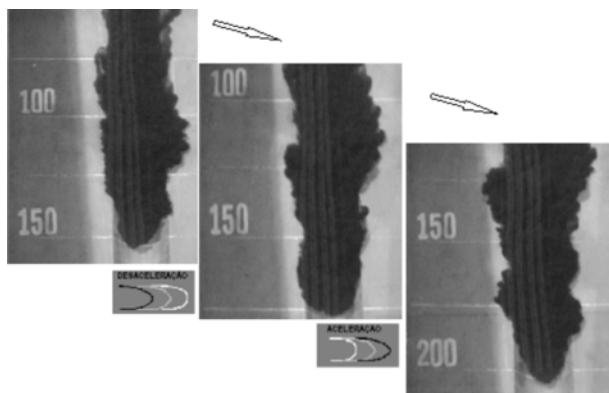


Figura 12 - Mudança no formato da cabeça da corrente de turbidez devido à desaceleração (mais achatada) e aceleração (mais alongada) do fluxo.

Padrões de Deposição

Analisando o padrão de deposição formado pela simulação das correntes, nota-se que, em rela-

ção às quantidades expressas pela espessura da corrente (Fig.14), temos um decréscimo tendendo a uma exponencial, isto é, com grandes quantidades de material acumulado (~85%) nas regiões mais proximais do canal. Este decaimento indica que a turbulência interna da corrente não é capaz de manter o sedimento em suspensão, isto foi notado nos três ensaios, independente do volume de material utilizado. A influência do volume, nesse caso, pode ser notada no terceiro ensaio, que apresentou a mesma tendência em forma exponencial, porém, com quantidades de material de depósito maior, em torno de quatro vezes a espessura dos outros ensaios.

As vazões maiores (ensaio 3) tendem a formar depósitos com variações menores da espessura ao longo do canal. Verifica-se, também que o aumento da vazão trasladou o pico de deposição no sentido de deslocamento da corrente. Nesses casos, os depósitos só começam a se desenvolver quando a corrente sofreu uma forte desaceleração. Nestes resultados, podemos observar que a vazão da corrente de densidade influencia na disposição dos grãos no canal, uma vez que com vazões baixas (ensaios 1 e 2), os grãos não atingiram distâncias muito longas. Já quando a vazão foi aumentada (ensaio 3), a competência do escoamento em transportar os grãos aumentou, permitindo uma melhor distribuição ao longo do canal.

Numa análise qualitativa através da distribuição granulométrica ao longo da distância (Fig. 15a, 15b, e 15c), notou-se que a vazão influencia o comportamento dos grãos. Com baixas vazões (ensaios 1 e 2), a fração areia fina (15a), tende a se depositar nas regiões mais proximais do canal, en-

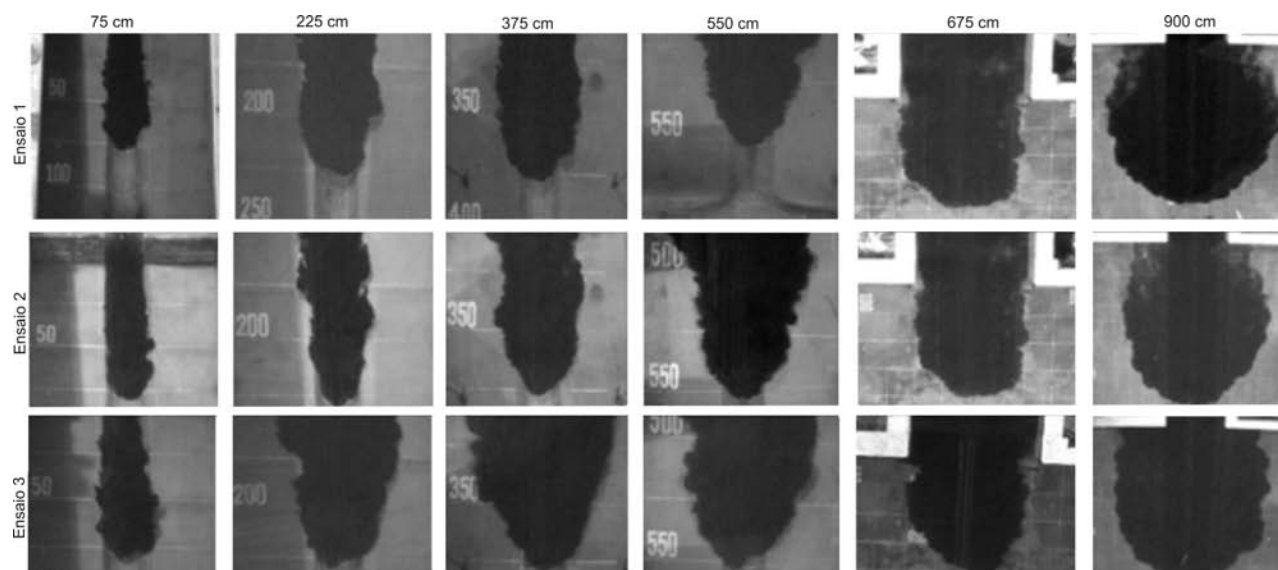


Figura 13 - Evolução da frente da corrente de turbidez nos três ensaios.

enquanto que para a fração areia muito fina (15b), o comportamento é diferente, apresentando uma maior concentração de grãos nas zonas intermediárias do canal. Já a fração silte (15c), começa a predominar apenas nos trechos mais distais do canal. Com o aumento da vazão (ensaio 3) a fração areia fina tem maior capacidade de se manter mais no fluxo, chegando a distâncias maiores, o mesmo ocorrendo para as outras frações.

Isso vem a contribuir para a hipótese de que a vazão controla o transporte dos grãos e, portanto, a variação da sua granulometria ao longo do canal. Na quebra de declividade, ocorre uma alteração no comportamento do depósito com alteração nas proporções da fração silte e areia muito fina. Os resultados desses poucos ensaios são importantes, visto que a avaliação do tamanho de grãos e a distribuição das frações ao longo da distância podem ser perfeitemen

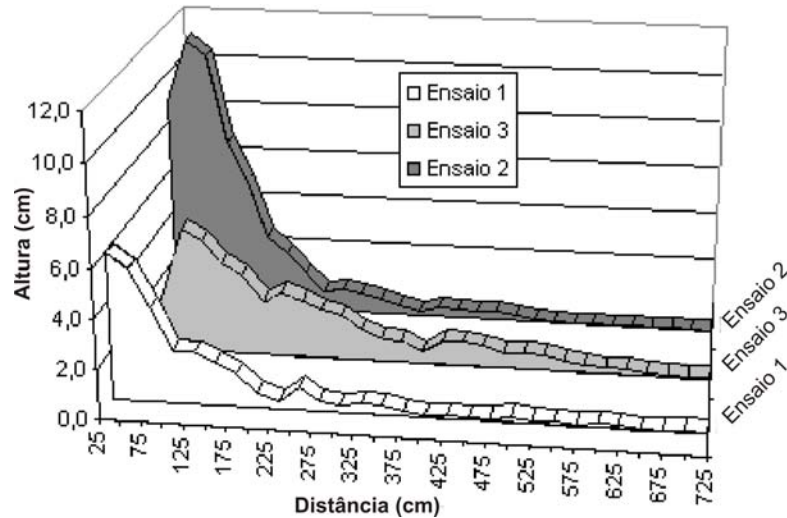


Figura 14 - Espessuras do depósito formado nos ensaios da terceira fase.

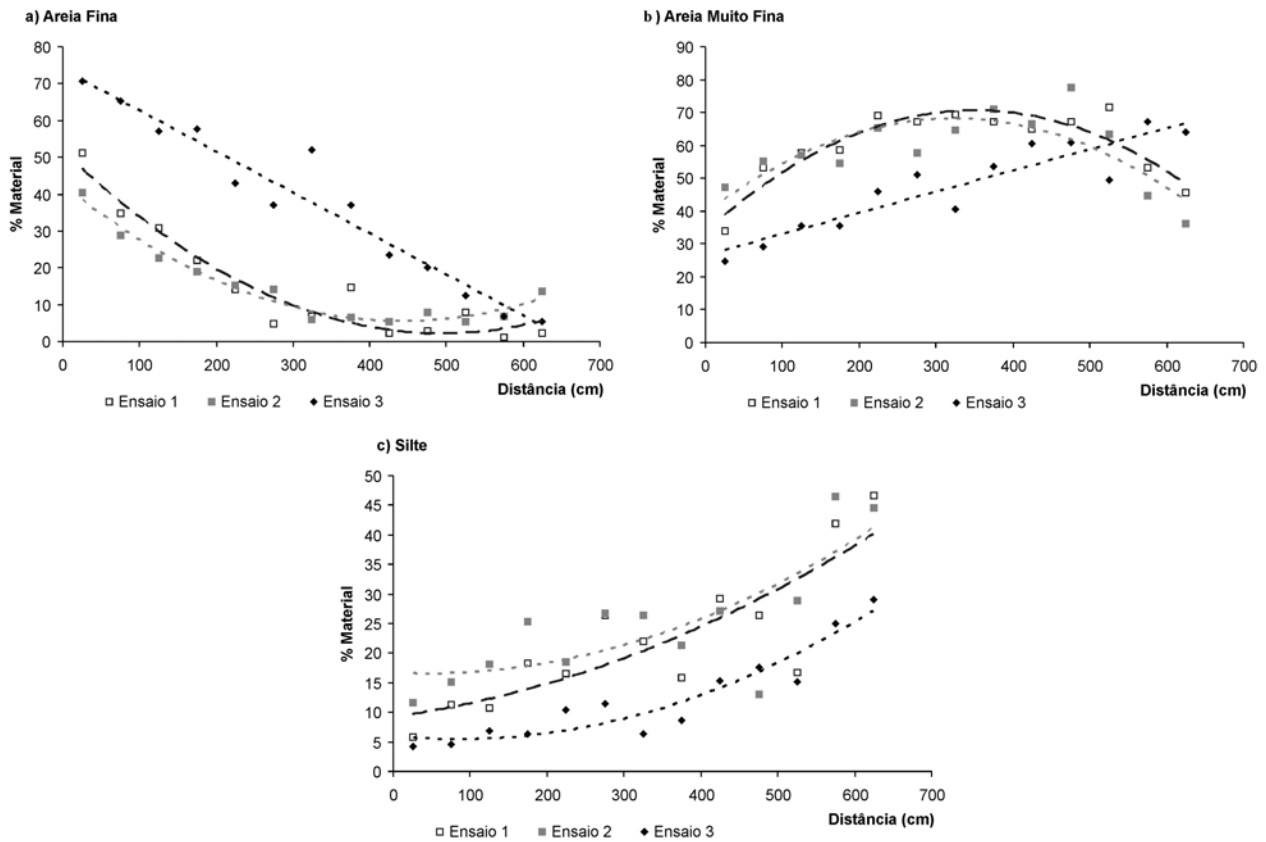


Figura 15 - Tendência do comportamento das frações correspondentes: a) areia fina; b) areia muito fina e c) silte.

te realizadas na prática, através de testemunhos de sondagens, sísmicas, etc.

Formas de Fundo

As figuras 16a, 16b e 16c apresentam as imagens dos depósitos realçando as formas de fundo geradas nos depósitos. As formas de fundo são geradas devido a interação do sedimento suspensos na corrente com os sedimentos presentes no fundo, apresentando características específicas tanto na superfície, quanto no arranjo interno. As formas de leito variam principalmente com as características cinemáticas do fluxo. De uma maneira geral, existem seis grandes grupos de formas de leito, para fluxos unidimensionais, são eles: depósito leito plano (inferior); ripples; dunas; leito plano (superior) e; anti dunas. Dentro de cada grupo existem ainda sub-classificações que variam de acordo com as propriedades do fluxo e sedimento. Nos experimentos realizados, de um modo geral, notamos novamente a semelhança entre os dois primeiros ensaios, que apresentaram formas de leito parecidas. Estas formas são intimamente ligadas a velocidade da corrente. Como nos dois primeiros ensaios, as velocidades médias foram similares, era esperado o mesmo comportamento no depósito. No terceiro ensaio, as formas de fundo foram mais definidas, com ondulações mais visíveis. A tabela 4 resume genericamente as formas de fundo encontradas em cada trecho do canal.

Pela análise da figura 16 e da tabela 4 notamos que na zona proximal do canal, as formas de leito são planas, sem marcas e estão associadas aos depósitos mais espessos e com relevo suave (zona de jato de entrada de material). Seguindo no sentido de deslocamento da corrente (a partir de 50 cm), onde são formados os depósitos mais espessos, são identificadas marcas onduladas de corrente de crista retilínea alternando com marcas de ondulações de crista sinuosa (ensaios 1 e 3). Sendo essa variação possível pela variação de velocidade da corrente. Nota-se ainda nestes dois ensaios, que o fluxo é meandrante (linha branca na figura), cujo eixo flutua entre as bordas da calha. No ensaio 2, notamos somente a presença de marcas de ondulações de crista reta. Neste ensaio, a variação de velocidades,

ao longo do ensaio, foi diferenciada, devido a acumulação de muito material junto a fonte, explicando assim, a presença de poucas marcas ao longo do depósito. Nas zonas mais distais do canal (a partir de 325 cm), quando as forças inerciais começam a entrar em equilíbrio com as forças gravitacionais inicia-se a formação de depósitos mais delgados. Esta região apresenta nitidamente, um fundo mais plano sem muitas deformações, notando-se apenas algumas marcas junto aos taludes. Nos ensaios 1 e 2, a zona não-confinada não apresenta depósitos significativos. Já no ensaio 3, verifica-se quatro marcas de ondulações com forma de um pequeno leque deposicional.

IMPLICAÇÕES DOS RESULTADOS NO ESTUDO DOS TURBIDITOS

Através da simulação física é possível inferir e avaliar as diversas características de um determinado fenômeno, sob condições controladas. As simulações apresentadas neste trabalho reportaram isso, na busca do entendimento do complexo fenômeno natural que são as correntes de turbidez.

Baas *et al.* (2004) comentaram que nos turbiditos gerados em laboratório, frequentemente faltam as estruturas sedimentares (estratificações) presentes na natureza e levanta algumas razões possíveis para isso, como por exemplo, o curto tempo dos experimentos.

O registro destas formas de leito, na porção confinada do canal (calha), nos dá uma indicação de que muitas estruturas de tração que desenvolvem estratificação podem estar sendo desprezadas ou pouco evidenciadas em corpos arenosos espessos. Associado a isso, o acúmulo de material nessas regiões indicam ser possível o preenchimento dos cânions marinhos por espessos pacotes arenosos, principalmente nas zonas mais próximas a área fonte de sedimentos.

Os experimentos realizados neste trabalho buscaram simular um evento não catastrófico, ou seja, com uma alimentação contínua ao longo de um determinado tempo (p.ex. uma desembocadura de rios num ambiente marinho). A partir daí, nota-se que há uma tendência de formação de depósitos

Tabela 4 -Resumo das formas de fundo encontradas nos depósitos.

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

mais distribuídos ao longo da distância, devido a essa permanência do fluxo, com as partículas mais grossas mais próximas a área fonte (talude e quebra de declividade) e as mais finas distribuídas até as zonas mais distais (lobos deposicionais).

A utilização de sedimentos com uma massa específica, menor que o material presente na natureza, na segunda e terceira séries de ensaio, se justifica pela redução de escala geométrica impostas nas simulações em laboratório. Se fosse utilizado o mesmo material, no caso, silicatos com massa específica próxima a $2,65 \text{ g/cm}^3$, as frações reduzidas em escala teriam que ser da faixa do silte e argila. Middleton (1967) comenta que para estudar os processos de deposição em laboratório é necessário utilizar sedimentos relativamente grossos, pois o comportamento das partículas finas (argilas) é fortemente influenciado: pelo seu pequeno tamanho em relação a espessura da camada limite laminar; pelas suas propriedades de coesão e por apresentar forças eletrostáticas entre os grãos. Com o uso do carvão mineral, para as condições existentes no Necod, esse fator foi minimizado, pois permitiu que uma ampla faixa de tamanhos de grãos estivesse presente na mistura, representando uma granulometria extensa e mais próxima do processo real.

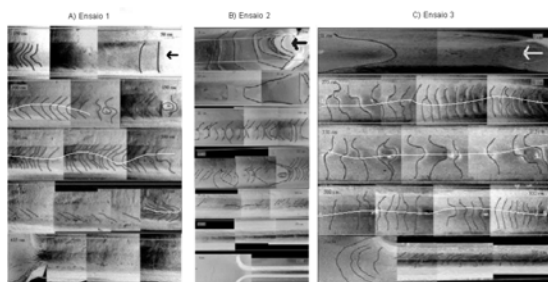


Figura 16 - Formas de leito geradas no depósito (leitura de cima para baixo da direita para esquerda). As setas indicam o sentido do fluxo e a linha branca a tendência ao meandramento dentro da calha.

Os resultados apresentados mostram também, que a distância percorrida pela corrente de densidade também depende da massa específica do material utilizado e, conseqüentemente, de sua velocidade de queda, mas como na natureza os sedimentos presentes nas correntes de densidade são praticamente sempre os mesmos (silicatos), a comparação com turbiditos naturais não precisa levar em conta esta variável. Isso, porém, não invalida a experimentação com estes tipos de materiais, bem como quer dizer que os ensaios em laboratório devam ser feitos com o mesmo material encontrado na natureza, uma vez que, os critérios de semelhança (efeitos de escala) devem ser levados em conta nas simulações.

As simulações também indicam que parâmetros de difícil monitoramento na natureza, como a tendência do comportamento das características geométricas da corrente (altura da cabeça e corpo) pode ser inferida através dos experimentos, auxiliando no entendimento das características geométricas dos depósitos sedimentares e seu comportamento ao longo de uma determinada área. Nestes ensaios, correlacionando-se a altura da cabeça com a velocidade e a distância a fonte, verifica-se que nas regiões em que a velocidade é maior (próximo à fonte) a altura da cabeça é menor. À medida que a cabeça vai aumentando de tamanho, a velocidade vai diminuindo e a resistência do fluido ambiente aumenta. No final, quando a maioria do material já se depositou, a velocidade decai bastante e altura da cabeça diminui. Com estes resultados pode-se destacar uma correlação inversa com a velocidade do fluxo, indicando que as maiores alturas da cabeça estão nas correntes que apresentam as menores velocidades.

CONCLUSÕES

Com a realização das três fases de simulação física realizadas no NECOD, podemos concluir que:

Os experimentos demonstraram que os materiais granulares comerciais de baixo custo utilizados nos ensaios reproduziram, em escala de laboratório, as correntes de turbidez. Desta forma, dependendo da escala adotada para a simulação e o objetivo do parâmetro a ser estudado na modelagem física, cada um deles pode ser utilizado para a reprodução de depósitos turbidíticos análogos.

Quanto às características dinâmicas, as velocidades médias de avanço das correntes, indicaram uma correlação com a massa específica da mistura e com a densidade do material utilizado. Pode-se dizer que a concentração da mistura, também, possui uma correlação com a velocidade de avanço, devido a sua dependência com a densidade do material.

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

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

resultados apresentados não indicaram uma correlação forte.

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

Independente das características particulares de cada um dos ensaios, as frações maiores (correspondentes a areia fina) ficam retidas nas zonas mais proximais do canal (até 50 cm), as frações intermediárias (correspondentes a areia muito fina) conseguem atingir distâncias um pouco mais longas (150 cm) e com os grãos mais finos chegam até as regiões mais distais do canal (150-275 cm).

O estudo comparativo de vazões e volumes permitiu avaliar a influência de cada variável sobre as características dos fluxos gravitacionais. Os resultados dos ensaios indicam que a velocidade de avanço, espessuras, formas de fundo e distribuição granulométricas do material estão intimamente mais ligada à vazão de entrada, enquanto que o volume de material injetado é responsável apenas pela magnitude dessas variações. Pode-se concluir nesta etapa que nos três ensaios não foi verificado uma mudança substancial no comportamento da velocidade da corrente após mudança da região confinada para a região não confinada do canal. A tendência da velocidade manteve-se nesta região. O mesmo se dá na quebra de declividade (325 cm), onde nos dois primeiros ensaios a velocidade seguiu o mesmo comportamento anterior à quebra, e, no terceiro ensaio, houve uma ligeira acelerada da corrente.

O uso de modelagem física em canal de geometria simplificada se mostrou eficiente no estudo dos depósitos turbidíticos, reproduzindo estruturas e condições encontradas no ambiente natural, auxiliando no entendimento destes fluxos através da

correlação causa (aporte de sedimentos) com a consequência (depósitos).

REFERÊNCIAS

- Bass, 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.
- Bruhn, C. H. L. 1998. Deep-water reservoirs from the eastern Brazilian rift and passive margin basins. In: AAPG International Conference & Exhibition, 1998, Rio de Janeiro. **Extended abstracts**. Rio de Janeiro: Exxon Exploration. Brasil. Part. 2. 187p.
- Bruhn, C. H. L e Moraes, M. A. S. 1989 Turbiditos da Formação Urucutuca na Bacia de Almada, Bahia: um laboratório de campo para estudo de reservatórios canalizados. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, **3**: 235-267.
- Bouma, A. H. 1962. **Sedimentology of some flysch deposits: a graphic approach to facies interpretation**. Amsterdam: Elsevier, 168p.
- Fabian, S. 2002. **Modelagem física de correntes de densidade em canal bidimensional de declividade variável**. Porto Alegre. 130p. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Huppert, H. E.; Simpson, J. E. 1980. The slumping of gravity currents. **Journal of Fluid Mechanics**, **99** (4): 785-799.
- Kneller, B. 1995. Beyond the turbidite paradigm: physical models for deposition of turbidites and their implications for reservoir prediction. In: A.J. Hartley & D.J. Prosser (Eds.) **Characterization of deep marine clastic systems**. London, The Geological Society, Special Publication, p. 31-49.
- 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**, (1): 62-94.
- Kuenen, P. H. 1951. **Properties of turbidity currents of high density**. Tulsa: Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, p. 1-14. Special Publication. n.2.
- 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**, **52** (1): 279-297.
- Luthi, S. 1981. Experiments on non-channelized turbidity currents and their deposits. **Marine Geology**, **40**: M59-M68.
- Middleton, G. V. 1966. 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. **Canadian Journal of Earth Sciences**, **4**: 475-505
- Mulder, T., Syvitski, J. P. M., Migeon, S., Faugères, J. C. Savoye, B. 2003. Marine Hyperpycnal flows: initiation, behavior and related deposits. A review, **Marine and Petroleum Geology**, **20**: 861-882.
- Mutti, E.; Tinterri, R.; Remancha, E.; Mavilla, N. Angella, S.; Favali, L. 1999. **An introduction to the analysis of ancient turbidite basins from an outcrop perspective**. Tulsa: AAPG 86p. (AAPG Course Notes, 39).
- Postma, G.; Nemecek, W.; Kleinspehn, K.L. 1988 Large floating clasts in turbidites: a mechanism for their emplacement. **Sedimentary Geology**, **58**: 47-61.
- Simpson, E. J. 1972. Effects of the lower boundary on the head of a gravity current. **Journal of Fluid Mechanics**, **53**: 759-768.
- Simpson, E. J. 1997. **Gravity currents in the environment and the laboratory**. 2nd ed. Cambridge University, 244p.

