

Influência do mecanismo de iniciação na dinâmica dos fluxos e na geometria dos depósitos gerados: observações obtidas a partir de estudo experimental de correntes de densidade não-conservativas

The impact of triggering mechanism on flow dynamics and depositional geometry: results from an experimental study of non-conservative density currents

Rafael Manica | Antônio Cosme Del Rey | Rogério Dornelles Maestri |
Ana Luiza de Oliveira Borges | Adriano Roessler Viana

resumo

A partir de 28 simulações experimentais de correntes de densidade não-conservativas realizadas no Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade (NECOD), no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS, buscou-se avaliar os padrões de deposição gerados em duas condições distintas de iniciação da corrente: volume inicial fixo (alimentação instantânea por pulso) e volume variável (fluxo contínuo). Foi igualmente alvo de interesse verificar a influência da massa específica da mistura, do tipo de material e do diâmetro dos grãos no depósito gerado. Também foram avaliadas as características dinâmicas (velocidades de avanço) e geométricas (altura da cabeça e do corpo) da corrente para cada tipo de mecanismo de iniciação. A partir do tratamento e análise de imagens via computador e da coleta e análise granulométrica do material depositado, observou-se que: a velocidade

da corrente aumenta à medida que a massa específica/concentração da mistura aumenta; a distribuição dos volumes de depósitos apresentou uma tendência geral de decaimento exponencial com a distância; a distribuição dos grãos indica uma segregação dos sedimentos, ao longo do comprimento, estando as frações maiores (correspondentes à areia fina), presentes nas zonas mais proximais do canal e com os grãos mais finos chegando até às regiões mais distais. Os resultados apresentados nas simulações mostram a eficiência da modelagem física no estudo dos depósitos turbidíticos, permitindo uma primeira comparação entre diferentes mecanismos de mobilização de sedimentos (causa) com os resultados (conseqüência).

(originais recebidos em 01.03.2005)

Palavras-chave: mecanismo de iniciação | correntes de turbidez | modelagem física | turbiditos

abstract

This study presents 28 physical simulations of non-conservative density currents used to evaluate their depositional patterns. Two different triggering mechanisms were used: lock gate and fluid injection. The impact of specific gravity, material type and grain size on the mixture were also checked. Dynamic and geometric features, such as head velocity and head/body height, were recorded. Results show flow velocity increase as concentration grows; deposition volumes present a general tendency to exponential decline with distance; the grain size range of the deposits decreases towards the distal portion of the channel. The results obtained have showed the efficiency of physical modeling in the study of turbidites in allowing correlations to be defined between currents and deposition patterns.

(expanded abstract available at the end of the paper)

Keywords: *triggering mechanism | turbidity current | physical modeling | turbidites*

introdução

Na escala geológica de tempo as correntes de densidade não-conservativas são o principal mecanismo de dispersão de sedimentos nos ambientes de águas profundas (Kneller e Buckee, 2000; Baas *et al.* 2004). Apesar da sua importância, este fenômeno ainda hoje não é bem fundamentado, tanto no que se refere à sua dinâmica interna quanto aos mecanismos de iniciação, deslocamento e deposição do material que se encontra em suspensão. O monitoramento destes processos em escala natural, por se tratar de eventos altamente imprevisíveis e com alto poder destrutivo, apresenta inúmeras dificuldades. Conseqüentemente, a sua dinâmica é menos compreendida do que a dinâmica sedimentar em ambientes subaéreos.

No registro geológico, os sistemas deposicionais turbidíticos são resultado da sedimentação dos materiais erodidos e transportados por correntes de densidade não-conservativas em águas oceânicas profundas durante milhares de anos.

Devido a suas grandes dimensões e características permoporosas de suas rochas, estes sistemas compõem um dos principais tipos de reservatórios de hidrocarbonetos que ocorrem em bacias sedimentares e, atualmente, têm sido o mais importante alvo da indústria de petróleo. Shanmugam (2002) apresenta a polêmica em torno das propriedades hidrodinâmicas das correntes de turbidez e seus depósitos e destaca que o centro das controvérsias reside nos inúmeros desacordos quanto aos mecanismos que regem o transporte e os processos de sedimentação.

O conhecimento presente na dinâmica do fluxo tem sido desenvolvido a partir de estudos detalhados de fácies turbidíticas realizados desde os trabalhos pioneiros de Kuenen e Migliorini (1950). Porém, a dificuldade de ligar a dinâmica das correntes de turbidez com as características dos depósitos turbidíticos em escala natural tem indicado a utilização de métodos alternativos de estudo como simulação física ou numérica. A simulação física deste fenômeno, em modelo reduzido, permite o total controle nas condições de contorno dos ensaios e de seus resultados, mas exige o conhecimento de leis de semelhança que permitam transferir os resultados do modelo para o protótipo.

Middleton (1970) destaca como uma das vantagens da investigação experimental o fato de que o processo pode ser diretamente observado e que as condições do experimento podem ser controladas diretamente pelo investigador. Assim é possível correlacionar as características da corrente com o depósito gerado. Kneller e Buckee (2000) complementam dizendo que o avanço tecnológico tem permitido compreender melhor a morfologia das correntes de densidade e a estrutura da turbulência nestas correntes.

mecanismos de iniciação

Stow e Mayall (2000) destacam que fatores ligados ao aporte sedimentar, tais como área-fonte, volume disponível, composição e tamanho dos grãos são os mais importantes na constituição do depósito final. Porém, na prática, essa estimativa da quantidade e qualidade de sedimento é difícil. Middleton e Hampton (1973) destacam três tipos

de mecanismo de iniciação: 1) a remobilização do sedimento depositado na plataforma ou na cabeça do talude continental, originada pela ocorrência de eventos catastróficos; 2) pela descarga fluvial em oceanos, e 3) pelo surgimento, no talude, de aquíferos provocados pelo rebaixamento do nível de base. Em laboratório, estes mecanismos são simulados: no primeiro caso, através da desestabilização de um volume fixo de material com duração quase instantânea, ou seja, por pulso, ou, no segundo e terceiro casos, pela descarga, a partir de um reservatório, de uma quantidade de material distribuído ao longo do tempo, caracterizando um fluxo contínuo de material. Na modelagem física de correntes de densidade por pulso, o canal é normalmente dividido em duas seções por uma comporta delgada. De um lado da comporta fica o fluido denso e do outro o fluido ambiente. Tão logo a comporta é retirada, o fluido denso começa a formar a corrente enquanto uma contracorrente do fluido ambiente flui na direção oposta (Simpson, 1997). Huppert e Simpson (1980), através de experimentos de laboratório, mostram que após liberar o fluido a corrente formada passa por três estágios. No primeiro estágio, onde ocorre a entrada inicial do fluido, a corrente é retardada pelo contrafluxo formado pelo fluido presente no canal. Esta fase também é chamada de ajustamento ou transição da corrente. Em seguida ocorre um estágio puramente inercial, onde as forças de empuxo são balanceadas pelas forças de inércia. E o terceiro estágio ocorre também durante o desenvolvimento da corrente ao longo do canal, quando as forças de empuxo são equilibradas pelas forças viscosas.

Já na modelagem de correntes de densidade com fluxo contínuo, o fluido mais denso é normalmente preparado num tanque auxiliar, que garantirá um suprimento constante de material durante a execução do ensaio. A conexão entre o reservatório auxiliar e o canal é normalmente realizada utilizando uma tubulação e um difusor transversal ao canal, auxiliando a distribuição do material no canal. Sartor *et al.* (2002) estudaram a influência deste difusor através do princípio da quantidade de movimento, mostrando que a corrente de densidade passa por uma fase de estabilização nos segundos iniciais do escoamento, nos quais ela é completamente turbulenta e imprevisível e que,

depois de transcorrido esse período, se estabiliza e não altera seu estado até o esgotamento do volume injetado.

Alexander e Mulder (2002) destacam que há um grande número de fatores que influenciam os sedimentos em suspensão quando há um aporte fluvial ligado ao meio marinho. São eles: a composição e temperatura do efluente e da bacia, a concentração de sedimentos, a distribuição dos grãos, a composição de sedimento, a descarga do efluente, a profundidade do canal e da bacia, a declividade da plataforma continental, entre outras. A importância de cada uma delas é ainda desconhecida.

O objetivo, aqui, é comparar os dois mecanismos de iniciação de correntes de densidade não-conservativas em um canal horizontal de pequeno porte através da avaliação de suas características dinâmicas (velocidades e aceleração) e geométricas (altura da cabeça e do corpo) do fluxo, e dos padrões de deposição gerados.

Num primeiro momento, são analisados os padrões de distribuição dos volumes/espessuras de depósitos e dos grãos, por faixas granulométricas, ao longo do comprimento do canal. Posteriormente, procura-se correlacionar os depósitos gerados nas duas condições de admissão de materiais com as seguintes variáveis da corrente: massa específica da mistura, tipo de material e o diâmetro dos grãos.

A partir dessas observações, procura-se encontrar analogias com os depósitos tubidíticos naturais e, desta forma, colaborar para o entendimento de tais fenômenos em escala real, buscando relacionar a formação das correntes (causa) com o depósito gerado (conseqüência).

metodologia e aparato experimental

Foram realizadas 28 simulações no NECOD/IPH/UFRGS utilizando um canal retangular horizontal com as seguintes dimensões: comprimento 300 cm, largura 12,5 cm e altura 15 cm. Na porção final existe um compartimento mais profundo e largo (25 cm x 15 cm x 30 cm) para dispersão de material, evitando, assim, a reflexão da corrente.

Para os 14 ensaios de correntes por pulso, que simulam eventos naturais catastróficos com a remobilização instantânea de um volume limitado de sedimento, o início do canal foi isolado através de uma comporta delgada, posicionada a 30 cm da extremidade do canal. Este compartimento possuía dois misturadores manuais para manter a mistura homogênea e comportava um volume de 4 l de mistura.

Os 14 ensaios por fluxo contínuo procuravam simular situações correspondentes a um aporte fluvial junto à cabeceira de um *canyon*. Os ensaios utilizaram um sistema de alimentação externo e independente ao canal, que consta de um reservatório de alimentação de vidro em forma de funil, com capacidade para 7 l, em cuja saída foi acoplada uma tubulação (25 mm) com um registro-esfera que controla a vazão de descarga de material, enquanto um difusor no final distribui o fluxo lateralmente no canal.

Os ensaios seguiram a metodologia desenvolvida por Fabian (2002) e Manica (2002), onde foram utilizados 4 l de misturas de água e sedimento com massas específicas de 1010 e 1022 kg/m³. Manica (2002) realizou uma série de ensaios com diferentes materiais disponíveis no mercado visando determinar o tipo de material granular que melhor reproduzisse o comportamento dos grãos naturais em escala reduzida em um faixa granulométrica abrangente, permitindo uma inversão escalar que valide a transferência dos resultados obtidos nos ensaios para as condições esperadas de um fluxo em meio natural. Na figura 1 estão sintetizadas as características dos sedimentos utilizados. Para cada grupo foram realizadas dois experimentos de corridas. A letra “P”

junto ao número do grupo representa ensaios por pulso e a letra FC corresponde aos ensaios por fluxo contínuo de material.

Os ensaios foram registrados por duas vídeo-câmeras digitais, uma acompanhando a frente da corrente, e outra o corpo. A partir deste registro pôde-se determinar as características dinâmicas do escoamento, como altura e a velocidade de deslocamento da cabeça, a configuração geométrica do corpo e o desprendimento de vórtices. A altura da cabeça foi medida no ponto mais elevado da região frontal da corrente e, a altura do corpo, em seções espaçadas entre si em 25 cm.

O material depositado foi coletado integralmente nos seguintes intervalos: 0-50 cm; 50-100 cm; 100-150 cm; 150-200 cm e 200-250 cm. Após a secagem, o material foi pesado e peneirado para análise granulométrica. O resultado final considerou a média das duas repetições de cada grupo. Nos ensaios 3P, 5P e 7P observou-se reflexão da corrente no final do canal de ensaio. A influência dessa reflexão é analisada e discutida junto com os resultados dos ensaios nos itens seguintes.

resultados elementos posicionais do sistema arenoso (SA)

Na figura 2 são apresentadas as velocidades médias de avanço da cabeça da corrente, obti-

Figura 1

Tabela com as principais características dos ensaios realizados.

Figure 1

Table containing the main characteristics of the experiment.

Grupo	Material	Granulometria do material (mm)	Massa Específica do material (kg/m ³)	Massa Específica mistura (kg/m ³)
1P e 1FC	Carvão 207	0,297 - 0,125	1365	1022
2P e 2FC	Carvão 207	0,297 - 0,125	1365	1010
3P e 3FC	Carvão 205	0,125 - 0,053	1190	1010
4P e 4FC	Carvão 205	0,125 - 0,053	1190	1022
5P e 5FC	Carvão 205	0,297 - 0,125	1190	1010
6P e 6FC	Carvão 205	0,297 - 0,125	1190	1022
7P e 7FC	Calcário C	0,125 - 0,053	2832	1022

das através do tratamento de imagens extraídas da vídeo-câmera que registrava o avanço da corrente de densidade. Nesta figura, pode-se verificar um comportamento bastante variado entre os ensaios por pulso (fig. 2a) e fluxo contínuo (fig. 2b). No primeiro caso, verifica-se uma grande dispersão nos resultados e comportamentos diversos de desaceleração das correntes. Já no segundo há um padrão homogêneo de redução de velocidade em todos os ensaios, indicando ser o mecanismo de iniciação das correntes um fator importante na dinâmica das mesmas. Nos ensaios por pulso, o fluxo desenvolve uma turbulência interna mais intensa do que nos ensaios por fluxo contínuo, mantendo maiores velocidades de escoamento a maiores distâncias da fonte. Pode-se inferir, a partir desta observação, que esse tipo de disparo parece ser mais eficiente no transporte da carga sedimentar. Devido a esta maior turbulência, a corrente consegue manter as partículas em suspensão por maiores distâncias, aumentando sua velocidade de deslocamento, além de desacelerar menos ao final do canal. Esta turbulência pode estar associada ao uso de agitadores manuais no compartimento de mistura, que tinham a função de manter a homogeneidade da mistura, ou à contracorrente gerada após a abertura da comporta. A contracorrente afeta principalmente a porção superior da corrente, sendo mais importante na porção proximal.

Pela figura 3, pode-se verificar que, para um fluxo com um único tipo de material e com uma mesma faixa granulométrica, quanto maior a massa específica da mistura maior é a velocidade média atingida pela corrente (grupos: 1, 2 e 3, 4). Isso é explicado pelo aumento da diferença de massa específica relativa entre os meios. Para o caso do mesmo material, porém com granulometrias diferentes (grupos: 3P, 5P e 4P, 6P - carvão 205), os valores médios indicam que a diferença de massa específica continua sendo preponderante na definição da velocidade da corrente do que a diferença no tamanho dos grãos no ensaio por pulso (fig. 3a). Analisando, porém, a figura 2a, nota-se que a corrente com grãos mais finos (grupo 3P), embora iniciando com velocidade menor, perde velocidade mais lentamente ao longo da distância se comparada com a corrente

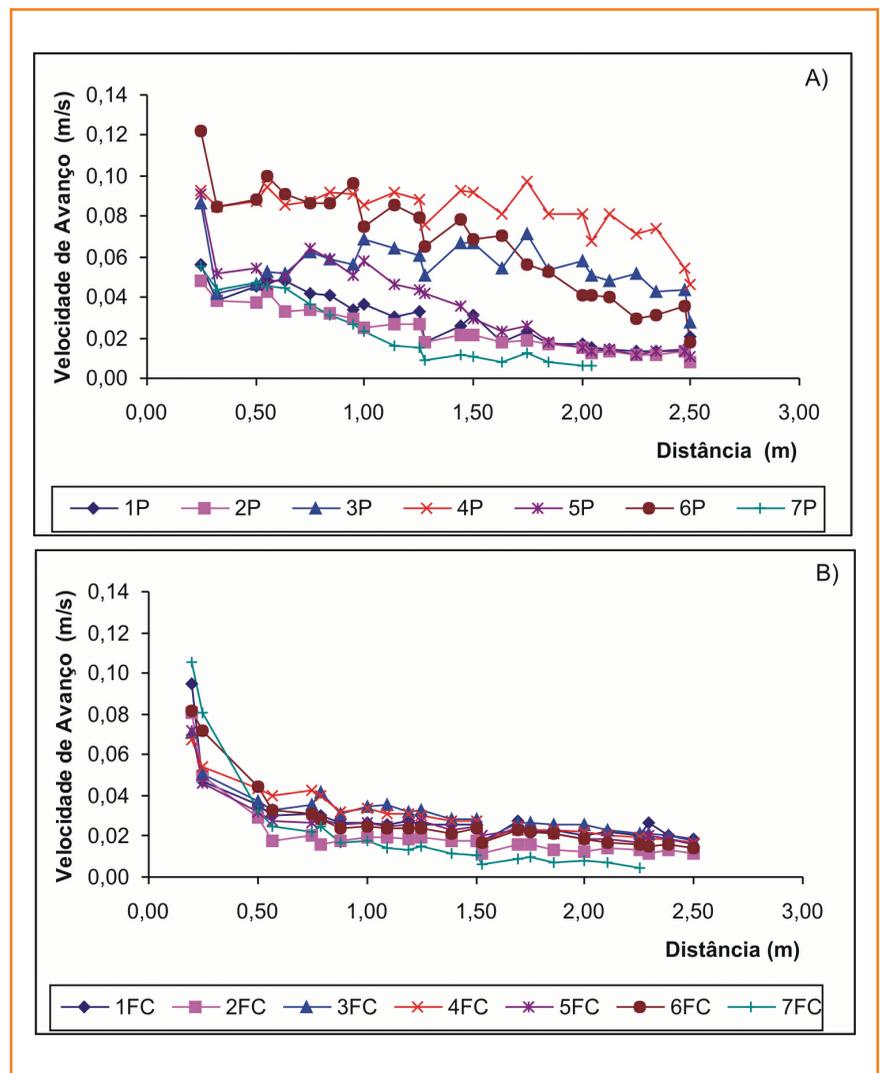


Figura 2

Gráfico da variação da velocidade da cabeça em função da distância percorrida - ensaios por pulso (a) e por fluxo contínuo (b).

Figure 2

Head velocity variation versus distance crossplot - (a) pulse and (b) continuous flow experiments.

com grãos mais grossos (grupo 5P). Isso ocorre devido à maior capacidade dos grãos finos se manterem em suspensão (eficiência do fluxo). Já para os ensaios por fluxo contínuo (fig. 3b), para o mesmo material, porém com granulometria diferente (3FC, 4FC, 5FC e 6FC - carvão 205), o comportamento foi diferente do observado nos ensaios por pulso, onde a corrente formada por material com grãos mais finos desenvolveu velocidade maior do que com grãos mais grossos, independentemente da massa específica da mistura.

Nos fluxos com alimentação contínua, os materiais mais densos (grupos 1, 2 e 7) geram correntes com velocidades médias mais lentas. Na figura 3b ilustra-se esta constatação através da comparação entre os grupos 1P e 2P contra o 5P e 6P, que possuem a mesma granulometria e

massa específica da mistura, porém materiais de diferentes densidades. À medida que aumenta a diferença de massa específica do material, como no caso da comparação entre o grupo 7P com os grupos 3P e 4P essa tendência fica ainda mais acentuada.

Concluindo, a relação entre a velocidade média e a massa específica da mistura pode ser sintetizada da seguinte maneira: aumentando-se a massa específica da mistura aumenta-se a velocidade, porém, aumentando-se a massa específica do material diminui-se a velocidade. Já a presença de material de granulometria mais fina aumenta a capacidade da corrente em manter a sua quantidade de movimento.

avanço da frente da corrente de densidade

O avanço da frente das correntes ensaiadas foi medido através da relação entre o tempo e a distância percorrida. Como em todos os ensaios, as correntes atingiram a região de dispersão do canal, a extrapolação das curvas (figs. 4a e 4b) pode ser um indicativo para se estimar a distância total percorrida pelas correntes de densidade. Na figura 4a indicam-se os resultados das simulações nos ensaios por pulso de material. Nela, pode-se observar que materiais com menores densidades formam correntes que percorrem distâncias maiores (pela ordem, grupos 4P, 6P, 3P, 5P, 1P, 2P, 7P). Isso pode ser explicado pela diferença na velocidade de queda da partícula: sendo maior para os grãos mais densos, faz com que eles apresentem a tendência de depositar nas zonas iniciais do canal. Analisando-se a influência da massa específica da mistura nota-se que, em mesmas condições de ensaios (grupos 3P e 4P, 5P e 6P, 1P e 2P), a massa específica maior proporcionou um tempo menor de percurso no canal, porém ao se analisar a forma das curvas apresentadas, nota-se que as correntes com grãos mais finos (grupos 3P e 4P) apresentam uma tendência mais linear que, quando extrapolada, indicaria uma distância maior atingida, enquanto os grupos 5P e 6P (grãos mais grossos) apresentam uma curvatura na parte final, indicando estar entrando na fase depletiva (Kneller, 1995), ou seja, apresentando uma rápida desaceleração na zona distal do canal. Gladstone *et al.* (1998) avaliaram o comportamento da corrente com partículas grossas e finas, concluindo, igualmente, que as correntes com grãos mais finos apresentam maior eficiência no transporte.

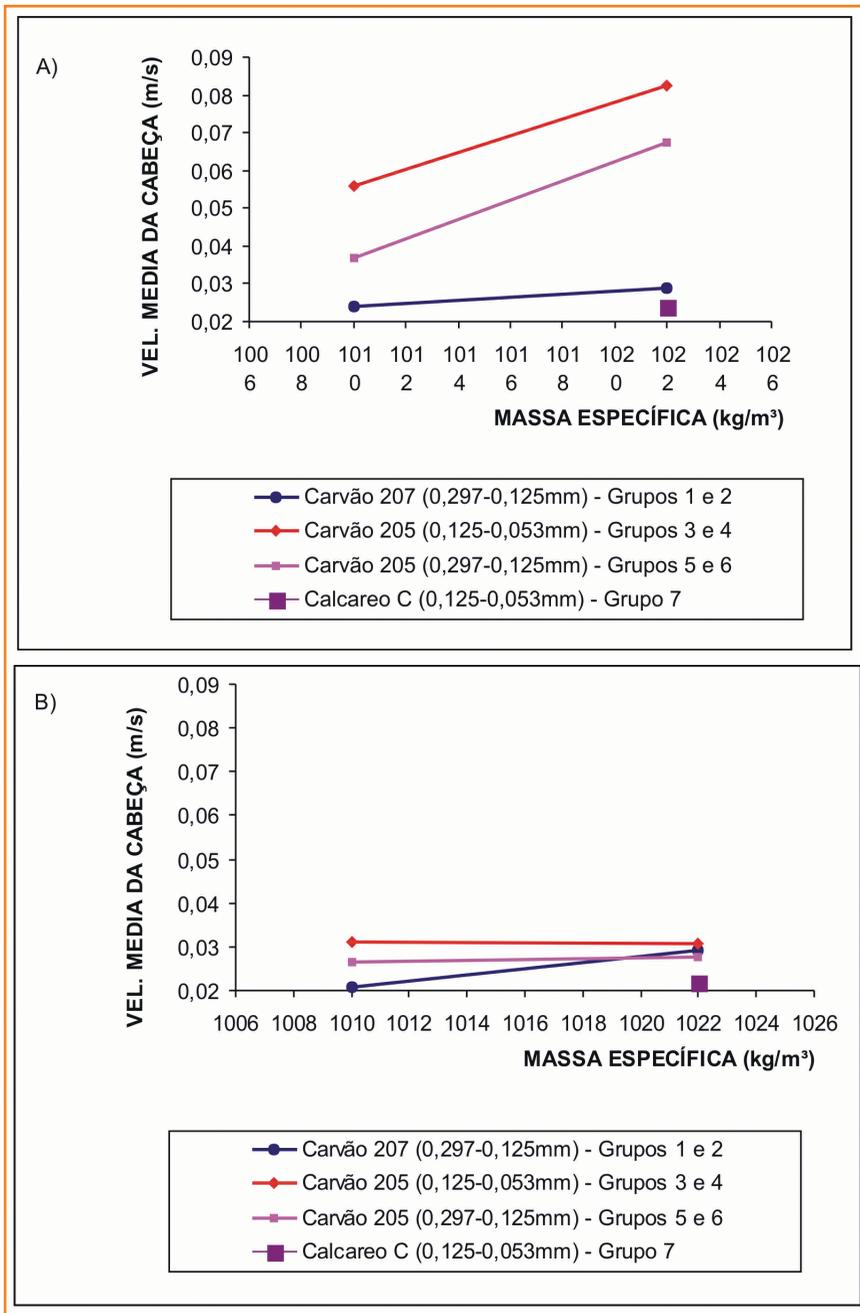


Figura 3 – Gráfico correlacionando a massa específica da mistura e a velocidade média da cabeça – ensaios por pulsos (a) e por fluxo contínuo (b).

Figure 3 – Current density versus head velocity crossplot - (a) pulse and (b) continuous flow experiments.

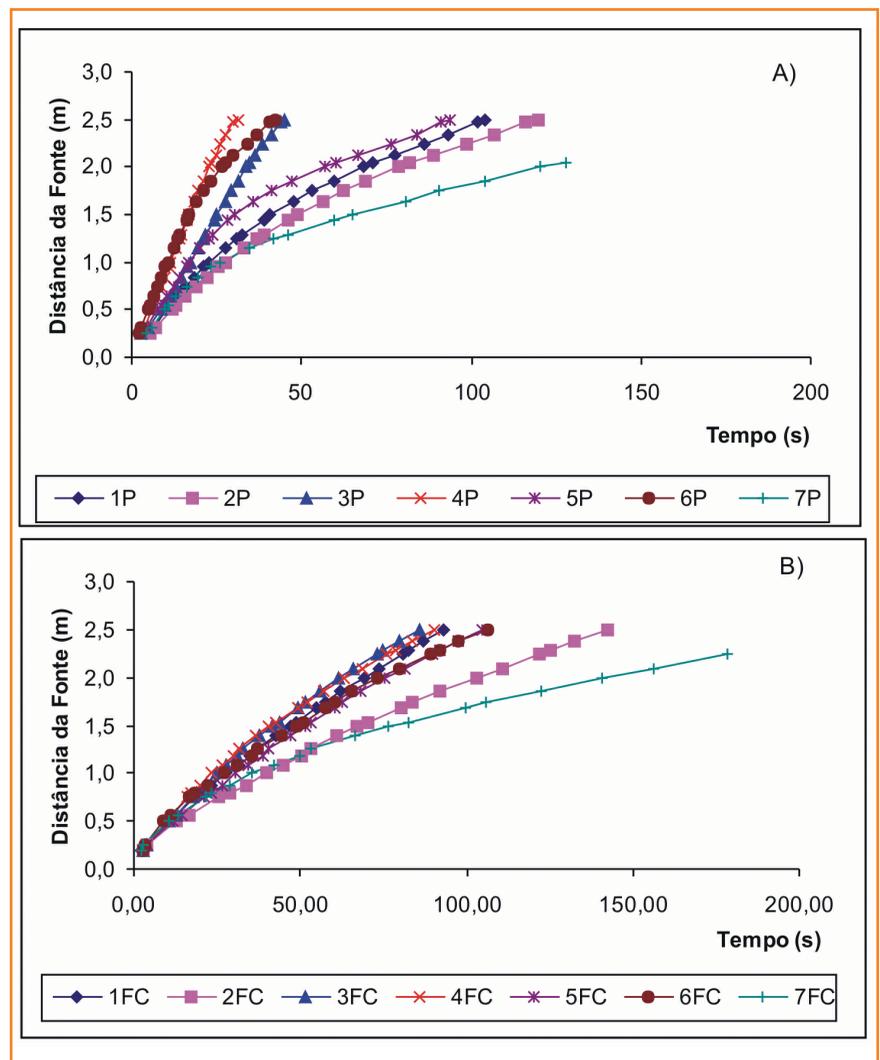
Na figura 4b são apresentados os valores encontrados para as simulações por fluxo contínuo de material. Nestas, o comportamento apresentado difere dos valores por pulso, evidenciando a diferença entre os mecanismos de iniciação. Com relação à massa específica de cada material, que está relacionada à característica do grão em si, os resultados apresentaram a mesma ordem dos ensaios por pulso, excetuando o grupo 1, que apresentou uma velocidade maior. Nos ensaios por fluxo contínuo, notou-se que os grupos com faixas granulométricas menores (grupos 3FC e 4FC) foram mais rápidos, comprovando que as frações mais finas apresentam a característica de se manter mais em suspensão, conservando, assim, a diferença de densidade entre os meios.

Pelas figuras 4 nota-se que os valores de tempo dos ensaios por pulso são menores do que os ensaios por fluxo contínuo de material, porém com uma curvatura mais acentuada na zona mais distal do canal, indicando que, nesta fase, as forças viscosas estão começando a preponderar sobre as forças de empuxo. Já nos ensaios por fluxo contínuo, apesar da desaceleração ao longo do ensaio, a tendência das curvas apresenta um comportamento linear, indicando que distâncias maiores poderiam ser percorridas pela corrente.

geometria da corrente

Nas figuras 5a e 5b são apresentadas as imagens do desenvolvimento de duas correntes de densidade com as mesmas características (grupo 3), a primeira para ensaios por pulsos e a segunda para fluxo contínuo. Foram extraídas em três seções distintas do canal: na zona proximal (50 cm), junto à área-fonte de sedimentos, na zona intermediária (125 cm) e na zona distal do canal (225 cm).

Pela figura 5a (ensaio por pulso), nota-se que o comportamento das correntes segue os três estágios descritos por Huppert e Simpson (1980). Logo após a abertura da comporta, há o desenvolvimento de um fluxo hiperpicinal com uma cabeça alongada e um nariz (ponto mais à frente) acentuado. Há também o desprendimento de



vórtices logo atrás da cabeça (estágio I). Já na zona intermediária, há uma estabilização do fluxo (estágio II), com poucas perturbações na interface superior, sem presença de uma zona de mistura nítida logo atrás da cabeça. Esta relativamente baixa intensidade turbulenta na interface superior demonstra a capacidade destes fluxos em manter sua quantidade de movimento por um período maior. Já na zona mais distal do canal, na fase de desaceleração da corrente (estágio III), fica acentuada a diferença entre as alturas da cabeça e do corpo, característica das correntes conservativas, conforme descrito em Simpson (1997) e Simpson e Britter (1979). Middleton (1993) comenta que a resistência imposta pelo fluido ambiente é muito maior do que a resistência existente na superfície inferior e superior, assim a cabeça deve ser mais espessa

Figura 4

Gráfico correlacionando o tempo de propagação em função da distância percorrida pela cabeça indicando o padrão de avanço da frente da corrente – ensaios por pulsos (a) e por fluxo contínuo (b).

Figure 4

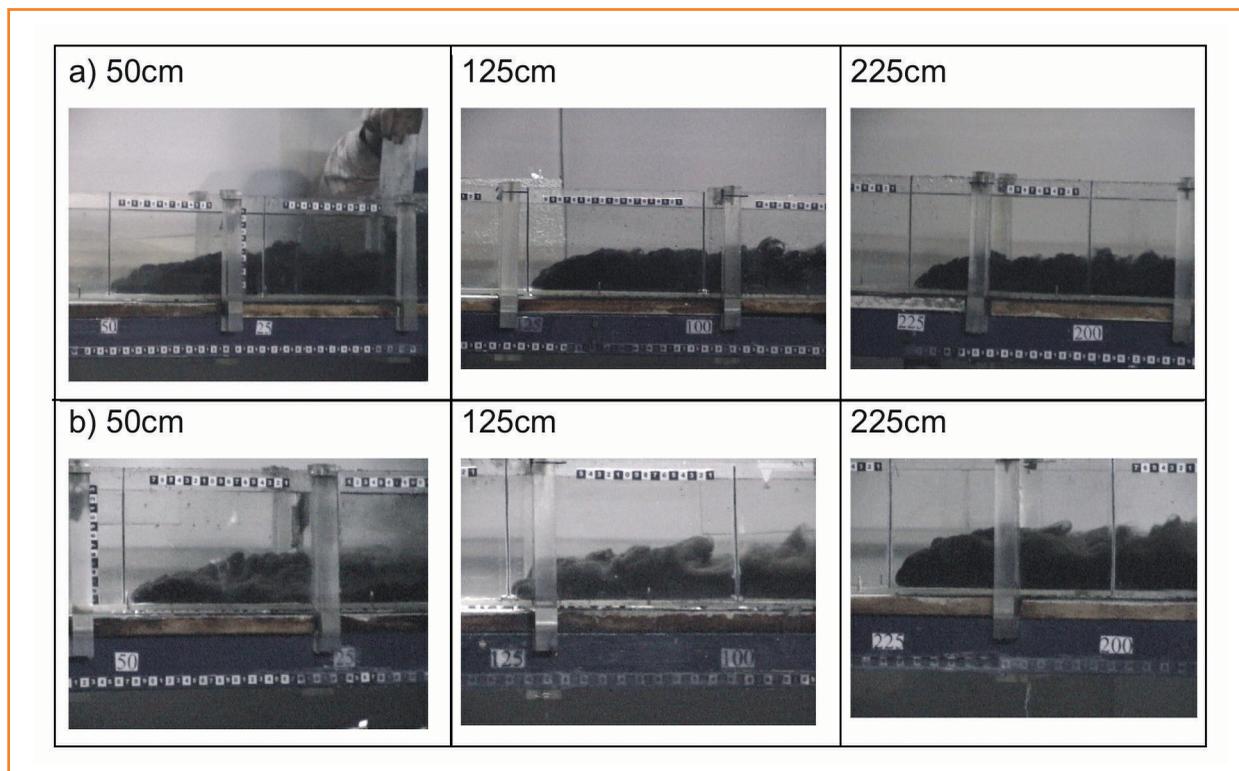
Time versus distance of head propagation cross-plot showing the pattern of the front advance - (a) pulse and (b) continuous flow experiments.

Figura 5

Imagens do comportamento da corrente em três momentos (50 cm, 125 cm e 225 cm). Ensaio do grupo 3P (por pulso) (a) e ensaio do grupo 3FC (por fluxo contínuo) (b).

Figure 5

Pictures showing the current behavior at three points (50 cm, 125 cm and 225 cm) - (a) pulse 3P and (b) 3FC experiments.



(ter energia potencial gravitacional maior) do que o corpo, onde só a resistência na interface superior é importante. Com isso, o corpo possui uma velocidade maior, o que força a cabeça contra o fluido ambiente, aumentando, assim, sua espessura (fig. 6).

Já para o caso dos ensaios por fluxo contínuo de material (fig. 5b), nota-se nos primeiros 50 cm que a corrente, após passar por uma zona de estabilização logo depois da saída do difusor, apresenta uma característica muito similar à do ensaio por pulso, com uma cabeça alongada e um corpo com altura maior. Nesta zona do canal há o predomínio das forças de empuxo na corrente. Porém, na zona intermediária, há uma grande diferença entre o comportamento das correntes em relação ao mecanismo de iniciação. Enquanto na iniciação por pulso há uma fase onde as forças de empuxo são balanceadas pelas forças de inércia, na iniciação por fluxo contínuo nota-se claramente uma zona de intensa turbulência na interface superior. Além disso, não há uma distinção definida entre o que é cabeça e corpo da corrente. Esta instabilidade junto à superfície, provocada pela tensão de cisalhamento junto à interface superior, faz com que ocorra a introdução de fluido ambien-

te para o interior da corrente, provocando sua diluição, diminuindo sua densidade relativa e, conseqüentemente, diminuindo a sua velocidade. Já na zona mais distal (225 cm), o comportamento da corrente iniciada por fluxo contínuo se torna muito parecido ao da corrente iniciada por pulso (fig. 5a - 125 cm), onde parece haver uma maior estabilização da corrente, com as forças de empuxo sendo de mesma ordem do que as forças de inércia.

Os resultados das medições da altura da cabeça e do corpo das correntes ensaiadas tanto por pulso como por fluxo contínuo estão representados na figura 7. No caso das correntes iniciadas por pulso (figs. 7a e 7b), não foram verificadas mudanças significativas da altura da cabeça durante seu deslocamento. Nota-se, contudo, uma redução considerável da altura do corpo. No caso das correntes iniciadas por fluxo contínuo (figs. 7c e 7d) não ocorre o mesmo comportamento no corpo. Ele se apresenta mais baixo do que a cabeça, isto é, se mantém sem grandes variações durante sua movimentação. Esta observação está intrinsecamente ligada ao processo de alimentação: enquanto no fluxo por pulso ela foi sendo reduzida em função do tempo, no fluxo contínuo esta se manteve constante.

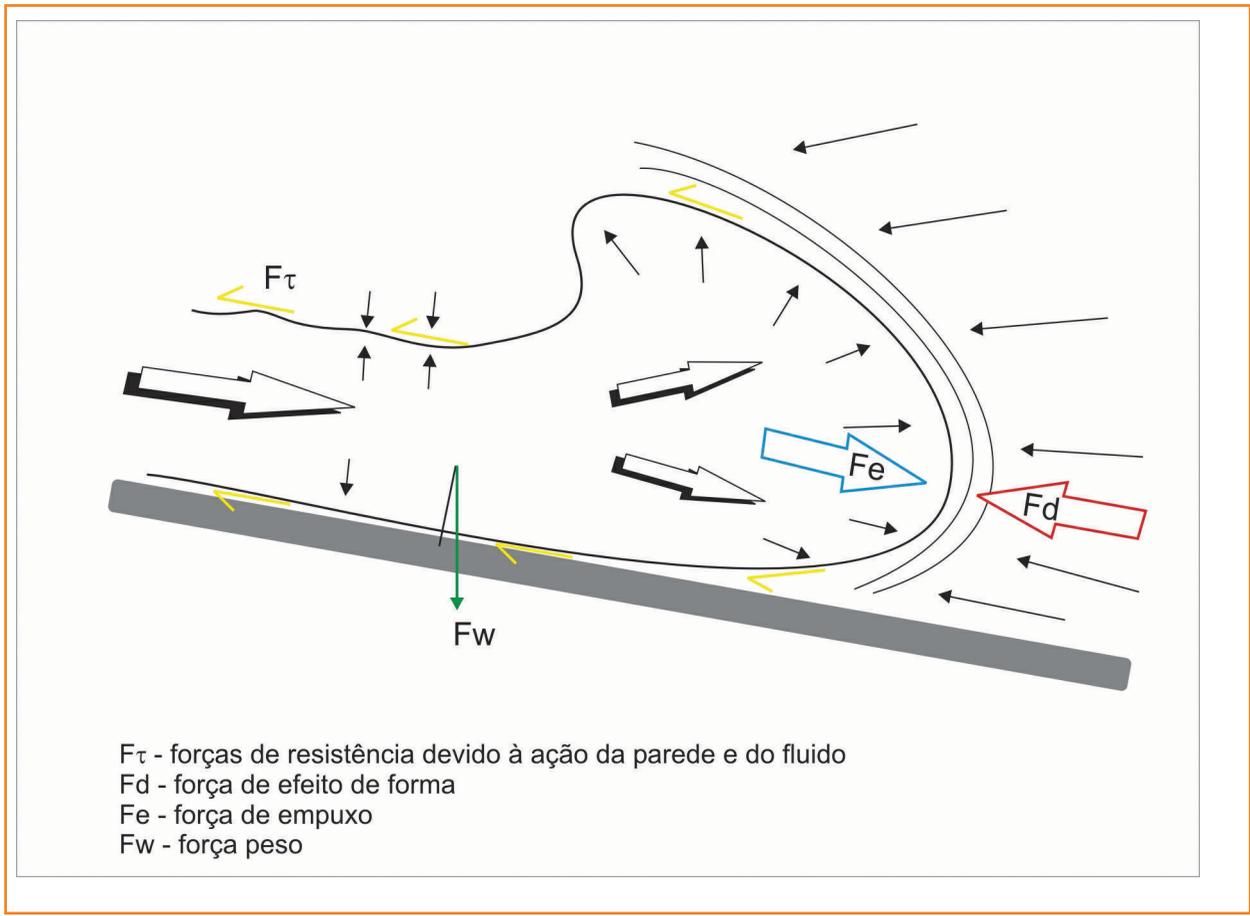


Figura 6

Representação esquemática das relações de forças e distribuição de velocidades de corpo e cabeça ao longo do escoamento de uma corrente de densidade; observa-se a expansão da cabeça em função da resistência imposta pelo fluido ambiente à passagem da corrente ("efeito de forma"), o que provoca uma desaceleração da cabeça em relação ao corpo da corrente.

Figure 6

Schematic representation of the relationship between flow and ambient forcing mechanisms, and velocity distribution along the current body and head; a head expansion occurs as a result of the drag imposed by the ambient fluid upon the current ("shape effect"), thus inducing a head deceleration in respect to the body dynamics.

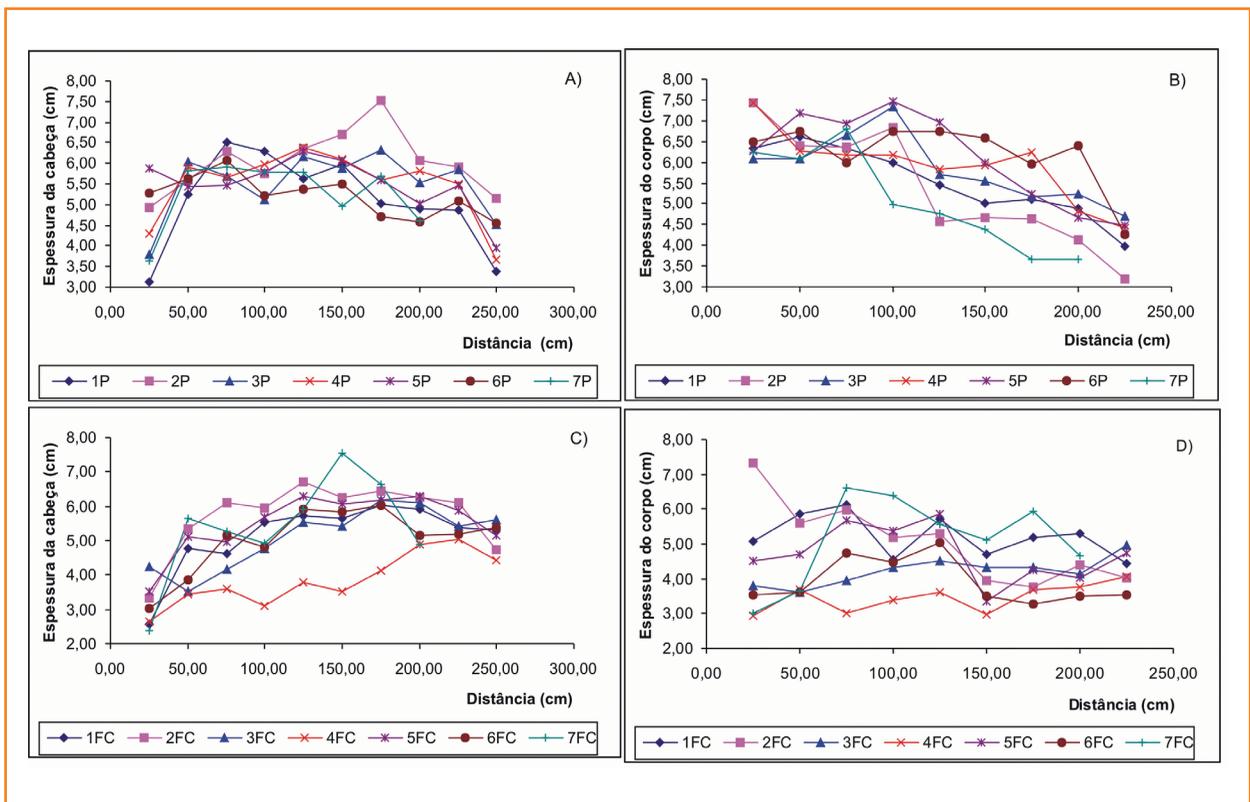


Figura 7

Gráfico ilustrando o comportamento da altura da cabeça (a e c) e do corpo (b e d) ao longo dos ensaios por pulso e fluxo contínuo.

Figure 7

Head height versus distance crossplot ((a) pulse and (c) continuous flow) and body height versus distance crossplot ((a) pulse and (c) continuous flow).

Especificamente com relação à altura da cabeça da corrente, pode-se notar nas figuras 7a e 7c que, excetuando o grupo 4FC, os comportamentos das correntes foram muito similares, com crescimento na altura da cabeça no início, uma região com alturas constantes até os 200 cm e um decrescimento nas regiões finais do canal.

Nas figuras 8a e 8b, são apresentados os gráficos de correlação entre a espessura da cabeça e a sua velocidade de deslocamento. Nos ensaios por pulso (fig. 8a), os resultados não apresentam nenhuma tendência clara de comportamento entre as duas variáveis (nuvem de pontos dispersos). Apenas nos grupos 4P e 6P é que há indícios de uma proporcionalidade direta. Esta proporcionalidade, porém, não tem muito sentido físico pois, pela análise das figuras 4, 5 e 6, nota-se claramente que nas regiões em que a velocidade é

maior, ou seja, nos primeiros 100 cm, a altura da cabeça é menor. À medida que a cabeça vai aumentando, a velocidade vai diminuindo e a resistência do fluido ambiente aumenta. No final, quando a maior parte do material já se depositou no canal, a velocidade decai bastante e a altura da cabeça diminui.

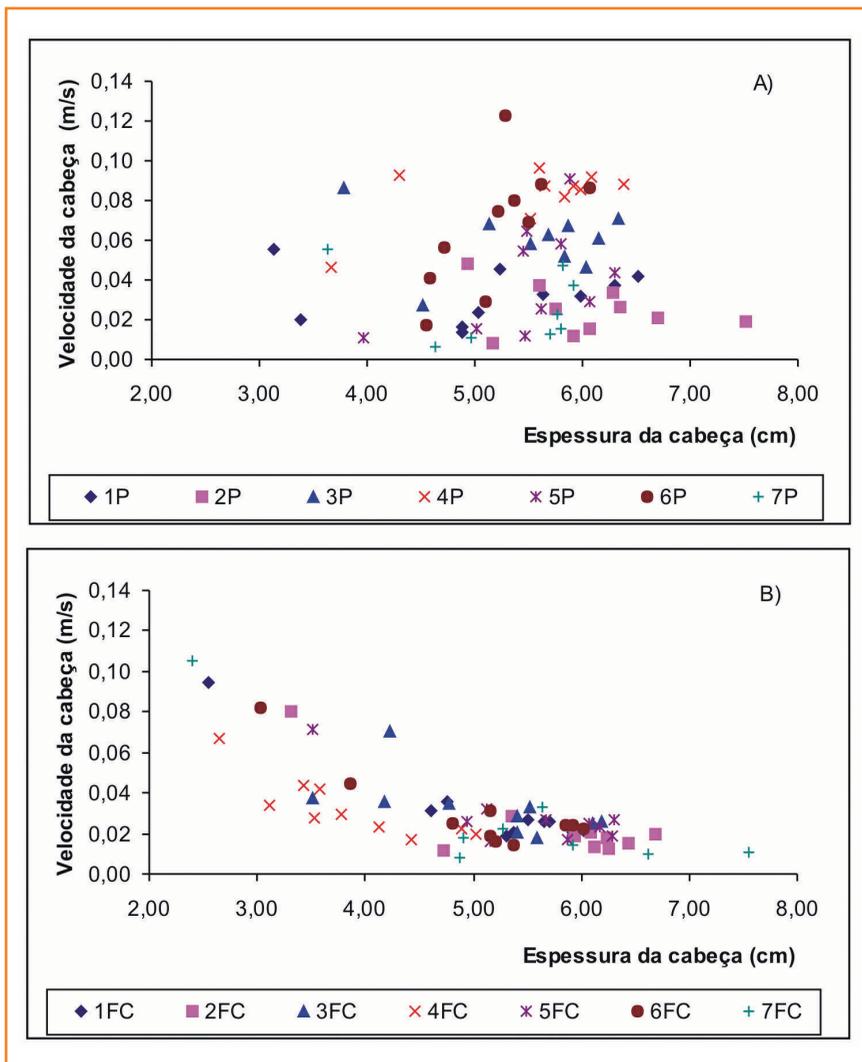
Já os ensaios por fluxo contínuo (fig. 8b) refletem uma tendência de decaimento em seis dos sete grupos (1FC, 2FC, 4FC, 5FC, 6FC, 7FC), que tende a ser exponencial, isto é, com grandes velocidades iniciais devido à velocidade do jato de entrada, e com a diminuição brusca da velocidade à medida que se aumenta a distância da fonte. Essa correlação pode ser explicada fisicamente, uma vez que as velocidades mais altas conseguem transpor a resistência imposta pelo fluido ambiente com mais facilidade. Mas, à medida que esta velocidade vai diminuindo, a resistência frontal torna-se predominante a ponto de criar instabilidades internas ascendentes, junto ao nariz da corrente, fazendo aumentar sua altura.

Figura 8

Gráfico correlacionando a velocidade de avanço e altura da cabeça: (a) ensaio por pulso, (b) ensaio por fluxo contínuo.

Figure 8

Velocity versus head height crossplot – (a) pulse and (b) continuous flow experiments.



distribuição longitudinal do depósito

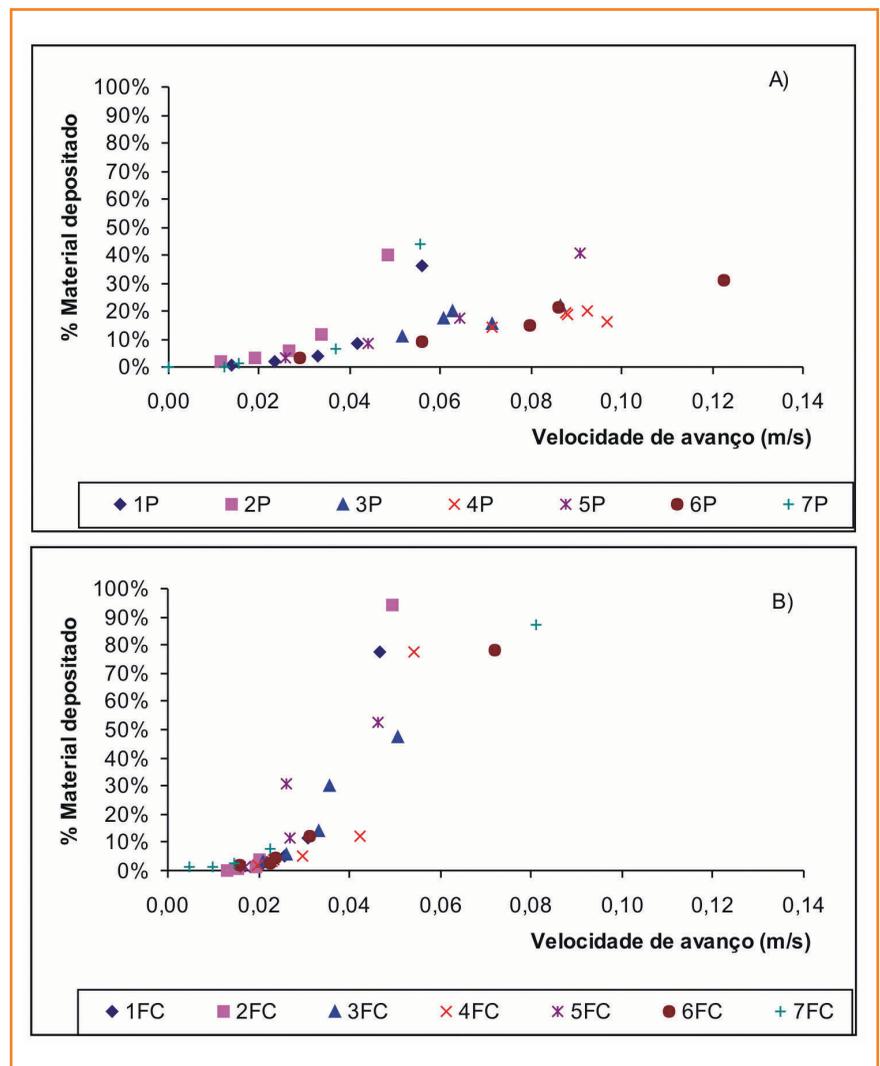
Nas figuras 9 e 10 estão apresentados os resultados dos padrões de distribuição do volume de sedimento depositado obtidos através das médias dos materiais coletados de duas repetições de cada ensaio. Na figura 9 nota-se boa correlação entre o comportamento dos depósitos e a velocidade de deslocamento da corrente, ou seja, as maiores velocidades implicaram em uma melhor distribuição dos sedimentos transportados pelas correntes ao longo do canal. Há também uma relação direta entre a desaceleração da corrente e a espessura dos depósitos, exceção feita aos depósitos gerados nos ensaios 3P, 5P e 7P (por pulso), onde ocorreu reflexão da corrente no término do canal. Mais uma vez, nota-se que o mecanismo de pulso é mais eficiente no transporte sedimentar que o contínuo, e que a granulometria e a densidade do material são os fatores que mais influenciam os depósitos, depois do mecanismo de iniciação.

Considerando a distribuição dos volumes de depósitos gerados em relação à distância da fon-

te, observa-se que na realização dos ensaios por pulso de material (fig. 10a), independente das características dos ensaios, o padrão de deposição apresentou uma tendência geral de acúmulo de material, da ordem de 50%, nas regiões mais proximais do canal (0-100 cm) e acúmulo de material, da ordem de 10%, nas regiões mais distais do canal (150-200 cm). As exceções foram naqueles ensaios em que ocorreu reflexão da corrente de densidade no final do canal (3P, 5P e 7P). Nestes casos, os depósitos apresentaram um comportamento decrescente praticamente linear com a distância. Com relação à distribuição dos volumes de depósitos gerados pelos ensaios por fluxo contínuo de material, ao se analisar a figura 9b nota-se que, para cinco dos sete grupos analisados, os comportamentos foram similares independente das características dos ensaios. As únicas exceções foram os grupos 3FC e 4FC (grãos mais finos), que apresentaram um comportamento totalmente diferente. As granulometrias mais finas desses dois grupos (0,125 mm – 0,053 mm) mostraram uma maior capacidade de se manter em suspensão durante o desenvolvimento da corrente. Nota-se que o padrão de deposição por fluxo contínuo apresentou uma tendência de acúmulo de material, da ordem de 90%, nas regiões mais proximais do canal (0-75 cm) e acúmulo da ordem de 5% nas regiões mais distais do canal (150-200 cm). Cabe salientar que, nesse caso, não houve reflexão da corrente que pudesse prejudicar a análise.

distribuição dos grãos ao longo do depósito

A distribuição dos diâmetros dos grãos presentes nos depósitos ao longo do canal, por faixas granulométricas, é apresentada para os ensaios por pulso nas figuras 11 a, b, c; e para os ensaios em fluxo contínuo nas figuras 11 d, e, f. Mais uma vez o ensaio por pulso mostra-se muito mais eficiente que o fluxo contínuo no transporte dos grãos em todas as faixas granulométricas. Como os grupos 3P, 4P e 7P não possuíam a faixa granulométrica correspondente a areia fina, estas não estão presentes no primeiro grá-



fico das figuras 11. No caso dos ensaios realizados com calcário, nota-se que a densidade do grão é um fator preponderante na capacidade de transporte das correntes de densidade, uma vez que até na fração silte houve uma concentração dos depósitos nas regiões proximais (primeiros 75 cm) do canal, independentemente do mecanismo de iniciação. Por sua vez, a fração areia fina só ultrapassou os primeiros 75 cm nos experimentos realizados com o carvão 205 (o de menor densidade utilizado). Nos ensaios por pulso, a fração correspondente a silte, com exceção do grupo 7P, não sofreu variação expressiva de seu depósito ao longo do canal, mostrando ter se mantido em suspensão durante a passagem da corrente e ter sido depositada por decantação após a sua passagem.

Com relação apenas aos resultados da areia fina, onde somente quatro grupos ensaiados pos-

Figura 9

Gráfico correlacionando a velocidade de deslocamento da cabeça e a porcentagem volumétrica dos depósitos – ensaios por pulsos (a) e por fluxo contínuo (b).

Figure 9

Velocity versus (a) pulse and (b) continuous flow experiments.

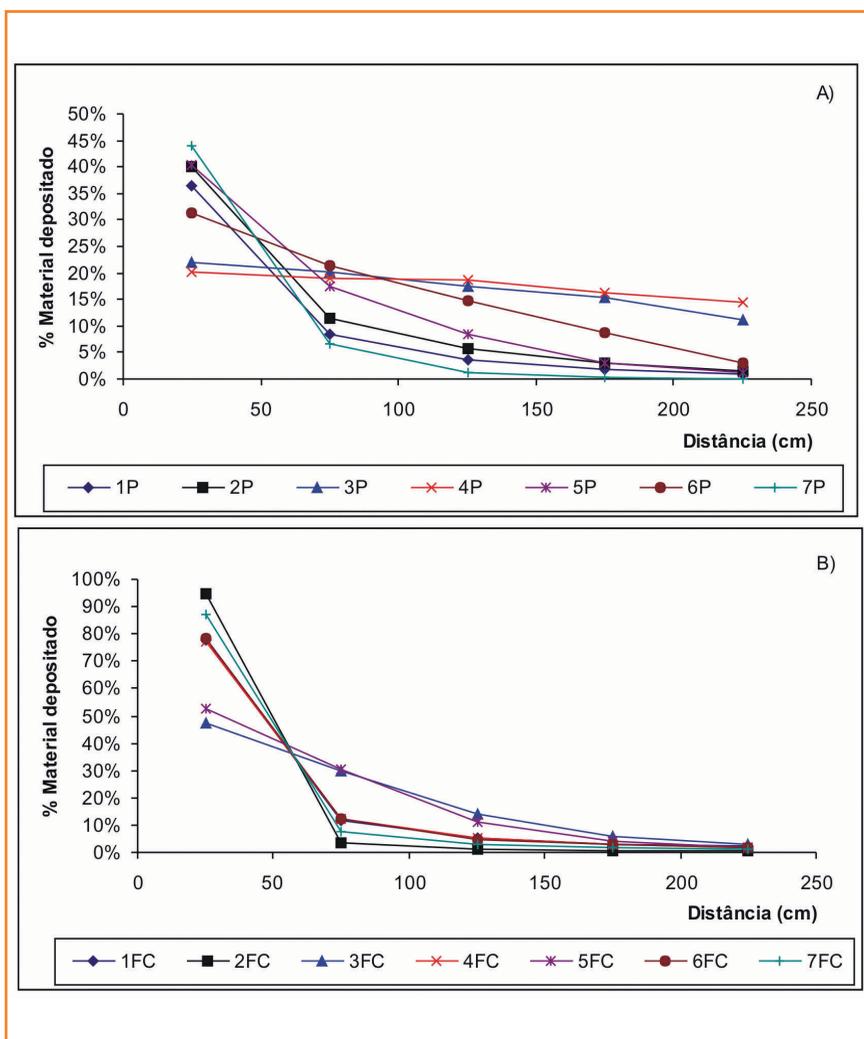


Figura 10
Gráfico ilustrando a distribuição do volume dos depósitos ao longo do canal nos ensaios – ensaios por pulsos (a) e por fluxo contínuo (b).

Figure 10
Volumetric percentage of the deposits versus distance crossplot - (a) pulse and (b) continuous flow experiments.

suem esta faixa granulométrica, verifica-se, pela análise da figura 9a, que para os ensaios por pulso realizados com o carvão 205 (grupos 5P e 6P) os grãos se distribuem melhor ao longo da distância, ao passo que para o carvão 207 (grupos 1P e 2P) há maior acumulação nos 50 cm iniciais. Com relação aos ensaios por fluxo contínuo (fig. 11d), os quatro grupos que possuem essa faixa granulométrica, ou seja, 1FC, 2FC, 5FC e 6FC, independentemente das condições de ensaio, apresentaram uma tendência única de depósito, ou seja, uma grande quantidade de material ficou acumulada nos primeiros 50 cm do canal.

Para a areia muito fina (figs. 11b e 11e), grupos 3, 4 e 7, onde esta faixa granulométrica predomina, observa-se que o material mais denso (calcário C) fica acumulado junto ao início do canal, enquanto para o material menos denso

(carvão 205) ocorreu sua distribuição mais homogênea ao longo da distância. Cabe salientar que o efeito da reflexão se faz presente nesse resultado, alterando os valores das regiões mais distais do canal. Para as correntes ensaiadas por fluxo contínuo, o carvão com essa faixa granulométrica (grupo 3FC e 4FC) forma depósitos até os 100 cm, enquanto a faixa de areia fina atinge apenas 50 cm do canal. Exceção ficou para o calcário C (7FC), que apresentou comportamento similar à faixa de areia fina.

Com relação às frações correspondentes ao silte nos ensaios por pulso (fig. 11c), excetuando o grupo 7P (calcário C) com maior concentração na parte inicial do canal, o comportamento para cada ensaio foi de presença homogênea desta fração ao longo do canal, com pequenas oscilações em torno de um valor médio. Nos ensaios por fluxo contínuo (fig. 11f), essa fração apresentou comportamento similar ao da faixa de areia muito fina, porém com volumes de depósitos menores. Diferentemente dos ensaios por pulso, estas frações apresentam decaimento ao longo da distância, que é mais acentuado para o grupo 7FC.

De maneira geral, pode-se notar que as frações maiores (correspondentes à areia fina) ficam retidas nas zonas mais proximais do canal, as frações intermediárias (correspondentes à areia muito fina) conseguem atingir distâncias um pouco mais longas, com os grãos mais finos chegando até as regiões mais distais do canal.

discussões

Os ensaios realizados salientaram a importância do processo de alimentação nas características dos depósitos gerados por correntes de densidade não-conservativas.

Os resultados obtidos indicam que o mecanismo por pulso é mais eficiente no transporte de sedimentos por correntes de densidade. Este fato tem implicações muito relevantes quando são estudados os depósitos gerados por essas correntes, tanto em sua geometria externa quanto na estruturação interna. As geometrias dos depósitos gerados por pulso tenderão a ser mais ta-

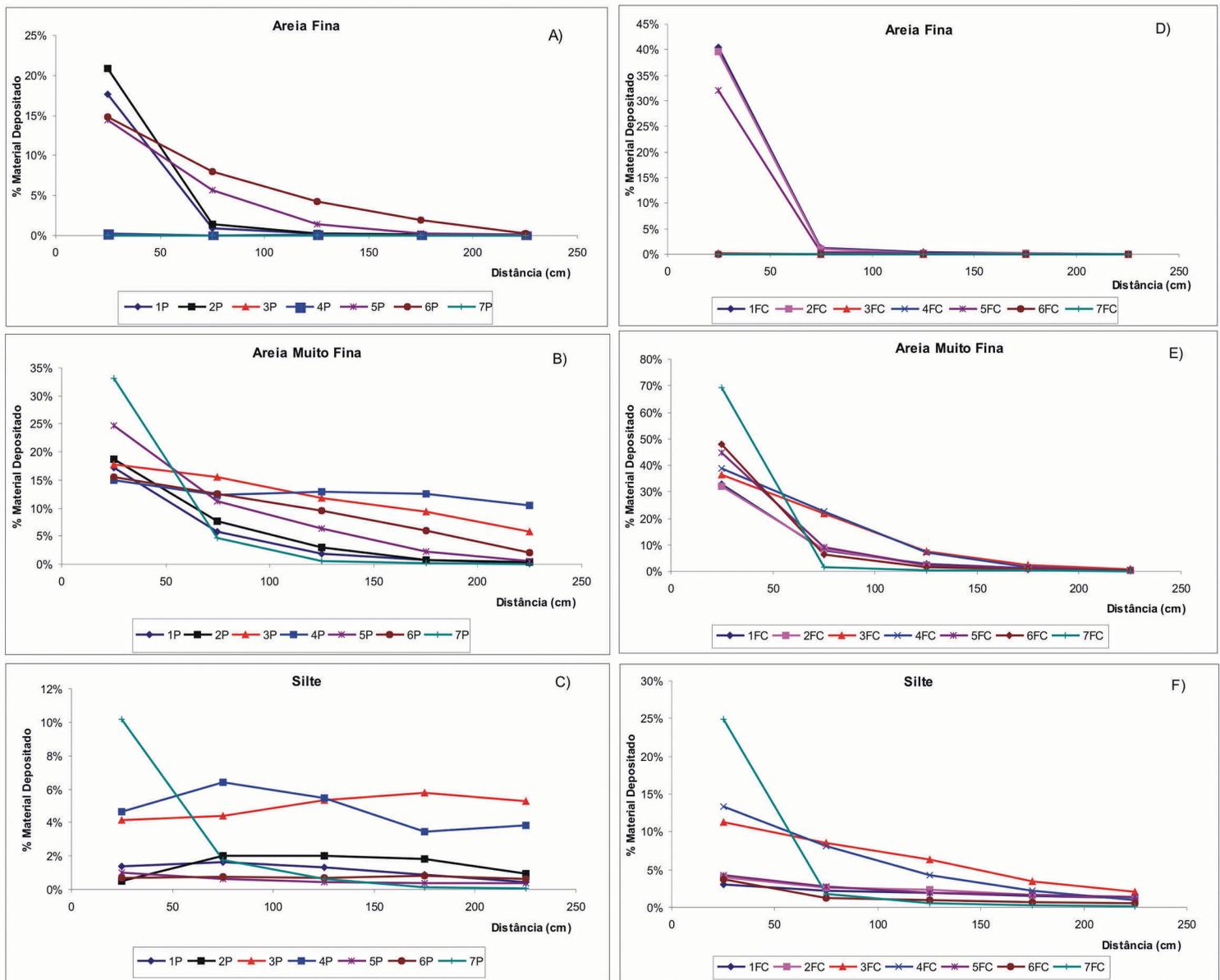


Figura 11 – Gráfico ilustrando a distribuição percentual ao longo do comprimento do canal dos grãos correspondentes: a areia fina (a), areia muito fina (b), silte (c) nos ensaios por pulso e, areia fina (d), areia muito fina (e), silte (f) nos ensaios por fluxo contínuo.

Figure 11 – volumetric percentage of the deposits versus distance crossplot for the following grain size: (A) pulsed experiments – fine sand, (B) very fine sand and (C) silt; (D) continuous flow experiments - fine sand, (E) very fine sand and (F) silt.

bulares, delgadas e com maiores extensões laterais do que as geradas por fluxo contínuo. Neste último caso (fluxo contínuo), ocorrerão depósitos bastante espessos próximos à alimentação, seja ela na desembocadura de rios, seja no local onde possa ocorrer o surgimento do aquífero ao

longo do talude. A geometria externa destes depósitos tenderá a ser sigmoideal, com forte acunhaamento. Essas observações são importantes ao se compararem os ensaios realizados com os sistemas turbidíticos marginais mistos, caracterizados por Mutti et al. (2003). Por analogia àqueles ti-

pos de sistemas naturais percebe-se que os ensaios permitem lhes conferir um padrão geométrico. Igualmente, corrobora a adjetivação de sistemas turbidíticos pouco eficientes (*poorly-efficient turbidite systems*), termo já utilizado por Mutti na sua classificação de sistemas turbidíticos de 1979 (*in* Mutti *et al.* 2003) aos depósitos associados a fluxos contínuos, e permite mostrar uma maior proximidade dos depósitos à origem do fluxo. Haverá também uma tendência à formação de estruturas trativas devido às características do fluxo mostrarem uma tendência de estacionaridade, onde o corpo se mantém praticamente constante (dinâmica e geometricamente), enquanto no caso de pulso haverá uma tendência de formação de depósitos homogêneos ou com decréscimo ascendente de tamanho de grãos, onde o fluxo tende a perder sua energia durante a sua passagem com o corpo reduzindo sua dimensão durante o fluxo. Novamente, essas observações coincidem com as observações de campo apresentadas por Mutti *et al.* (2003) na sua definição de sistemas mistos tipo B, onde a presença de feições trativas é uma característica daqueles sistemas ligados a fluxos hiperpicnais assumidamente ligados à ingressão bacia adentro de descargas de cheias catastróficas. Pelas análises granulométricas dos depósitos pode-se inferir que aqueles gerados por correntes de densidade com mecanismo de iniciação por pulso tenderão a apresentar uma menor seleção granulométrica do que os desenvolvidos em fluxo contínuo. Estes últimos apresentarão uma grande segregação dos sedimentos mais grossos próximo à área-fonte, afinando no sentido do fluxo. Nos depósitos gerados por iniciação por pulso ocorrerá uma variação granulométrica mais acentuada no sentido vertical dos depósitos. Os resultados também reportam a importância da densidade dos grãos no processo sedimentar investigado, mostrando que o conteúdo de minerais pesados em depósitos de correntes de densidade pode ser um bom indicador da distância da área-fonte dos sedimentos, quando não há muita variação granulométrica na origem, pois terão a tendência de se concentrarem próximos à fonte por apresentarem uma velocidade de queda muito maior do que os demais grãos.

O fator que parece ter maior impacto no comportamento tanto das correntes de densidade naturais como no seu padrão deposicional é a quantidade de finos que está presente nos grupos 3 e 4. A presença deste material parece favorecer o transporte dos grãos por maiores distâncias, mantendo a quantidade de movimento do fluxo. Esta observação tem fundamental importância porque, após o início do seu deslocamento, as correntes de densidade na natureza passam normalmente sobre um substrato lamoso, incorporando finos à sua composição, aumentando sua capacidade de transportar sedimentos mais grossos que já se encontram em suspensão e aumentando consideravelmente as distâncias a que estes sedimentos são transportados (Gladstone *et al.* 1998). Alexander e Mulder (2002) destacam que, na natureza, as correntes de turbidez geradas por fluxo contínuo, apesar de serem menos concentradas do que as correntes por pulso, podem causar maior erosão, transporte e deposição devido à sua longa duração. Os resultados dos experimentos de laboratório validam essa hipótese uma vez que a relação entre a duração da alimentação da corrente e o seu tempo total é de 50%. A perspectiva de serem fluxos com alta capacidade erosiva aumenta o potencial de auto-sustentação dos fluxos contínuos a partir da incorporação de finos do substrato. Restam, porém, incertezas quanto à forma que o material fino pré-depositado é incorporado na corrente, se na sua textura original (silte-argila), ou em forma de agregados lamosos que teriam um comportamento granular correspondente ao diâmetro do intraclasto e, portanto, apresentando maior velocidade de queda. Esta observação sugere que intraclastos não tem longa permanência no seio da corrente, depositando-se relativamente próximos ao local de onde foram erodidos. Os resultados apresentados mostram 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 na sua maior parte silicatos com massa específica próxima a 2650 Kg/cm³, a comparação com depósitos naturais não precisa levar em conta esta variável. Isso, porém, não 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 para a validação dos resultados.

conclusões

Os resultados, avaliados 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 das curvas de distribuição de volume do depósito ao longo do comprimento, nota-se uma tendência dos volumes de depósito apresentarem um decaimento similar a uma exponencial, com grandes quantidades nas regiões mais próximas à fonte e reduzindo nas regiões mais distantes dela. Outros estudos (Middleton, 1967); Middleton e Neal, 1989; Gladstone *et al.* 1998, Alexander e Mulder, 2002) também apresentaram este comportamento. Esta tendência ocorreu mais intensamente para a condição de admissão de material em fluxo contínuo que por pulso. Qualitativamente, estes depósitos foram avaliados através da sua granulometria. Para os dois tipos de ensaios realizados os grãos mais grossos se encontram nas regiões mais próximas à fonte de material, enquanto os grãos mais finos se espalham à medida que a distância aumenta. Não foram notadas estruturas de tração nos depósitos, isso pode ser explicado pelo tempo de duração do experimento ser muito curto.

Quanto às características dinâmicas, os resultados das velocidades médias de avanço da corrente indicaram uma correlação com a massa específica da mistura, com a distribuição granulométrica do sedimento 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 à sua dependência com a densidade do material.

Em termos gerais, as observações podem ser sintetizadas quanto à dinâmica nos seguintes tópicos:

a) a velocidade da corrente aumenta à medida que a relação entre a massa específica e a concentração da mistura aumenta;

b) a velocidade da corrente aumenta à medida que a densidade do material diminui;

c) a velocidade da corrente com mistura composta por material de mesma massa específica aumenta à medida que o tamanho do grão diminui;

d) a utilização de diversos materiais para a simulação de correntes de densidade não-conservativas, em laboratório, e a análise de sua influência no comportamento do fluxo é muito importante para o desenvolvimento do processo experimental, permitindo a flexibilização de ensaios com garantia de resultados coerentes;

e) foram verificadas diferenças significativas entre os depósitos gerados por correntes de densidade com mecanismos de iniciação distintos; este fator influencia na geometria externa e estrutura interna dos depósitos turbidíticos.

Os resultados apresentados nas simulações mostram a eficiência da modelagem física no estudo dos depósitos turbidíticos, permitindo uma primeira comparação entre diferentes mecanismos de remobilização de sedimentos (causa) com os resultados (conseqüência), além de servir como ferramenta confiável para a diminuição das incertezas no processo de caracterização de reservatórios na exploração de hidrocarbonetos.

referências bibliográficas

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

BAAS, J. H.; KERSTEREN, W. V.; POSTMA, G. Deposits of depletive quasi-steady high density turbidity currents: a flume of bed geometry, structure and texture. **Sedimentology**, Oxford, v. 51, p. 1053-1088, 2004.

FABIAN, S.. **Modelagem física de correntes de densidade em canal bidimensional de declividade va-**

- riável.** Porto Alegre : Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. Dissertação (Mestrado).
- GLADSTONE, C.; PHILLIPS, J. C.; SPARKS, S. J. Experiments on bidisperse, constant-volume gravity currents: propagation and sediment deposition. **Sedimentology**, Oxford, v.45, n. 5, p. 833-843, 1998.
- HUPPERT, H. E.; SIMPSON, J. E. The slumping of gravity currents. **Journal of Fluid Mechanics**, London, v.99, n 4, p. 785-799, 1980.
- KNELLER, B. Beyond the turbidite paradigm: physical models for deposition of turbidites and their implications for reservoir prediction. In: **Characterization of deep marine clastic systems**. London : Geological Society of London, 1995. p. 31-49. (Geological Society Special Publication, 94).
- KNELLER, B.; BUCKEE, C. The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological implications. **Sedimentology**, Oxford, v.47, p. 62-94, 2000. Suplemento 1.
- KUENEN, P. H.; MIGLIORINI, C. I. Turbidity currents as a cause of graded bedding. **Journal of Geology**, Chicago, v.58, p. 91-127, 1950.
- MANICA, R. **Modelagem física de correntes de densidade não conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada**. Porto Alegre : Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. Dissertação (Mestrado).
- MIDDLETON, G. V. Small-scale models of turbidity currents and the criterion for auto-suspension. **Journal of Sedimentary Petrology**, Tulsa, Okla., v.36, n. 1, p. 202-208, 1966.
- MIDDLETON, G. V. **Experiments on density and turbidity currents III**. Deposition of sediment. Canadian Journal of Earth Sciences, Ottawa, v.4, p. 475-505, 1967.
- MIDDLETON, G. V. Experimental studies related to problems of flysch sedimentation. In: **Flysch Sedimentology in North America**. Newfoundland : Geological Association of Canada, 1970. p. 253-272. (Special Paper, 7).
- MIDDLETON, G. V. Sediment deposition from turbidity currents. **Annual Review of Earth and Planetary Science**, Palo Alto, Calif., v.21, n. 1, p. 89-114, 1993.
- MIDDLETON, G. V. ; HAMPTON, M. A. Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity flows. In: **Marine Sediment Transport and Environmental Management**. New York : Wiley, 1973. p. 197-218.
- MIDDLETON, G. V. ; NEAL, W. J. Experiments on the thickness of beds deposited by turbidity currents. **Journal of Sedimentary Petrology**, Tulsa, Okla., v.59, n. 2, p. 297-307, 1989.
- MUTTI, E. Turbidites et cones sous-marine profonds. In : HOMEWOOD, P. (ed.). **Sedimentation detritique : fluviatile, littorale et marine**. Fribourg : Institut de Geologie, Université de Fribourg, 1979. p. 353-419.
- MUTTI, E. ; TINTERRI, R.; BENEVELLI, G.; DI BIASE, D.; CAVANA, G. Deltaic, mixed and turbidite sedimentation of ancient foreland basins. **Marine and Petroleum Geology**, Guildford, v. 20, p. 733-755, 2003.
- SHANMUGAM, G. 50 years of the turbidite paradigm 1950s-1990s. Deep-water processes and facies models: a critical perspective. **Marine and Petroleum Geology**, Guildford, v.17, p.285-342, 2000.
- SARTOR, R.; MANICA, R.; AVILA, M. D.; BORGES, A. L. de O.; MAESTRI, R. D.. **Utilização de modelo físico simplificado para estudo de padrões deposicionais das correntes de densidade na interface base do talude e planície abissal**. In: XLI CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 2002, João Pessoa. 2002.
- SHANMUGAM, G. Ten turbidites myths. **Earth Science reviews**, Amsterdam, v. 58, n. 3-4, p. 311-341, 2002.
- SIMPSON, E. J. **Gravity currents in the environment and the laboratory**. 2. ed. Cambridge : Cambridge University Press, 1997. 244 p.
- SIMPSON, E. J. ; BRITTER, R. E. The dynamics of the head of a gravity current advancing over a horizontal surface. **Journal of Fluid Mechanics**, London, v.94, p.447-495, 1979.
- STOW, D. A. V. ; MAYALL, M. Deep-water sedimentary systems : new models for the 21st Century. **Marine and Petroleum Geology**, Guildford, v. 17; p. 125-135, 2000.

expanded abstract

Middleton and Hampton (1973) pointed out three types of density current initiation mechanisms in natural settings: 1. remobilization of shelf-deposited or edge-of-shelf-deposited sediments due to catastrophic events; 2. river discharge into the oceans; 3. surging of aquifers in the slope triggered by sea level falling. In laboratory studies, these mechanisms are represented by two types of experiments: 1. generation of a pulse by instantaneous liberation of a fixed volume of material (reproduces the first mechanism); 2. generation of a continuous flow by discharge of a certain amount of material (reproduces the second and third mechanisms).

This work aimed to compare the three mechanisms that initiate non-conservative density currents. The comparison is made by evaluating the flow dynamics (speed and acceleration) and geometric (head and body height) characteristics and the resulting depositional patterns. The impact of the current density, size and composition of the solid grains were also investigated. A total of 28 experiments (14 pulse and 14 continuous flow) were carried out in the NECOD/IIPH/UFRGS using a 300 cm long, 12.5 cm wide and 15 cm high flume. In order to prevent current reflection in the final portion of the flume a deeper compartment (25 cm x 15 cm x 30 cm) was installed to allow material dispersion.

Two different apparatus were used for material feeding purposes:

- Pulse flow experiments: a four-liter compartment with two manual mixers to homogenize material released through an isolated gate (30cm long) installed in the initial portion of the flume.
- Continuous flow experiments: an independent system composed by a seven-liter-glass-funneled reservoir connected to a valve that controls the discharge and a diffuser that distributes the flow in the canal.

Four liters of water and sediment mixture with 1010 and 1022 Kg/m³ density were used in both experiments.

Experiments showed that the feeding process is a factor of major impact on the sedimentary characteristics of deposits generated by non-conservative density currents. Pulse mechanism proved to be much

more efficient than continuous flow as to sediment transportation by density currents. Pulse experiments developed a more intense internal turbulence than continuous flow did. Turbulence is exactly what keeps the particles in suspension for longer distances and increases the velocity of the current. A lower deceleration occurs at the end of the flume.

The deposits pattern changes both quantitatively and qualitatively. Quantitatively it was verified that the deposits volume distribution in the flume shows an exponential trend of decline, and a large amount of material was restrained near the source regions. This trend occurred more intensely in continuous than in pulse condition.

Qualitatively, deposits have been evaluated by observing their grain size behavior. For both types of feeding processes, larger grains deposit near the source regions, while finer ones spread along the flume. In spite of the absence of observed traction structures, which can be explained by the short duration of the experiments, their presence is expected due to the dynamic characteristics of the produced flows, specially the continuous flow.

Results indicate that the dynamic characteristic of the current depends on its density, sediment grain size and grain density. A positive correlation between the current density and the mean head velocity was observed. The displacement of the density current shows that density depends on the suspended sediment and, consequently, on its settling velocity.

We can summarize the observations on the flow dynamics as follows:

- a) Current velocity increases with the increase of the density and sediment concentration;
- b) Current velocity increases with the decrease of grain density;
- c) Current velocity increases with sediment grain size decrease.

Results of the experiments show important implications on the external geometry and the internal structure of deposits generated by density currents. Deposits originated by pulse triggering will be more tabular, thinner and larger laterally than those generated by continuous flow. In this latter case, thicker deposits will be expected near the feeding point, not far from the river mouth/delta front or spatially related to aquifer surging. The external geometry of the deposits will have a sigmoid shape with a strong lateral wedging. In this case stationary flow tends to

develop traction structures as the flow in the body keeps practically constant. The pulse-related flow, on the other hand, tends to develop homogeneous packages or fining-upward layers in places where the flow loses its energy. Grain size analysis suggests that deposits generated by a surge (pulse flow) tend to present poorer sorting compared to those developed by continuous flow. The latter ones present a better segregation with a coarser sediments deposit near the source area and a finer-grained deposit downstream. Deposits generated by pulse flow exhibit a well-defined vertical grain size variation (fining upward).

Results also show the importance of the grains density on the sedimentary processes investigated. The distribution of heavier minerals can be good a indicator of the distance from the triggering point. These minerals tend to concentrate in a proximal area because of their higher settling velocity. Another fac-

tor that seems to influence both the behavior of natural density currents and the depositional pattern is the amount of fine-grained sediments. Their presence favors the transportation for larger distances by keeping the momentum of the flow. This observation is important because, as soon as the displacement is initiated, the density current in natural settings normally crosses a muddy substratum, thus incorporating finer sediments and increasing its capacity to carry coarser sediments in suspension for larger distances (Gladstone et al. 1998).

The simulation results also show the efficiency of physical modeling to study the density of current-derived deposits and to allow the association of the different mechanisms of sediment remobilization (cause) to the deposits pattern (effect). A more disseminated use of this tool will help reduce uncertainties in hydrocarbon exploration and reservoir characterization.

autor author



Rafael Manica

Doutorando do Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade

Instituto de Pesquisas Hidráulicas

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

e-mail : rmanica@portoweb.com.br

Rafael Manica nasceu em 17 de julho de 1977 em Porto Alegre, RS, graduou-se em Engenharia Civil em 2000 pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Em meados do ano 2000, ingressou no Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade (NECOD), no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS, trabalhando em modelagem física de fluxos gravitacionais de sedimentos (correntes de turbidez), em dois projetos de pesquisas iniciados em 1999 e financiados pelo Fundo Setorial de Petróleo (FINEP/CTPetro) e Petrobras (Profex). Em 2002, obteve o grau de mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo programa de Pós-Graduação do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS com o título da dissertação: “Modelagem física de correntes de densidade não-conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada”. Trabalhou, ainda, no NECOD, como pesquisador do programa RHAE/CNPq em 2002, e no convênio Petrobras (Profex) e NECOD para a “Construção e Instrumentação do Simulador Físico de Fluxos de Alta Densidade”, nos anos de 2003 e 2004. Concomitante a isso, em 2003, ingressou no doutorado no NECOD/IPH/UFRGS para pesquisar os fluxos de turbidez de alta densidade e seus depósitos.