



## GERAÇÃO DE CORRENTES HIPERPICNAIS EM AMBIENTE SALINO COM CONTRASTE NEGATIVO DE DENSIDADE

*Carolina Holz Boffo<sup>1</sup>; Ana Luiza de Oliveira Borges<sup>2</sup>; Eduardo Puhl<sup>3</sup>*

**RESUMO** -As correntes de densidade, oriundas da rede fluvial, são consideradas as principais formas de transporte e deposição de material no meio sub-aquoso, responsáveis pela formação de deltas, cânions e depósitos tanto em reservatórios, quanto em águas profundas. O presente trabalho apresenta os resultados obtidos a partir da simulação de 19 correntes de densidade em laboratório, com diferentes concentrações de sedimentos, em ambientes salinos de diferentes densidades. As análises focaram-se nos fluxos que, de forma surpreendente, formaram uma corrente que se alastrou pelo leito (hiperpícnal), mesmo tendo sido injetada uma mistura de menor densidade que o fluido ambiente. Os resultados contribuem para justificar a formação desse tipo de corrente pela rápida incorporação de fluido ambiente ao corpo da corrente, levando a uma redução da velocidade de queda das partículas e, conseqüente, manutenção das partículas em suspensão por maior tempo. Além disso, foi verificada uma forte relação entre a espessura do depósito e a velocidade de avanço da frente, contudo, foi observado que as maiores distâncias atingidas pelas correntes ocorreram com aquelas de maiores concentrações de sedimentos, e não em função das velocidades de injeção das mesmas.

**ABSTRACT** - Density Currents, originating from river network, are considered the main ways to transport and deposition of material in the sub-aqueous environments being responsible for the formation of deltas, canyons and deposits in both reservoirs, as in deep water. This paper presents the results from 19 density currents simulated in the laboratory, with different concentrations of sediments in saline ambients of different densities. Analyses were focused on flows that, surprisingly, have formed a current flowing along the bed (hyperpycnal), yet it was originated by an injection of mixture of lower density than the fluid ambient. The results help to justify the formation of such current by fast incorporation of the ambient fluid by the body of the current, leading to a reduction in the sediment fall velocity of the particles and the consequent maintenance of the particles in suspension for a longer period. Furthermore, there was a strong relationship between the thickness of the deposit and the velocity of the front. However, it was observed that currents that reached longer distances were the ones that had higher sediment concentration, not being related by the velocity of injection.

**Palavras-chave:** correntes de densidade, simulação física, ambiente salino.

<sup>1</sup>Aluno do curso de Doutorado do PPGRHSA/ IPH/UFRGS. E-mail: [carolina.boffo@ufrgs.br](mailto:carolina.boffo@ufrgs.br)

<sup>2</sup>Professor Associado IPH/UFRGS. E-mail: [alborges@iph.ufrgs.br](mailto:alborges@iph.ufrgs.br)

<sup>3</sup>Professor Adjunto IPH/UFRGS. E-mail: [eduardo.puhl@ufrgs.br](mailto:eduardo.puhl@ufrgs.br)

## INTRODUÇÃO

A expressão “corrente de densidade” refere-se ao fluxo gerado devido à ação da gravidade sobre fluidos com densidades diferentes. O mecanismo de geração destas correntes está centralizado na diferença entre a densidade do fluido da corrente e a densidade do fluido ambiente. Esta diferença de densidade, que pode ser muito pequena, é responsável pela geração de forças de empuxo diferentes entre o meio e a corrente, fazendo com que o fluido de maior densidade movimente-se em direção ao de menor densidade.

A diferença de densidade entre os fluidos pode ser gerada: (1) pela diferença de temperatura entre eles, como no caso do movimento de massas de ar atmosférico; (2) pela presença de substâncias dissolvidas, como no caso de uma solução salina penetrando em um reservatório de água doce; ou, então, (3) pela presença de sólidos em suspensão (Simpson, 1997).

As correntes de densidade geram diferentes fenômenos naturais, como, por exemplo: avanço de frentes frias e de brisas marinhas; avalanches de neve; fluxos de rochas ou de lama; vazamentos de gases densos; despejo de resíduos industriais. Devido à grande quantidade de fenômenos relacionados, as correntes de densidade são motivo de pesquisas e estudos em diversas áreas da ciência, como a Meteorologia, a Geologia, a Mecânica de Fluidos e a Engenharia Hidráulica (Simpson, 1997). Neste trabalho, o foco direciona-se às correntes de densidade geradas pela presença de partículas em suspensão, como ocorre, por exemplo, no encontro de um rio com um lago/reservatório ou com o oceano.

### **As correntes de densidade no fundo do mar**

Os rios fornecem a via dominante de transporte de sedimentos oriundos dos continentes para os oceanos. A diferença de densidade entre a água dos rios, gerada pela presença dos sedimentos, e a água dos oceanos, controla o fornecimento, o transporte e destino final dos sedimentos vindos dos continentes. A maioria dos fluxos fluviais, quando deságuam no oceano, produz plumas, uma vez que possuem baixa concentração de sedimentos e são compostos de água doce. No entanto, a contínua agregação e deposição de partículas minerais e orgânicas que são carregadas por estes fluxos fluviais propicia que, no oceano, a rota do transporte de sedimentos afaste-se da rota seguida pelo fluxo de água fresca (Geyer, W.R., Hill, P.S. and Kineke, G.C. 1995, 2004).

Efetivamente, tem-se a formação de correntes de turbidez carregadas de sedimentos, as quais deslocam-se junto ao fundo e constituem um importante mecanismo de transporte dos sedimentos para águas mais profundas, sendo, inclusive, responsáveis pela formação de muitos dos caminhos preferenciais (cânions) subaquáticos (Parker, G., Fukushima, Y., Pantin, H. M., 1986).

As correntes de densidade são classificadas em função do contraste de densidade entre o fluido que constitui a corrente e a densidade do fluido ambiente (corpo receptor). Uma corrente é dita hipopical quando sua densidade é menor que a densidade do fluido ambiente ( $\rho_c < \rho_a$ ). Quando as densidades do fluido que escoar e do fluido ambiente são iguais ( $\rho_c = \rho_a$ ), a corrente é classificada como homopical. Quando a corrente tiver densidade maior que o fluido ambiente ( $\rho_c > \rho_a$ ), será classificada como hiperpical. A corrente de densidade também poderá ser classificada como mesopical, caso haja uma estratificação do fluido ambiente ( $\rho_{a1} > \rho_{a2}$ ) (Mulder & Alexander, 2001) (Figura 1).

Devido à estratificação natural dos oceanos e sendo os rios composto por água doce, onde as partículas de sedimento se encontram suspensas, muitas vezes ocorre de as correntes serem menos densas que o fluido ambiente das águas profundas. Consequentemente, uma corrente de turbidez pode inicialmente ser mais densa que a água do ambiente marinho e propagar-se como uma corrente hiperpical (“groundhugging flow”), mas, depois de sua densidade diminuir devido à sedimentação, ocorre a inversão na fluatibilidade e a corrente torna-se menos densa que o ambiente. Quando isso ocorre, tem-se a formação da corrente hipopical (“buoyant sediment-laden”) e a deposição dos sedimentos ocorre mais tarde, a maiores distâncias de sua origem (Gladstone, C. and Pritchard, D., 2010).

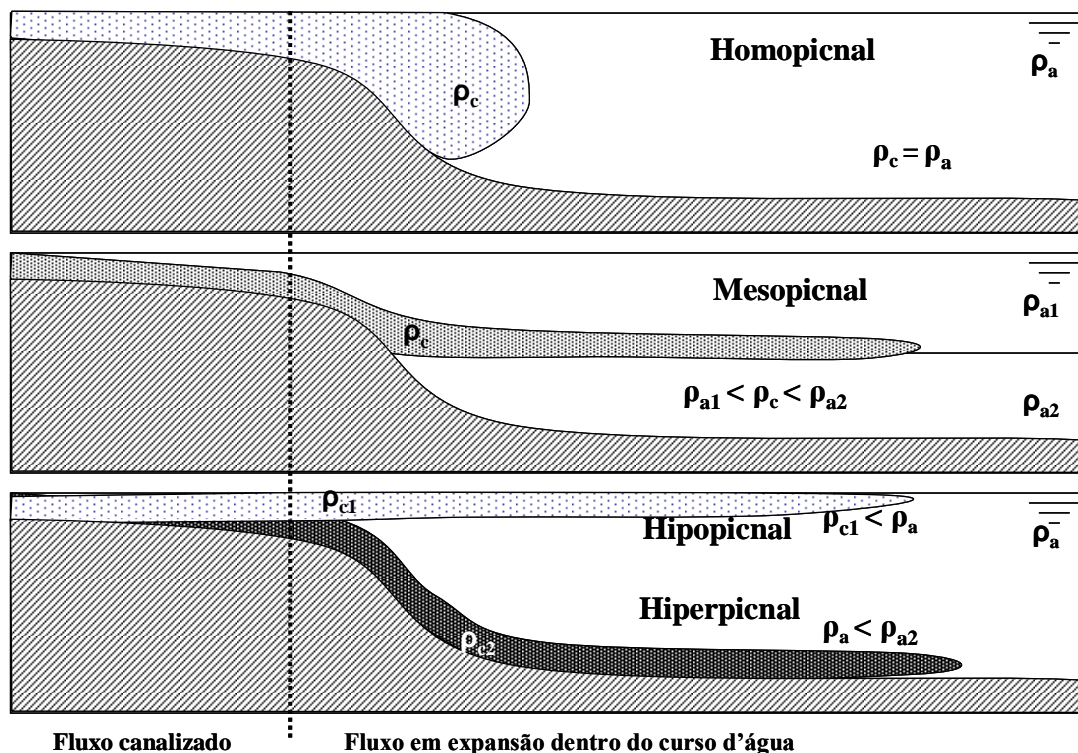


Figura. 1: Tipos de correntes de densidade, [adaptado de Mulder & Alexander (2001)]. Sendo  $\rho_c$  densidade da corrente;  $\rho_a$ , a densidade do fluido ambiente;  $\rho_{a1}$  e  $\rho_{a2}$  densidades de estratificação do fluido ambiente.

A capacidade de transporte das correntes de densidade depende muito da quantidade de água e sedimentos presente na mistura, bem como da coesividade do material dissolvido. Também está relacionada com os mecanismos de suporte de grãos, cuja classificação iniciou com o trabalho de Bagnold (1954), seguido por Middleton e Hampton (1976), Lowe (1982), Postman et al. (1988), Shanmugam (1996) e Mulder e Alexander (2001). Segundo estes autores, os mecanismos de transporte em correntes de densidade podem ser (a) através da turbulência, com movimentação não organizada das partículas; (b) pelo escape de fluido intersticial, em que a elevada concentração de grãos acaba inibindo o depósito, fazendo com que a água presente na mistura seja forçada a sair de dentro do corpo da corrente; (c) pela interação entre grãos, através da colisão ou pelas forças viscosas exercidas sobre os grãos; (d) pela formação de uma matriz coesiva, em que uma mistura de material argiloso e fluido intersticial suporta o peso dos clastos e forma também um filme que lubrifica as irregularidades na superfície do grão, reduzindo o atrito e permitindo que os fluxos de detritos fluam por grandes distâncias. Os padrões e os mecanismos de transporte de sedimentos em suspensão nas plumas que abastecem os oceanos dependem fundamentalmente do tamanho dos grãos (a velocidade de sedimentação) e da erodibilidade, os quais determinam, respectivamente, a taxa de perda de sedimento das plumas e a mobilidade pós-deposicional (Syvitski et al., 1995).

Os depósitos gerados pela ação das correntes de densidade no meio marinho são também de grande importância, pois carregam, juntamente com o sedimento, materiais orgânicos, que, depositando-se e encontrando condições favoráveis de temperatura e pressão, podem gerar compostos orgânicos de interesse comercial. As correntes hiperpicnais são consideradas como geradoras de depósitos sedimentares espessos e de boa porosidade, que, quando selados por material mais fino, podem constituir bons reservatórios para a acumulação de hidrocarbonetos. Já o selamento dos depósitos porosos, devido à deposição de materiais muito finos, geralmente é criado pelas correntes hipopícnais, sendo fundamental para evitar a migração do material orgânico para outras camadas de depósito.

Os turbiditos e seus depósitos associados começaram a despertar o interesse da ciência e da indústria do petróleo, tanto pelo aspecto científico (sua origem, formação, evolução, caracterização e parametrização), quanto pelo aspecto econômico, uma vez que, devido a suas características sedimentológicas, eles podem se constituir em reservatórios de hidrocarbonetos (Manica, R., 2009). Estima-se que 35 a 40% das reservas mundiais de hidrocarbonetos estejam armazenadas nesses depósitos. No Brasil, as principais reservas confirmadas de hidrocarbonetos são oriundas de sistemas deposicionais no fundo do mar, como por exemplo, as Bacias de Campos, Espírito Santo e Santos, representando mais de 90% das reservas brasileiras (D'Ávila et al., 2003).

## **Simulações de correntes de densidade**

As correntes de turbidez podem ser modeladas utilizando-se estruturas laboratoriais adequadamente dimensionadas. A vantagem dessa abordagem é que as características iniciais dos fluxos podem ser fixadas, a corrente em si pode ser observada e, posteriormente, o depósito gerado pode ser analisado. Na falta de boas observações diretas dos fenômenos naturais, as experiências em laboratório são de extrema importância para compreender a dinâmica básica das correntes e como ocorrem os processos de transporte e deposição das partículas nas correntes de densidade (Gladstone, C. and Pritchard, D., 2010).

No Brasil, poucos estudos têm sido realizados aplicando a simulação física de correntes de turbidez. Desde 1999, estão sendo executados projetos de pesquisa entre a PETROBRAS e algumas Universidades, com a intenção de subsidiar as pesquisas sobre correntes de turbidez, ampliando, assim, os conhecimentos nesta área. Um destes núcleos de pesquisa foi criado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Trata-se do Núcleo de Estudos em Correntes de Densidades (NECOD), situado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH). No NECOD, vários trabalhos foram realizados (Fabian, 2002; Manica, 2002; D'Ávila, 2003; Brito, 2005; Del Rey, 2006; Ducker, 2007; Guirro, 2008; Manica, 2009; Boffo, 2010; Puhl, 2012), procurando, através de modelos de simulação física de correntes de densidade, gerar elementos para subsidiar as operações e explorações dos reservatórios de hidrocarbonetos.

## **METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

Os ensaios foram conduzidos em um tanque de vidro com 3,0m de comprimento, 0,2m de profundidade e 0,15m de largura (Figura 2). Foram simuladas 19 correntes, sendo que as primeiras 16 tiveram como objetivo principal avaliar as alterações sofridas pelas correntes com diferentes contrastes de densidade entre a corrente e o fluido ambiente. Nas últimas 3 correntes simuladas, por seu turno, foi empregada uma técnica para tentar visualizar o escape de fluido intersticial das correntes.

Em todos os ensaios, utilizou-se como fluido ambiente uma mistura de água e sal em diferentes concentrações, sendo que as massas específicas utilizadas foram de 1010, 1015, 1020, 1025 e 1030 kgm<sup>-3</sup>. Para as correntes, foram utilizadas misturas de água doce com diferentes concentrações de sedimentos, sendo que as massas específicas variaram entre 1002 e 1026 kgm<sup>-3</sup>.

O sedimento utilizado nos experimentos foi carvão mineral (massa específica de 1.191 kgm<sup>-3</sup>), sem seleção de faixa granulométrica e com diâmetro médio de 55µm (Tabela 1). As últimas 3 correntes foram preparadas de forma idêntica, mas com a adição, à mistura preparada para a corrente, de um corante solúvel em água, com a finalidade de evidenciar a saída da água intersticial da corrente.

Depois de o canal com a mistura salina estar pronto, era preparada a mistura de água e sedimentos para a formação da corrente. Esta era vigorosamente agitada e depois lançada dentro do reservatório, através de uma canalização, cujo fluxo era iniciado após a abertura de um registro. Em todos os experimentos, foi cronometrado o tempo total de esvaziamento do reservatório utilizado para armazenar a mistura preparada para a composição da corrente, sendo que o volume total de mistura utilizado era de 5 litros. A partir do tempo de esvaziamento, foram determinadas a vazão e a velocidade média de injeção.

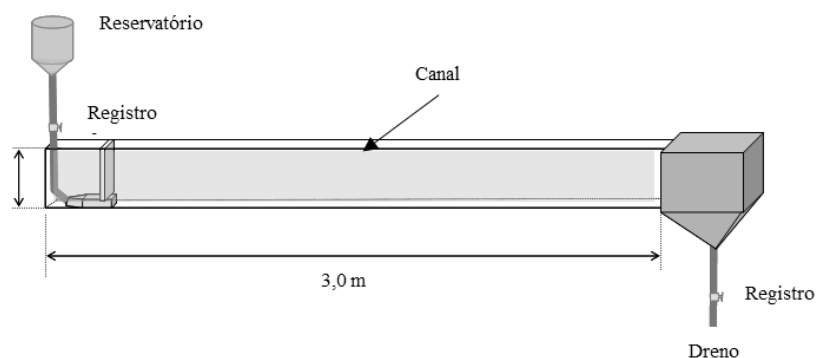


Figura 2: Esquema da estrutura experimental utilizada.

Tabela 1: Dados do fluido ambiente, das misturas utilizadas na formação das correntes e das condições iniciais de injeção, sendo: S - salinidade do fluido ambiente;  $\rho_a$  - a massa específica do fluido ambiente; Cv - a concentração volumétrica de sedimentos presente na mistura da corrente;  $\rho_c$  - massa específica da corrente injetada,  $\Delta\rho$  - diferença entre a massa específica do fluido ambiente e a mistura na corrente.

Ensaio	S g l <sup>-1</sup>	$\rho_a$ kg m <sup>-3</sup>	Cv %	$\rho_c$ kg m <sup>-3</sup>	* $\Delta\rho$
C1	23,54	1010	2,4	1002	-8,32 x10 <sup>-3</sup>
C2	21,82	1010	3,6	1005	-4,95 x10 <sup>-3</sup>
C3	23,09	1010	4,9	1007	-3,04 x10 <sup>-3</sup>
C4	22,65	1010	7,4	1012	1,75 x10 <sup>-3</sup>
C5	24,52	1010	9,9	1016	5,87 x10 <sup>-3</sup>
C6	24,03	1010	12,4	1021	1,11 x10 <sup>-2</sup>
C7	24,03	1010	14,9	1026	1,57 x10 <sup>-2</sup>
C8	33,17	1015	6,8	1010	-4,93 x10 <sup>-3</sup>
C9	31,80	1015	9,1	1015	0
C10	32,23	1015	9,9	1017	1,80 x10 <sup>-3</sup>
C11	32,68	1015	12,4	1021	6,16 x10 <sup>-3</sup>
C12	33,17	1015	14,9	1026	1,09 x10 <sup>-2</sup>
C13	41,38	1020	9,1	1015	-4,90 x10 <sup>-3</sup>
C14	40,95	1020	11,6	1020	0
C15	49,67	1025	11,8	1020	-4,88 x10 <sup>-3</sup>
C16	58,43	1030	14,0	1025	-4,85 x10 <sup>-3</sup>
E1	48,20	1025	11,1	1020	-4,88 x10 <sup>-3</sup>
E2	20,73	1010	5,9	1010	0
E3	0,00	998,68	5,9	1010	1,13 x10 <sup>-2</sup>

$$* \Delta\rho = (\rho_m - \rho_a) / \rho_a$$

Todos os ensaios foram registrados com uma câmera de vídeo digital, o que permitiu a obtenção de imagens da evolução das correntes. Através destas imagens, foram determinadas as variações da altura média da corrente e a velocidade de avanço da frente ao longo do canal.

Nos ensaios da primeira etapa, que corresponde as correntes C1 até C16, em que foram apenas variadas as concentrações de sal no ambiente e a concentração de sedimentos na corrente, foram coletados os depósitos gerados pelas correntes. Para a amostragem, aguardava-se um período de 24 horas após os ensaios para que ocorresse a sedimentação das partículas que estavam em suspensão e, após esse período, era iniciado, de forma muito lenta, o esvaziamento do canal. Apenas quando o depósito estivesse completamente seco era iniciada a coleta do material depositado. O fundo do canal foi dividido em trechos, com 0,20m de comprimento e 0,15m de largura, nos quais todo o material depositado foi coletado para determinação de espessura de depósito e da distribuição granulométrica. Após a coleta, o material foi seco em estufa e, após, pesado e submetido à análise granulométrica.

## RESULTADOS

Para a apresentação dos resultados, foram selecionadas 5 correntes, cujo comportamento contrariou o comportamento esperado, de acordo com as classificações propostas encontradas na literatura, pois a massa específica da corrente era menor que a massa específica do ambiente, o que deveria resultar na formação de correntes do tipo hipopícnais. As correntes selecionadas, apresentaram comportamento hiperpícnal, sendo compostas por diferentes concentrações de sedimentos e diferentes concentrações salinas, porém com mesmos valores de contraste negativo de massa específica ( $\Delta\rho = -0,005$ ). As demais correntes simuladas, que não serão apresentadas aqui, desenvolveram padrões semelhantes de deposição e formas das correntes, porém em diferentes espessuras e diferentes alcances, que dependeram dos contrastes entre as densidades simuladas.

Através do registro dos ensaios com câmera filmadora digital, foi possível a obtenção de imagens da evolução da corrente, as quais foram utilizadas para determinar a altura da cabeça da corrente hiperpícnal e da pluma (H) ao longo do seu deslocamento, bem como as variações de velocidade de avanço da frente das correntes (U) e a distância máxima percorrida (L). Os valores de Reynolds calculados mostram que existe uma tendência de as correntes com menores concentrações serem mais turbulentas que as correntes com concentrações elevadas (Tabela 2).

Na maioria dos experimentos realizados, é possível observar a formação de uma corrente hiperpícnal logo no início da injeção. As correntes com baixa concentração ( $C_v < 7\%$ ) formaram apenas a corrente hipopícnal. Com o aumento da concentração de sedimentos na mistura, ocorre também um aumento da distância percorrida pela corrente hiperpícnal e a formação da corrente hipopícnal ocorre a uma maior distância da saída do difusor (Figura 3). No entanto, nas correntes

simuladas, foi notado que o aumento na concentração de sedimentos causou também uma pequena redução na velocidade de avanço das correntes mais concentradas e também a redução na altura da corrente hiperpical. Inversamente, as correntes com menores concentrações de sedimentos desenvolveram plumas com maiores velocidades de avanço e com menores espessuras.

Tabela 2: Dados obtidos pela análise dos vídeos dos ensaios da primeira etapa, sendo:  $\rho_a$  - a massa específica do fluido ambiente;  $\rho_c$  - a massa específica da corrente injetada;  $H_c$  - a altura média da corrente hiperpical;  $V_c$  - a velocidade média da corrente hiperpical;  $H_p$  - a altura média da corrente hipopical;  $V_p$  - a velocidade média da corrente hipopical;  $L$ , a distância percorrida pela corrente hiperpical.

Ensaio	$\rho_a$ $\text{kg m}^{-3}$	$\rho_c$ $\text{kg m}^{-3}$	$H_c$ cm	$V_c$ $\text{cm s}^{-1}$	$H_p$ cm	$V_p$ $\text{cm s}^{-1}$	$L$ cm
C2	1010	1005	6,18	0,96	1,57	1,37	40
C8	1015	1010	2,79	1,89	2,32	1,29	90
C13	1020	1015	1,55	2,09	3,47	1,28	120
C15	1025	1020	1,16	1,78	2,61	1,32	150
C16	1030	1025	1,41	1,75	3,33	1,21	170

Quando são comparadas as velocidades de avanço das correntes hiperpicais, é possível notar que, ao entrar no ambiente salino, as correntes sofrem uma desaceleração. A taxa de decrescimento da velocidade de deslocamento demonstra estar relacionada à densidade das correntes, ou seja, aquelas com menor densidade sofrem uma desaceleração maior e se deslocam por uma menor distância. No entanto, quando são comparadas as velocidades de avanço das plumas hipopicais, não se percebe nenhuma desaceleração ao longo de seu deslocamento na área disponível dentro do comprimento do canal, o que demonstra que estas correntes conseguem manter as suas velocidades por grandes distâncias, independentemente da densidade da corrente (Figura 3).

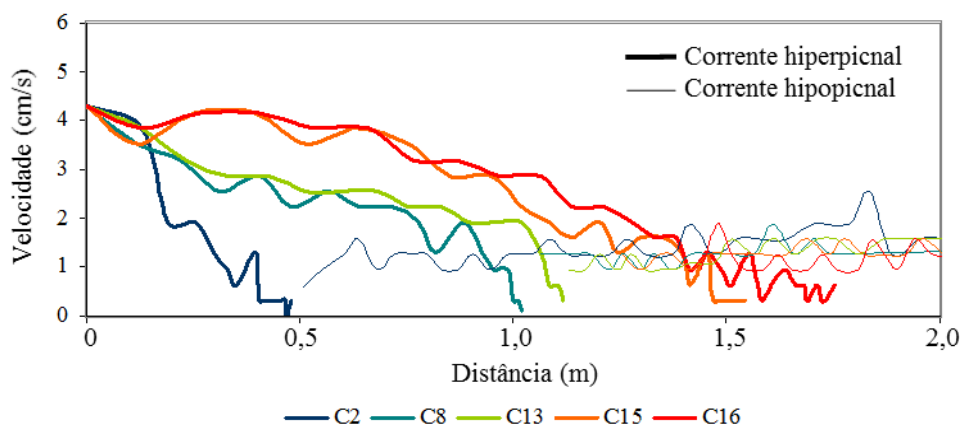













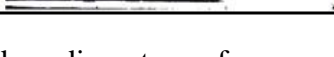



Figura 3: Variação da velocidade de avanço das correntes hiperpical e hipopical ao longo da distância do canal.



Na sequência de imagens apresentada na Tabela 3, podem ser observadas as alterações sofridas pela corrente para as diferentes concentrações de sedimentos. Pode ser notado que, com o aumento da concentração, mesmo com uma mesma diferença de densidade entre o fluido da corrente e o fluido ambiente, ocorre uma redução da espessura da corrente hiperpical nos primeiros 15 segundos de ensaio. A redução da espessura da corrente nas maiores concentrações possivelmente está relacionada com a viscosidade da corrente e com os mecanismos de transporte e sustentação do material em suspensão. Muitos trabalhos utilizam o sistema de injeção por pulso(lock-box) para dar partida à corrente e este tipo de mecanismo faz com que as correntes formadas desenvolvam uma cabeça bem definida seguida de um corpo deprimido (surge e surge-likeflows). No entanto, no presente estudo, foi utilizado um sistema de alimentação diferente, por injeção contínua, e, em todas as correntes simuladas, não ocorreu a formação de uma cabeça nítida, podendo então ser classificadas como correntes do tipo permanente (steadyflows), que são as que ocorrem na maioria dos rios brasileiros que encontram o mar.

Tabela 3: Sequência de imagens das evoluções das correntes nos ensaios com a mesma diferença de densidade entre fluido da corrente e fluido ambiente.

Ensaio	$\rho_a$ Kg m <sup>-3</sup>	$\rho_c$ Kg m <sup>-3</sup>	Evolução da corrente ao longo do tempo de ensaio		
			15s	50s	100s
C2	1010	1005			
C8	1015	1010			
C13	102	1015			
C15	1025	102			
C16	1030	1025			

As correntes com menor concentração de sedimentos sofrem uma rápida expansão ao entrar em contato com o ambiente salino e, portanto, têm sua espessura aumentada logo no início do canal. Essa relação é apresentada pela corrente C2 (Figura 4). No entanto, as correntes em que foram utilizadas maiores concentrações de sedimentos demoraram mais tempo para sofrerem expansão e, conseqüentemente, desenvolveram menores espessuras ao longo de seu deslocamento, relação essa apresentada pelas correntes C13, C15 e C16 (Figura 4). De forma contrária, as plumas geradas pelas correntes nas quais foram utilizadas menores concentrações de sedimentos desenvolveram menores espessuras por longa distância (C2), enquanto as correntes mais densas produziram plumas mais espessas (C13, C15 e C16) (Figura 4).

Muito embora este estudo não tenha investigado os mecanismos de transporte de sedimentos para as correntes simuladas, naquelas em que foram utilizadas maiores concentrações de sedimentos, é provável que exista uma forte influência do número de partículas presentes na

mistura. Supostamente, a maior concentração da corrente implica um maior número de partículas suspensas e, conseqüentemente, uma maior proximidade entre elas. Para estes casos, além dos mecanismos de transporte associados à turbulência, outros processos também podem estar atuando, inclusive a tensão superficial causada pelo filme de água salgada que se forma em torno das partículas.

As distâncias percorridas pelas correntes simuladas também demonstraram (Figura 5) relação com as concentrações de sedimentos utilizadas. As correntes com menores concentrações de sedimentos não atingiram grandes distâncias, chegando a pouco mais de 0,5m. No entanto, as correntes mais concentradas, por possuírem maior capacidade de manter sua forma, em função da maior quantidade de partículas presentes em suspensão, conseguiram atingir grandes distâncias dentro do canal, chegando a percorrer mais de 1,0m. Em todas as correntes simuladas, não foi possível determinar as distâncias percorridas pelas plumas hipopícnais, pois estas, devido à pequena variação na velocidade de deslocamento, certamente conseguiriam deslocar-se por uma longa distância, que não seria possível medir dentro do comprimento do canal.

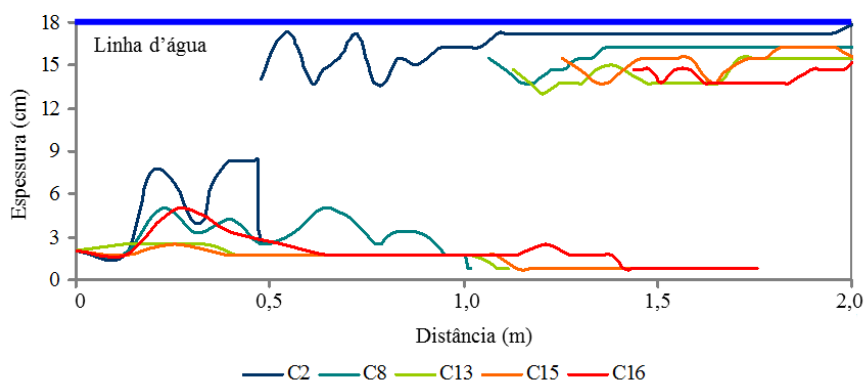


Figura 4: Variação da espessura das correntes hiperpícnal e hipopícnal ao longo da distância do canal.

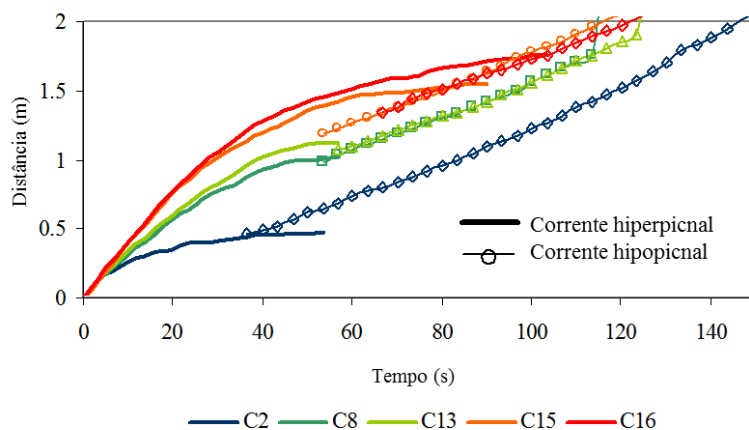


Figura 5: Distância percorrida pelas correntes hiperpícnal e hipopícnal em função do tempo.

Através da relação entre a variação da velocidade de deslocamento da corrente hiperpicnal e a quantidade de material depositada ao longo do canal, é possível notar (Figura 6) que estas duas variáveis possuem uma correlação positiva e que também são fortemente dependentes. A partir dos gráficos da velocidade de avanço da corrente hiperpicnal ao longo da distância do canal, pode-se observar que, à medida que a corrente avança, ocorre um decréscimo da velocidade. Sabendo-se que a velocidade da corrente influencia diretamente em sua capacidade de transporte de sedimentos, tem-se que um decréscimo de velocidade acarreta a deposição de material. Esta relação entre velocidade de avanço da corrente e capacidade de transporte é comprovada pela sequência de gráficos apresentada na Figura 6. Nota-se que a espessura do depósito diminui à medida que a velocidade da corrente também diminui, refletindo uma queda de capacidade de transporte da corrente.

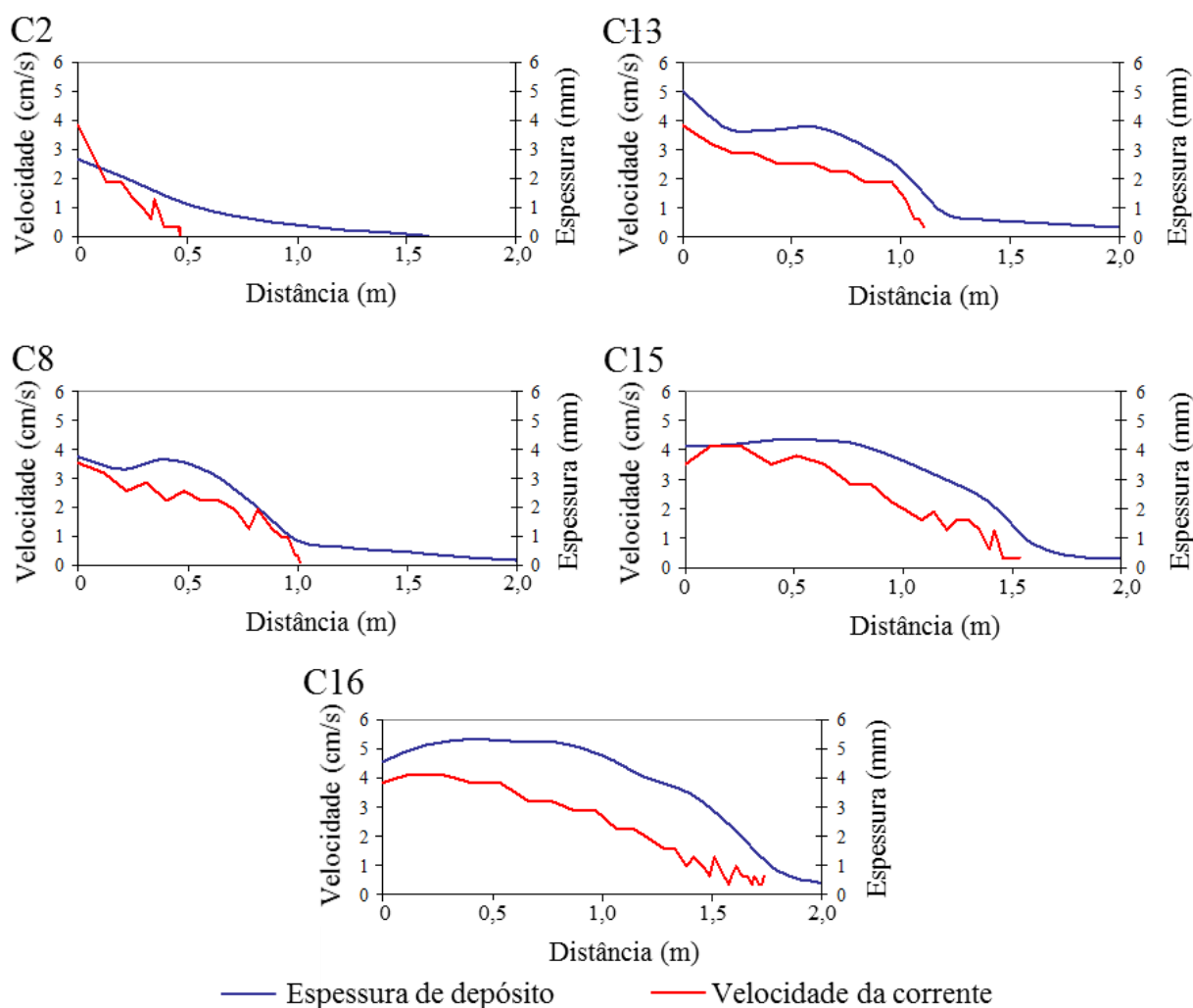


Figura 6: Relação entre a velocidade de avanço da corrente e a espessura de depósito ao longo da distância do canal.

Conforme mostrado na Figura 6, a redução da velocidade de deslocamento da corrente ao longo do canal influenciou na quantidade de material depositado e, através das análises

granulométricas dos depósitos, ficou evidenciado que também existe uma seleção do tamanho dos grãos que são mantidos em transporte (Figura 7).

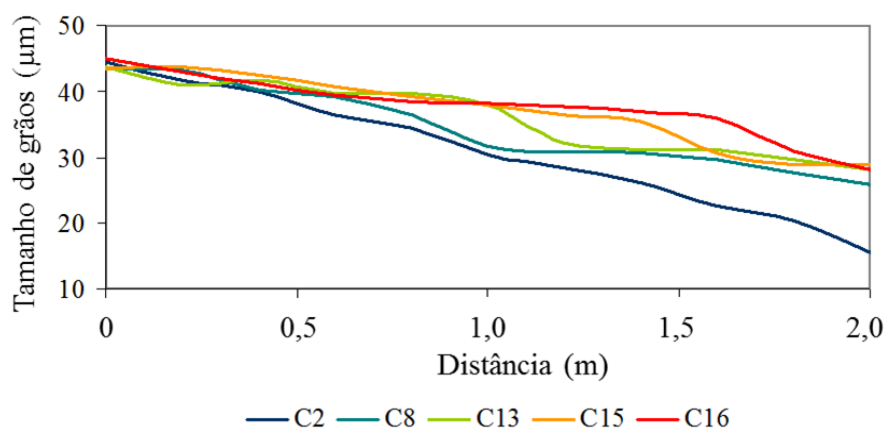


Figura 7: Variação do tamanho médio dos grãos depositados ao longo da distância do canal.

Ao longo do depósito formado pela corrente, ocorreu uma redução do tamanho médio dos grãos depositados, e esta redução é também dependente da concentração da corrente. Pela análise quantitativa das diferentes faixas granulométricas depositadas ao longo do canal, foi possível notar que partículas do tamanho de areia muito fina ( $125\mu\text{m}$ ) estão presentes em todo depósito formado pela corrente hiperpicnal. As demais frações finas, que aparecem em quantidades crescentes para maiores distâncias além do ponto de injeção da corrente, provavelmente foram transportadas pela pluma hipopicnal (Figura 8). A redução do tamanho de grãos depositados ao longo do canal também demonstra a queda de energia sofrida pela corrente; as partículas maiores possuem maior massa e, conseqüentemente, são as primeiras a serem depositadas, permanecendo em suspensão as partículas de menor massa (tamanho).

No instante em que a corrente entra no canal, aproximadamente 30% do material transportado possui diâmetro maior que  $62\mu\text{m}$ . À medida que a corrente avança, ocorre uma redução nesta proporção, que atingiu 10% a aproximadamente 0,75m para a corrente C2, enquanto que a corrente C16 atingiu essa proporção (10%) a uma distância de mais de 1,5m (Figura 9 A). Com relação à densidade do depósito da fração grossa, a corrente C2 gerou um depósito de  $0,15\text{kg m}^{-2}$  a uma distância de 0,5m do ponto de injeção da corrente, enquanto que a corrente C16 desenvolveu um depósito cinco vezes mais denso na mesma distância (Figura 9 B).

Para compreender como uma corrente de menor massas específica que o ambiente estava sendo capaz de gerar uma corrente do tipo hiperpicnal, foram simuladas as últimas três correntes. Utilizando-se um corante diluído na mistura de água e sedimentos que compõe o fluido da corrente, foram realizados três experimentos com diferentes contrastes de densidade entre a corrente e o fluido ambiente. A simulação das correntes, sendo uma menos densa que o fluido ambiente

( $\rho_{fl} < \rho_a$ ), outra de mesma densidade ( $\rho_{fl} = \rho_a$ ) e uma corrente mais densa que o fluido ambiente ( $\rho_{fl} > \rho_a$ ), permitiu evidenciar as trocas de fluidos que ocorrem entre o ambiente e a corrente ao longo do seu percurso.

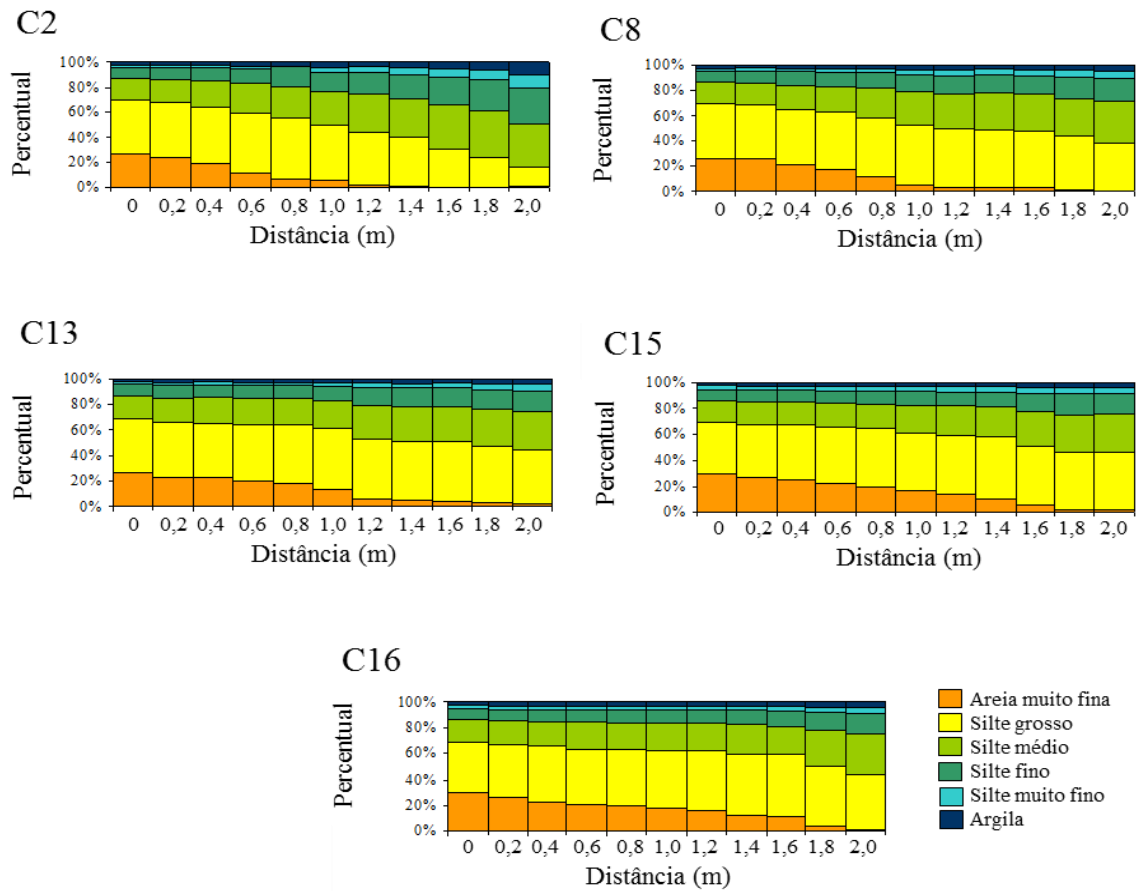


Figura 8: Distribuição granulométrica do material depositado ao longo do canal.

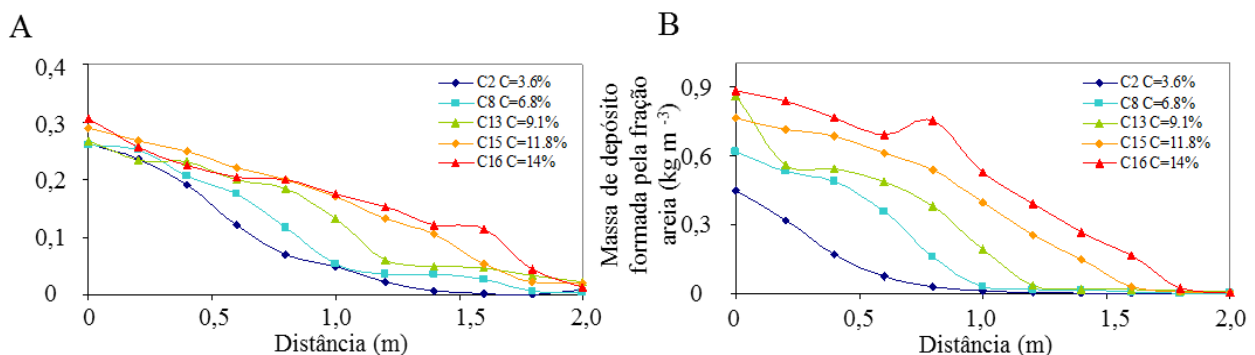


Figura 9: A: Proporção de areia presente no depósito (%) ao longo da distância do canal; B: espessura do depósito gerado pela fração grossa ( $d > 63 \mu\text{m}$ ) ao longo da distância do canal.

Pela análise das imagens da evolução da corrente, o mesmo comportamento apresentado nos dados da primeira etapa foi observado nas duas correntes que foram simuladas em ambiente salino (E1 e E2). Sendo assim, a corrente com maior concentração também se deslocou por uma maior

distância e desenvolveu uma menor espessura da corrente hiperpicnal ao longo de sua trajetória (E1). No entanto, nas correntes E2 e E3, que possuem a mesma concentração de sedimentos, a corrente que foi simulada em ambiente não salino (E3) desenvolveu uma menor espessura e a distância percorrida ultrapassou a máxima distância disponível no canal (Tabela 4).

As imagens obtidas durante os ensaios mostram, em suma, que o comportamento das duas correntes simuladas em ambiente salino (E1 e E2) é igual ao das correntes apresentadas anteriormente, na primeira etapa, e que a corrente simulada em ambiente não salino (E3) teve um comportamento completamente diferente (Tabela 5).

Tabela 4: Dados obtidos pela análise dos vídeos dos ensaios da segunda etapa, sendo:  $\rho_a$  - a massa específica do fluido ambiente;  $\rho_c$  - a massa específica da corrente injetada;  $H_c$  - a altura média da corrente hiperpicnal;  $V_c$  - a velocidade média da corrente hiperpicnal;  $H_p$  - a altura média da corrente hipopical;  $V_p$  - a velocidade média da corrente hipopical; L, a distância percorrida pela corrente hiperpicnal.

Ensaio	$\rho_a$ kg m <sup>-3</sup>	$\rho_c$ kg m <sup>-3</sup>	$H_c$ cm	$V_c$ cm s <sup>-1</sup>	$H_p$ cm	$V_p$ cm s <sup>-1</sup>	L cm
E1	1025	1020	5,34	1,53	6,30	3,31	140
E2	1010	1010	8,87	2,08	6,71	3,07	125
E3	998	1010	4,43	2,32	-	-	250

Tabela 5: Sequência de imagens das evoluções das correntes nos ensaios em que foi adicionado corante à mistura do fluido da corrente.

Ensaio	$\rho_a$ Kg m <sup>-3</sup>	$\rho_c$ Kg m <sup>-3</sup>	Evolução da corrente ao longo do tempo de ensaio		
			15s	50s	100s
E1	1025	1020			
E2	1010	1010			
E3	1000	1010			

O corante que foi adicionado à mistura de água e sedimentos utilizada nas simulações das correntes permitiu evidenciar a trajetória da água doce ao longo do deslocamento das correntes. Para aquelas simuladas em ambiente salino (E1 e E2), foi possível visualizar claramente a saída de água colorida do interior do corpo do fluxo ao longo de todo o deslocamento. A corrente, ao se deslocar, incorpora fluido ambiente na região da cabeça, e a entrada da água salgada poderia estar causando um grande aumento em sua densidade. Simultaneamente à entrada de fluido ambiente, ocorre, na região que seria o corpo da corrente, a saída de fluido intersticial, que, pela diferença de densidade e pela atuação do empuxo, é forçado a subir para a superfície do fluido ambiente, levando juntamente as partículas menores e mais leves e originando a pluma hipopical.

Nas imagens registradas ao final dos três experimentos, pode ser visualizado o corante na superfície do fluido ambiente, evidenciando a presença de uma mistura salgada de baixa densidade

e resultante da mistura entre a água doce que sai da corrente e o fluido ambiente, gerando uma estratificação no meio (Figura 10). O fenômeno da saída de fluido intersticial não foi observado na corrente simulada em ambiente não salino.

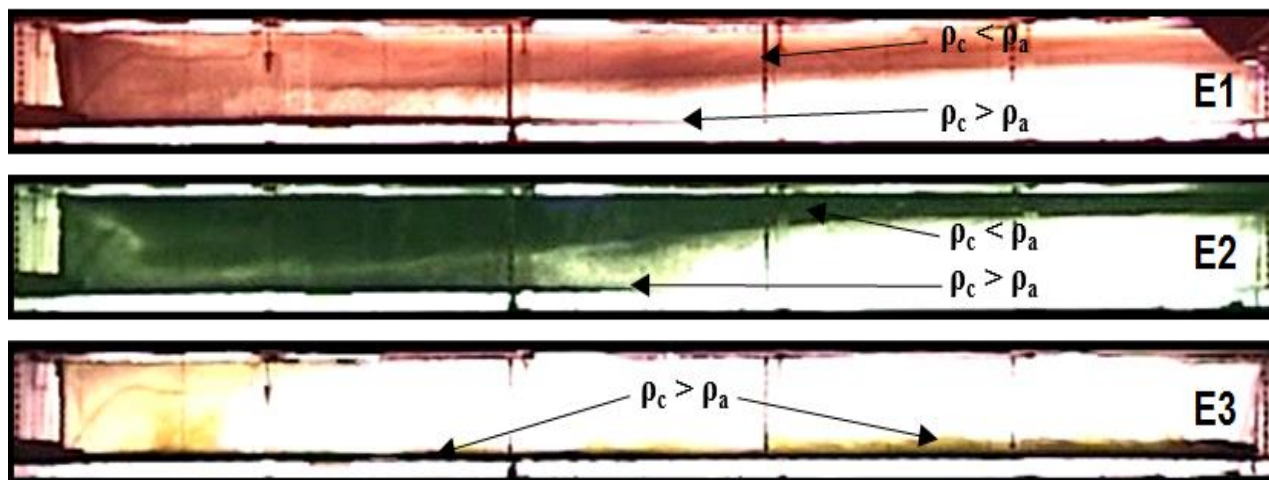


Figura 10: Imagens do instante final dos experimentos para visualização do escape de fluido intersticial.

## DISCUSSÕES

Ao longo deste trabalho, foram estudadas correntes de densidade em ambientes salinos sob diferentes contrastes de densidade entre as correntes simuladas e os diferentes ambientes salinos empregados. Os dados e as imagens das correntes simuladas permitiram estabelecer tendências para o comportamento de como estas correntes se desenvolvem nos sistemas naturais; no entanto, para que se possam fazer extrapolações dos resultados de laboratório, maiores investigações em experimentações físicas devem ser feitas, com o intuito de ampliar os conhecimentos a respeito do fenômeno.

Para o presente trabalho, a análise das imagens obtidas através das filmagens dos ensaios foi uma ferramenta bastante importante para a avaliação das características dinâmicas e geométricas das correntes. Através das imagens, foi possível visualizar as alterações causadas na forma e nas velocidades de avanço das correntes para as diferentes concentrações de sedimentos utilizadas. O aumento na concentração da corrente e da massa específica do ambiente acarretou uma maior velocidade de saída da água pura utilizada na mistura da corrente e mais rápida incorporação de fluido ambiente, fazendo com que a corrente conseguisse deslocar-se por maiores distâncias. Já as correntes com menores concentrações apresentaram maiores velocidades de deslocamento da pluma, possivelmente causados pelo maior contraste de densidade entre as correntes e o fluido ambiente.

Com relação aos depósitos gerados pelas correntes, foi verificada uma forte relação entre a espessura do depósito e a velocidade de avanço da frente, mostrando que a quantidade de material transportada pela corrente é dependente da velocidade. Contudo, foi observado que as maiores

distâncias atingidas pelas correntes ocorreram com aquelas de maiores concentração de sedimentos, e não em função das velocidades de injeção das mesmas.

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

Mas é preciso entender que injetar uma corrente menos densa que o fluido ambiente não significa que esta corrente vá se deslocar ao longo do canal com uma densidade menor que o fluido ambiente. Para que ocorra a formação de uma corrente hiperpicnal, é necessário que sua densidade seja maior que a do fluido ambiente; portanto, a única explicação para justificar a formação desse tipo de corrente ao injetar uma mistura menos densa que o ambiente seria a de que ocorre uma rápida incorporação de fluido ambiente ao corpo da corrente. Pelas imagens da evolução das correntes em que foram utilizados corantes para pigmentar a água intersticial do fluxo, percebe-se que essa substituição de fluidos é a teoria mais coerente para compreender a formação e deslocamento das correntes hiperpicnais simuladas. As correntes que foram simuladas em ambientes mais salinos também foram beneficiadas pela redução da velocidade de queda das partículas, o que poderia contribuir para a manutenção destas em suspensão por maior tempo.

Assumindo-se como verdade o fato da substituição do fluido intersticial pelo fluido salino do ambiente, a teoria apresentada por Gladstone e Pritchard (2010) pode ser estendida aos resultados do presente trabalho. Segundo os autores, a corrente, ao se deslocar, perde velocidade e deposita parte do material transportado, até que as densidades da corrente e do fluido ambiente tornam-se iguais e, após, a corrente passa a ser menos densa que o fluido ambiente, originando o fluxo hipopicnal.

## REFERÊNCIAS

BAGNOLD, R.A. (1954) Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newton fluid under shear. Proc. R. S. London, Ser., 225, 49-63.

BOFFO, C. 2010. Caracterização física de correntes de densidade em ambientes salinos sob diferentes contrastes de densidade. 2010. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas.

BRITO, D. U. de. 2005. Efeito das escalas de simulação sobre os padrões deposicionais de fluxos turbidíticos. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre, Brasil.

D'ÁVILA, R. S. F; PAIM, P. S. G., 2003. Mecanismos de transporte e deposição de turbiditos: Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares. Universidade do Vale do Rio dos Sinos.



- DEL REY, A. C., 2006. Simulação Física de Processos Gravitacionais Subaquosos: uma aproximação para o entendimento da sedimentação marinha profunda. Tese (Doutorado). Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, IPH, Porto Alegre.
- DÜCKER, R., 2007. Avaliação da capacidade portante de frações finas nas correntes de turbidez. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, IPH, Porto Alegre.
- GEYER, W.R., HILL, P.S. AND KINEKE, G.C. 2004. The transport, transformation and dispersal of sediment by buoyant coastal flows. *Continental Shelf Research* 24 (2004) 927–949.
- GLADSTONE, C. AND PRITCHARD, D., 2010. Patterns of deposition from experimental turbidity currents with reversing buoyancy. *Sedimentology*, 57, 53-84.
- GUIRRO, A.C., 2008. Simulações físicas com correntes de turbidez num tanque sem confinamento lateral: efeitos da variação do tamanho dos grãos e da vazão. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre.
- FABIAN, S., 2002. Modelagem física de correntes de densidade conservativas em canal de declividade variável. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- LOWE, D. R. 1982. Sediment gravity flows: II. Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. *Journal of Sedimentary Petrology*, Tulsa, v.52, n.1, p. 279-297.
- MIDDLETON, G. V.; HAMPTON, M. A. 1976. Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity flows. In: *Marine Sediment Transport and Environmental Management*. New York, Wiley, p. 197-218.
- MANICA, R., 2002. Modelagem física de correntes de densidade não conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MANICA, R., 2009. Geração de correntes de turbidez de alta densidade: condicionantes hidráulicos e deposicionais. Tese (Doutorado). Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MULDER & ALEXANDER, 2001. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. *Sedimentology*, 48, 269-299.
- PARKER, G., FUKUSHIMA, Y., PANTIN, H. M., 1986. Self-accelerating turbidity currents. *J. Fluid Mech*, vol. 171, 145-181.
- POSTMA, G.; NEMEC, W.; KLEINSPEHN, K.L. 1988 Large floating clasts in turbidites: a mechanism for their emplacement. *Sedimentary Geology*, 58, 47-61.
- PUHL, E., 2012. Morfodinâmica e condição de equilíbrio do leito sob a ação de correntes de turbidez. Tese (doutorado) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SHANMUGAM, G. 1996. High-density turbidity currents: Are they sandy debris flows?. *Journal of Sedimentary Research, Tulsa*, v. 66, n. 1, p.2-10

SIMPSON, J.E., 1997. *Gravity currents in the environment and the laboratory*. Cambridge University, 244 p.

SYVITSKI, J.P.M., ASPREY, K.W., LE BLANC, K.W.G., 1995. In-situ characteristics of particles settling within a deep-water estuary. *Deep-Sea Research II* 42, 223–256.