



## **Copyright 2005, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP**

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor (es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

---

# **ANÁLISE DE ESTRUTURAS PRIMÁRIAS EM DEPÓSITOS GERADOS EM LABORATÓRIO E SUA RELAÇÃO COM A DINÂMICA DAS CORRENTES TURBIDÍTIICAS DE BAIXA DENSIDADE.**

Marcelo D. Ávila<sup>1</sup>, Renata dos S. Giacomel<sup>2</sup>, Iran C. S. Correa<sup>3</sup>, Daniel U. Britto<sup>1</sup>, Ana Luiza de O. Borges<sup>1</sup>, Rogério D. Maestri<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pesquisadores do Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade NECOD/UFRGS - Av. Bento Gonçalves, 9500 – Porto Alegre – RS – mavila2@ig.com.br

<sup>2</sup> Bolsista do Programa de Geologia do Petróleo da Agência Nacional do Petróleo – ANP/UFRGS – [rgiacomel@yahoo.com.br](mailto:rgiacomel@yahoo.com.br)

<sup>3</sup> Pesquisador do Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica CECO/UFRGS – Av. Bento Gonçalves, 9500 – Porto Alegre – RS – iran.correa@ufrgs.br

**Resumo** – O presente trabalho apresenta um estudo de detalhe dos turbiditos gerados pela sucessão de correntes de densidade (simuladas em laboratório) buscando a correlação entre as características estruturais das camadas e a dinâmica interna das correntes. A etapa experimental constou de 20 ensaios com correntes contínuas simuladas em um canal bidimensional com declividade nula. Para cada ensaio foram adquiridos dados da corrente (vazão, geometria, velocidade e aceleração) e dos depósitos (espessura, textura e estruturas internas). O arranjo interno dos grãos e a associação vertical de fácies indicam a ocorrência de intervalos gradados (gradação normal e inversa) e maciços ao longo do perfil longitudinal dos depósitos. O padrão de organização dos sedimentos no interior das camadas é uma consequência direta do regime hidrodinâmico das correntes ao longo de sua trajetória.

**Palavras-Chave:** turbiditos; correntes de turbidez; simulação física; correntes de densidade.

**Abstract** – The present study aims to evaluate internal structure details from turbidites generated by physically simulated density currents attempting to correlate structural aspects of the deposits and flow internal dynamics. Twenty experiments, composed of two or four flows each, were performed in a bi-dimensional planar slope channel. Data from the currents (flow rate, geometry, velocity and acceleration) and from their deposits (thickness and internal structures) were collected. The internal arrangement of the grains and the vertical association of depositional facies indicated the occurrence of normally and inversely graded beds as well as massive beds. The sediment patterns within the deposit layers seem to be directly related to the hydrodynamics of the currents.

**Keywords:** Turbidites; turbidity currents; physical simulation; density currents.

## 1. Introdução

Este estudo é resultado da campanha de ensaios realizados nas instalações do Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade (NECOD/UFRGS) numa parceria entre o Instituto de Geociências (IG/UFRGS) o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS) e a Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS).

As correntes de densidade não conservativas são fluxos induzidos pela ação da gravidade, sobre misturas de água e partículas sólidas (fluido + sedimento), devido à diferença de densidade entre a mistura e o fluido ambiente (Kneller & Buckee, 2000).

De acordo com Mutti et. al. (1999), os depósitos turbidíticos são caracterizados pelo acúmulo de material siliciclástico em ambiente marinho profundo, apresentando em geral um decréscimo longitudinal na granulometria do material, com predomínio das frações mais grossas (areia muito grossa, grossa, grânulos e cascalho) nas porções mais próximas, sucedido mergulho abaixo por frações intermediárias (areia média a fina) e nas porções distais da bacia pelas frações finas (areia muito fina a argila). Verticalmente os turbiditos podem ser definidos como uma sucessão de camadas gradadas e/ou maciças compostas pela associação entre arenitos/pelitos, que foram depositadas por correntes de turbidez (alta e/ou baixa densidade) e normalmente recobertas por sedimentos hemipelágicos, contendo assembléias de fósseis de águas profundas.

O modelo de Bouma (1962) é um exemplo clássico de depósitos turbidíticos gradados resultado da sedimentação de correntes turbidíticas de baixa densidade. O referido modelo foi elaborado a partir do mapeamento de detalhe de afloramentos, o autor identificou uma sucessão (ideal) de estruturas sedimentares no interior das camadas turbidíticas, propondo uma sucessão vertical de fácies com granodecrescência ascendente (gradação normal), que quando completa apresenta na porção basal um horizonte maciço (intervalo Ta), passando a arenitos com laminação plano-paralela (Tb), laminação gerado por *Ripples* (Tc), lamas e hemipelágicos associados as porções terminais dos fluxos turbidíticos (Td) e, por último, sedimentos pelágicos bioturbados associados a sedimentação da própria bacia.

O uso da modelagem física de correntes de densidade como método de interpretação dos fenômenos turbidíticos, teve início na década de 50, com o trabalho inovador de Kuenen & Migliorini (1950), que utilizou modelos reduzidos no estudo das correntes e dos depósitos associados. Este trabalho é reconhecido como um marco na modelagem de turbiditos, apresentando os primeiros registros de depósitos gradados fora do ambiente natural.

Estudos desenvolvidos em canais bidimensionais com declividade variável e em canais tridimensionais com geometria complexa, foram realizados no Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade (NECOD), do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, com o intuito de avaliar a relação existente entre os diferentes parâmetros envolvidos na simulação de correntes turbidíticas. Estes experimentos abordam casos específicos como: o desenvolvimento das correntes em meio estratificado (Brito et al, 2002), mudanças no padrão de deposição das correntes de acordo com o ângulo de inserção da mistura (Sartor et al, 2002), comportamento e desenvolvimento de correntes formadas por parcelas conservativas e não conservativas (Dücker et al, 2002), desenvolvimento de formas de leito em canais tridimensionais (Manica, 2002 e Del Rey, 2003) e o arranjo interno dos grãos no interior do pacote sedimentar (Ávila et al, 2002 e Ávila 2003).

## 2. Metodologia

A etapa experimental constou de duas séries de ensaios, divididas em: **a) 1ª série** – 6 ensaios com correntes intercaladas (tempo de simulação entre a primeira corrente e a posterior de aproximadamente 12 horas), sendo 3 ensaios com baixa vazão de inserção de material ao canal ( $q = 5,5$  l/min) e 3 ensaios com alta vazão ( $q = 9$  l/min) e **b) 2ª série** – 14 ensaios com correntes consecutivas (tempo de simulação entre a primeira corrente e a posterior de aproximadamente 1 minuto); totalizando 20 simulações com sucessão de duas ou mais correntes. Os parâmetros físicos iniciais das correntes (concentração, massa específica, granulometria inicial, etc) foram fixados em um mesmo valor para todos os ensaios, variando-se apenas a vazão média de aporte de material no canal (entre 5 e 10 l/min). As simulações foram realizadas no NECOD (Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade), em canal bidimensional com as dimensões de 300 x 12,5 x 20cm (figura 1).

As correntes de densidade, simuladas neste estudo, foram elaboradas a partir da dissolução de uma quantidade específica de carvão mineral em 4 litros de água. O carvão utilizado para simular o material sedimentar das correntes turbidíticas apresenta as seguintes características: massa específica de 1365 kg/m<sup>3</sup>, grãos variando de semi-angular a semi-arredondados e velocidade de queda média das frações utilizadas de 0,005 m/s.

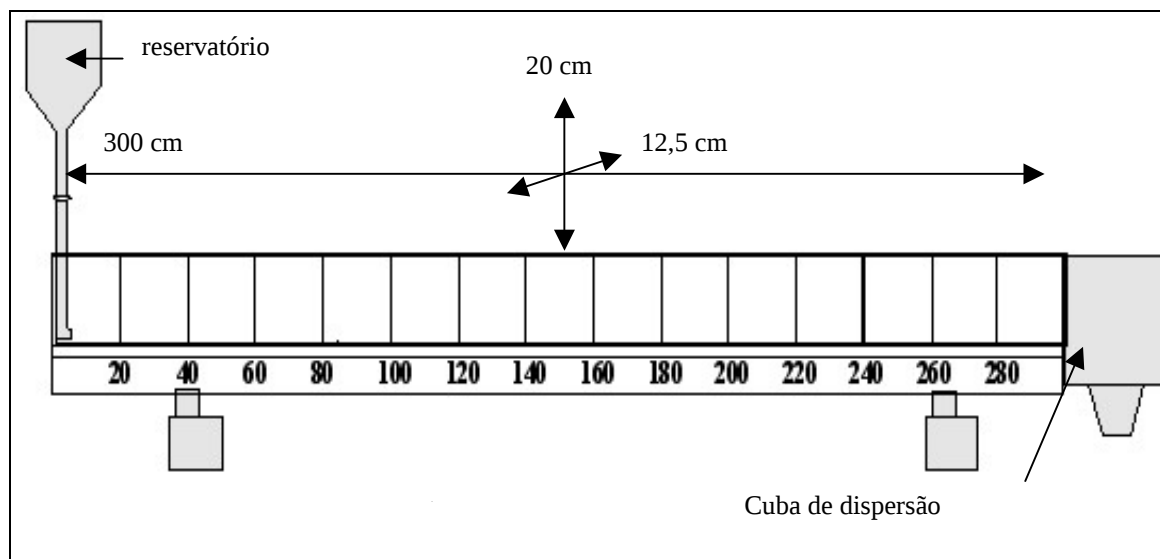


Figura 1: Perfil esquemático do canal bidimensional de pequeno porte.

A metodologia utilizada nos ensaios foi de fluxo contínuo, conforme Manica (2002) e Ávila (2003). Os procedimentos experimentais seguiram uma rotina de etapas que foram desempenhadas de forma integral a fim de salvaguardar a confiabilidade dos resultados. Tais etapas foram desenvolvidas em três instantes distintos do ensaio (preparação, simulação e pós-simulação), considerando o desenvolvimento da corrente ao longo do canal.

### 3. Resultados

O estudo de detalhe dos pacotes sedimentares enfatizou a análise textural dos perfis longitudinais e verticais dos depósitos, bem como o arranjo interno dos grãos e características estruturais.

#### 3.1. Distribuição longitudinal dos depósitos

A análise detalhada dos perfis longitudinais dos ensaios revelaram a ocorrência de dois padrões deposicionais distintos. O primeiro com três trechos deposicionais (distribuição convexa) com um predomínio de amostras com melhor grau de seleção nos intervalos intermediários do canal (figura 2), este tipo de padrão de distribuição das frações granulométrica foi verificado principalmente nos ensaios com correntes intercaladas e baixa vazão. A figura 3 mostra o segundo padrão de deposição, caracterizado pela ocorrência de apenas dois trechos deposicionais com amostras melhor selecionadas nas porções iniciais e finais do canal (distribuição côncava), tal padrão foi mais característico nos ensaios com correntes intercaladas e alta vazão e nos ensaios com correntes consecutivas.

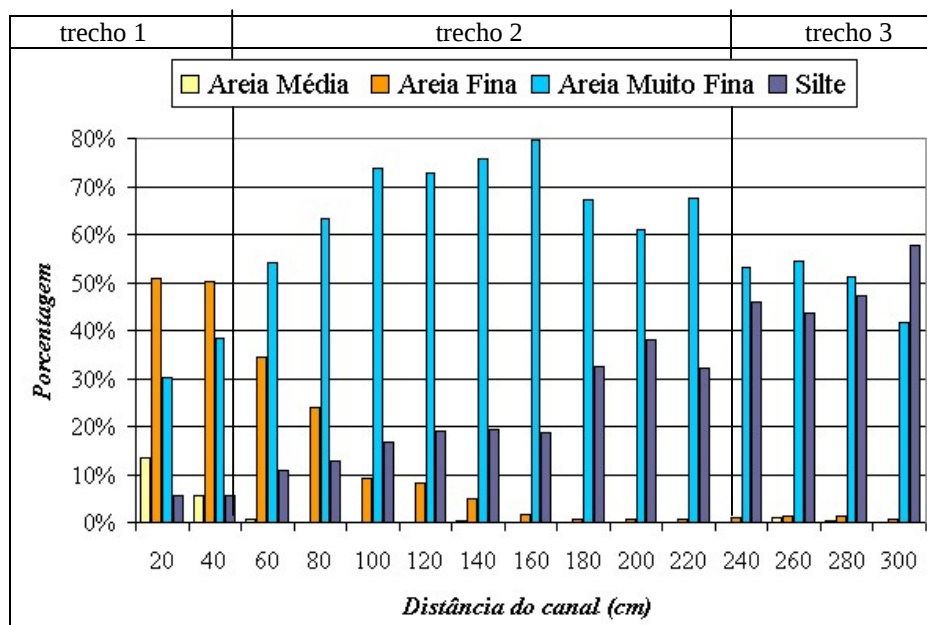


Figura 2: Distribuição longitudinal do tipo convexa.

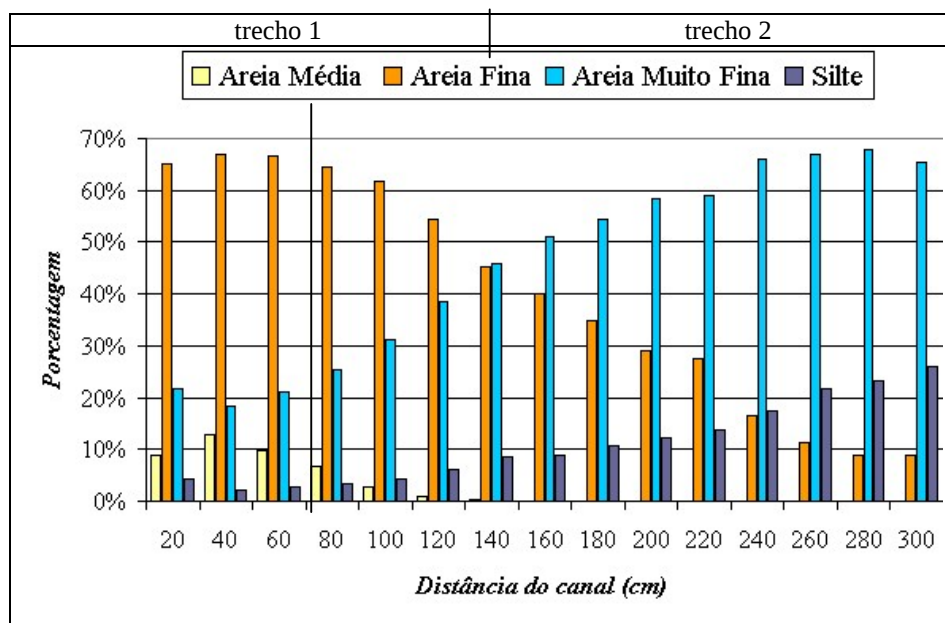


Figura 3: Distribuição longitudinal do tipo concava.

A verificação da espessura média dos depósitos e a medição das velocidades médias das correntes revelaram o predomínio de dois padrões morfológicos associados principalmente à velocidade inicial do fluxo e a aceleração da corrente ao longo de sua trajetória, como mostra a figura 4.

Nos ensaios com correntes intercaladas e baixa vazão os depósitos apresentaram um perfil mais proeminente na porção proximal do canal com uma espessura máxima em torno de 2,8cm, o perfil de velocidade média da parte frontal da segunda corrente, lançada de forma intercalada, revelou uma velocidade inicial bem inferior às velocidades iniciais dos demais ensaios, favorecendo a rápida deposição da carga em suspensão e corroborando para o espessamento do depósito próximo à área fonte de sedimentos (figura 4).

Os depósitos gerados por correntes intercaladas de alta vazão e correntes consecutivas apresentaram um perfil longitudinal muito semelhante com aspecto mais uniforme e menos espesso do que os depósitos das correntes de baixa vazão, esse fato pode ser explicado pelo aumento na velocidade inicial das correntes e a diminuição da zona de mistura da porção superior e frontal do fluxo (figura 4).

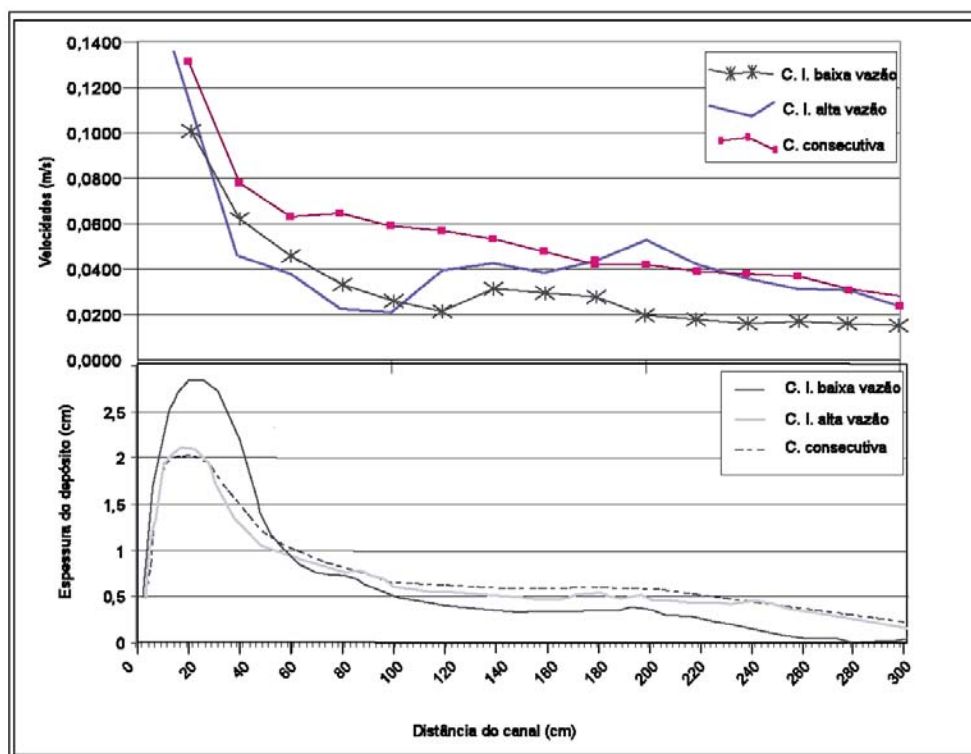


Figura 4: Perfis de velocidade média da passagem da parte frontal da segunda corrente simulada de forma sucessiva, e espessura média dos depósitos gerados após a passagem da segunda corrente (C = Correntes e I = Intercaladas).

### 3.2. Distribuição vertical dos depósitos

A avaliação textural e estrutural dos perfis verticais dos depósitos revelou a ocorrência de um padrão de arranjo interno dos grãos característico para cada um dos tipos de simulações efetuadas.

Na figura 5 podemos observar o padrão de arranjo interno dos grãos no interior do pacote sedimentar formado pela passagem de duas correntes intercaladas e baixa vazão houve, percebe-se um predomínio de camadas nitidamente gradadas e estratos apresentando uma granodecrescência ascendente, principalmente nas porções proximais do depósito. A gradação normal das camadas pode ser evidenciada visualmente e a partir da análise textural de topo e base dos estratos.

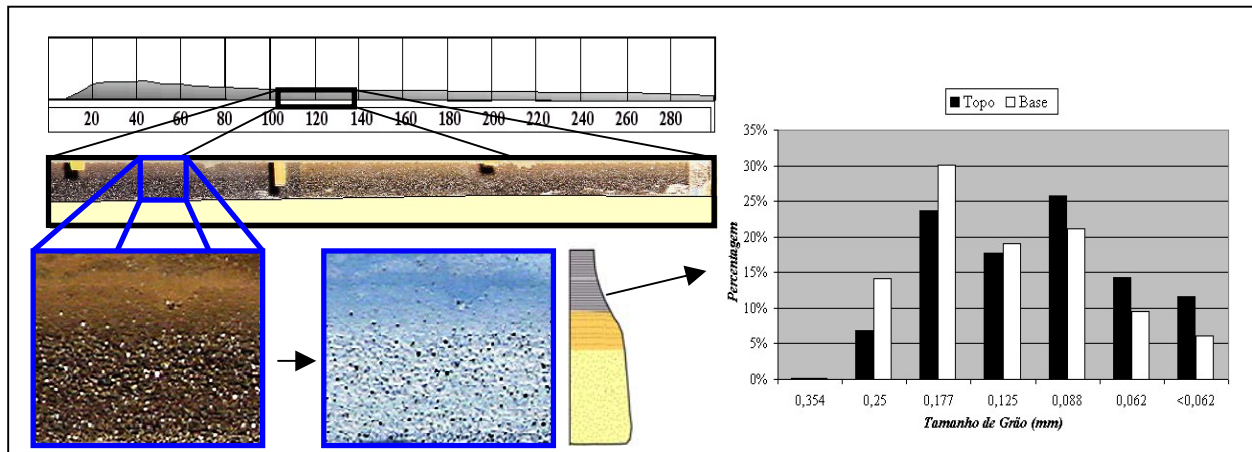


Figura 5: Perfil vertical de um depósito gerado a partir da simulação de duas correntes intercaladas e baixa vazão.

A figura 6 mostra o perfil vertical de um depósito gerado em ensaio com correntes intercalada e alta vazão, o perfil vertical destes depósitos são caracterizados pela ocorrência de estratos maciços na porção proximal do perfil passando para intervalos com gradação normal nas porções intermediárias e distais do canal. A formação dos estratos maciços é uma consequência direta do aumento na energia do sistema, evidenciado pela elevação da velocidade inicial das correntes.

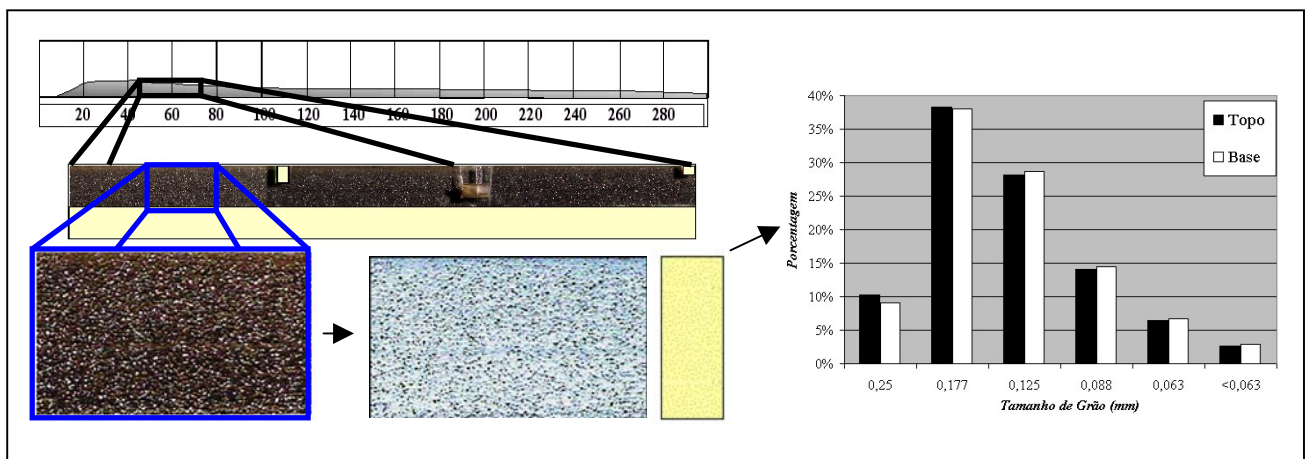


Figura 6: Perfil vertical de um dos depósitos gerados a partir da simulação de duas correntes intercaladas e alta vazão.

Os depósitos formados a partir da simulação de duas ou mais correntes de forma consecutivas apresentaram um arranjo interno bem peculiar, com a ocorrência de estratos inversamente gradados na porção proximal do canal (figura 7), passando para estratos maciços nas porções intermediárias e para estratos com gradação normal nas porções mais distas. A formação das camadas inversamente gradadas nos primeiros 60cm do canal está associado a uma aceleração

temporal do fluxo ocasionado pela inserção de uma segunda corrente de forma consecutiva, ocasionando um acréscimo na energia cinética do sistema.

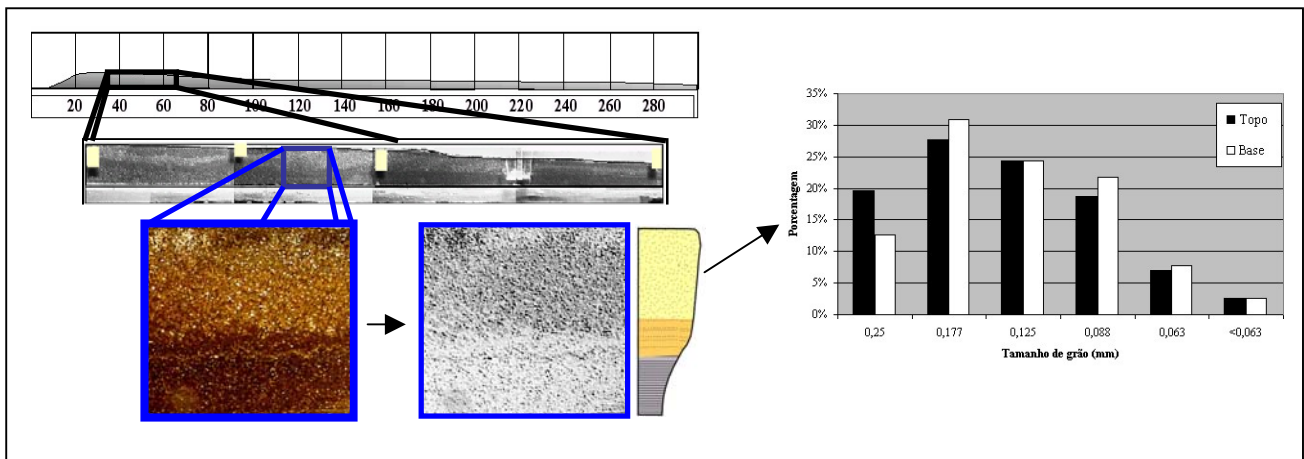


Figura 7: Perfil vertical de um depósito gerado a partir da simulação de duas correntes consecutivas.

#### 4. Conclusões

Observando os registros deposicionais formados em cada um dos três tipos de correntes simuladas nesse estudo, podemos verificar algumas características pertinentes aos fluxos turbiditos e impressos no registro deposicional.

De acordo com modelo proposto por Kneller (1995), as mudanças nas características internas dos depósitos estão relacionadas às variações temporais e espaciais da velocidade das correntes ao longo de sua trajetória. O referido autor propôs uma classificação para as correntes de turbidez através das suas características hidrodinâmicas, baseando-se nos conceitos de regime permanente e uniforme. Utilizando a nomenclatura de Kneller (1995) podemos dizer que as correntes intercaladas de baixa vazão podem ser classificadas como fluxos não permanentes desacelerados (*Waning flow*) ocasionando depósitos que tendem a se adelgaçar mergulho abaixo e apresentando estratos com gradação do tipo normal. As correntes intercaladas com alta vazão podem ser classificadas como fluxos “*quasi-stead*”, ou seja que apresentam pequenas variações de velocidade ao longo de sua trajetória. E finalmente as correntes consecutivas podem ser referenciadas como fluxos não permanentes acelerados (*waxing flow*), ocasionando a formação de depósitos mais contínuos e com estratos inversamente gradados.

#### 5. Referências

- AVILA, M. D. (2003) Modelagem física de correntes de densidade no estudo de depósitos turbidíticos. *Dissertação de mestrado em Geociências* - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BOUMA, A. H. 1962. Sedimentology of some flysch deposits: a graphic approach to facies interpretation. Amsterdam: Elsevier; 168p.
- BRITO, D. U.; MEDEIROS, D. S.; MANICA, R.; BORGES, A. L. O., MAESTRI, R. D. 2002. Emprego de equipamento de visualização (Ecógrafo Médico) para o estudo de correntes de densidade não conservativas. *Revista Técnica de Energia, Petróleo e Gás*. Rio de Janeiro, vol. 1, nº 2 (jul./ago./set./2002), p. 54-58.
- DÜCKER, R. E.; ÁVILA, M. D.; MAESTRI, R. D.; BORGES, A. L. de O. 2003. Influence of the Finer Material Portion in Physical Simulation of Density Currents. *AAPG Annual Meeting 2003*, p. A-45.
- KNELLER, B. 1995. Beyond the turbidite paradigm: physical models for deposition of turbidite and their implications for reservoir prediction. In: *Characterization of deep marine clastic systems*. The Geological Society Special Publication, London, p. 31-49.
- KNELLER, B. & BUCKEE, C. 2000. The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological implications. *Sedimentology*, Oxford, v.47, Suppl. 1, p. 62-94.
- KUENEN, P.H.H. e MIGLIORINI, C.I. 1950. Turbidity currents as a cause of graded bedding. *Journal of Geology*, v.58, 91-127.
- MANICA, R. 2002. Modelagem física de correntes de densidade não conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada, 161p. *Dissertação (Mestrado em Engenharia)* - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.