

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

**MODELAGEM FÍSICA TRIDIMENSIONAL DE CORRENTES DE
TURBIDEZ: CARACTERIZAÇÃO ESPACIAL DE DEPÓSITOS
ANÁLOGOS SOB AÇÃO DE CONTROLES AUTOGÊNICOS.**

CRISTIANO FICK

ORIENTADORES:

Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr

Prof. Dr. Rafael Manica

Volume I

Porto Alegre – 2015

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

**MODELAGEM FÍSICA TRIDIMENSIONAL DE CORRENTES DE
TURBIDEZ: CARACTERIZAÇÃO ESPACIAL DE DEPÓSITOS
ANÁLOGOS SOB AÇÃO DE CONTROLES AUTOGÊNICOS.**

CRISTIANO FICK

ORIENTADORES:

Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr

Prof. Dr. Rafael Manica .

BANCA EXAMINADORA:

Claiton Marlon dos Santos Scherer (UFRGS/Geociências)

Jair Weschenfelder (UFRGS/Geociências)

Eduardo Puhl (UFRGS/IPH)

Dissertação de Mestrado apresentada
como requisito parcial para a obtenção
do Título de Mestre em Ciências.

Porto Alegre – 2015

Ficha Catalogáfica

Fick, Cristiano

Modelagem física tridimensional de correntes de turbidez: caracterização espacial de depósitos análogos sob ação de controles autogênicos. . / Cristiano Fick. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2014.

[71 f.] il.

Dissertação (Mestrado).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2014.

Orientador(es):Elírio Ernestino Toldo Jr

Coorientador(es):Rafael Manica

1. Controles autogênicos 2. Sistemas marinho-profundo 3. Modelagem física 4. Auto canalização I. Título.

CDU 911

Dedicatória

*“O tempo é muito lento para os que esperam.
Muito rápido para os que têm medo.
Muito longo para os que lamentam.
Muito curto para os que festejam.
Mas, para os que amam, o tempo é eterno.”*

Henry Van Dike

Em memória de meu pai, Renato.

Resumo

A presente dissertação aborda a modelagem física de sistemas marinho profundo em escala reduzida, uma metodologia que vem contribuindo no entendimento dos processos sedimentares atuantes neste ambiente, principalmente as correntes de turbidez, fluxo gravitacional subaquoso responsável pela formação dos turbiditos, importantes reservatórios de hidrocarbonetos da costa brasileira. A modelagem física 3D empregada neste trabalho aborda a influência da autogênese no comportamento espacial e evolutivo de depósitos análogos gerados por simulações de correntes de turbidez em duas séries de 10 experimentos com parâmetros de controle constantes (vazão, concentração volumétrica de sedimentos, tipo e granulometria das partículas sedimentares), onde em cada série foi utilizada uma concentração de sedimentos diferente: uma com maior concentração – HDTC (high-density turbidity currents) e outra com menor concentração – LDTC (low-density turbidity currents) onde se buscou observar o efeito desta propriedade na construção dos depósitos. Para caracterizar o comportamento geométrico dos depósitos, uma nova abordagem estatística é utilizada a partir de uma análise de variância. Os resultados obtidos apontam que processos autogênicos locais puderam alterar a configuração global dos depósitos. A concentração de sedimentos teve influência direta nas características morfológicas e evolutivas dos depósitos, sendo os experimentos de HDTC os que apresentam uma evolução mais complexa, onde ocorreu um processo de auto-confinamento das correntes, gerando uma morfologia mais diversa.

Palavras-chave: controles autogênicos, sistemas marinho-profundo, modelagem física, auto canalização, repetibilidade

Abstract

Autogenic / allogenic controls have been discussed widely because they represent an important parameter in the constructive and evolutionary process of a sedimentary system. To evaluate these controls in submarine fans and analyse its capacity of self-organizing and creating depositional patterns, this work performed fully controlled 3D physical simulations of turbidity currents under ideal autogenic controls (no external influence) with detailed data for the generated deposits. Two series of 10 experiments of high-density turbidity currents (HDTC) and low-density turbidity currents (LDTC) were run, keeping all other input parameters (discharge, volumetric concentration, type and grain size) constant. From statistical and qualitative approach were characterised the geometric elements and morphodynamic behaviour of the deposits (centroid, Length/Width ratio, morphodynamic evolution). The results indicate local autogenic processes change the global setting of the flow evolution and deposits of submarine fans. A morphodynamic evolution generated by HDTC showed complex stages of filling and stacking caused by two types of flow self-channelling. Type I is characterised by flow channelling due to the elevation of levees without lateral avulsion and more efficient sediment transport (longer deposits, with terminal lobes well developed), and Type II is characterised by flow channelling but allows lateral avulsions and involves less efficient sediment transport (shorter deposits with terminal lobes undeveloped). The HDTC deposits showed random behaviour for the length/width ratio and for the centroid of sedimentary bodies and distinct morphological elements (elongated central deposit, fringes and distal lobes). By contrast, the LDTC morphodynamics were simplified without any self-confining process or distinct morphological elements. Finally, the statistical approach showed that the HDTC deposits had a greater variance of geometrical elements in relation to LDTC deposits. The experiments provided evidence that high rates of sediment supply decisively influenced the geometry and morphodynamic of the deposits, as well as they self-organizing capacity.

Keywords: autogenic controls, self-channelizing, deep water system, physical modelling, repeatability.

Lista de Figuras

- Figura 1: Modelos deposicionais de leques submarinos retirados de Nichols (2009). 13
- Figura 2: Imagens do tanque de simulação. A) tanque, B) torre de alimentação e C) geometria interna do tanque. 16
- Figura 3: Sistema de alimentação. Em A, uma imagem do sistema de alimentação posicionado ao lado do tanque, próximo do ponto de injeção da mistura. Em B, um esquema do sistema de alimentação com seus respectivos componentes e dimensões: a – misturador elétrico, b – reservatório metálico, c – tubulação de PVC 25 mm, d – medidor de vazão, e – registro do medidor de vazão, f – reservatório de descarte de mistura, g – mangueira que conecta a tubulação ao difusor dentro do tanque, V1 – válvula 1, V2 – válvula 2 e V3 – válvula 3. 18
- Figura 4: Misturador elétrico. A - motor e suporte de sustentação, B – hélice que proporciona a agitação da mistura, C – mistura sendo agitada. 19
- Figura 5: Laser MD250 - ADV acoplado à mesa de coordenadas. 20
- Figura 6: Mesa de coordenadas sobre o tanque de ensaios. 20
- Figura 7: Medidor de vazão Siemens MAG500. 21
- Figura 8: Analisador de partículas a laser. 22
- Figura 9: Balança modelo Marte AS5500C. 22
- Figura 10: Estufa Famem 311 CG. 23

- Figura 11: Posicionamento dos holofotes e câmara fotográfica. 24
- Figura 12: Amostragem de mistura sedimentar. 25
- Figura 13: Seqüência operacional de um ensaio. 1 – abertura das válvulas V1 e V2 para a amostragem inicial. 2 – calibração da vazão. 3 – fechamento da válvula V2 e abertura da válvula V3 para iniciar o ensaio. 4 – fechamento da válvula V3 para finalizar o ensaio e abertura da válvula V2 para a amostragem final. 26

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Valores dos parâmetros utilizados nos experimentos. | 14 |
| Tabela 2: Quantidades de carvão e água utilizados para produzir as misturas sedimentares. | 17 |

Sumário

| | |
|---|----|
| RESUMO | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| LISTA DE FIGURAS | 3 |
| LISTA DE TABELAS | 5 |
| 1 INTRODUÇÃO | 8 |
| 2 OBJETIVOS | 9 |
| 3 ESTADO DA ARTE | 10 |
| 3.1 Conceituação: Controles Autogênicos e Alogênicos | 10 |
| 3.2 Modelagem Física no Estudo de Processos Autogênicos | 10 |
| 3.3 Modelos de Sistema de Leque de Águas Profundas | 12 |
| 4 MATERIAIS E MÉTODOS | 14 |
| 4.1 Técnica de Simulação | 15 |
| 4.1.1 Tanque | 15 |
| 4.1.2 Mistura sedimentar. | 16 |
| 4.1.3 Sistema de Alimentação | 17 |
| 4.1.4 Equipamentos | 19 |
| 4.1.4.1 Distanciômetro a laser | 19 |
| 4.1.4.3 Medidor de vazão eletromagnético | 21 |
| 4.1.4.4 Analisador de partículas á laser | 21 |
| 3.1.4.5 Balança de Precisão | 22 |

| | |
|--|----|
| | 7 |
| 4.1.4.6 Máquina Fotográfica | 22 |
| 4.1.4.7 Estufa | 22 |
| 4.2 Procedimento de Modelagem Experimental | 23 |
| 4.2.1 Pré-Simulação | 23 |
| 4.2.2 Simulação | 25 |
| 4.2.3 Pós-Simulação | 27 |
| 5 CARTA DE SUBMISSÃO | 29 |
| 6 ARTIGO | 30 |
| 7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS | 30 |
| 8 REFERÊNCIAS | 32 |

1 Introdução

A presente dissertação aborda o comportamento espacial de leques submarinos, dominados por correntes de turbidez, sob a ação de controles (forçantes) autogênicos, através de modelagem física em escala reduzida.

O estudo dos controles autogênicos sobre sistemas sedimentares utilizando modelagem física vem se tornando, nos últimos 10 anos, um recorrente tema de pesquisa nesta área (Paola *et al*, 2009), uma vez que a maioria dos experimentos realizados até recentemente, abordam o cenário alogênico, onde se busca observar no modelo (sistema a ser criado) o efeito das oscilações nos parâmetros de entrada (condições de contorno) ao longo das simulações. Por outro lado, nos estudos envolvendo processos autogênicos, busca-se observar a capacidade de auto-organização do sistema, suas tendências morfológicas e arquiteturas, além de sua abrangência espaço-temporal.

Seguindo esta linha, este trabalho dá prosseguimento ao estudo de Fick (2012) (Projeto Temático em Geologia), que estabeleceu os procedimentos e diretrizes experimentais executadas neste estudo, além de fornecer 50% dos dados utilizados na produção desta pesquisa. A partir de duas séries com 10 experimentos cada, totalizando 20, uma de maior concentração (HDTC – high-density turbidity currents) e outra de menor concentração (LDTC – low-density turbidity currents), onde todos os parâmetros controladores (vazão, concentração volumétrica, granulometria da mistura) eram iguais e constantes ao longo do tempo, buscou-se observar o comportamento dos depósitos, para duas condições de fluxo, em um cenário autogênico ideal (sem influência externas).

Os experimentos de modelagem física realizados para a elaboração deste estudo foram executados no laboratório do Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade (NECOD) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS.

2 Objetivos

- Identificar comportamentos espaciais evolutivos (morfológicos e geométricos) nos padrões dos depósitos de leques submarinos análogos;
- Observar a influência da concentração de sedimentos no comportamento espacial evolutivo dos depósitos;
- Aplicar a repetibilidade experimental e ferramentas estatísticas quantitativas para descrever comportamentos preferenciais dos depósitos;
- Comparar os depósitos gerados nos experimentos com modelos de leques submarinos existentes na literatura.

3 Estado da Arte

3.1 Conceituação: Controles Autogênicos e Alogênicos

O primeiro trabalho a apresentar uma proposta para diferenciar as forças controladoras de um sistema sedimentar foi Beerbower (1964), introduzindo os termos autociclos e alociclos, ou autogênico e alogênico (como empregado neste trabalho, por ser mais comumente usado na literatura atual), este autor aborda um sistema de planície aluvial, onde seus elementos (canais, canais abandonados, diques marginais, canais de *crevasse* e planície de inundação) podem sofrer modificações progressivas distintas neste ambiente, de acordo com o tipo de controle exercido sob os mecanismos sedimentares.

Assim os controles autogênicos, seriam aqueles associados a um prisma unicamente sedimentar, a partir dos gradientes internos de energia do sistema, sem grandes mudanças de vazão, aporte sedimentar e declividade, e de abrangência local. Os principais mecanismos ligados a esse tipo de controle seriam a migração e abandono de canais, avulsão e formação de canais distributários.

Já os controles alogênicos seriam associados à forças externas ao sistema sedimentar, caracterizadas por grandes variações nas taxas de vazão, aporte sedimentar e declividade, com abrangência global. Neste caso, os principais mecanismos envolvidos seriam a tectônica, o clima e variação do nível do mar.

Outros aspectos inerentes a esses controles dizem respeito ao comportamento dos depósitos gerados para cada tipo de controle, em termos das feições que caracterizam cada um, do determinismo ou aleatoriedade envolvidos nos processos, além da escala espaço – temporal em que cada um atua. Por exemplo, de acordo com alguns autores, como Schwarzacher (1993), Cecil *et al.* (2003) e Muto, *et al.* (2004), controles autogênicos produzem assinaturas estratigráficas aleatórias, dentro de uma escala de tempo pequena e de abrangência local, pois são resultado da auto-organização do sistema, enquanto que os controles alogênicos tendem a apresentar no registro, assinaturas estratigráficas determinísticas em maior escala de tempo e de abrangência regional (global), pois são controladas por ciclos periódicos, como os ciclos de Ciclos de Milankovitch (10^4 anos), que possuem periodicidade regular.

3.2 Modelagem Física no Estudo de Processos Autogênicos

Até o final da década de 90, a maior parte dos estudos de modelagem física de sistemas sedimentares tinham como foco a influência de controles alogênicos no comportamento morfodinâmico dos depósitos, isto é, procuravam observar qual era a resposta do modelo a uma oscilação das taxas de algum parâmetro controlador do experimento ao longo do tempo (Paola *et al.*, 2009).

No entanto, como muitos controles existentes no ambiente marinho ainda não são muito bem conhecidos, existe certa dificuldade de se obter um melhor entendimento e aplicar os resultados obtidos em modelagem física para modelos naturais. Desta maneira, a partir do início deste século, começou-se a estudar o comportamento dos processos autogênicos, focando a sua influência nas diferentes escalas arquiteturais e de tempo, tornando-se até a presente época, um dos principais focos de estudo em simulações físicas de sistemas marinho profundo (Paola *et al.*, 2009).

Alguns dos estudos já realizados para averiguar a escala espaço – temporal de influência dos controles autogênicos, utilizando modelagem física, são Straub *et al.* (2009), Hajek *et al.* (2010) e Wang *et al.* (2011).

- Straub *et al.* (2009): Propõem um cálculo para quantificar o *compensational stacking* (empilhamento compensatório - capacidade de um sistema sedimentar preencher baixos topográficos, suavizando o relevo de modo a diminuir a energia potencial interna), a partir da razão: taxa de sedimentação pela taxa de subsidência em um determinado ponto da bacia, dentro de uma janela temporal, aplicando-o em sistemas deltaicos e mini bacias de águas profundas. Analisando seis sistemas deposicionais e experimentais, conclui que mesmo sem influências externas, o empilhamento estratigráfico de uma bacia pode ser controlado pela frequência de avulsões de canais (forçante autogênica).

- Hajek et al. (2010): Comparou a distribuição de depósitos de canal de sistema aluvial em um experimento e afloramentos da Formação Ferris (Cretáceo-Paleógeno, centro-sul de Wyoming, EUA), ambos sem ação de forçantes alogênicas, utilizando método estatístico de *spatial point process*, que analisa comportamento espacial dos agrupamentos de canais no arcabouço estratigráfico de uma bacia aluvial. Os autores observaram que a distribuição dos corpos de canais mostrou um grau de organização maior do que era esperado para um processo aleatório em uma longa escala de tempo ($10^3 - 10^5$ anos), demonstrando o poder de auto-organização do sistema sedimentar. A

partir disso os autores discutem as interpretações que são feitas de arquiteturas estratigráficas organizadas, onde na maioria das vezes esse maior grau de determinismo é atribuído a controles alogênicos, apontando que há evidências do contrário e que é necessário um maior cuidado ao se fazer este tipo de interpretação, pois um sistema sob a ação de forçantes autogênicas também pode apresentar comportamentos determinísticos em uma longa escala de tempo.

- Wang *et al.* (2011): Estudou as feições que permitem identificar as assinaturas das forçantes autogênicas e alogênicas no registro estratigráfico e suas respectivas escalas espaço-temporais de abrangência, observando o comportamento evolutivo da topografia (*compensational stacking*) de depósitos aluviais e deltaicos. Para isso, utilizou modelagem numérica e física, além de análise de afloramentos da Formação Ferris. Observou que processos autogênicos, com forte *compensational stacking*, observados no comportamento da avulsão de canais e taxa de subsidência, podem ter abrangência temporal significativa, maior do que esperada para processos alogênicos, como por exemplo o Ciclos de Milankovitch.

3.3 Modelos de Sistema de Leque de Águas Profundas

Os modelos apresentados neste item foram utilizados para comparar as morfologias entre os depósitos gerados nos experimentos e os existentes na natureza. Na literatura existem vários modelos de sistemas turbidíticos, que são diferenciados pelo tipo dominante de tamanho de grão e, conseqüentemente, pelo contexto morfológico e tectônico da margem continental em questão.

Nichols (2009), apresenta quatro modelos de sistemas águas profundas (Fig. 01), classificando-os em:

- Sistemas ricos em grossos (*gravel-rich systems*) (Fig. 1A) – leques submarinos curtos (alguns km), alimentados por sistemas deltaicos associados a leques aluviais ou rios entrelaçados, em margens continentais de plataforma estreita. Os sedimentos grossos são depositados por fluxo de detritos e as areias rapidamente por correntes de turbidez de alta densidade. O leque se afina abruptamente nas porções mais distais ocorrendo apenas deposição de sedimentos pelágicos.

- Sistemas ricos em areia (*sand-rich systems*) (Fig. 1B) – leques submarinos constituídos por ao menos 70% de sedimentos arenosos. São alimentados por

plataformas ricas em areia, onde ondas, tempestades e correntes de maré selecionam o material, removendo a maior parte dos finos e deixando depósitos ricos em areia que são retrabalhados por correntes de turbidez de alta densidade. Estas correntes possuem baixa eficiência, gerando um leque de dezenas de km. Os elementos arquiteturais presentes são canais e lobos canalizados distais, que são circundados por pacotes de sedimentos finos pouco espessos.

- Sistemas mistos de areia-lama (*mixed sand-mud system*) (Fig. 1C) – leques submarinos associados a sistemas deltaicos e fluviais que suprem o leque submarino com areia e lama, sendo constituídos de 30% a 70% de areia. Este sistema possui alta eficiência de transporte estendendo-se por dezenas a centenas de km, contendo canais de *levee* e lobos deposicionais como feições características. Os lobos deposicionais são formados tanto por correntes de turbidez de alta densidade, quanto por correntes de turbidez de baixa densidade, onde os lobos constituem-se por extensas lentes arenosas interdigitadas em finas camadas de lama.

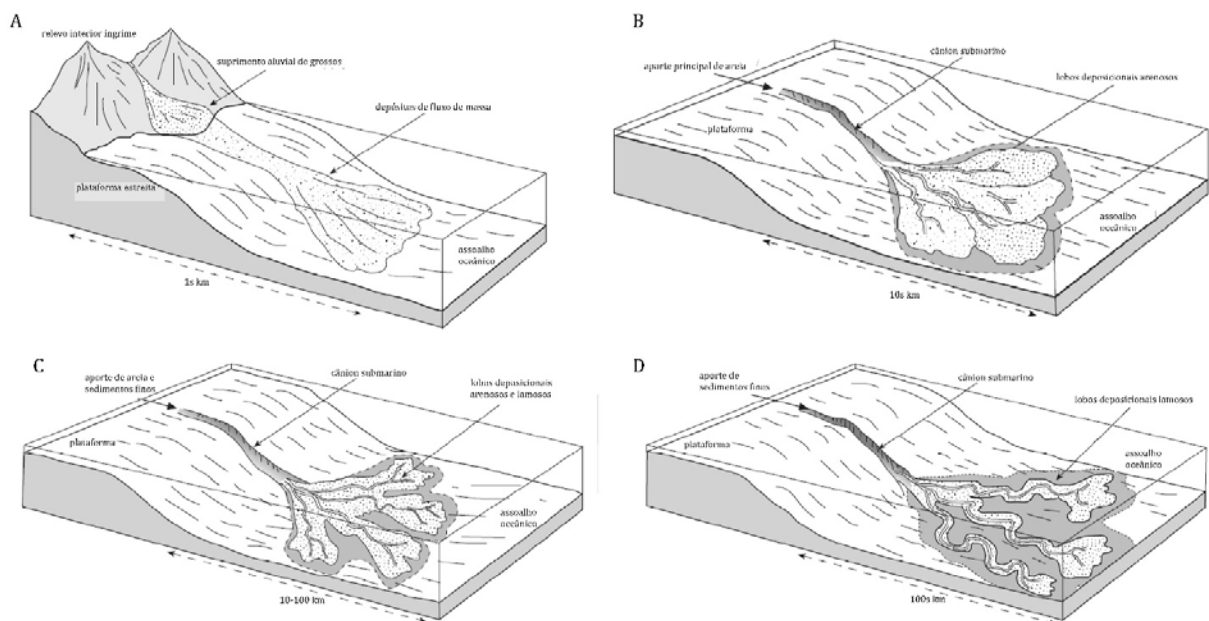


Figura 1: Modelos deposicionais de leques submarinos retirados de Nichols (2009).

- Sistemas lamosos (*muddy systems*) (Fig. 1D) – leques submarinos que mais ocorre nos oceanos atuais, associados a desembocaduras de grandes rios, como o Amazonas, Ganges, Brahmaputra e Mississipi. Possuem centenas de km de extensão e

são constituídos por menos de 30% de areia. O elemento arquitetural dominante são canais com forte sinuosidade em zonas com baixa declividade, sendo os seus depósitos constituídos de areia e muita lama nas margens gerando *levees* bem desenvolvidos. Também possui lobos deposicionais pouco desenvolvidos e adelgaçados.

Já Bouma (2000) classifica os sistemas turbidíticos em duas classes extremas: sistemas dominados por grãos grossos e sistema dominado por grãos finos. O primeiro tipo está relacionado a margens continentais ativas, com alto gradiente de relevo, plataforma curta, área fonte próxima e alta competência hidráulica dos rios adjacentes, como por exemplo, os leques submarinos atuais de Redondo e La Jolla (costa oeste norte-americana). Já o segundo tipo está relacionado com margens continentais passivas com planícies costeiras extensas, baixo gradiente de relevo, sistemas fluviais maduros de baixa competência hidráulica, como por exemplo, o Rio Amazonas.

4 Materiais e Métodos

A metodologia empregada neste trabalho, tanto experimental quanto de análise de resultados, está descrita no artigo em anexo. No entanto, aqui neste capítulo descrevemos mais detalhadamente os equipamentos, materiais e os procedimentos utilizados nas séries experimentais, que já foram expostos em Fick (2012).

Foram realizados 20 experimentos, divididos em duas séries com 10 experimentos cada. Cada série representou uma das condições de fluxo propostas neste estudo, HDTC e LDTC, com seus respectivos parâmetros controladores (Tab. 1) constantes ao longo do tempo e iguais em todos os experimentos.

Tabela 1: Valores dos parâmetros utilizados nos experimentos.

| Condição de Fluxo | Quantidade de ensaios | Vazão (litros/min.) | Concentração volumétrica (%) | Densidade (Kg/m ³) | D ₅₀ das partículas (µm) | Tempo (min.) |
|--------------------|-----------------------|---------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------------|
| <u>HDTC</u> | 10 | 1,00 | 15,00 | 1028,50 | 45 | 30 |
| <u>LDTC</u> | 10 | 1,00 | 5,00 | 1009,50 | 45 | 30 |

4.1 Técnica de Simulação

A técnica de modelagem corresponde àquela utilizada para gerar os depósitos em escala reduzida, ou seja, os depósitos sedimentares que caracterizam os objetos de análise deste estudo.

Para a execução desta técnica foi necessário utilizar certos elementos e equipamentos que possibilitam a sua apropriada realização. Os quatro elementos principais que compõem esta etapa da modelagem são o tanque de simulação, a mistura sedimentar, sistema de alimentação e os equipamentos necessários para executar e analisar a modelagem.

4.1.1 Tanque

O tanque corresponde ao espaço físico em que as correntes de turbidez foram geradas e onde o depósito ou objeto de estudo se desenvolve. Este deve ter uma configuração espacial semelhante ao do espaço natural em que esses processos sedimentares ocorrem.

Assim, a modelagem física empregada neste estudo foi realizada em um tanque tridimensional (desconfinado) de alvenaria, denominado Cuba Retangular de Pequenas Dimensões, que simula a conexão do talude continental com a planície abissal, possuindo um plano inclinado a 4° e outro horizontal. Suas dimensões são de 110 cm de largura, 230 cm de comprimento, 30 cm de altura na parte proximal e 50 cm de altura na parte distal, acomodando um volume de aproximadamente 1000 litros (Fig. 2).

Este tanque possui três aberturas revestidas com vidro à jusante, para que a corrente possa ser observada frontalmente e lateralmente. Duas dessas aberturas se localizam nas paredes laterais e outra na parte a jusante do tanque.

Junto ao fundo do tanque, a jusante, localiza-se uma saída de água para efetuar o esvaziamento da cuba. Na parte superior, uma calha fixa controlava o nível de água dentro tanque, evitando o transbordamento do mesmo.

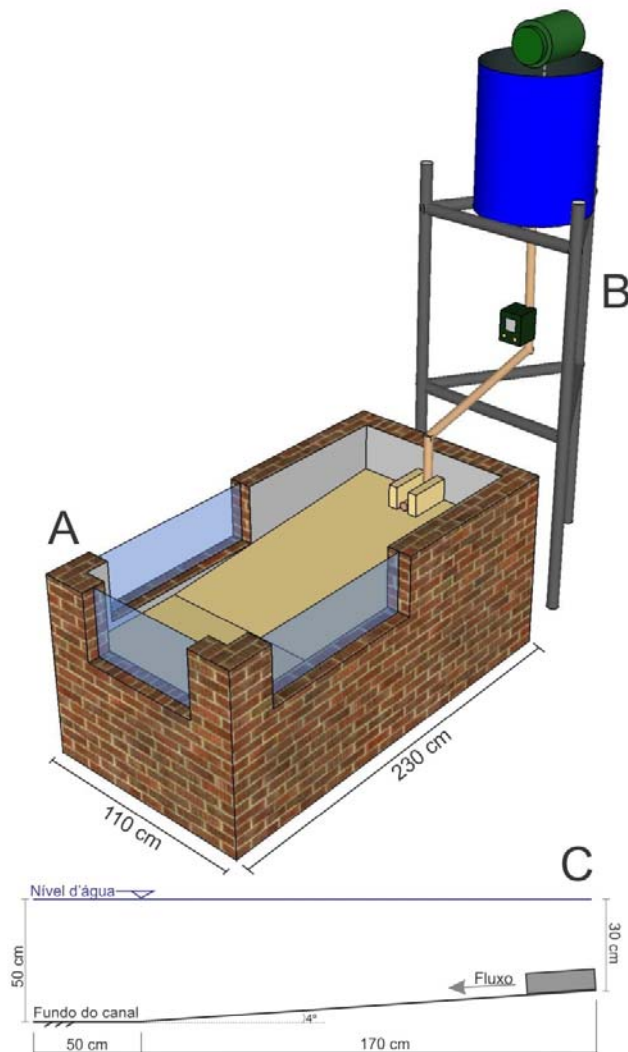


Figura 2: Imagens do tanque de simulação. A) tanque, B) torre de alimentação e C) geometria interna do tanque.

4.1.2 Mistura sedimentar.

A mistura sedimentar corresponde ao fluido injetado que forma a corrente de turbidez. A mistura é composta de um fluido, no caso água, e de partículas sólidas de um ou mais componentes materiais com densidade superior ao do fluido, e de mesmos ou variados tamanhos de partículas.

Na preparação da mistura sedimentar adotou-se a metodologia desenvolvida por Manica (2002), na qual foi utilizada uma mistura de água e carvão mineral peneirado.

Nos experimentos foi utilizado carvão mineral peneirado do tipo Cardiff (moído e peneirado na fábrica) com massa específica de 1190 kg/m^3 . Sua granulometria varia de

tamanho argila até areia fina, tendo um diâmetro médio ($D_{\text{médio}}$) de aproximadamente 45 μm . De acordo com o estudo de Manica (2002), este material apresenta bons resultados quanto ao efeito escala da modelagem em canais de pequeno porte.

O volume de mistura sedimentar injetado em cada ensaio foi de 30 litros. A quantidade de material (água e carvão) foi calculada de acordo com os dois tipos de fluxo propostos neste estudo, um com concentração volumétrica de sedimentos de 15% e outro com concentração volumétrica de sedimentos de 5%. Devido a perdas de volume de mistura durante o experimento, e devido às amostragens de mistura no início e ao final de cada ensaio para o controle de concentração, foi produzida uma quantidade maior de mistura, no caso 50 litros, para garantir que todos os ensaios tivessem 30 litros de mistura injetada, mantendo a premissa de que os parâmetros volume de mistura injetada e quantidade de material sedimentar depositado sejam os mesmos em todos os ensaios. A quantidade em massa e volume dos materiais estão especificados na Tabela 2. A pesagem do carvão foi realizada com uma balança de precisão. Já a medição de volume de água foi realizada com um recipiente plástico graduado de litro em litro.

Tabela 2: Quantidades de carvão e água utilizados para produzir as misturas sedimentares.

| Fase | C_{vol} (%) | massa (Kg) | | | volume (litros) | | | massa específica da mistura (Kg/m^3) |
|-------------|----------------------|------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|--|
| | | carvão | água | total | carvão | água | total | |
| HDTC | 15,00 | 8,92 | 42,50 | 51,42 | 7,50 | 42,50 | 50,00 | 1028,50 |
| LDTC | 5,00 | 2,97 | 47,50 | 50,47 | 2,50 | 47,50 | 50,00 | 1009,50 |

4.1.3 Sistema de Alimentação

O sistema de alimentação corresponde ao sistema que acomodava e controlava a entrada de mistura sedimentar no tanque. Este era composto de equipamentos que permitiam um controle rigoroso sobre a homogeneização e amostragem da mistura, assim como da vazão de fluxo que adentra no tanque.

Seus componentes eram um reservatório metálico de 90 litros e um sistema de tubulação conectado ao difusor dentro do tanque, acoplados em uma torre metálica de 270 cm de altura (Fig. 3).

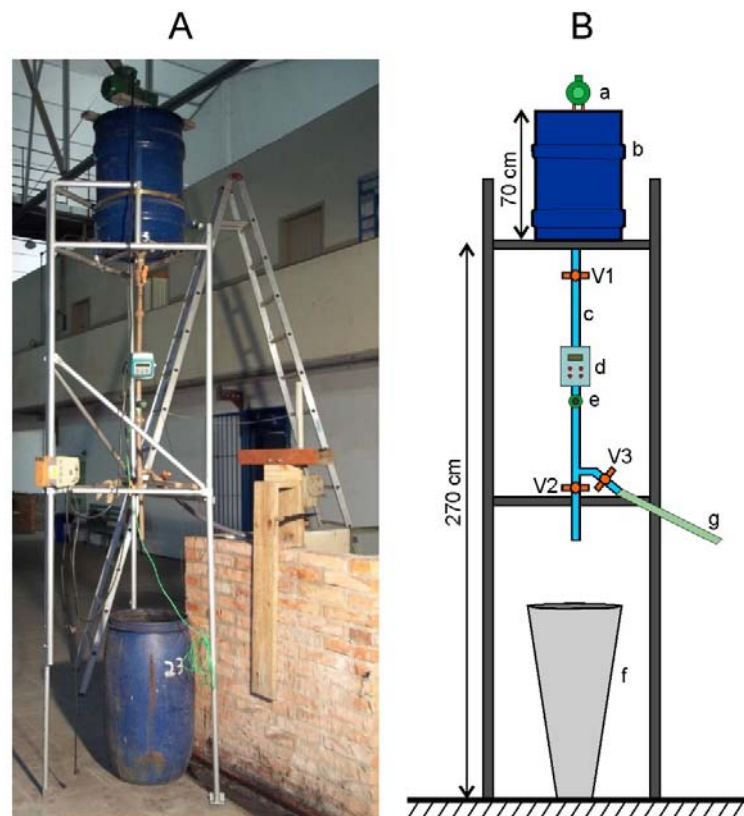


Figura 3: Sistema de alimentação. Em A, uma imagem do sistema de alimentação posicionado ao lado do tanque, próximo do ponto de injeção da mistura. Em B, um esquema do sistema de alimentação com seus respectivos componentes e dimensões: a – misturador elétrico, b – reservatório metálico, c – tubulação de PVC 25 mm, d – medidor de vazão, e – registro do medidor de vazão, f – reservatório de descarte de mistura, g – mangueira que conecta a tubulação ao difusor dentro do tanque, V1 – válvula 1, V2 – válvula 2 e V3 – válvula 3.

No interior do reservatório metálico onde ficava armazenada a mistura sedimentar, havia um misturador elétrico composto de uma hélice e um motor elétrico (Fig. 4), cuja função era homogeneizar a mistura, quanto a sua concentração e granulometria, durante o decorrer ensaio, evitando a formação de torrões de sedimento e acúmulo de sedimentos grossos no fundo do recipiente. A homogeneização da mistura é essencial para garantir as premissas de que os parâmetros concentração volumétrica de sedimentos e granulometria da mistura sejam constantes ao longo do ensaio.

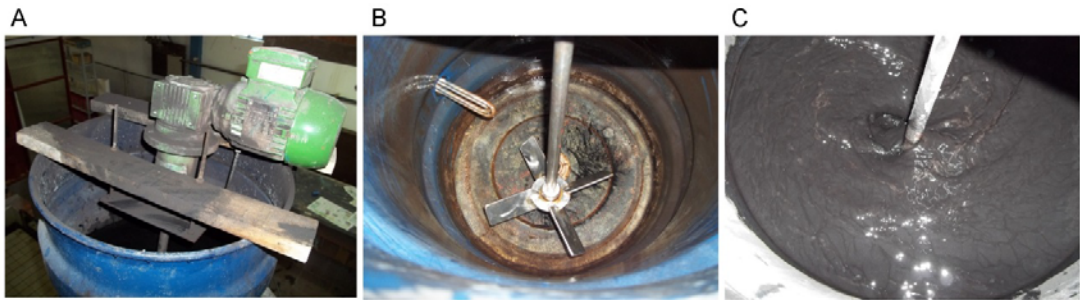


Figura 4: Misturador elétrico. A - motor e suporte de sustentação, B – hélice que proporciona a agitação da mistura, C – mistura sendo agitada.

A tubulação que conecta o recipiente metálico ao difusor alojado na entrada do tanque era constituída de tubos de PVC 25 mm. Nela estão acopladas três válvulas: V1, V2 e V3. A válvula V1 controla a saída de mistura do recipiente metálico para a tubulação. A válvula V2 liga a tubulação a uma conexão, por onde é feita a amostragem de mistura no início e ao final do ensaio. A válvula V3 liga a tubulação à mangueira conectada ao difusor, controlando a passagem de mistura para o interior do tanque (Fig. 3).

Entre a válvula número 1 e 2 ficava acoplado o medidor eletrônico de vazão. Este equipamento permitia o controle e o registro da vazão de entrada ao longo do ensaio. O mesmo será descrito mais detalhadamente no item Equipamentos (item 4.1.4).

4.1.4 Equipamentos

Para a realização dos experimentos e a coleta de dados foram utilizados uma série de equipamentos, na qual podemos destacar o distanciômetro a laser, a mesa de coordenadas, o medidor de vazão, o analisador de partículas a laser, a balança de precisão, a estufa e a máquina fotográfica.

4.1.4.1 Distanciômetro a laser

O distanciômetro a laser foi utilizado para realizar o levantamento topográfico dos depósitos. Este equipamento é um medidor de distâncias a laser chamado MD250 ADV (Fig. 5). Ele possui alta precisão, sendo utilizado para a avaliação de distâncias, dimensões, posicionamento relativo e comparação de cotas, efetuando uma medida

dinâmica, pontual e contínua, sem contato físico entre o medidor e o objeto alvo, o que significa mais precisão e rapidez. O MD250 ADV apresenta uma precisão de 0,1 mm e uma velocidade de leitura de 100 medidas/seg.



Figura 5: Laser MD250 - ADV acoplado à mesa de coordenadas.

4.1.4.2 Mesa de coordenadas

Este equipamento consiste em uma mesa de movimentação que permite o deslocamento bastante controlado do distanciômetro sobre o tanque, garantindo alta precisão na varredura do depósito (Fig. 6). Com ela é possível varrer uma área de até 0,5 m² nas direções X e Y do tanque.



Figura 6: Mesa de coordenadas sobre o tanque de ensaios.

4.1.4.3 Medidor de vazão eletromagnético

O medidor de vazão eletromagnético Siemens MAG500 (Fig. 7) foi utilizado para medir a vazão passante na tubulação que conecta o recipiente de armazenagem da mistura ao tanque. Para registrar a vazão no decorrer dos ensaios há um aplicativo de computador conectado ao medidor, que efetua leituras a uma taxa de quatro medidas / segundo. Como resultado são gerados gráficos que mostram a variação da vazão (l/min) ao longo do tempo.



Figura 7: Medidor de vazão Siemens MAG500.

4.1.4.4 Analisador de partículas á laser

O analisador de partículas a laser (Fig. 8) foi utilizado para realizar as análises granulométricas através de um processo óptico, diferenciando partículas de tamanhos que variam entre 0,04 e 2500 μm . Este equipamento funciona a partir dos fenômenos da difração (Teoria de Fraunhofer) e da difusão (Teoria de Mie) de um feixe de raio laser. O material sedimentar que se deseja analisar, juntamente com uma solução aquosa, circula por um circuito fechado no qual são projetados feixes de raio laser. Desta interação surgem os resultados, sendo eles registrados em tabelas e gráficos por um sistema computacional que controla o equipamento (Manica, 2009).



Figura 8: Analisador de partículas a laser.

3.1.4.5 Balança de Precisão

A balança de precisão foi utilizada para realizar as pesagens dos materiais sedimentares e das amostragens de mistura sedimentar coletadas no início e ao final dos ensaios. Esta balança é do modelo Marte AS5500C e possui precisão de 0,01 gramas (Fig. 9).



Figura 9: Balança modelo Marte AS5500C.

4.1.4.6 Máquina Fotográfica

Para realizar os registros visuais dos depósitos foi utilizada uma máquina fotográfica modelo Nikon D5000 18-55 mm.

4.1.4.7 Estufa

A estufa modelo Famem 311 CG (Fig. 10) foi utilizada para realizar a secagem das amostras de mistura sedimentar.



Figura 10: Estufa Famem 311 CG.

4.2 Procedimento de Modelagem Experimental

A realização de cada ensaio foi dividida em três etapas: pré-simulação, simulação e pós-simulação. A cada uma destas etapas foram atribuídas tarefas específicas, de modo que a execução do ensaio e a coleta dos dados seja organizada, diminuindo os riscos com problemas em equipamentos e imprevistos técnicos.

4.2.1 Pré-Simulação

A pré-simulação corresponde à etapa de preparação do ensaio, levando de 2 a 3 horas para ser efetuada. Nesta, eram realizados o preparo da mistura sedimentar e o preenchimento de água do tanque, assim como os ajustes no medidor de vazão, câmera fotográfica e iluminação do tanque.

A mistura sedimentar foi preparada adicionando a massa de carvão desejada ao volume de água adequado (Tab. 1) no recipiente metálico localizado na torre de alimentação. Neste recipiente, ocorre a homogeneização da mistura por meio do agitador elétrico. Para um melhor resultado, o agitador era acionado antes da adição do carvão, evitando o acúmulo de material sedimentar no fundo do recipiente. A mistura sedimentar ficava sob agitação por no mínimo uma hora, onde permanecia sendo agitada do início ao fim do ensaio, evitando a formação de torrões de sedimento.

O enchimento de água do tanque foi realizado manualmente por meio de uma mangueira localizada ao lado do mesmo. O tanque era completamente preenchido de água, levando cerca de 45 minutos.

Depois de realizadas as tarefas anteriores, cerca de 30 minutos antes do início do ensaio, eram ajustadas a iluminação do tanque e a câmera fotográfica.

A iluminação era feita com dois holofotes posicionados nos cantos à jusante do tanque, a um nível de aproximadamente 1 metro acima da borda do mesmo, de modo a iluminar da melhor maneira possível o interior do tanque (Fig. 11).

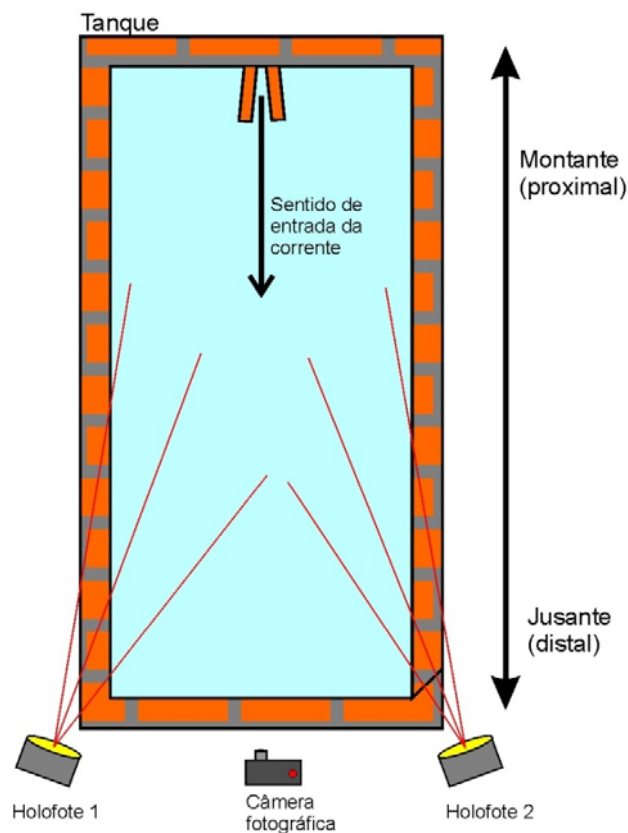


Figura 11: Posicionamento dos holofotes e câmera fotográfica.

A câmera fotográfica foi posicionada em frente à abertura de vidro da parede à jusante do tanque, de modo a registrar o avanço frontal da corrente de turbidez, sendo programada para disparar automaticamente de 15 em 15 segundos.

Por último, finalizando a etapa de pré-simulação, era acionado o controlador de vazão e volume para ajuste dos dados de entrada no aplicativo que registra este parâmetro. Como já dito anteriormente, a vazão utilizada nos ensaios foi de 1 litro / minuto e o volume total injetado foi 30 litros.

4.2.2 Simulação

A simulação corresponde à etapa de realização efetiva do ensaio, onde foram geradas as correntes de turbidez e feitas as aquisições de dados, como a amostragem de mistura sedimentar, o controle e registro da vazão, as imagens fotográficas e a descrição visual do depósito.

Antes do lançamento da corrente era realizada a amostragem inicial de mistura sedimentar (Fig. 12). Para tal, abria-se as válvulas número 1 e 2, conforme mostrada na (Fig. 13), coletando em um béquer de vidro cerca de 700 ml de mistura. Após a amostragem, fazia-se a calibração da vazão utilizando o registro do medidor de vazão, de modo que a vazão de injeção inicial partisse o mais próximo possível de 1 litro / minuto. Efetuada a calibração, as válvulas eram fechadas evitando perda de mistura excessiva.



Figura 12: Amostragem de mistura sedimentar.

Em seguida, iniciando o ensaio, abriam-se as válvulas 1 e 3, proporcionando a entrada da mistura sedimentar no tanque. Ao decorrer do ensaio, um técnico fazia o

acompanhamento do controle de vazão, abrindo ou fechando o registro conforme necessário, a fim de mantê-la constante. Como esse parâmetro pode variar bastante ao longo do ensaio, é imprescindível a presença de um técnico para fazer o controle da vazão, de modo a atender a premissa de que a vazão injetada não varie ao longo do tempo. As principais causas da oscilação da vazão são o entupimento parcial da tubulação pelo acúmulo excessivo de sedimento na tubulação, principalmente para misturas muito concentradas.

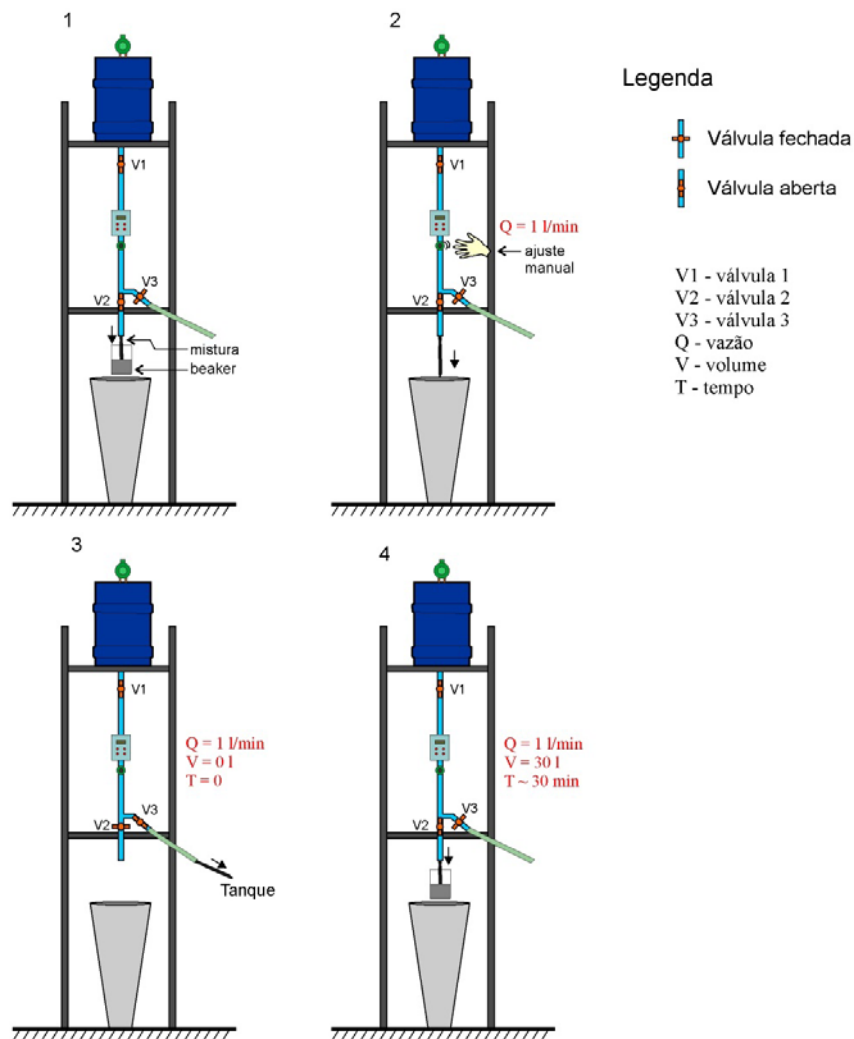


Figura 13: Seqüência operacional de um ensaio. 1 – abertura das válvulas V1 e V2 para a amostragem inicial. 2 – calibração da vazão. 3 – fechamento da válvula V2 e abertura da válvula V3 para iniciar o ensaio. 4 – fechamento da válvula V3 para finalizar o ensaio e abertura da válvula V2 para a amostragem final.

A descrição qualitativa da evolução do depósito foi realizada visualmente, na qual era produzido um croqui e um registro fotográfico da parte mais proximal do depósito, junto à saída do difusor. Esse procedimento era feito a cada cinco minutos, nos tempos 5', 10', 15', 20' 25' e 30' do ensaio, de modo a registrar a evolução temporal do depósito. Esta descrição era restrita aos primeiros 50 cm do tanque, pois era onde havia uma turbidez menos acentuada da água ambiente, permitindo a visualização do depósito. Já a parte mais distal do tanque, possuía uma turbidez muito elevada não permitindo o acompanhamento visual do depósito.

Os tempos de duração dos ensaios foram de aproximadamente 30 minutos, podendo variar em alguns segundos, dependendo do comportamento da vazão, pois o parâmetro determinante para a finalização do ensaio foi o volume de mistura injetada, ou seja, no momento em que se atingisse o volume de 30 litros injetados, o ensaio era finalizado.

Atingido tal volume, a válvula V3 era fechada cessando a entrada de mistura sedimentar no tanque. Após, abria-se a válvula V2 para a amostragem final de mistura sedimentar. Terminada essa tarefa, a etapa de simulação estava finalizada.

4.2.3 Pós-Simulação

A pós-simulação corresponde à etapa de aquisição de dados. Nesta eram realizadas as leituras topográficas, os registros fotográficos e as amostragens granulométricas do depósito.

Finalizado o ensaio, aguardava-se de 2 a 3 dias para que todo os sedimentos em suspensão decantassem, possibilitando a visualização total do depósito e as leituras topográficas.

As leituras topográficas foram efetuadas pelo distanciômetro a laser, com o depósito submerso, para evitar que possíveis deformações e ressedimentações ocorrentes durante o esvaziamento do tanque, prejudicassem a topografia original gerada pelo processo de modelagem física de correntes de turbidez.

Depois de realizada a leitura topográfica, iniciava-se o esvaziamento do tanque. Este processo era efetuado lentamente, levando de 2 a 3 dias. O esvaziamento lento do tanque se fez necessário para evitar possíveis deformações e ressedimentações do

depósito, como por exemplo, a formação de ravinas, escorregamentos e abaulamentos de partes do depósito.


O registro fotográfico foi realizado de duas maneiras: uma considerando uma visão geral, sendo que a máquina fotográfica era posicionada em pontos fixos, em três posições diferentes e outra, em detalhe, sem posição definida, conforme a feição do depósito que se mostrasse interessante registrar.

Terminada esta etapa, o procedimento de simulação estava finalizado.

5 Carta de Submissão

O artigo foi submetido à revista *Sedimentology*, extrato A1 da Qualis CAPES, de modo a preencher o requisito da Norma 103.

ScholarOne Manuscripts <https://mc.manuscriptcentral.com/sed>

 Sedimentology

Submission Confirmation



Thank you for submitting your manuscript to *Sedimentology*.

Manuscript ID: SED-2014-OM-198

Title: Spatial characterisation of similar deposits generated by turbidity currents under the action of autogenic controls: a 3D physical modelling approach.

Authors: Fick, Cristiano
Manica, Rafael
Toldo Jr., Elirio

Date Submitted: 24-Dec-2014

 Print  Return to Dashboard

1 | de 2 24/12/2014 11:01

6 Artigo

Spatial characterisation of similar deposits generated by turbidity currents under the action of autogenic controls: a 3D physical modelling approach.

Fick, C.¹; Manica, R.¹; Toldo Jr, E. E.²

¹ - Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade. Address: Postal Code 91501-970, Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre – Brasil. E-mail: cristiano.fick@ufrgs.br, manica@iph.ufrgs.br,

² - Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Instituto de Geociências, Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica. Address: Postal Code 91501-970, Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre – Brasil. E-mail: toldo@ufrgs.br

Abstract

Autogenic / allogenic controls have been discussed widely because they represent an important parameter in the constructive and evolutionary process of a sedimentary system. To evaluate these controls in submarine fans and analyse its capacity of self-organizing and creating depositional patterns, this work performed fully controlled 3D physical simulations of turbidity currents under ideal autogenic controls (no external influence) with detailed data for the generated deposits. Two series of 10 experiments of high-density turbidity currents (HDTC) and low-density turbidity currents (LDTC) were run, keeping all other input parameters (discharge, volumetric concentration, type and grain size) constant. From statistical and qualitative approach were characterised the geometric elements and morphodynamic behaviour of the deposits (centroid, Length/Width ratio, morphodynamic evolution). The results indicate local autogenic processes change the global setting of the flow evolution and deposits of submarine fans. A morphodynamic evolution generated by HDTC showed complex stages of filling and stacking caused by two types of flow self-channelling. Type I is characterised by flow channelling due to the elevation of levees without lateral avulsion and more efficient sediment transport (longer deposits, with terminal lobes well developed), and Type II is characterised by flow channelling but allows lateral avulsions and involves less efficient sediment transport (shorter deposits with terminal lobes undeveloped). The HDTC deposits showed random behaviour for the length/width ratio and for the centroid of sedimentary bodies and distinct morphological elements (elongated central deposit, fringes and distal lobes). By contrast, the LDTC morphodynamics were simplified without any self-confining process or distinct morphological elements. Finally, the statistical approach showed that the HDTC deposits had a greater variance of geometrical elements in relation to LDTC deposits. The experiments provided evidence that high rates of sediment supply decisively influenced the geometry and morphodynamic of the deposits, as well as they self-organizing capacity.

Keywords: autogenic controls, self-channelizing, deep water system, physical modelling, repeatability.

1 Introduction

Sedimentary processes in deep water systems have been studied widely due to their economic and scientific importance; they can potentially represent important hydrocarbon reservoirs and a complex environment for sedimentation controlled by tectonic, climate and sea level changes. In natural environments, the currents containing sediments in suspension (e.g., turbidity currents) generally present high-sediment transport capacity because they can remobilise large amount of sediments over long distances in ocean basins. This process is directly related to the reworking processes of sediments previously deposited on the shelf and continental slope and the direct fluvial sediment supply into a basin, also known in the literature as hyperpycnal currents (Bates, 1953).

The processes of generation, transport and deposition of turbidity currents still remain uncertain due to the difficulties observing and monitoring such phenomena *in situ*. As a result, since the 1930s, a number of researchers have adopted small-scale physical modelling as a method to study such a phenomenon, simulating different types of flows in tanks (usually a 3D approach) and/or flumes (usually a 2D approach). A pioneering study using physical modelling was performed by Keunen (1937), who tested the possibility of creating submarine canyons by turbidity currents composed of a mixture of water and clay. Later, Keunen (1950), Keunen & Migliorini (1950) and Middleton (1966a, 1966b, 1967) ran experiments to verify how turbidity currents change in terms of hydrodynamic behaviour and their subsequent deposits by controlling input parameters such as sediment concentration, flow rate, sediment type and slope.

Since then, many experiments have been performed to understand all processes involved, such as rheology, structure and depositional features of density currents (Middleton, 1966a, 1966b, 1966c; Hampton, 1972; Parker *et al.*, 1987; Manica, 2012), bottom erosion (Parker *et al.*,

1987; Garcia, 1994) and submarine fan morphology (Baas *et al.*, 2004; Guirro, 2008), among others.

The 2D flumes are usually used to analyse aspects related to flow hydrodynamics, their interaction with the bed, the visualisation of depositional features, bed forms, and grain size distribution, i.e., aspects that involve a small-scale space-temporal modelling, including the scale of depositional facies. The 3D flumes have been used for simulations involving aspects related to the morphology and geometry of submarine fans and depositional lobes, the generation and interaction of coastal - continental shelf to deep water systems, depositional evolution, and the interaction of turbidity currents with channels (Paola *et al.*, 2009), i.e., aspects concerning large scale modelling ranging from depositional systems to basin filling.

Concerning this issue, the present paper addressed the key concepts in sedimentology: autogenic patterns, also known in the literature as autocyclic patterns, as opposed to allogenic or allocyclic controls.

Beerbower (1964) first applied these concepts to define natural river system controls (e.g., for channels, abandoned channels, levees, crevasse splays and the floodplain). According to the author, the autogenic controls are those associated with a unique sedimentary prism from the internal energy gradients of the system, where the discharge, sediment supply and the topographic gradient are steady on a local scale. Hence, the mechanisms linked to this type of control are lateral migration and the abandonment of channels, avulsion and the formation of distributary channels. By contrast, allogenic controls are associated with external controls to the sedimentary system characterised by large variations in the regional scale of the rates of discharge, sediment supply and topographic slope. These mechanisms include tectonics, climate and relative base level.

Recent studies (Straub *et al.*, 2009; Hajek *et al.*, 2010; Jerolmack *and* Paola, 2010; Wang *et al.*, 2011) on autogenic dynamic and also allogenic controls, have been focused in autogenic signatures of the sedimentary record. They intended to verify whether these records could be distinguished from allogenic signatures or even mask some allogenic processes. By the use of different approaches, i.e. physical and numerical modeling and description of ancient sedimentary systems outcrops, these studies introduced statistical and qualitative methods to quantify the influence of self-organization in the stratigraphic stacking and also the morphology of sedimentary systems, particularly considering the spatial and temporal scales of each type of control.

Jerolmack *and* Paola (2010) proposed that the sediment transport (dynamic autologous) could act as a noise, completely removing the environmental signals (allogenic control) in the sedimentary record. The authors demonstrated by numerical modeling that allogenic signals are distorted shredded when their time and amplitude scales are of the same order of the autogenic one.

Wang *et al.* (2011) evaluated several features from stratigraphic record based on numerical, physical and field data (Ferris Formation - Cretaceous-Paleogene, south-central Wyoming, USA) in order to identify signatures of autogenic and allogenic controls and their range of spatial and temporal scales. The authors observed the evolutionary behavior of the topography (i.e. compensational stacking) of alluvial and deltaic deposits and they applied the metric method of compensation index (Straub *et al.*, 2009) to compare the spatial variability of sedimentation between depositional horizons. In addition, Wang *et al.* (2011) concluded that autogenic process with strong compensational stacking such as: avulsion channels and subsidence rate may have significant time span greater than expected for allogenic processes, principally associated with Milankovich cycles (10^4 years).

Likewise, Hajek *et al.* (2010) observed that spatial behavior of group channel distribution in alluvial basin, showed a level of organization higher than expected for a random process, considering long time scale ($10^3 - 10^5$ years), which indicate the power of self-organization of the sedimentary system.

As we could see above, it is possible to infer that autogenic signals in alluvial and deltaic systems can partially remove or even destroy allogenic signs of the sedimentary record from a succession of events, in certain scales. The power of self-organization of a sedimentary system is an important control on the evolutionary and morphological behavior of sedimentary deposit. Based on this particularly premise, the following question arises: can a hypothetical deep-marine sedimentary system and its self-organizing ability, generate for the same event under the same autogenic conditions (no influence of external forces), similar evolution behavior as well as final deposits? Additionally, this paper aims to investigate whether the influence of autogenesis on the final deposit depends mainly on the entrance of sediment rate into the system or, in other words, on the bulk volumetric concentration of sediment of flows.

To answer this question it was applied 3D physical modelling to characterize deep-water deposits generated by different types of turbidity currents. Two series of experiments (HDTC - high-density turbidity current and LDTC - low-density turbidity current), with accurate controlled parameters over time, were performed to avoid the introduction of any random factors throughout the simulation.

2 Apparatus and methodology

2.1 Experimental Apparatus

The physical experiments were performed in a non-confined tank (230 cm long x 110 cm wide x 30 cm depth in the slope and 50 cm in the basin) at NECOD/IPH/UFRGS, which

simulates the connection of the continental slope to the basin (Figure 01). The mixture injection was prepared in an auxiliary reservoir (feeder system), consisting of a metal bowl of 90 litres, pipes and valves, and a flow meter, coupled to a metal tower of 270 cm (Figure 01). Inside this auxiliary reservoir, a mechanical mixer was responsible for keeping the mixture homogenised in suspension. The mixture of sediments was composed of water and sieved mineral coal (Manica, 2002) with a density of 1190 kg/m^3 and grain size ranging from $0.5 \text{ }\mu\text{m}$ to $150 \text{ }\mu\text{m}$ (with D_{50} approximately $45 \text{ }\mu\text{m}$). The mixture was then injected continuously in the tank passing through a magnetic flow meter (Siemens M1100) which acquire a discharge time series at rate of 4 Hz.

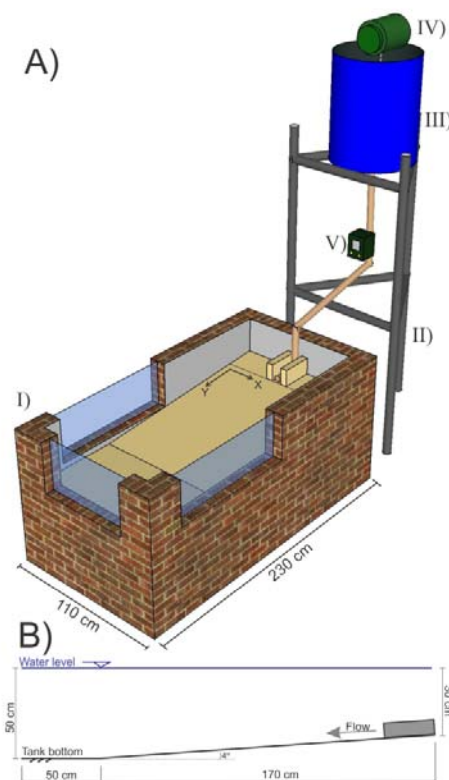


Figure 01: Experimental apparatus. A: Tank and tower of feeding, (I – Unconfined small tank, II – Metallic tower, III – reservoir, IV – Mixer, V – Flow rate meter). B: Internal geometry.

The experiments were recorded using two video-cameras, one positioned on the top of the tank at the same location for all experiments, which record experiments evolution every 10 seconds; and the other movable, recording specific features of the deposit evolution. Beyond that,

a direct qualitative visual description was also performed along the entire simulation to follow the development and/or evolution of the depositional system.

In addition, at the end of each run, a laser scanner (accuracy of 0.1 mm) swept the entire deposits to create digital surfaces. Finally, the sediment grain size of both mixture and deposit samples were performed by a laser particle analyser meter (Cilas 1180) which cover the grain size range from 0.04 μm to 2500 μm .

2.2 Experimental Methodology

In this study, the experiments' methodology was set up based on repeatability of experiments, which can be defined as follows: the closeness in agreement between the results of successive measurements of the same measurement carried out under the same conditions of measurement (NIST, 1994). Two series of ten (10) continuous flow experiments with two different volumetric concentrations were run in total. Apart from concentration, all other input parameters and boundary conditions (e.g., discharge, water base level, type and grain size of mixture sediments, mixture volume and experiment duration) were kept constant and in a steady state during the experiments. As a consequence, the deposits generated in the experiments were basically kept under the action of autogenic controls. The expected input parameter values of the experiments are presented in Table 01.

Table 01: Expected values of the input parameters in the experiments.

| Flow type | Number of experiments | Discharge (litres/min.) | Volumetric concentration (%) | Density (Kg/m³) | Sediment D₅₀ (μm) | Experiment duration (min.) |
|------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---|-----------------------------------|
| HDTC | 10 | 1.00 | 15.00 | 1028.50 | 45 - 50 | 30 |
| LDTC | 10 | 1.00 | 5.00 | 1009.50 | 45 - 50 | 30 |

The same experimental methodology was applied in all runs. Before the beginning of the each run, a mixture (water + sediment) was prepared on the auxiliary reservoir. At the same time, the tank was filled with fresh water up to the required level. Just before the injection of the mixture, a sample was collected in a proper recipient to verify characteristics of the input parameters such as: grain size and sediment concentration of the mixture. Then, both flow-meter and video-cameras were switch on and the mixture was injected into tank (Figure 02). During the run, the discharge was controlled by a valve, however, only a slight adjustment on the discharge was indeed necessary. Along with, a qualitative description of the deposit was performed by visual observation and later described. After 30 minutes, the mixture injection ceased. But just before it, another sample of the mixture was collected in a recipient to verify and to guarantee the control of the input parameters during all run.

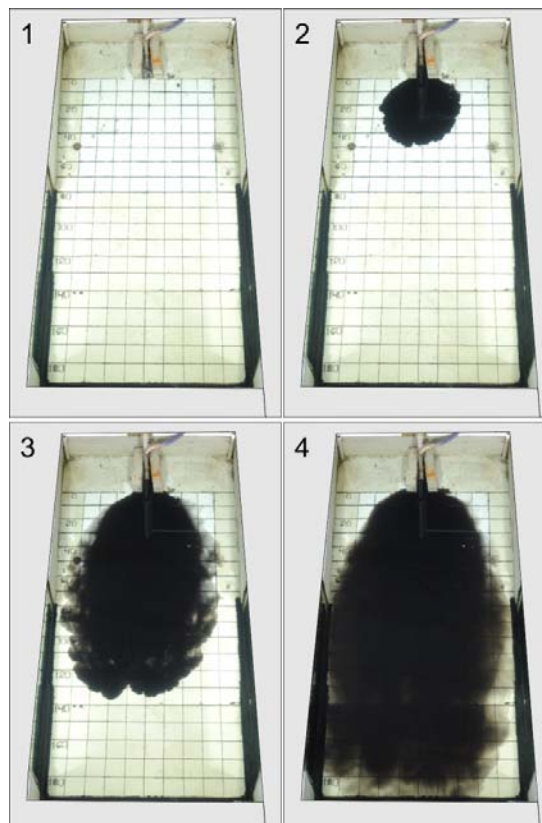


Figure 02: Sequence of images showing the first 30 seconds of the experiment. Each pictures is 10 seconds delayed.

The tank was kept full of water until all sediment deposited from suspension. After a couple of days, the tank was slowly drained (2 to 3 days) to avoid sediment remobilization, and all thin deposits were evaluated based on images. Next, the laser scanner swept the entire deposit in a grid of (1 mm x 18 mm) resolution. At the end, some deposit samples were collected both spatially and vertically in a selected location to characterize the grain size and others deposit parameters. Finally, to finish the experiment, the tank was completely cleaned and then a new experiment could be held.

2.3 Analytical Methodology

The analytical methodology proposed in this study was correlating an efficient experimental methodology used in terms of controlled boundary condition with the analytical aspect of the results, i.e. statistical analysis or even qualitative observations.

In this manner, the identification of a standard behavior of the results as being function of a given repetitive boundary condition, allow us to get a fairly accurate method to indicates the nature of resultant deposit, even consider their typical features or also, identify if they tend to repeat or not.

Yet, to guarantee the autogenic premise and verify the degree of repeatability of the experiments and quantify the level of variance of the geometric elements, it was used the statistical parameter Relative Standard Deviation (RSD) (Eq. 01). A narrow threshold value of 10% was assumed as the limit for a parameter to be considered satisfactory, as in that case only very small variations on the input and deposit parameters are considered, which is likely in any experimental work.

$$RSD = \frac{S}{x} \cdot 100 \quad (01)$$

where RSD (%) is the relative standard deviation, \bar{x} is the arithmetic mean and S (non-polarised) is the standard deviation.

3 Experimental Results

3.1 Input Parameters

The results of input parameters of the all injected mixtures were evaluated to demonstrate the degree of repeatability of the experiments. Table 02 shows the results of discharge time series in terms of RSD. In all experiments, the mean values for discharge was very close to the expected value of 1.0 L / min. The RSD values ranged from 4.19% to 7.95% in HDTC series, which is slightly higher than LDTC series variation 4.9% to 6.1%. Nonetheless, both results indicated no significant variation of the input discharge during the entire simulations (RSD < 10%).

Table 02: RSD analysis of the discharge on the experiments. *Mean values of all temporal series

| Series Experiment | HDTC | | | LDTC | | |
|----------------------|--------------|-----------|-------|--------------|-----------|------|
| | Mean (L/min) | S (L/min) | RSD | Mean (L/min) | S (L/min) | RSD |
| F1_E0 | 1.04 | 0.08 | 7.95% | 0.99 | 0.05 | 5.0% |
| F1_E1 | 0.98 | 0.06 | 6.02% | 1.01 | 0.05 | 5.1% |
| F1_E2 | 1.00 | 0.06 | 6.30% | 0.99 | 0.05 | 4.9% |
| F1_E3 | 1.00 | 0.04 | 4.34% | nd | nd | nd |
| F1_E4 | 1.01 | 0.07 | 6.48% | 1.02 | 0.05 | 4.8% |
| F1_E5 | 1.00 | 0.07 | 7.12% | 1.00 | 0.06 | 6.1% |
| F1_E6 | 1.01 | 0.07 | 6.64% | 0.99 | 0.05 | 5.0% |
| F1_E7 | 0.99 | 0.05 | 5.11% | 1.00 | 0.06 | 5.9% |
| F1_E8 | 1.01 | 0.04 | 4.19% | 0.99 | 0.05 | 5.3% |
| F1_E9 | 1.00 | 0.05 | 5.19% | 1.01 | 0.06 | 5.9% |
| Mean* | 1.00 | 0.06 | 6.22% | 1.00 | 0.05 | 5.3% |

Table 03 presents the results of volumetric concentration and grain size (D_{50}) of the injected mixture of sediments in terms of RSD. We can clearly see that both input parameters showed values very close to the expected one (see tab. 1). Also, the overall average, the initial

and final samples absolute values presented very small variations, remaining practically constant. Finally, RSD values were kept below 5.5%, indicating a satisfactory degree of experimental repeatability.

Table 03: RSD analysis of the sediment concentration and grain size of the mixture on the experiments.

| HDTC | Sediment Concentration (% vol.) | | | Grain size (D50 - μm) | | |
|------------|---------------------------------|-------------|-------------|-----------------------------------|-------------|-------------|
| | Initial | Final | Mean | Initial | Final | Mean |
| F1_E0 | 12.9 | 14.4 | 13.6 | 51 | 49 | 50 |
| F1_E1 | 13.0 | 13.1 | 13.0 | 50 | 47 | 48 |
| F1_E2 | 13.2 | 13.1 | 13.2 | 48 | 46 | 47 |
| F1_E3 | 13.3 | 13.8 | 13.5 | 48 | 47 | 47 |
| F1_E4 | nd | nd | nd | 47 | 41 | 44 |
| F1_E5 | 14.3 | 13.4 | 13.8 | 41 | 48 | 45 |
| F1_E6 | 13.5 | 13.2 | 13.4 | 48 | 47 | 47 |
| F1_E7 | 14.1 | 13.4 | 13.8 | 49 | 45 | 47 |
| F1_E8 | 13.6 | 12.9 | 13.3 | 46 | 46 | 46 |
| F1_E9 | 13.0 | 12.9 | 13.0 | 48 | 49 | 48 |
| Mean | 13.4 | 13.4 | 13.4 | 48 | 46 | 47 |
| S | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 3 | 2 | 2 |
| RSD | 3.8% | 3.5% | 3.4% | 5.4% | 5.0% | 3.8% |
| LDTC | Sediment Concentration (% vol.) | | | Grain size (D50 - μm) | | |
| | Initial | Final | Mean | Initial | Final | Mean |
| F2_E0 | 4.8 | 4.5 | 4.6 | 48 | 48 | 48 |
| F2_E1 | 4.5 | 4.4 | 4.4 | 49 | 46 | 47 |
| F2_E2 | 4.4 | 4.3 | 4.4 | 45 | 44 | 45 |
| F2_E3 | 4.4 | 4.5 | 4.4 | 49 | 46 | 48 |
| F2_E4 | 4.6 | 4.7 | 4.7 | 45 | 51 | 48 |
| F2_E5 | 4.5 | 4.2 | 4.3 | 51 | 47 | 49 |
| F2_E6 | 4.6 | 4.4 | 4.5 | 45 | 43 | 44 |
| F2_E7 | 4.7 | 4.5 | 4.6 | 45 | 45 | 45 |
| F2_E8 | 4.3 | 4.6 | 4.4 | 49 | 45 | 47 |
| F2_E9 | 4.5 | 4.7 | 4.6 | 50 | 46 | 48 |
| Mean | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 47 | 46 | 47 |
| S | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 3 | 2 | 2 |
| RSD | 2.7% | 3.6% | 3.3% | 5.3% | 4.7% | 3.7% |

3.1 Geometric Elements

The geometric elements of the final deposits such as: length, width, length/width (L/W) ratio and deposit centroid (Figure 03) were analysed in terms of RSD. This kind of analysis is important to check the variability of the final shape of the deposit and also the likely displacement of the deposits related to the tank (centroid).

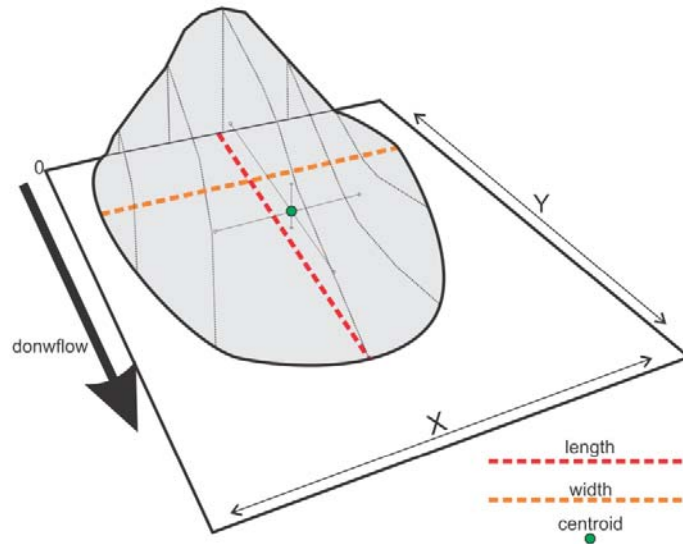


Figure 03: Scheme of measurement of length, width and centroid of the generated deposits extracted from 3D digital surfaces and deposit images.

The RSD of the geometric elements (Figure 04 and Table 04) of the final deposit showed that deposits generated by HDTC series had higher values than LDTC series regarding all geometric elements. In other words, more concentrated currents tend to generate deposits with higher variability in terms of length (X coordinate) of the deposit. As consequence, L/W ratio RSD increases almost to the threshold value of 10%. On the other hand, RSD variability related to LDTC deposits keeps an almost constant value for all kind of parameters.

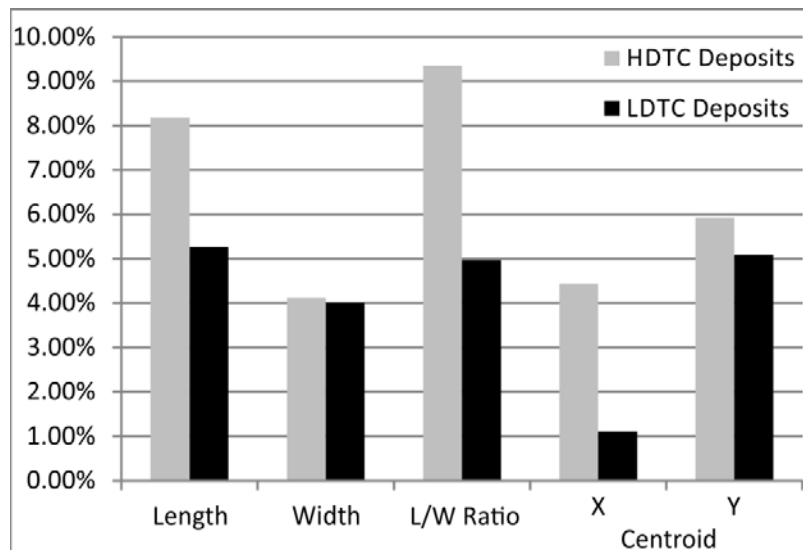


Figure 04: RSD of geometric elements of the final deposit.

Table 04: RSD analysis of the geometric elements of the final deposit.

| HDTC Series | Length (mm) | Width (mm) | Length / Width Ratio | Centroid (coordinates: mm) | |
|-------------|--------------|--------------|----------------------|----------------------------|--------------|
| | | | | X | Y |
| F1_E0 | 1119 | 905 | 1.24 | 444 | 327 |
| F1_E1 | 1052 | 932 | 1.13 | 455 | 321 |
| F1_E2 | 1190 | 876 | 1.36 | 442 | 326 |
| F1_E3 | 1059 | 980 | 1.08 | 428 | 315 |
| F1_E4 | 1278 | 940 | 1.36 | 460 | 345 |
| F1_E5 | 1056 | 927 | 1.14 | 451 | 274 |
| F1_E6 | 1253 | 955 | 1.31 | 468 | 329 |
| F1_E7 | 1102 | 989 | 1.11 | 474 | 302 |
| F1_E8 | 1287 | 925 | 1.39 | 484 | 314 |
| F1_E9 | 1241 | 1013 | 1.23 | 420 | 316 |
| Mean | 1164 | 944 | 1.23 | 453 | 317 |
| S | 95 | 38 | 0.12 | 20 | 18 |
| RSD | 8.17% | 4.12% | 9.35% | 4.43% | 5.92% |

3.2 Deposit Morphology

In terms of deposit morphology, both series of the experiments generated fan-shaped deposits, however with distinct size and internal morphology. The HDTC deposits (Figure 05) were longer and had a more complex feature than the nearly rounded-shape deposits of LDTC (Figure 06), as can be clearly seen on 3D digital models generated by laser scanner.

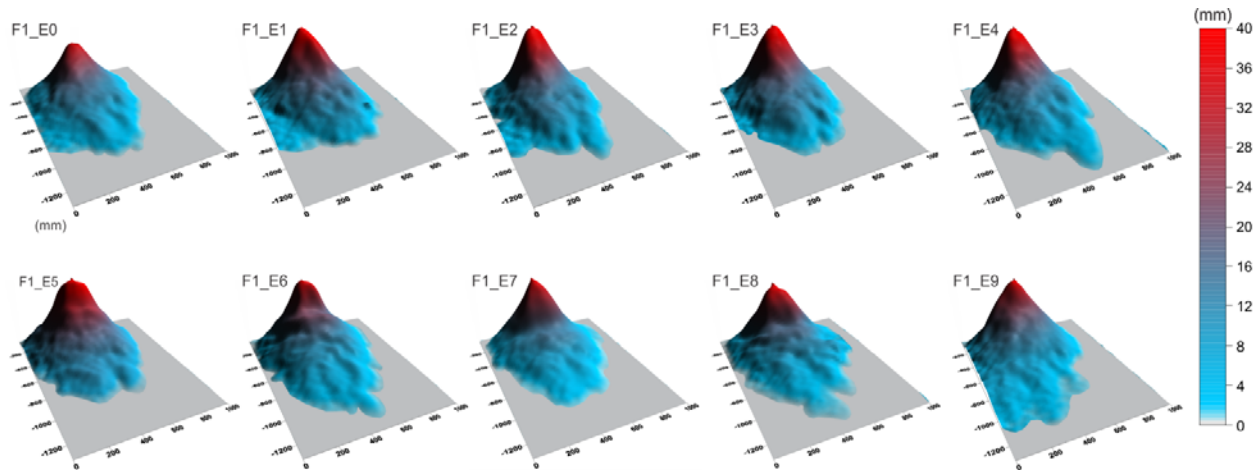


Figure 05: 3D digital surfaces of HDTC deposits created by a laser scanner. The thickness is vertically exaggerated 10x.

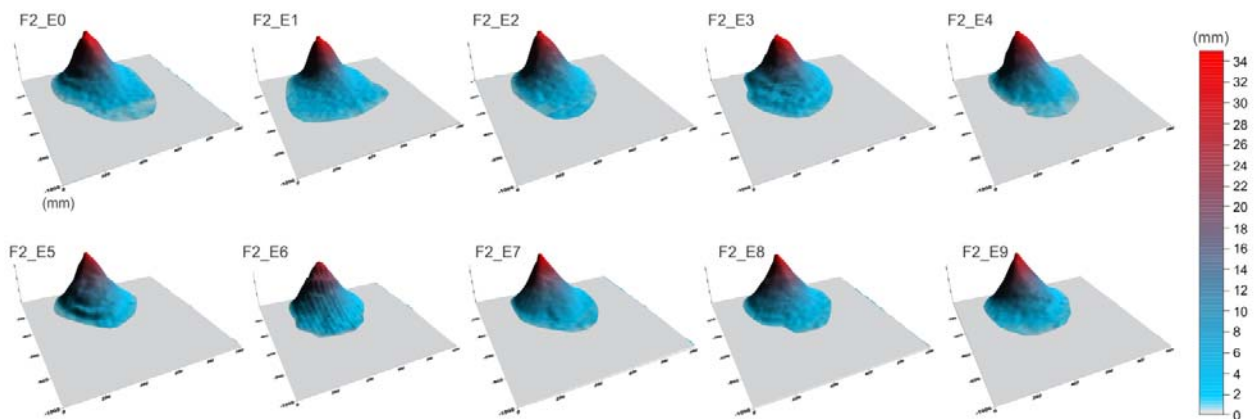


Figure 06: 3D digital surfaces of LDTC deposits created by a laser scanner. The thickness is vertically exaggerated 10x.

The internal morphological elements generated in the HDTC Series were classified as a central elongated fan, fringes and terminal lobes (Figure 07). The central elongated fan is characterised by a thicker elongated shape extending from the mixture injection point to the terminal lobes and concentrates a large amount of sediments. Also, inside this morphologic element, we can observe two important internal features: the levees and an incipient channel between them. The fringes are thin features located on the edge of the central fan and sometimes

around the terminal lobes, extending from the proximal area to the distal regions. The terminal lobes are thicker than fringes. Frequently, they are located at more distal regions of deposits, but they can sometimes occur in the intermediate zone, as can be seen in detail at Figure 08A.

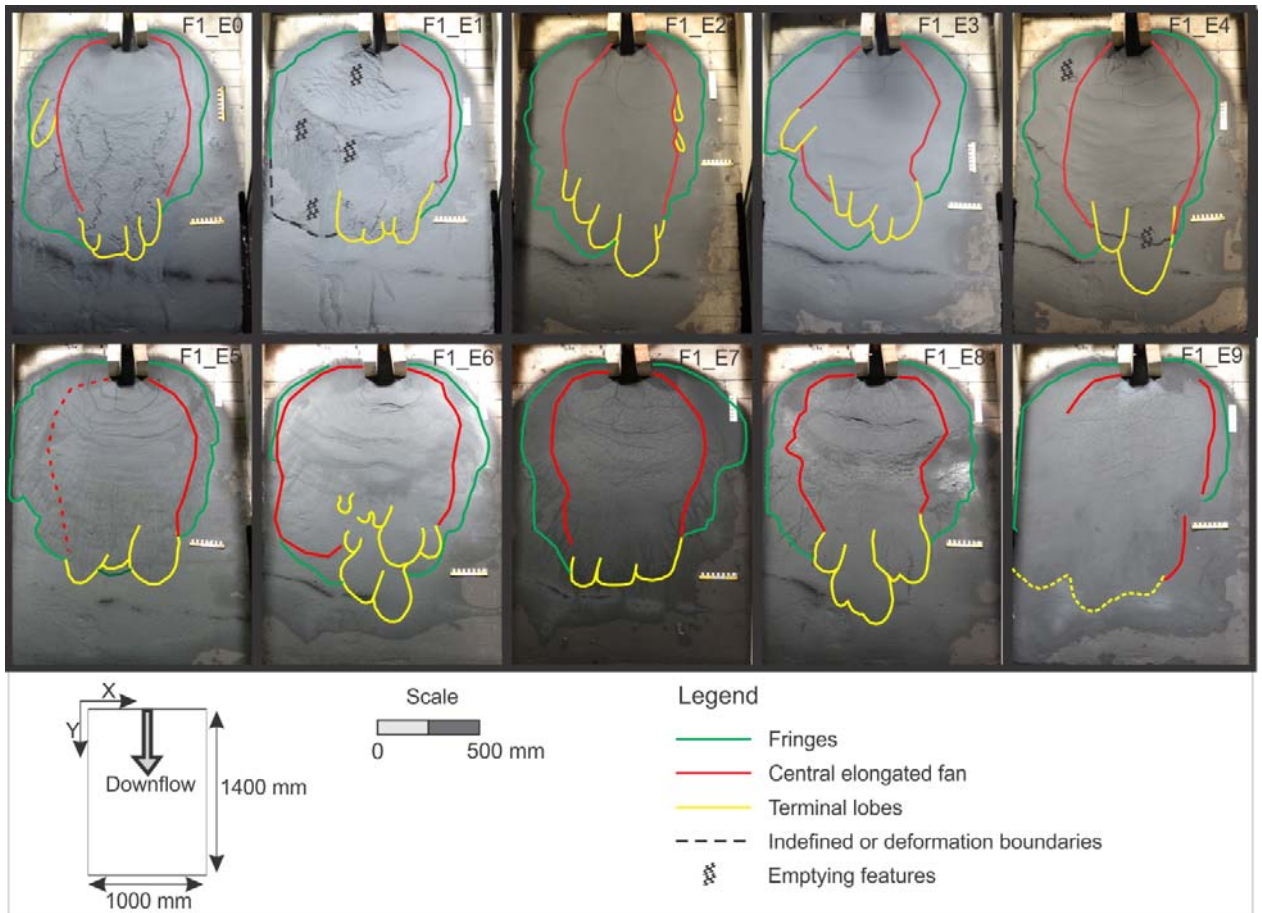


Figure 07: Morphological features of the deposits generated in the HDTC Series.

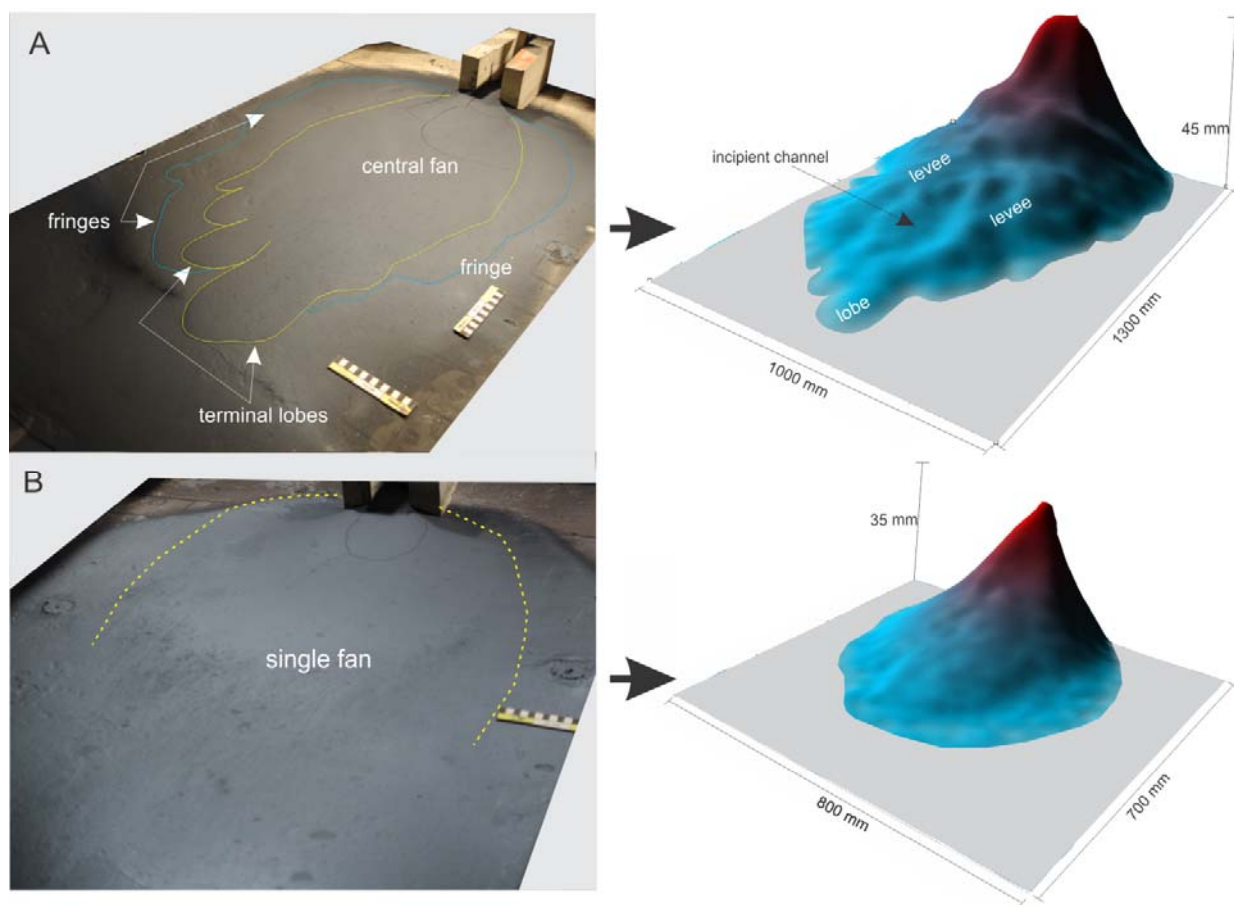


Figure 08: Details of the morphological features generated in the experiments. A: HDTC deposit. B: LDTC deposit. The thickness is vertically exaggerated 10x.

In the experiments of LDTC Series, the deposits showed no visible edges, being constituted by a unique body of sediments waning uniformly and smoothly to the edge (Figure 08B).

3.3 Morphodynamic Evolution

The behaviour of the current and morphodynamic evolution in physical simulations was obtained *in situ* by visual description of the deposit. As a result, the nature of the turbidity currents generated in these experiments can be inferred as bipartite, mainly formed by a viscous basal layer, which concentrates most of the sediment and a turbulent cloud of fine sediments in

suspension above. This behaviour has been observed by many authors over the years (e.g., Alexander & Morris, 1994; Parsons, 2002; Baas *et al.* 2004; Guirro, 2008). However, this bipartite nature was better observed in low concentrate currents (LDTC Series) because the intensity of turbulent cloud of suspended sediment is greater than that of high concentrate flows.

The morphodynamic evolutions of the deposits were dissimilar between the two experimental series. In all experiments of the HDTC Series, the deposits had a more complex and chronologically organised evolution. The main process observed in these experiments was self-channelizing (Metivier *et al.*, 2005; Yu *et al.*, 2006; Guirro, 2008; Hoyal *et al.*, 2008; Silva *et al.*, 2012). However there were two main differences at the final stage (after 25 minutes) of the simulation (Figure 09), as follows. With Type I, i.e., the most efficient, the current channelling remobilises the fine sediment of the levees. These fine sediments are then transported by drag into the central topographic low area or the incipient channels, increasing the inner concentration of the current, consequently moving this material to the distal zones (generating well-developed terminal lobes). With Type II, i.e., the less efficient, the self-channelizing currents are not able to rework sediments due to the lateral avulsion of the current. The levees generated are not very thick, and lateral proximal lobes, wide fringes and poorly developed distal lobes are generated instead.

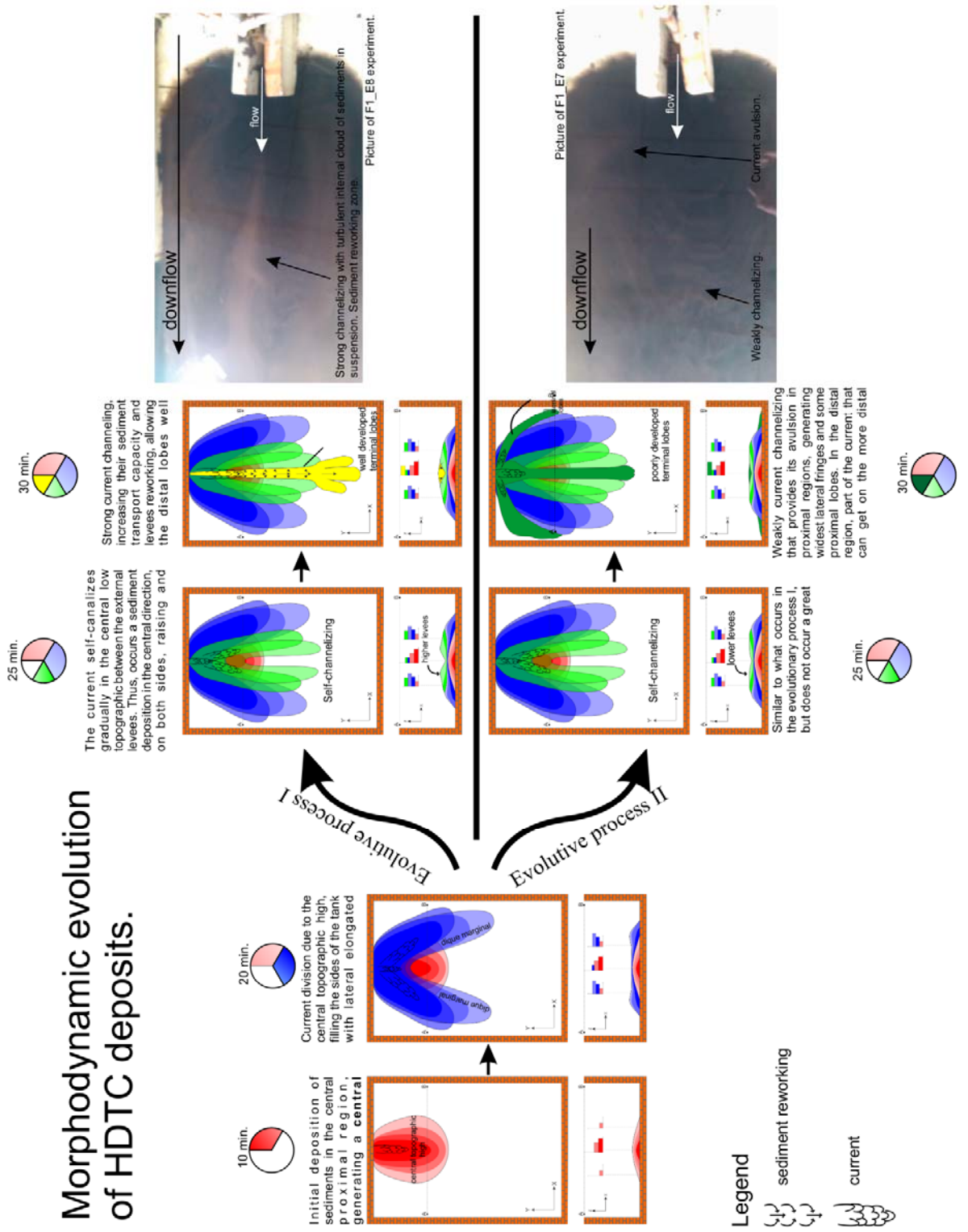


Figure 09: Evolutionary picture of HDTC deposits, highlighting the process of differential self-channelizing.

The internal architecture of the deposits was not observed because of a lack of contrast in the used sediment. However, it was possible to collect samples of the deposit at different heights to verify the vertical grain size profile (deposit stacking). Four deposit samples were collected from the base to the top of the deposits at three distinct locations along a strike section: one at the centre ($X = 500 \text{ mm}$, $Y = 250 \text{ mm}$), one on the right side ($X = 300 \text{ mm}$, $Y = 250 \text{ mm}$) and one on the left side ($X = 800 \text{ mm}$, $Y = 250 \text{ mm}$). The profiles are shown in Figure 10. In all deposits of the HDTC Series, the profiles showed the same stacking behaviour. At the initial moments of the experiments, the flow of the current was centred, and the deposit was formed with coarser particles at the central region and thin particles at the flanks. As the current divided ($\sim 20 \text{ min}$ - Fig. 09) and began to flow towards the flanks, the deposited grain size tended to increase (i.e., become coarser) there and decrease (i.e., become finer) at the central region. Later, during the self-channelling stage ($> 25 \text{ min}$ - Fig. 09), the current returned to the centre, generating a coarse upward profile at the centre and fine upward profile towards the sides.

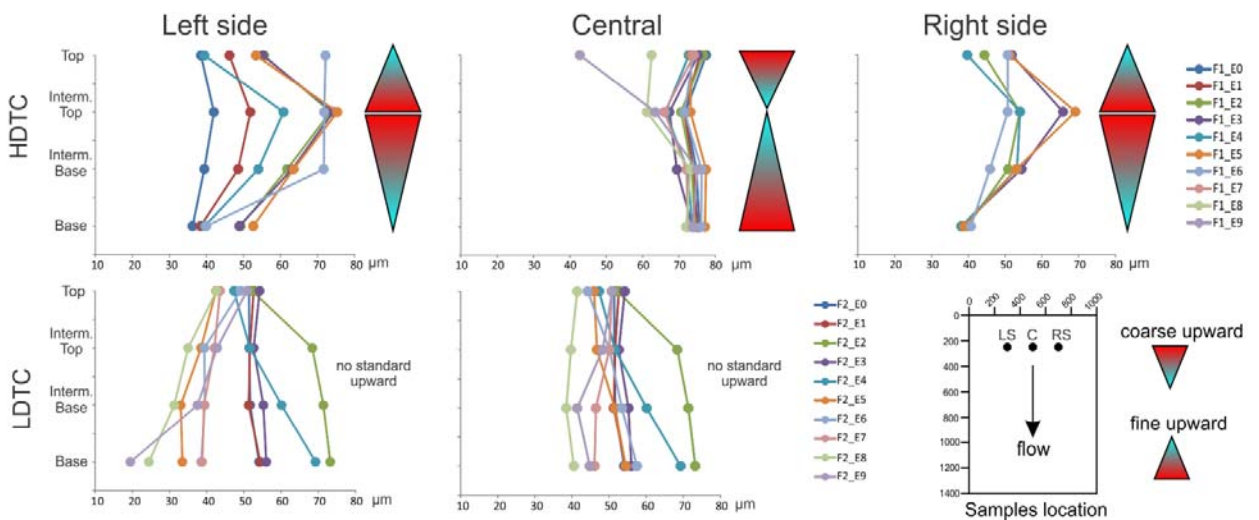


Figure 10: Median (D50) of the HDTC and LDTc vertical profiles deposits sampled in all runs. Note that in HDTC Series, the vertical profiles presented a standard upward behavior (fine or coarse) for all location. By contrary, LDTc Series did not present any standard upward behaviour. The right side samples of LDTc Series, and some left and right side samples in HDTC Series, were not collected due to experimental difficulties.

In the LDTC Series, the morphodynamic evolution (Figure 11) occurred in a simple and organised manner. A continuous and gradual deposition of sediments generating uniform expansion (concentric) from the injection point of the current was observed. As a result, a fan-shaped body was generated without any self-confining process. In addition, all three vertical profile samples of the deposit did not show any standard behaviour (coarse or fine upward) in grain size variations.

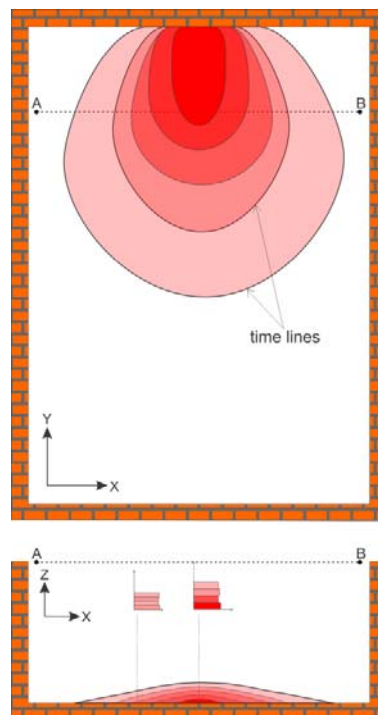


Figure 11: Morphodynamic evolution of LDTC deposits.

4 Discussion

Prior to carry on further discussion relating to the geometric and morphological behaviour of deposits on this paper, it is essential to verify the initial hypothesis raised previously in this article concerning the influence of the input parameters on the flow i.e., whether discharge, volumetric concentration and grain size can be considered constant in all experiments. In this way, we could secure the particular action of the autogenic dynamic on the simulated system

without any influence of oscillating external controls, but exclusively the ability of system to self-organize. Thus, in all RSD input parameters presented above, none of them exceeded 7.95%, which is less than the reasonable threshold of 10% previously established. As a consequence, we can definitely sustain our initial premise.

4.1 Analogy with natural models

Based on the results presented in this paper, HDTC deposits are a morphological analogy to the sand-rich submarine fans natural model of Nichols (2009). The main similarities observed were (Figure 12) i) abrupt pinches out to the edges of the deposits, marked by well-defined limits of depositional shape; ii) the generation of lobes surrounded by a thin layer of fine sediments represented by the distal lobes and lateral fringes and iii) relatively small-sized, i.e., not very long deposits.

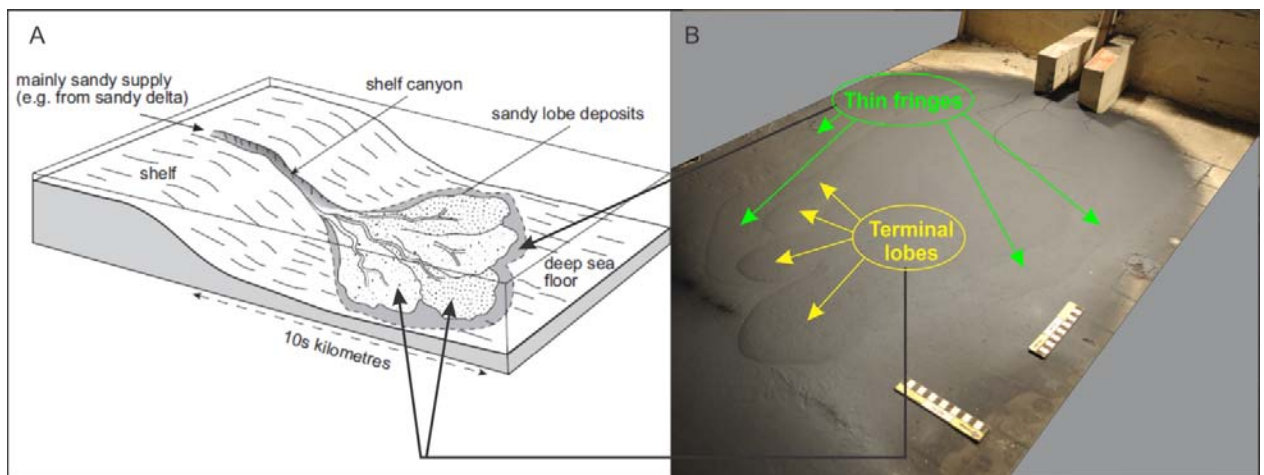


Figure 12: Analogy between a sand-rich submarine fan system by Nichols (2009) (A) and a deposit of the HDTC Series (B). Note that the lobes and the thin fringes adjacent are very similar to the sand-rich system.

Another similar aspect concerns the type of flow, which in both cases (nature and the model) had high-density turbidity currents as the dominant agent of sediment transport (Nichols, 2009).

According to the natural model, we can compare the HDTC deposits with those present at short continental shelf zones and source areas close to high gradients (e.g., active continental margins), where there is a large sediment supply that generates sand-rich and gravel-rich submarine systems, such as the Redondo submarine fan and La Jolla (U.S. west coast).

Although they do not show any morphological similarities with natural models in terms of lobes and channels, the LDTC deposits can be attributed to low-concentration systems, which are present in extensive continental shelf areas and/or distal regions (away from sources), such as the submarine fan feeders by the estuary of Rio de la Plata - Uruguay (South American East Coast).

4.3 HDTC Series vs. LDTC Series: The influence of the volumetric concentration of sediments in morphodynamic.

The influence of the volumetric concentration of the currents is investigated in this session in terms of geometric variability, morphology, stacking and evolution.

The geometric variability observed between the two series of experiments in terms of length and length/width ratio (L/W), mainly at high concentration turbidity currents, was directly affected by the volumetric concentration of the mixture. Similarly, the morphodynamic evolution of the deposits, the pattern obtained was also relatively different in both experimental phases. The HDTC deposits presented a more complex evolution of space filling, as evidenced by different building stages and local variation. The LDTC deposits showed a more orderly progression, with continuous and uniform deposition and stacking.

These behaviours can be explained not only by different rheological and hydrodynamical properties of HDTC and LDTC (Manica, 2012), but also by the difference of the input sediment rate on the systems. HDTC Series (15% volumetric concentration) was three times higher than LDTC Series (5% volumetric concentration). Consequently, HDTC Series presented distinct

morphological features, such as the heterogeneous evolution of gap filling and stacking, mainly caused by higher demand for self-adjustment (autogenic controls) to accommodate these sediments during the flow. On the other hand, LDTC Series presented less sediment in suspension, which was more easily accommodated on the tank floor, as injection was happening.

In addition, another important aspect that distinguishes both series is the final volume of deposits, which in HDTC Series was approximately three times greater than LDTC Series. This fact could be one of the causes of important changes among sets. To test this hypothesis, an additional test was performed, reproducing one single LDTC experiment, but increasing the total time of simulation to 3 times (90 min) instead. In this way, both series could be related in terms evolutionary morphodynamics.

However, the result of this additional run showed similar morphological behavior of all previous LDTC deposits (Figure 13). The only change concerns the creation of a thicker deposit. Again, this result support the hypothesis that volumetric concentration of the mixture is the key parameter of HDTC and LDTC results, because it causes significant change in spatial morphology and evolutionary processes strongly associated to the different accommodation sediment rate.

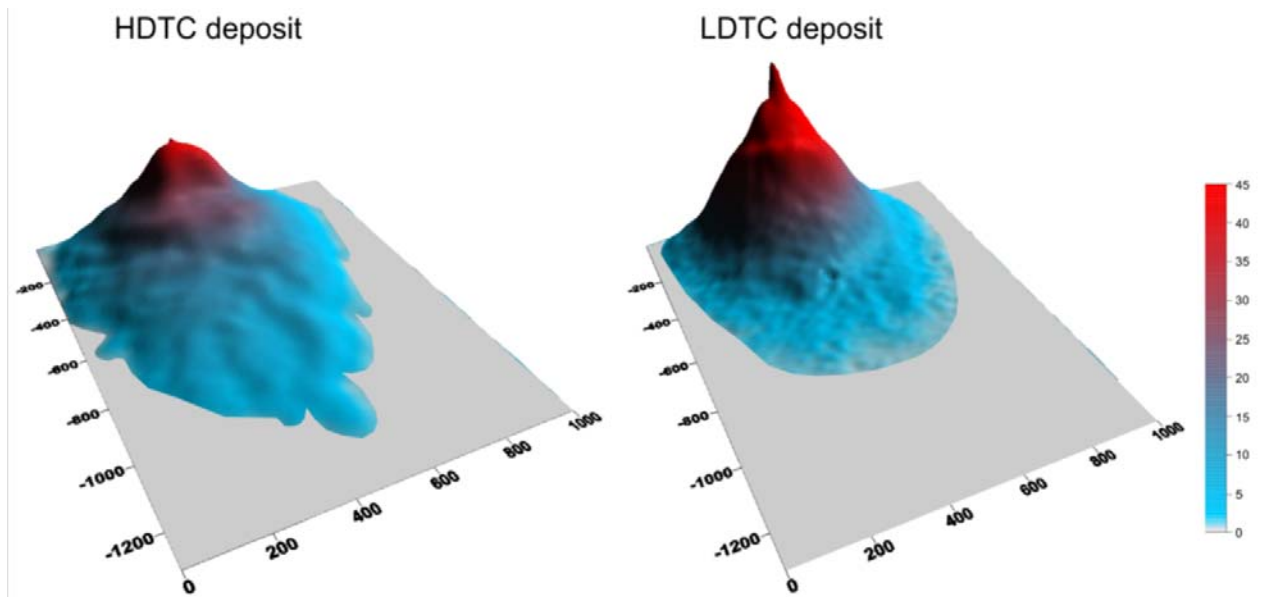


Figure 13: LDTC deposit (right) generated by the additional run with 3 times more volume than regular series. Note that the LDTC deposit is completely different in terms of morphological features despite the fact they have the same volume injected. The thickness is vertically exaggerated 10x.

4.4 Relationship between the morphological and spatial elements with morphodynamic developments in the HDTC Series.

Based on the deposit results, we can establish a direct relationship between the type of evolution and the length / width ratio of the deposit in particular.

Figure 14 clearly shows that for the experiments of the HDTC Series where the evolutionary process of self-channelizing I (most efficient) occurred, the terminal lobes were better developed and extended to more distal areas, creating a deposit of greater length that is narrower (smaller width), with a larger length/width ratio, as seen the experiments F1_E2, F1_E4, F1_E6 and F1_E8. This relationship can be explained by the fact that a local factor generated by autogenic control (higher levees in the central channel) creates better conditions for the current to transport sediments towards the basin (confined path).

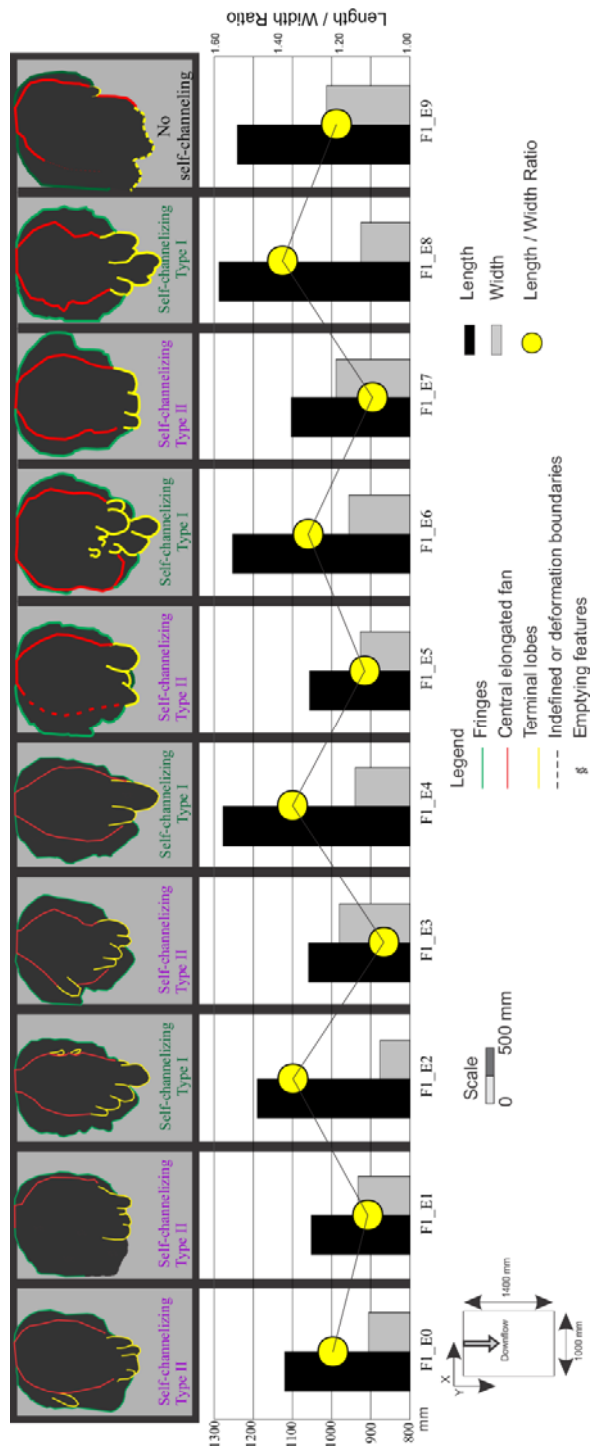


Figure 14: Relationship among the morphological, spatial and evolutionary behaviour of HDTC deposits.

By contrast, in the experiments were self-channelizing type II (less efficient) occurred, including F1_E0, F1_E1, F1_E3, F1_E5 and F1_E7, the deposits were generally wider and short

and, consequently, presented a low length/width ratio because the dynamics of the turbidity currents showed a strong tendency for lateral avulsion, filling the proximal flanks of the deposits and reducing the sediment load deposited in distal areas.

Based on this shape factor (length/width), important evidence can be inferred: a change in local-scale behaviour, i.e., a local random process controlled by autogenic controls (e.g., formation of high/low levees), can change the large-scale configuration of the deposits in a relatively short time. The occurrence of a self-channelizing process took place in the final 5 minutes of the simulation (25-30 min - Fig. 09). Catuneanu *et al.* (2009) commented that autogenic processes on a local scale tend to self-organise into a more efficient form of energy-generating features similar to those attributed to allogenic processes. Applying this premise to the results presented here, differences in terms of the lengths of terminal lobes could be fairly attributed to allogenic controls in a natural system, such as global climate change causing an increase in the input discharge.

Comparing the extension (length) between self-channelling type I and type II deposits, the former presented a mean length 16% greater than the latter. If we compare the maximum difference between deposits, the value increases to 22%. If we apply these values to the usual lengths of the sand-rich systems model of Nichols (2009), which are around tens of kilometres, this could correspond to a kilometric order of variation that could be attributed to an external change or an allogenic control. Straub *et al.* (2009), Hajek *et al.* (2010) and Wang *et al.* (2011), who performed a study of autogenic controls based on outcrops and physical modelling in a distinct sedimentary systems (alluvial, deltaic and deep-water minibasins), corroborate the idea that processes governed by autogenic controls may also influence the architectural development on a large scale of the system.

Previous works (e.g. Jerolmack and Paola, 2010 and Wang *et al*, 2011) focused on the influence of autogenic dynamic depositional signatures in the sedimentary record, in terms of the resulting stratigraphic stacking created by a succession of various events. They inferred that sometimes, autogenesis can produce some noise or even destroy environmental signals (allogenic controls) of the deposit record. However, in this experimental study, if we consider only a single event without any influence of oscillating external controls, we can verify the occurrence of several possibilities of evolutionary processes producing distinct morphological features (mainly in HDTC currents). Also, if we consider to a succession of various events, that same single event could generate different signatures in a stratigraphic stacking, which could be interpreted as signs of environmental changes within its own scale of occurrence.

5 Conclusions

Submarine fans generated by turbidity currents under the action of autogenic controls with no oscillating external factors, associated with a methodology of experimental repeatability and statistical analysis used in this study, contribute to a better understanding of the spatial behaviour of deep-water deposits. Also, the quantification of experimental variance proved to have a significant importance for qualifying the generated results; all studies involving the physical modelling of sedimentary systems should give special attention to the control of the input parameters prior to extrapolating the result to a natural environment.

The experiments also provide evidence that a local process (building levees) controlled by autogenic forces could influence the geometric behaviour and overall morphology of the deposits due to changes in the capacity of transport caused by the self-channelizing of the current. In addition, the volumetric concentration or the higher rate of sediment input in the system

decisively influenced the evolution and morphodynamics of space filling because the high-concentration induced the evolutionary process in a heterogeneous form over time.

6 Acknowledgements

We thank the NECOD (Centro de Estudos de Correntes de Densidade, at the Instituto de Pesquisas Hidráulicas of the Universidade Federal do Rio Grande do Sul) for providing the necessary infrastructure in the physical modelling experiments and supporting materials and technical support.

In addition, the first author thanks the PRH (Human Resources Program) of Petrobras S.A for the financial support, which allowed him to dedicate himself exclusively to the development of this research.

7 Notations

RSD - Relative standard deviation in Eq. 01

S - Standard deviation

—

\bar{x} - Mean

S^2 - Variance

Q - Discharge (L/min)

C_{vol} - Volumetric concentration (%)

D_{50} - Grain size median (μm)

8 References

Alexander, J. & Morris, S. (1994) Observations on experimental nonchannelized , high-concentration turbidity currents and variations in deposits around obstacles. *Journal of Sedimentary Research*, **64** (4), 899-909.

- Baas, J.H.; Kesteren, W.V.; Postma, G.** (2004) Deposits of depletive high-density turbidity currents: a flume analogue of bed geometry, structure and texture. *Sedimentology*, **51**, 1053-1088.
- Bates, C.C.** (1953) Rational Theory of Delta Formation. *AAPG Bulletin* Vol. **37**.
- Beerbower, I.R.** (1964) Cyclothems and cyclic depositional mechanism in alluvial plain sedimentation. *Kansas Geological Survey Bulletin* **169** (1), 31–32.
- Catuneanu, O.; Abreu, V.; Bhattacharya, J.P.; Blum, M.D.; Dalrymple, R.W.; Eriksson, P.G.; Fielding, C.R.; Fisher, W.L.; Galloway, W.E.; Gibling, M.R.; Giles, K.A.; Holbrook, J.M.; Jordan, R.; Kendall, C.G.ST.C.; Macurda, B.; Martinsen, O.J.; Miall, A.D.; Neal, J.E.; Nummedal, D.; Pomar, L.; Posamentier, H.W., Pratt, B.R.; Sarg, J.F.; Shanley, K.W.; Steel, R.J.; Strasser, A.; Tucker, M.E.; Winker, C.** (2009) Towards the standardization of sequence stratigraphy. *Earth-Science Reviews* **92**. P. 1-33.
- Garcia, M.H.** (1994). Depositional turbidity currents laden with poorly sorted sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, **120** (11), 1240–1263.
- Guirro, A.C.** (2008) Simulações físicas de correntes de turbidez: Efeitos da variação do tamanho dos grãos e da vazão. Tese de Doutorado (Doutorado em Geociências) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 161p.
- Hajek, E. A.; Heller, P. L.; Sheets, B. A.** (2010) Significance of channel belt clustering in alluvial basins, *Geology*, **38**(6), 535–538.
- Hampton, M.A.** (1972) The role of subaqueous debris flows in generating turbidity currents. *Journal of Sedimentary Petrology* **42**, 775–793.
- Hoyal, D.; Sheets, B.A.; Edwards, C.M.; Bloch, R.B.** (2008) Controls from channel formation in deep water distributive systems. *AAPG Search and Discovery*, 50090.

- Jerolmack, D. J. and Paola, C.** (2010) Shredding of environmental signals by sediment transport. *Geophysical Research Letters*, **37**, L19401.
- Kuenen, P.H.** (1937) Experiments in connection with Daly's hypothesis on the formation of submarine canyons. *Leidse Geo. Meded.*, **8**, 327-355.
- Kuenen, P.H.** (1950) Turbidity currents of high density. 18th Intern. Geol. Congr. London, Reports, pt. 8, 44-52.
- Kuenen, P.H. and Migliorini, C.I.** (1950) Turbidity currents as a cause of graded bedding. *Journal of Geology*, **58** (2), 91-128.
- Manica, R.** (2002) Modelagem física de correntes de densidade não conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada, 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Manica, R.** (2012) Sediment Gravity Flows: Study Based on Experimental Simulations. *Hydrodynamics – Natural Water Bodies*.
- Metivier, F., Lajeunesse, E., Cacas, M. C.** (2005) Submarine canyons in the bathtub. *Journal of Sedimentary Research* **75** (1), 6–11.
- Middleton, G.V.** (1966a) Small-scale models of turbidity currents and the criterion for auto-suspension. *Journal of Sedimentary Petrology*, **36** (1), 202-208.
- Middleton, G.V.** (1966b) Experiments on density and turbidity currents I. Motion of the head. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **3**, 523-546.
- Middleton, G.V.** (1966c) Experiments on density and turbidity currents II. Uniform flow of density currents. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **3**, 627 – 637.
- Middleton, G.V.** (1967) Experiments on density and turbidity currents III. Deposition of sediment. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **4**, 475 – 505.

- Nichols, G.** (2009) *Sedimentology and Stratigraphy*. 2nd edition. Wiley-Blackwell Publications, Pg. 247 – 262.
- NIST** (1994) *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*. NIST Technical Note 1297.
- Paola, C.; Straub, K.; Mohrig, D.; Reinhardt, L.** (2009) The ‘unreasonable effectiveness’ of stratigraphic and geomorphic experiments. *Earth-Science Reviews* **97**, 1-43.
- Parker, G., Garcia, M.H., Fukushima, Y., Yu, W.** (1987) Experiments on turbidity currents over an erodible bed. *Journal of Hydraulic Research* **25**, 123–147.
- Parsons, J. D.; Schweller, W. J.; Stelting, C. W.; Southard, J. B.; Lyons, W. J.; Grotzinger, J. P.** (2002) A preliminary experimental study of turbidite fan deposits. *Journal of Sedimentary Research*, **72** (5), 619–628.
- Silva, D. S.; Puhl, E.; Maestri, R. D.; Viana, A. R.** (2012) Comportamento de fluxos sedimentares como agentes de formação de canais submarinos: uma visão através da modelagem física. 46º Congresso Brasileiro de Geologia Santos / Brasil.
- Straub, K. M. and Wang, Y.** (2013) Influence of water and sediment supply on the long – term evolution of alluvial fans delta: Statistical characterization of basin-filling sedimentation patterns. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, vol. **118**, 1-15.
- Straub, K. M.; Paola C.; Mohrig, D.; Wolinsky, M. A.; George, T.** (2009) Compensational stacking of channelized sedimentary deposits. *J. Sediment. Res.*, **79** (9), 673–688.
- Wang, Y.; Straub, K. M.; Hajek, E. A.** (2011) Scale-dependent compensational stacking: An estimate of autogenic time scales in channelized sedimentary deposits. *Geology*, **39** (9), 811–814.

Yu, b., Cantelli, A., Marr, J., Pirmez, C., O'Byrne, C., Parker, G. (2006) Experiments on self-channelized subaqueous fans emplaced by turbidity currents and dilute mudflows. *Journal of Sedimentary Research* **76**, 889–902.

7 Conclusões e Considerações Finais

As principais conclusões extraídas deste trabalho podem ser sintetizadas nos seguintes itens:

- A metodologia de repetibilidade experimental, bem como a análise estatística adotada para descrever a qualidade dos experimentos e a natureza dos comportamentos geométricos, foram satisfatórias, a ponto de garantir o controle autogênico às simulações físicas de correntes de turbidez, sem influência de controles externos oscilantes e proporcionar uma caracterização quantitativa dos depósitos muito bem correlacionada com as análises qualitativas.
- Um processo local aleatório controlado pela autogênese (ocorrido na Fase 01), no caso as diferentes elevações dos diques marginais, pôde influenciar na configuração espacial e morfológica global dos depósitos, de modo a produzir alterações significativas nos comprimentos totais e no desenvolvimento dos lobos deposicionais, reflexo da maior ou menor capacidade de transporte criada pelo auto-confinamento da corrente;
- A concentração volumétrica de sedimentos da mistura, que pode ser interpretada também como a taxa de aporte sedimentar, teve influência significativa no comportamento deposicional. Nos experimentos com maior concentração (Fase 01) o preenchimento espacial foi menos uniforme ao longo do tempo, ocorrendo etapas de construção de depósito diferenciadas, representadas pelo processo de auto-confinamento, que produziu feições morfológicas distintas e elementos geométricos (fator de forma) aleatórios. Por outro lado, os experimentos gerados por correntes menos concentradas (Fase 02), apresentaram um preenchimento mais homogêneo e uniforme dos espaços ao longo do tempo, produzindo um depósito com morfologia simplificada e suavizada, e geometria (fator de forma) determinística.

Dando sequência a este tema e visando relevar a representatividade dos resultados e discussões apresentados, em estudos posteriores se recomenda o aumento da escala de modelagem aplicada ao mesmo procedimento experimental, a fim de se verificar o efeito escala envolvido nas simulações e se estes podem interferir nas dinâmicas sedimentares, a ponto de resultar em comportamentos diferentes dos

observadas nos experimentos deste estudo. Além disto, o aumento do modelo físico permitiria a observação da arquitetura interna dos depósitos.

8 Referências

- Beerbower, I.R. (1964) Cyclothems and cyclic depositional mechanism in alluvial plain sedimentation. *Kansas Geological Survey Bulletin* 169 (1), 31–32.
- Bouma, A. H. (2000). Coarse-grained and fine-grained turbidite systems as end member models: applicability and dangers. *Marine and Petroleum Geology*, 17:137 – 143.
- Cecil, C.B. (2003) The Concept of Autocyclic and Allocyclic Controls on Sedimentation and Stratigraphy, emphasizing the climatic variable. *SEPM - Climate Controls on Stratigraphy*, 77, 13-20.
- Fick, C. (2012) Modelagem física tridimensional de correntes de turbidez: comportamento espacial e granulométrico de depósitos turbidíticos. Trabalho de conclusão de curso (Geologia), 101 pg. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Hajek, E. A.; Heller, P. L.; Sheets, B. A. (2010) Significance of channel belt clustering in alluvial basins, *Geology*, 38(6), 535–538.
- Manica, R. (2002) Modelagem física de correntes de densidade não conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada, 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Manica, R. (2009) Geração de Correntes de Turbidez de Alta Densidade: Condicionantes Hidráulicos e Depositionais. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre (RS), 391 pp.
- Muto, T. & Steel, R. (2004) Autogenic response of fluvial deltas to steady sea-level fall: implications from flume-tank experiments. *Geology*, 32 (5), 401–404.

- Nichols, G. (2009) *Sedimentology and Stratigraphy*. 2nd edition. Wiley-Blackwell Publications, Pg. 247 – 262.
- Paola, C.; Straub, K.; Mohrig, D.; Reinhardt, L. (2009) The ‘unreasonable effectiveness’ of stratigraphic and geomorphic experiments. *Earth-Science Reviews* 97, 1-43.
- Schwarzacher, W. (1993) *Cyclostratigraphy and the Milankovic Theory*. Elsevier Science Publisher, *Developments in Sedimentology* 52, 225p.
- Straub, K. M.; Paola C.; Mohrig, D.; Wolinsky, M. A.; George, T. (2009) Compensational stacking of channelized sedimentary deposits. *J. Sediment. Res.*, 79 (9), 673–688.
- Wang, Y.; Straub, K. M.; Hajek, E. A. (2011) Scale-dependent compensational stacking: An estimate of autogenic time scales in channelized sedimentary deposits. *Geology*, 39 (9), 811–814.