

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Samuel de Souza Mattioda

**CARACTERIZAÇÃO DE DEPÓSITOS
SEDIMENTARES MARINHOS:
FORMAÇÃO POR CORRENTES DE TURBIDEZ**

Porto Alegre
dezembro 2013

SAMUEL DE SOUZA MATTIODA

**CARACTERIZAÇÃO DE DEPÓSITOS SEDIMENTARES
MARINHOS: FORMAÇÃO POR CORRENTES DE TURBIDEZ**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Rafael Manica
Coorientador: Richard Eduard Dücker

Porto Alegre
dezembro 2013

SAMUEL DE SOUZA MATTIODA

**CARACTERIZAÇÃO DE DEPÓSITOS SEDIMENTARES
MARINHOS: FORMAÇÃO POR CORRENTES DE TURBIDEZ**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2013

Prof. Rafael Manica
Dr. pela UFRGS
Orientador

Richard Eduard Dücker
Me. pela UFRGS
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Alexandre Beluco (UFRGS)
Dr. pela UFRGS

Profa. Ana Luiza de Oliveira Borges
Dra. pela Université Joseph Fourier –
Grenoble I

Prof. Rafael Manica (UFRGS)
Dr. pela UFRGS

Richard Eduard Dücker
Me. pela UFRGS

Dedico este trabalho a meus pais, Dirceu e Fatima, e ao meu irmão, Alexandre, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Fatima e Dirceu, e ao meu irmão, Alexandre, que sempre me apoiaram para que eu fosse em frente durante toda a faculdade. Gostaria de agradecer muito pela fé que eles depositaram em mim, mesmo quando a formatura era algo distante, apenas um sonho, e principalmente quando todas as circunstâncias indicavam que esse dia ficava cada vez mais longe. Também agradeço a eles pela educação que sempre me deram e pelos exemplos de muito trabalho e luta. Amo vocês. Obrigado.

Agradeço ao Prof. Rogério Dornelles Maestri pela imensa carga de conhecimento transmitida a mim durante o período de graduação no qual convivemos e por ter me encaminhado ao Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade (NECOD), no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. Durante o último ano, tive lá a oportunidade de aprender muito sobre as atividades de pesquisa e desenvolvimento de tecnologia na Universidade. Também pude conhecer grandes pessoas com quem sempre tive uma convivência harmoniosa e sempre muito distante de qualquer conflito.

Agradeço a Richard Eduard Dücker, meu chefe no pavilhão Shell, e grande companheiro durante as tardes do último ano, quando tivemos muitas dores de cabeça em função do funcionamento – ou não – do *scanner* perfilador. Obrigado pelo fornecimento de fotos e dados utilizados neste trabalho. Parabéns por todo o trabalho que já era realizado antes da minha entrada no laboratório para que o tanque se tornasse operacional para realizar tanto os ensaios que serviram como base para esse trabalho quanto os ensaios futuros, que com certeza trarão grandes frutos para pesquisas posteriores. Boa sorte na continuidade deste trabalho.

Obrigado ao Professor Rafael Manica, orientador deste trabalho, pela interminável atenção dispensada a mim durante todas as consultas e por ter me ajudado inclusive em tarefas que vão além da função do orientador e, inicialmente, caberiam exclusivamente a mim. Agradeço também por ter assumido minha orientação em meio à realização deste Trabalho de Conclusão e mesmo assim ter dado um rumo ao trabalho que eu não conseguia enxergar anteriormente.

Por fim, mas não menos importante, agradeço à minha namorada, Rafaela, por todo o seu carinho e amor durante os anos que estamos juntos e principalmente pelo grande exemplo de dedicação e força de vontade. Te amo.

Numerosas são as maravilhas da natureza, mas de todas, a maior é o Homem! Singrando os mares espumosos, impelido pelos ventos do sul, ele avança, e arrosta as vagas imensas que rugem ao redor! [...] A tribo dos pássaros ligeiros, ele a captura, ele a domina; as hordas de animais selvagens, e de viventes das águas do mar, o Homem imaginoso as prende nas malhas de suas redes. E amansa, igualmente, o animal agreste, bem como o dócil cavalo, que o conduzirá, sob o jugo e os freios, que o prendem dos dois lados; bem assim o touro bravo das campinas. E a língua, o pensamento alado, os costumes moralizados, tudo isso ele aprendeu! E também, a evitar as intempéries e os rigores de natureza! Fecundo em seus recursos, ele realiza sempre o ideal a que aspira! Só a Morte, ele não encontrará nunca, o meio de evitar!

Sófocles

RESUMO

As correntes de turbidez constituem mecanismos de grande eficiência no transporte de sedimentos de águas rasas para o mar profundo, gerando, com sua deposição, depósitos sedimentares de variadas espessuras e dimensões. Entre esses depósitos, destacam-se os turbiditos que, por sua vez, são grandes responsáveis pela formação de reservatórios de hidrocarbonetos. Na exploração de hidrocarbonetos, é essencial a elaboração de modelagens rochas-reservatório e de descrições muito detalhadas das heterogeneidades internas dos turbiditos.

Nesse contexto, este trabalho tem como objeto de estudo os resultados de algumas simulações, realizadas em modelo reduzido, da ação de correntes de turbidez no processo de sedimentação de partículas em solo marinho. Essas simulações foram realizadas em um dos pavilhões do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS no primeiro semestre de 2013 e fazem parte de um estudo mais amplo financiado por uma instituição privada e dirigido pelo Necod (Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade) sobre as características dessa interação no leito oceânico. Para a realização desses experimentos, foi construído um tanque de grandes dimensões (35 m x 7 m x 4 m) que visa simular um ambiente marítimo em escala reduzida. Esse tanque foi equipado com uma estrutura munida de um feixe de laser capaz de perfilar o relevo do fundo do tanque com grande precisão.

Neste tanque de grandes dimensões, foi injetada, em cada ensaio, uma mistura que simulava a ação das correntes de turbidez no leito marinho. Após observar-se o comportamento dessas correntes, foi feita a batimetria do fundo do tanque com o uso do perfilador e avaliou-se, com os dados obtidos, de que forma os depósitos sedimentares gerados pelas correntes se comportaram após cada ensaio.

Este trabalho explora as primeiras leituras feitas pelo perfilador e tem como objetivo analisar de que forma as leituras feitas pelo laser podem ajudar a compreender a dinâmica das correntes de turbidez em alto mar a partir dos resultados obtidos em modelo reduzido.

Palavras-chave: Correntes de Turbidez. Turbiditos. Ensaio em Modelo Reduzido.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas de trabalho.....	16
Figura 2 – Tipologia dos sedimentos.....	19
Figura 3 – Origens e trajetórias de sedimentos terrígenos até os oceanos.....	20
Figura 4 – Feições da margem continental.....	22
Figura 5 – Principais processos deposicionais.....	26
Figura 6 – Ocorrência de fluxo de detritos nos Andes peruanos.....	29
Figura 7 – Vista superior de um fluxo de detritos experimental.....	30
Figura 8 – Exemplo de corrente de turbidez: tempestade de areia movendo-se sobre uma cidade na Arábia Saudita.....	32
Figura 9 – Água com sedimentos oriundos de fonte externa.....	32
Figura 10 – Fluxos hiperpicnal e hipopicnal.....	33
Figura 11 – Evolução da cabeça de uma corrente de turbidez. Em (a), a diferença de temperatura entre a corrente e o meio é bem pequena. Em (f), ela chega a 35°C.....	35
Figura 12 – Zonas das correntes de turbidez que geram erosão ou sedimentação.....	36
Figura 13 – Corrente de turbidez de duas fases gerada em laboratório.....	37
Figura 14 – Experimento de Riddell.....	38
Figura 15 – Tanque que utiliza a técnica de <i>lock-exchange</i>	39
Figura 16 – Propagação da corrente de densidade gerada em experimento como o da figura 15.....	39
Figura 17 – Croqui esquemático dos aparatos utilizados.....	43
Figura 18 – Tanque de mistura visto de fora.....	44
Figura 19 – Misturadores homogeneizando água e sedimentos.....	45
Figura 20 – Tanque experimental em planta.....	46
Figura 21 – Tanque experimental visto em perspectiva.....	47
Figura 22 – <i>Scanner</i> perfilador.....	48
Figura 23 – Injeção de corrente de turbidez no tanque experimental.....	50
Figura 24 – Superfície de calha do tanque gerada no <i>Surfer</i>	54
Figura 25 – Superfície gerada no <i>Surfer</i> a partir de dados do ensaio 1.....	55
Figura 26 – Superfície gerada no <i>Surfer</i> a partir de dados do ensaio 2.....	56
Figura 27 – Superfície gerada no <i>Surfer</i> a partir de dados do ensaio 3.....	57
Figura 28 – Linhas arbitradas na região de calha do tanque.....	57
Figura 29 – Aproximações para a seção transversal média da calha após cada ensaio....	58

Figura 30 – Mapa topográfico do ensaio 1 com uma escala arbitrada de cores.....	59
Figura 31 – Mapa topográfico do ensaio 2 com a mesma escala de cores.....	60
Figura 32 – Mapa topográfico do ensaio 3 com a mesma escala de cores.....	61
Figura 33 – Linhas arbitradas na região de bacia do tanque.....	62
Figura 34 – Aproximações para a seção transversal média da bacia após cada ensaio....	62
Figura 35 – Aproximação para a seção transversal média da região de calha.....	63
Figura 36 – Aproximação para a seção transversal média da região de bacia.....	64
Figura 37 – Incremento relativo a cada ensaio em mm da espessura média de sedimentos nas regiões de calha e bacia.....	65
Figura 38 – Relação entre a massa de mistura injetada e a massa depositada no tanque experimental.....	66
Figura 39 – Relações entre aumentos de espessura de sedimentos na calha com parâmetros das correntes.....	67
Figura 40 – Relações entre aumentos de espessura de sedimentos na bacia com parâmetros das correntes.....	68
	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Síntese dos dados dos ensaios.....	52
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	15
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	15
2.2 OBJETIVO DA PESQUISA	15
2.3 PREMISSA	15
2.4 DELIMITAÇÕES	15
2.5 LIMITAÇÕES	15
2.6 DELINEAMENTO	16
3 ASPECTOS DE GEOLOGIA MARINHA	18
3.1 TIPOS DE SEDIMENTOS.....	18
3.1.1 Fontes extra-baciais ou alóctones	19
3.1.1.1 Sedimentos terrígenos	19
3.1.1.2 Sedimentos cosmogênicos.....	20
3.1.2 Fontes intra-baciais ou autóctones	20
3.1.2.1 Sedimentos bioquímicos.....	21
3.1.2.2 Sedimentos autigênicos.....	21
3.2 MARGEM CONTINENTAL.....	21
3.2.1 Plataforma continental	22
3.2.2 Talude continental	22
3.2.3 Elevação continental	23
3.2.4 Planície abissal	23
3.3 TRANSPORTE MARINHO DE SEDIMENTOS.....	24
4. PROCESSOS DE SEDIMENTAÇÃO	26
4.1 PROCESSOS DE SEDIMENTAÇÃO PELÁGICA.....	27
4.2 PROCESSOS ASSOCIADOS A CORRENTES NORMAIS DE FUNDO.....	27
4.3 PROCESSOS DE RESSEDIMENTAÇÃO.....	27
4.3.1 Fluxos de detritos	28
4.3.2 Fluxos de grãos	29
4.4 OSCILAÇÕES DO NÍVEL DO MAR.....	30
5 CORRENTES DE TURBIDEZ	31
5.1 DEFINIÇÃO.....	31
5.2 FORMAÇÃO E DESENVOLVIMENTO.....	32
5.2.1 Introdução de sedimentos de fonte externa	33

5.2.2	Rearranjo de sedimentos previamente depositados.....	34
5.2.3	Desenvolvimento das correntes de turbidez.....	34
5.3	ESTRUTURA.....	34
5.3.1	Cabeça.....	34
5.3.2	Corpo.....	35
5.4	SEDIMENTAÇÃO DAS CORRENTES DE TURBIDEZ.....	36
5.5	EXPERIMENTOS COM CORRENTES DE TURBIDEZ.....	37
6	TURBIDITOS.....	40
6.1	COMPLEXOS DE CANAIS.....	41
6.2	LOBOS CANALIZADOS.....	41
6.3	LOBOS NÃO CANALIZADOS.....	42
6.4	FRANJAS.....	42
6.5	CUNHAS CLÁSTICAS SUBAQUOSAS.....	42
7	PESQUISA: INSTALAÇÕES, ENSAIOS E RESULTADOS.....	43
7.1	LABORATÓRIO.....	43
7.1.1	Tanque de mistura.....	44
7.1.2	Reservatório de nível constante.....	45
7.1.3	Tanque experimental.....	45
7.1.4	Scanner perfilador.....	47
7.2	REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	48
7.2.1	Primeiro ensaio.....	50
7.2.2	Segundo ensaio.....	51
7.2.3	Terceiro ensaio.....	51
7.2.4	Parâmetros dos ensaios.....	51
7.3	FORMAÇÃO DE <i>GRIDS</i>	52
7.3.1	Região de calha.....	53
7.3.2	Região de bacia.....	58
8	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	63
8.1	ANÁLISE DAS FORMAS DOS DEPÓSITOS.....	63
8.2	ANÁLISE DAS ESPESSURAS FINAIS.....	64
8.3	VOLUMES ACUMULADOS INJETADOS E DEPOSITADOS.....	65
8.4	CONCENTRAÇÃO E DIÂMETRO.....	66
9	CONCLUSÕES.....	69
	REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa atualmente uma posição de destaque no cenário econômico mundial. A partir dos anos 1990, com o fim da inflação e o começo do ajustamento da economia, passando pelo crescimento experimentado nos anos 2000 e chegando até os dias de hoje, o País vive uma fase de grande crescimento.

Um dos fatos que respalda essa ascensão brasileira é a descoberta, anunciada em 2007, de reservas de hidrocarbonetos situadas a até sete mil metros de profundidade na costa brasileira, o chamado Pré-Sal. Com isso, o Brasil, que já ocupava um lugar de destaque na exploração dos hidrocarbonetos, consolidou-se também como uma das maiores reservas desse mineral no Planeta. O tamanho de uma descoberta como essa é entendida quando se verifica a importância do petróleo hoje em dia. Desde o seu uso como matéria-prima para a fabricação de materiais como plásticos, polímeros, produtos farmacêuticos, solventes, entre outros, até o seu uso mais importante: como fonte de energia. Nesse contexto, ganha importância a busca pela evolução dos processos de exploração desses reservatórios de hidrocarbonetos. Isso fica ainda mais claro à medida que a exploração dessas reservas envolve grandes custos operacionais e grandes incertezas. A partir disso, a caracterização dos depósitos sedimentares, que se constituem como potenciais reservatórios dos hidrocarbonetos, cumpre um papel importante, já que pode diminuir tanto os custos de operação (no caso da prospecção), quanto as incertezas nos levantamentos geotécnicos.

Depósitos sedimentares podem ser originados de muitas formas diferentes. Uma delas é decorrente da sedimentação de partículas transportadas por correntes de densidade. Correntes de densidade são fluxos horizontais gerados pela interação entre dois fluidos com densidades diferentes. Às correntes de densidade que apresentam material sólido em suspensão como sendo a causa da diferença de densidade entre o fluxo e o meio, dá-se o nome de **correntes de turbidez** (DÜCKER, 2007, p. 3). Os depósitos sedimentares gerados por estas correntes, chamados de turbiditos, são grandes responsáveis pela formação de reservatórios de hidrocarbonetos. Um exemplo disso é o fato de que, no Brasil, em 1988, 62% dos reservatórios de petróleo e 46% das reservas de gás natural conhecidas se encontravam em

reservatórios gerados em processos sedimentares causados por correntes de turbidez (BRUHN; MORAES, 1988, p. 824).

O presente trabalho estudou os resultados de experimentos nos quais correntes de turbidez foram geradas em um tanque de grandes dimensões (35 m x 7 m x 4 m). O objetivo foi simular os fluxos que deram origem aos depósitos turbidíticos e investigar a sedimentação do material por ele transportado. O trabalho apresenta os mecanismos de transporte dos sedimentos, a sua dinâmica, as interações entre fluidos, interfaces e partículas que as formam e os processos de consolidação desses sedimentos em leito marinho.

Este trabalho conta com um capítulo que indica quais foram as diretrizes que definiram o desenvolvimento do trabalho: a sua questão de pesquisa, objetivo, premissa, delimitações, limitações e delineamento. O capítulo 3 traz algumas definições sobre geologia marinha que são importantes para identificar os locais de ocorrência das correntes de turbidez e descrever os fenômenos de transporte de sedimentos. O capítulo 4 é dedicado a descrever os principais processos de sedimentação marinha e situar as correntes de turbidez entre esses processos. O capítulo 5 é dedicado inteiramente às correntes de turbidez, descrevendo de que forma elas se formam, se desenvolvem, qual é a importância de estudá-las e catalogar alguns estudos importantes que já foram feitos com essas correntes. O capítulo 6 trata sobre turbiditos, que são o tipo de formação mais comum nos reservatórios de petróleo explorados e têm nas correntes de turbidez suas grandes agentes de formação. O capítulo 7 descreve os materiais e métodos utilizados na pesquisa que serve de base para esse trabalho, desde o laboratório onde ela foi realizada, passando pelos ensaios realizados até chegar ao processamento dos dados coletados. O último capítulo destina-se a fazer algumas considerações gerais sobre o que foi estudado e a estabelecer comparações entre o que foi obtido nas simulações em laboratório e o que acontece na realidade.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes que definiram o desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho foi: que fatores são determinantes no transporte de sedimentos através da geração de correntes de turbidez em um canal de grandes dimensões?

2.2 OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo do trabalho foi a avaliação das acumulações de sedimentos geradas nos depósitos oriundos da simulação experimental de correntes de turbidez.

2.3 PREMISSA

O trabalho tem como premissa que as correntes de turbidez são uma das mais importantes formas de transporte e deposição de sedimentos em águas marinhas profundas.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho caracteriza o transporte e a deposição de sedimentos a partir da geração de correntes de turbidez em laboratório e da posterior análise do depósito resultante em um tanque experimental.

2.5 LIMITAÇÕES

Foi analisado somente o depósito gerado pelas correntes, sem análise das características do fluxo que transportou o sedimento depositado.

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão descritas nos próximos parágrafos e representadas na figura 1:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) preparação da estrutura;
- c) definição do programa experimental;
- d) realização dos ensaios;
- e) análise dos resultados;
- f) considerações finais.

Figura 1 – Diagrama das etapas de trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

Inicialmente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre o tema do trabalho. Essa pesquisa teve como foco a definição do que é uma corrente de turbidez e a apresentação dos procedimentos adotados em experimentos anteriores, nos quais essas correntes foram geradas e observadas. Além disso, a descrição de outros processos de transporte de sedimentos e de formas de sedimentação ocorridas em meio marinho também foram objeto de estudo da pesquisa.

Posteriormente à pesquisa bibliográfica, a preparação da estrutura – que conta com um aparelho perfilador de topografia a laser – foi realizada. Depois, com toda a estrutura do tanque experimental pronta, algumas medidas de segurança de trabalho e melhorias no entorno do tanque foram executadas (medidas estas exigidas pela instituição financiadora do projeto). Também foram realizados testes de aquisição e coleta de dados para que as capacidades de leitura e processamento de dados do equipamento perfilador fossem verificadas.

Depois da realização dessas etapas, o tanque se tornou operacional. A partir daí, ensaios foram realizados com a geração de correntes de turbidez injetadas no tanque. Após a movimentação e deposição dos sedimentos inseridos nessas correntes, o perfilador fez uma leitura do relevo do fundo do canal e, através da interpretação e processamento dos dados coletados pelo aparelho, foi possível avaliar o comportamento dos sedimentos injetados no tanque.

Por fim, nas considerações finais, com a finalização dos ensaios, foi analisado o papel cumprido pelas correntes de turbidez, geradas experimentalmente, na deposição dos sedimentos, bem como sua capacidade na movimentação de outras partículas sedimentares.

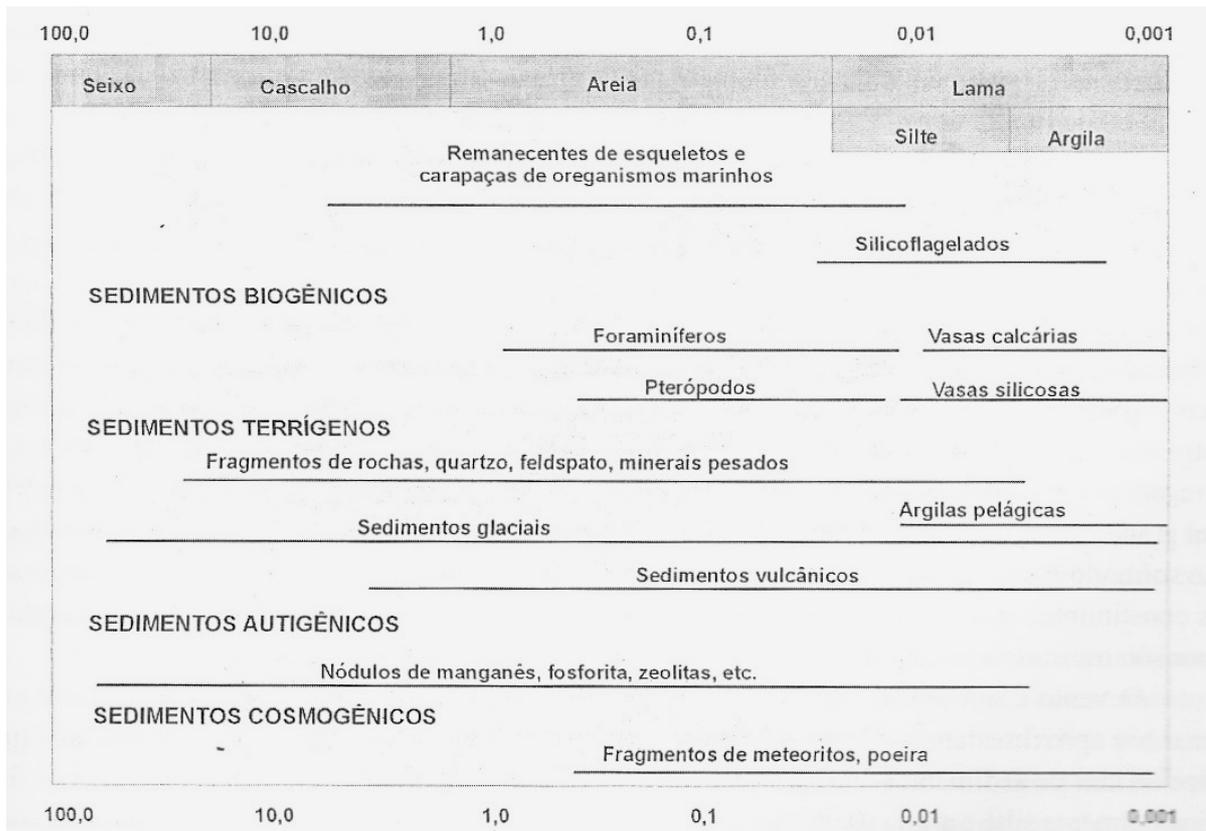
3 ASPECTOS DE GEOLOGIA MARINHA

Para situar melhor os fenômenos de transporte e deposição de sedimentos, bem como as correntes de turbidez, é importante apresentar alguns aspectos de geologia marinha que são relevantes para o completo entendimento desses processos. O primeiro aspecto destacado diz respeito aos tipos de sedimentos presentes nos oceanos. A localização geográfica dos sítios onde esses processos ocorrem de forma mais frequente também é motivo de algumas definições.

3.1 TIPOS DE SEDIMENTOS

A diferenciação dos sedimentos presentes nos oceanos depende de fatores como a origem, a granulometria e a composição mineralógica dos sedimentos (BAPTISTA NETO et al., 2004, p. 220). O local de origem dos sedimentos marinhos permite classificá-los como oriundos de fontes extrabaciais ou intrabaciais – essas classificações são mencionadas a seguir. Já a granulometria dos sedimentos permite que os mesmos sejam classificados em sedimentos grossos, como cascalho e areia, ou finos – agrupados genericamente como lama –, como silte e argila. É importante ressaltar que a nomenclatura aplicada aos sedimentos aqui descritos se refere à classe de tamanho dos mesmos, e não às suas composições químicas. A maneira como esses sedimentos se formaram também permite classificá-los em terrígenos, cosmogênicos, bioquímicos ou autigênicos. Essas divisões são apresentadas na figura 2.

Figura 2 – Tipologia dos sedimentos



(fonte: SEGAR¹, 1998 apud BAPTISTA NETO et al., 2004)

3.1.1 Fontes extrabaciais ou alóctones

Diz-se que um sedimento é proveniente de fonte extrabacial ou alóctone quando o mesmo tem origem em uma bacia sedimentar diferente daquela na qual ocorreu a sua consolidação. Podem ser classificados, de acordo com sua formação, em terrígenos ou cosmogênicos.

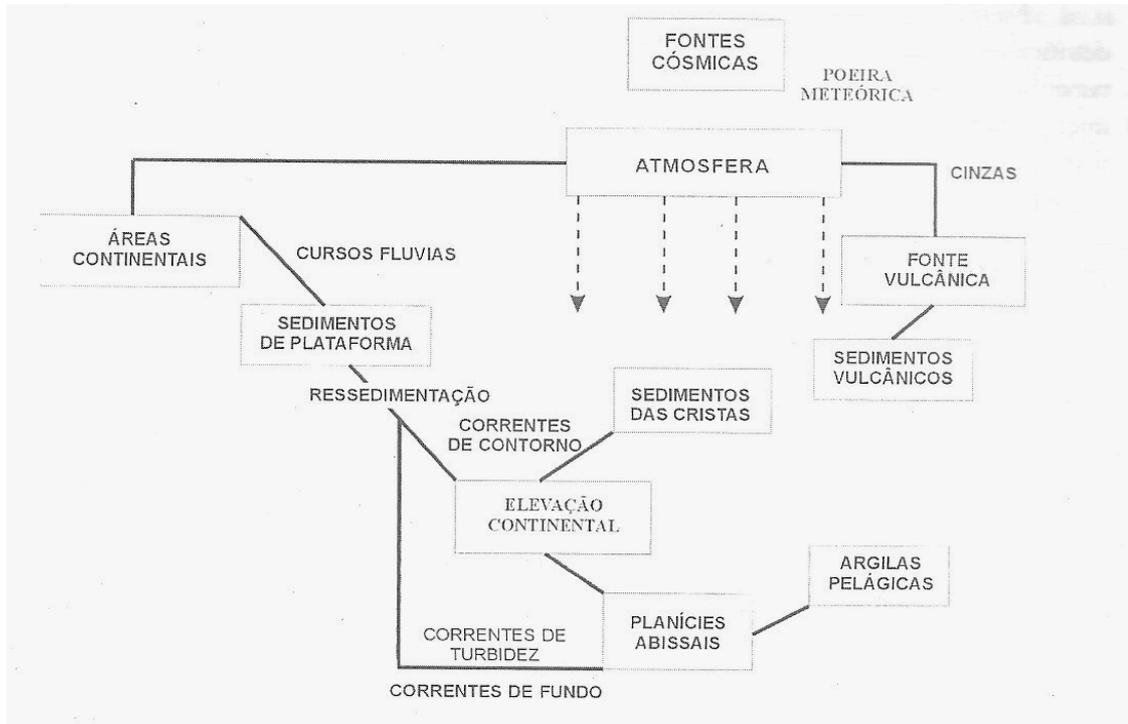
3.1.1.1 Sedimentos terrígenos

São fragmentos de distintos tamanhos, tanto orgânicos quanto inorgânicos, que conseguiram sobreviver ao intemperismo e foram carregados até o sítio marinho no qual se encontram pela ação de agentes como os cursos fluviais, os ventos e as chuvas. Entre os fragmentos orgânicos que se inserem nesse contexto, pode-se citar micro-raízes, folhas, sementes e outros tipos de remanescentes vegetais. Fragmentos de rochas e de minerais respondem pela fração inorgânica desses sedimentos. O meio de transporte e a distância viajada por esses sedimentos depende diretamente da sua granulometria, sendo os sedimentos mais leves transportados por

¹ SEGAR, D. A. **Introduction to ocean sciences**. Belmont, USA: Wadsworth Publishing Company, 1998.

distâncias maiores (BAPTISTA NETO et al., 2004, p. 222). A figura 3 ilustra a trajetória dos sedimentos terrígenos até os oceanos.

Figura 3 – Origens e trajetórias de sedimentos terrígenos até os oceanos



(fonte: HAYES², 1975 apud BAPTISTA NETO et al., 2004)

3.1.1.2 Sedimentos cosmogênicos

Os sedimentos cosmogênicos são considerados produtos de fontes extraterrestres e constituem uma proporção muito pequena em relação aos outros tipos de material. São principalmente fragmentos de meteoritos que entram por acidente na atmosfera junto com poeira cósmica e se misturam à água dos oceanos, compondo sedimentos marinhos (BAPTISTA NETO et al., 2004, p. 223).

3.1.2 Fontes intrabaciais ou autóctones

Diz-se que um sedimento é oriundo de fonte intrabaciais quando a sedimentação do mesmo ocorre na mesma região de origem do sedimento. Podem ser classificados, de acordo com sua formação, em bioquímicos ou autigênicos.

² HAYES, M. O. 1975. Morphology of sand accumulation in estuaries: na introduction to the symposium. *In: Estuarine Research*, vol 2. Geology and Engineering. pp 3-22. Academic Press. London

3.1.2.1 Sedimentos bioquímicos

Em águas rasas, a produção de sedimentos se deve em grande parte a processos biogênicos, já que se originam na decomposição de estruturas esqueléticas, de carapaças e de ossículos de vários seres vivos. Após a morte dos organismos detentores dessas estruturas, processos de abrasão e desarticulação transformam em fragmentos o que antes formava a estrutura desses organismos. Esses fragmentos são redistribuídos como cascalhos e areias nas margens continentais (BAPTISTA NETO et al., 2004, p. 223).

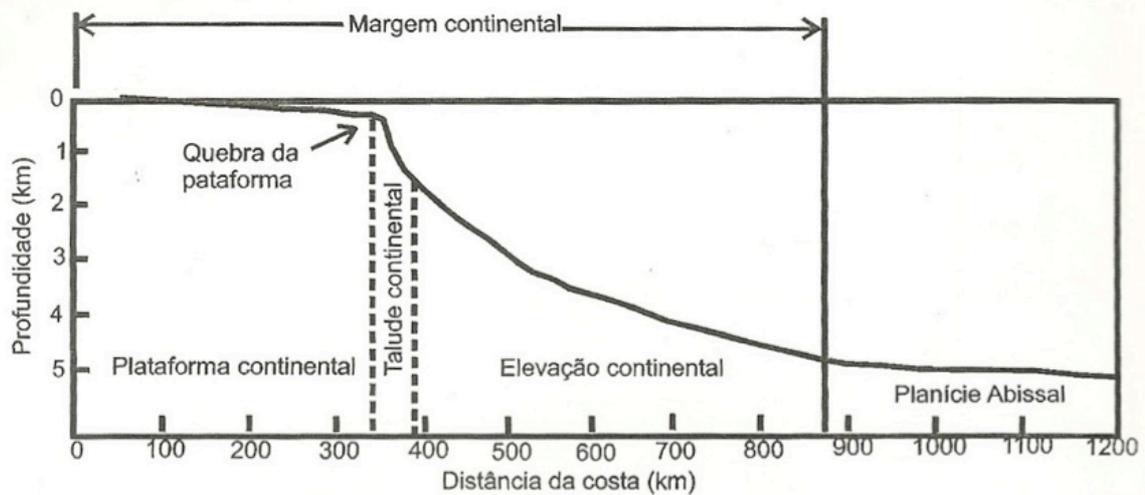
3.1.2.2 Sedimentos autigênicos

Os sedimentos autigênicos são formados a partir de reações químicas entre a água do mar e determinados compostos minerais. Esse processo ocorre diretamente nas rochas que desprendem partículas graças à erosão causada pelo oceano. Como produtos principais desse processo, vale destacar os nódulos polimetálicos, de ferro e manganês, e as fosforitas, depósitos mistos de fosfatos e carbonatos (BAPTISTA NETO et al., 2004, p. 225).

3.2 MARGEM CONTINENTAL

De acordo com Barbosa Neto et al. (2004, p. 33-34), as margens continentais são regiões litorâneas que representam a zona de transição entre o continente e a bacia oceânica. Elas podem ser divididas em regiões denominadas províncias fisiográficas. O objetivo de apresentar essa divisão da margem continental reside no fato de localizar geograficamente onde e como os processos de sedimentação marinha ocorrem. Essas regiões, que são detalhadas nos itens subsequentes, podem ser divididas em três províncias fisiográficas distintas: plataforma continental, talude continental e elevação continental. A região situada além da margem continental chama-se planície abissal e é onde os processos de deposição em águas profundas são mais comuns. A figura 4 ilustra essas divisões.

Figura 4 – Feições da margem continental



(fonte: ANIKOUCHINE; STERNBERG³, 1973 apud BAPTISTA NETO et al., 2004)

3.2.1 Plataforma continental

A plataforma continental, em geral, representa a extensão submersa do continente. A partir da linha de praia, sua extensão pode variar muito, desde poucos quilômetros até 400 quilômetros mar adentro, em profundidades que chegam, em média, a 130 metros. Este ponto final da plataforma chama-se quebra da plataforma e marca o limite entre a plataforma continental e o talude superior. A quebra pode se apresentar de várias formas, sendo abrupta ou gradacional, bem definida ou não, convexa ou côncava, em degraus irregulares ou ravinada (ZEMBRUSCKI⁴ et al., [1972] apud BAPTISTA NETO et al., 2004).

3.2.2 Talude continental

De acordo com Baptista Neto et al. (2004, p. 35), os taludes continentais apresentam gradientes de profundidade acentuados. Com valores médios de 1:15, podendo ser até maiores do que 1:4, estendem-se mar adentro por distâncias de 10 até 200 km a partir da quebra da plataforma continental até a elevação continental, que volta a apresentar gradientes de 1:40. Esses grandes gradientes de profundidade fazem dessa província fisiográfica aquela onde há a

³ ANIKOUCHINE, W. A.; STERNBERG, R. W. *The world ocean, an introduction to oceanography*. Englewood Cliffs, USA: Prentice-Hall, Inc, 1973.

⁴ ZEMBRUSCKI, S. G.; BARRETO, H. T.; PALMA, J. J. C.; MILLIMAN, J. D. Estudo preliminar das províncias geomorfológicas da margem continental brasileira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26, 1972, Belém. *Anais...* [S. l.: s. n.], [1972]. p. 187-209

maior instabilidade de fundo, sendo comum a ocorrência de erosões que favorecem a formação de estruturas que canalizam o transporte de sedimentos derivados da plataforma continental através das correntes de turbidez. Esse processo ainda dá origem a sistemas de ravinamentos, cânions e canais submarinos. Acrescenta-se que os taludes continentais apresentam as maiores espessuras de camadas sedimentares, podendo estas chegar a até 10 km de altura de sedimentos.

3.2.3 Elevação continental

A elevação continental (ou sopé continental) é a mais difícil de ser caracterizada entre as províncias fisiográficas, podendo por vezes ser impossível a sua identificação. Apresenta um gradiente suave de profundidade, em média de 1:150, mas podendo variar de 1:40 a 1:800, com esses valores sendo cada vez menores à medida que se avança mar adentro, em direção às planícies abissais. É uma região que sofre muita deposição de sedimentos que são trazidos da plataforma continental e do talude continental (BAPTISTA NETO et al., 2004, p. 36).

3.2.4 Planície abissal

As planícies abissais são locais de grande deposição de sedimentos oceânicos. Isso se explica pelo fato dessas planícies se constituírem no principal destino dos fluxos sedimentares (correntes de turbidez, por exemplo) originados nas margens oceânicas (LEEDER, 1999, p. 474). São as feições mais planas de todo o Planeta, e ocorrem em profundidades do mar que podem variar de 3.000 a 6.000 metros. As mais planas acontecem nos oceanos Atlântico e Índico, onde o aporte de sedimentos derivados dos continentes e trazidos por correntes de fundo ou de turbidez é maior. Isso não acontece no oceano Pacífico, pois há grande quantidade de ilhas e fossas que o limitam aprisionam essas partículas. As planícies abissais podem se encontrar isoladas por elevações do relevo oceânico ou unidas por estreitas passagens, chamadas passagens abissais. Um exemplo dessas passagens é o chamado canal Vema, que interliga a planície abissal da Argentina com a Bacia Oceânica do Brasil, no Atlântico Sul (BAPTISTA NETO et al., 2004, p. 40).

3.3 TRANPORTE MARINHO DE SEDIMENTOS

Ao apresentar os fenômenos associados ao transporte marinho de sedimentos, faz-se necessário mencionar algumas considerações acerca desses movimentos. O movimento de qualquer material sedimentar em um dado canal subaquático depende muito do fluido no qual está inserido. Por outro lado, o próprio material também colabora com suas características, desde a maneira como se distribui no leito marinho até a forma como se difunde dentro do fluido que causa o seu transporte. Por exemplo, sedimentos mais grossos, arenosos, não são transportados a grandes distâncias, sedimentando-se próximo a deltas de rios, se sua origem for fluvial. Sedimentos mais finos, como siltes e areias muito finas, sedimentam-se um pouco além, em águas mais profundas. Por fim, as lamas provenientes da região anterior ao delta (ainda levando em conta o fato de ser um rio a origem dos sedimentos) são transportados a grandes distâncias e se depositam através de processos lentos de decantação do material em suspensão na água (BAPTISTA NETO et al., 2004, p. 207).

Posto isso, afirma-se que os movimentos de ambos (fluido e material transportado) são interdependentes e, portanto, não podem ser estudados sem que se leve em consideração as propriedades mecânicas de ambos. Em outras palavras, esse movimento de duas fases constitui uma totalidade mecânica inseparável (YALIN, c1972, p. 2).

Alguns parâmetros matemáticos como a taxa de transporte, que fornece o montante de material originário do leito em um escoamento (YALIN, c1972, p. 111), ajudam a descrever melhor algumas características dos mecanismos de transporte de sedimentos.

Segundo Puhl (2009, p. 28), a velocidade do fluxo, a turbulência do escoamento e a velocidade de queda dos sedimentos após o início do seu movimento influenciam sua forma de transporte. Essas formas podem ser divididas em três, ou seja:

- a) **arraste e rolamento:** o grão entra em movimento a partir do momento em que sofre uma tensão cisalhante que excede sua força de coesão com a superfície, fazendo com que o mesmo seja arrastado e rolado, sempre em contato com o leito;
- b) **saltação:** os grãos são transportados em contato com o leito a partir de uma série de saltos, que respeitam as condições da trajetória da balística;
- c) **suspensão:** à medida que o grão sofre uma grande turbulência do fluido que o transporta, maior que as forças gravitacionais que o mantêm no leito, o grão permanece em suspensão acima do leito onde se encontrava.

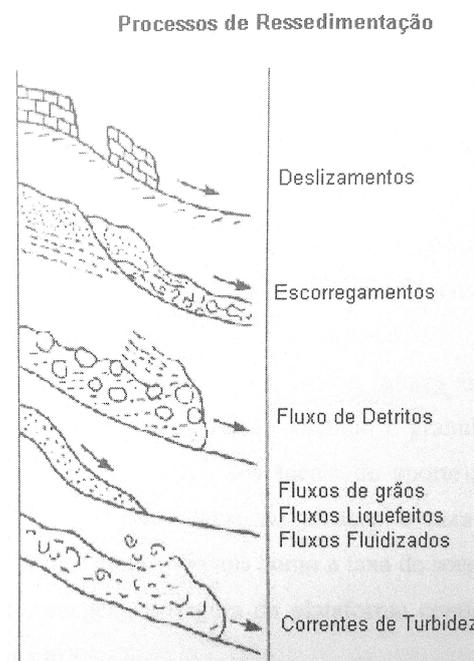
Essas condições descrevem casos naturais nos quais considera-se que o sedimento é apenas carregado pelo fluxo que o transporta. No entanto, a gravidade também pode agir no transporte de sedimentos, com o fluido realizando um papel secundário no processo. Nesse caso, porém, a ação da gravidade é mais efetiva na sedimentação do material, que é descrita a seguir.

4 PROCESSOS DE SEDIMENTAÇÃO

De acordo com Baptista Neto et al. (2004, p. 226), o estilo da sedimentação nas plataformas continentais resulta da combinação de fatores como os processos de transporte, os tipos e volumes de sedimentos envolvidos no processo, as dinâmicas deposicionais, o retrabalhamento desses sedimentos no leito marinho e a influência das oscilações do nível do mar.

Os processos deposicionais responsáveis pela sedimentação em águas marinhas profundas podem ser classificados em três grandes grupos, ou seja, processos: de sedimentação pelágica, associados a correntes normais de fundo e de ressedimentação (trabalho não publicado)⁵. Esses processos são indicados na figura 5 e detalhados em seguida.

Figura 5 – Principais processos deposicionais



(fonte: STOW⁶, 1994 apud PUHL, 2009)

⁵ Notas de aula de Luiz J. Tomazelli com o título Sistema Depositional Marinho Profundo, da disciplina Ambientes de Sedimentação, dada pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

⁶ STOW, D. A. V. Deep sea processes of sediment transport and deposition. In: PYE, K. (Ed.) **Sediment Transport and Depositional Process**. 1 ed. [S. I.]: Blackwell Science, 1994. p. 257-293.

4.1 PROCESSOS DE SEDIMENTAÇÃO PELÁGICA

Sedimentação pelágica envolve a deposição grão a grão de materiais de granulação fina, principalmente de origem biogênia – fragmentos calcários e silicosos provenientes da associação de microorganismos planctônicos associados a outros tipos de material orgânico – que foram sintetizados junto às águas superficiais dos oceanos. A distribuição dos diferentes tipos de sedimentos pelágicos é influenciada pelas condições climáticas, pelos padrões de circulação de correntes e pela produtividade e fertilidade de nutrientes orgânicos nas águas superficiais. A acumulação desses materiais forma os chamados depósitos pelágicos de mar profundo (trabalho não publicado)⁷.

4.2 PROCESSOS ASSOCIADOS A CORRENTES NORMAIS DE FUNDO

Esses processos envolvem vários tipos de correntes das quais destacam-se as denominadas correntes de contorno. Estas correntes resultam do resfriamento e mergulho das águas superficiais, fenômeno que ocorre próximo às regiões polares. Recebem o nome de correntes de contorno porque, no hemisfério sul, essas correntes se formam junto à Antártica e contornam a base da margem continental do continente americano. Podem alcançar velocidades grandes o suficiente para erodir e transportar grandes massas de sedimentos junto ao fundo marinho. Por isso, é comum que os depósitos situados nas regiões de talude e elevação continental sejam significativamente trabalhados por essas correntes de contorno. Os sedimentos retrabalhados ou redepositados por essas correntes são chamados de contornitos (trabalho não publicado)⁸.

4.3 PROCESSOS DE RESSEDIMENTAÇÃO

Chamados também de processos de transporte gravitacional de sedimentos, os processos de ressedimentação envolvem o transporte de sedimentos de porções rasas até porções de grande profundidade no leito marinho. Trata-se de um conjunto de processos dinâmicos de grande complexidade que atua sobre o talude continental, envolvendo movimentos de massa com

⁷ Notas de aula de Luiz J. Tomazelli com o título Sistema Depositional Marinho Profundo, da disciplina Ambientes de Sedimentação, dada pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

⁸ idem

fluxos controlados tanto pela gravidade quanto pela perda de estabilidade do talude onde estavam inseridas. Os processos de ressedimentação envolvem vários eventos causados pela gravidade – em termos de concentração e de estado de desagregação do material envolvido – que vão desde a queda livre de blocos de rochas até a formação de correntes de turbidez de baixa concentração (BAPTISTA NETO et al., 2004, p. 233). Esses processos são:

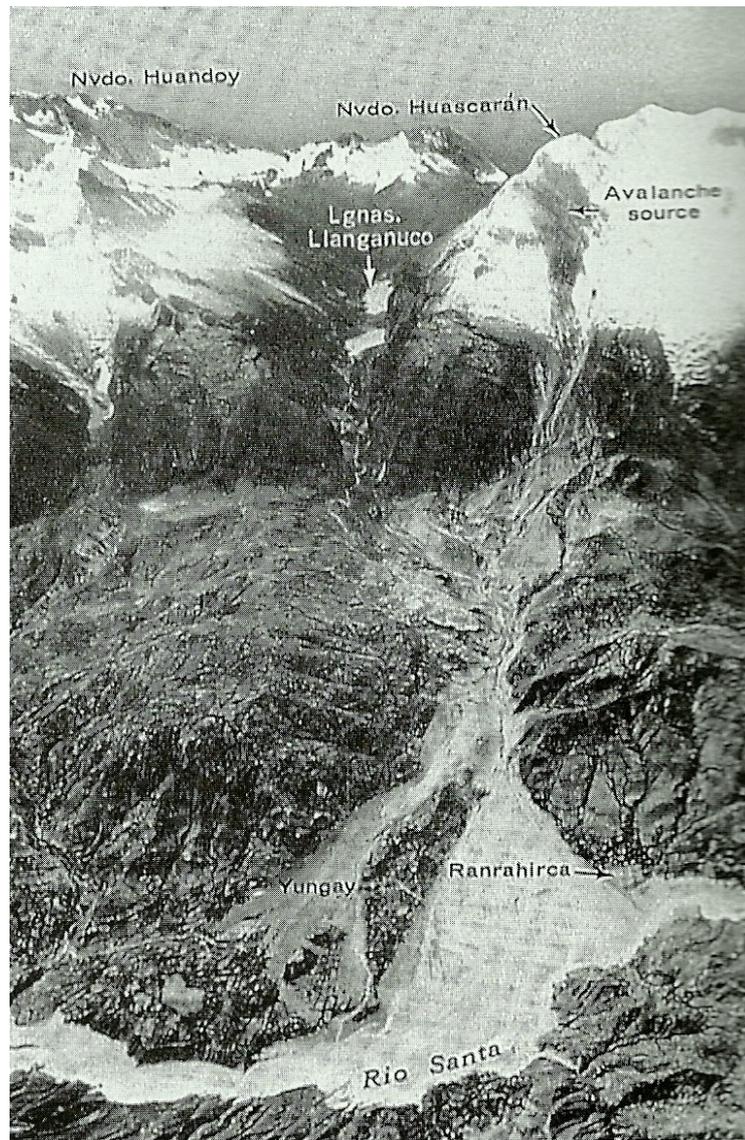
- a) queda de rochas (*rockfall*);
- b) rastejamento (*creep*);
- c) deslizamento de blocos (*slide*);
- d) colapso (*slump*);
- e) **fluxo de detritos** (*debris flow*);
- f) **fluxo de grãos** (*grain flow*);
- g) **corrente de turbidez** (*turbidity current*).

Os processos destacados interessam particularmente a esse estudo. Assim, os fluxos de detritos e os de grãos são descritos a seguir. A corrente de turbidez é detalhada no capítulo 5.

4.3.1 Fluxos de detritos

De acordo com Leeder (1999, p. 208), fluxos de detritos podem apresentar as mais variadas composições no que se refere à granulometria, concentração, velocidade e dinâmicas internas. Nesse contexto, podem se apresentar como os fluxos mais destrutivos e perigosos entre todos os fluxos gravitacionais. A figura 6 ilustra a fonte da ocorrência (chamada na figura de *avalanche source*) de um desses fluxos. Essa capacidade destrutiva dos fluxos de detritos se deve ao fato deles serem capazes de combinar altas velocidades – maiores até que 10 m/s – com grandes cargas dinâmicas na sua composição. Essas cargas se devem à presença de material grosso concentrado de forma muito densa na sua composição.

Figura 6 – Ocorrência de fluxo de detritos nos Andes peruanos



(fonte: PLAFCKER; ERICKSEN⁹, 1978 apud LEEDER, 1999)

4.3.2 Fluxos de grãos

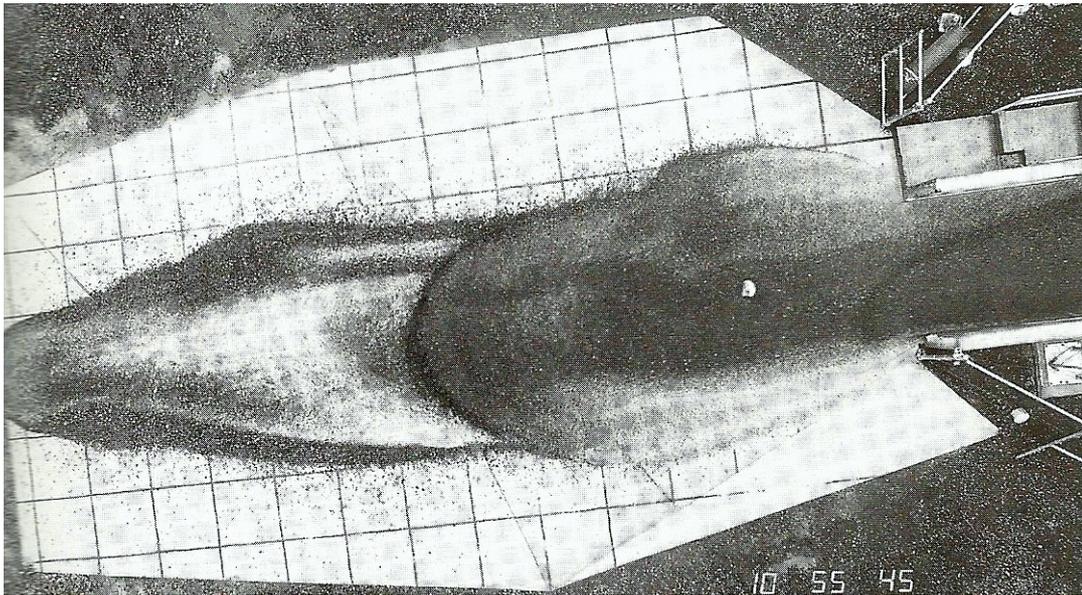
Middleton e Hampton¹⁰ (1976 apud NELSON, 1984) definiram fluxos de grãos baseados na ocorrência de interações grão-grão que agem de forma contrária à tendência natural dos grãos de se desprenderem do fluxo. Fluxos de grãos ocorridos na forma de avalanches de areia

⁹ PLAFCKER, G.; ERICKSEN, G. E. (1978) Nevados Huascarán avalanches, Peru. In: *Rockslides and Avalanches, Vol. 1, Natural Phenomena* (ed. B. Voight), p. 277-314

¹⁰ MIDDLETON, G. V.; HAMPTON, M. A. Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity flows. In: STANLEY, D. G.; SWIFT, D. J., (Ed.), **Marine Sediment Transport and Environmental Management**. New York: John Wiley, 1976. p. 197-217.

foram observados por mergulhadores no topo de cânions submarinos (SHEPARD; DILL¹¹, 1966 apud NELSON, 1984). Através de cálculos, pesquisadores sugerem que o transporte devido ao fluxo de grãos ocorre somente em taludes com inclinações de 18° até, aproximadamente, 30°. Por serem de certa forma raros na natureza, esses fluxos não parecem ser significantes no estudo do transporte marinho de sedimentos a grandes distâncias. Um fluxo de grãos experimental está ilustrado na figura 7.

Figura 7 – Vista superior de um fluxo de detritos experimental



(fonte: LEEDER, 1999, p. 213)

4.4 OSCILAÇÕES DO NÍVEL DO MAR

Estes fenômenos estão incluídos entre aqueles de maior impacto geológico-ambiental ocorridos durante o Quaternário – último período geológico da era Cenozóica, iniciado há aproximadamente 1,8 milhão de anos atrás e estendendo-se até o presente. Em períodos geológicos anteriores, a expansão das calotas polares durante a era glacial e a sua posterior retração teriam influenciado os sistemas de sedimentação tanto de águas rasas quanto de profundas. Isso aconteceu, por exemplo, porque o recuo das águas durante a era glacial deixou expostas porções de terra que foram erodidas e hoje equivalem às plataformas continentais. Muitos sistema fluviais cavaram e aprofundaram canais, que foram facilmente submersos pela água do mar, forçando o recuo das linhas de orla (BAPTISTA NETO et al., 2004, p. 225).

¹¹ SHEPARD, F. P.; DILL, R. F. **Submarine Canyons and Other Sea Valleys**. Chicago: Rand McNally, 1966.

5 CORRENTES DE TURBIDEZ

Nesse capítulo, as correntes de turbidez são definidas, sendo apresentados os seus processos de formação, os elementos que as constituem, sua estrutura, seu comportamento no mar e as suas consequências para os processos sedimentológicos marinhos. Também são apresentados experimentos que avaliaram o comportamento das correntes de turbidez.

5.1 DEFINIÇÃO

De acordo com Simpson (1997, p. 1), correntes de gravidade, também chamadas de correntes de densidade ou correntes de fluabilidade, ocorrem em situações tanto naturais quanto artificiais e são, principalmente, fluxos horizontais gerados pela interação entre duas massas de fluido que apresentam alguma diferença de densidade. As **correntes de turbidez** são correntes de densidade nas quais a diferença de densidade que as define ocorre devido à presença de material particulado em uma das massas de fluido. Elas constituem os mecanismos mais atuantes no transporte de sedimentos ao longo do talude continental, sendo de grande eficiência no transporte de sedimentos de águas rasas para o mar profundo, gerando depósitos sedimentares de variadas espessuras e dimensões (BAPTISTA NETO et al., 2004, p. 233). Um exemplo de corrente de turbidez pode ser visto na figura 8, onde uma tempestade de areia avança sobre uma cidade saudita.

Figura 8 – Exemplo de corrente de turbidez: tempestade de areia movendo-se sobre uma cidade na Arábia Saudita

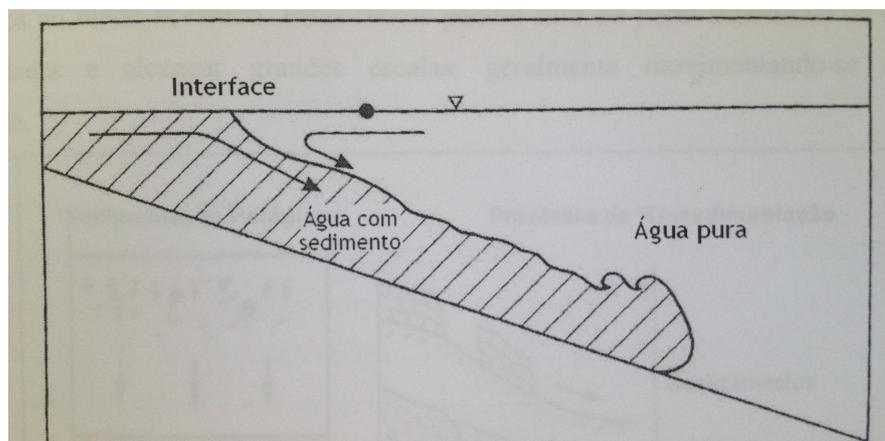


(fonte: BLINDING..., c2013)

5.2 FORMAÇÃO E DESENVOLVIMENTO

As correntes de densidade marinhas podem ser divididas em dois grupos principais, referentes à sua iniciação: podem ter sua movimentação desencadeada pela introdução de sedimentos de uma fonte externa (figura 9) ou pelo rearranjo de sedimentos depositados previamente do fundo oceânico (PUHL, 2009, p. 29).

Figura 9 – Água com sedimentos oriundos de fonte externa



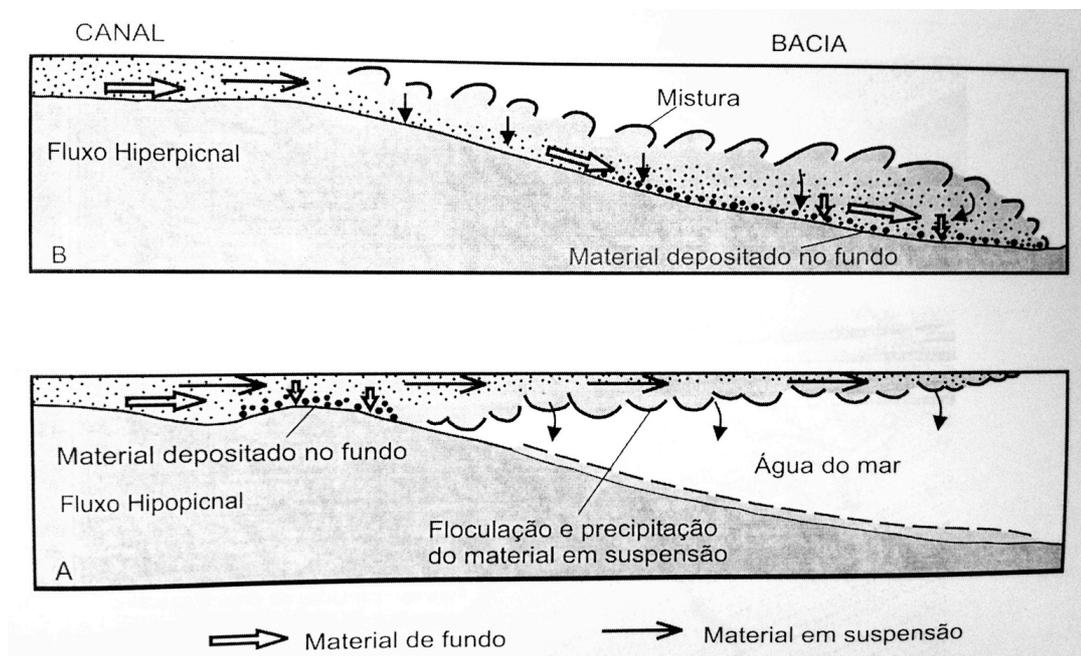
(fonte: STOW¹², 1994 apud PUHL, 2009)

¹² STOW, D. A. V. Deep sea processes of sediment transport and deposition. In: PYE, K. (Ed.) **Sediment Transport and Depositional Process**. 1 ed. [S. l.]: Blackwell Science, 1994. p. 257-293.

5.2.1 Introdução de sedimentos de fonte externa

A introdução de sedimentos de fonte externa ocorre, por exemplo, no delta dos rios, em que sedimentos provenientes do rio chegam ao mar, desenvolvendo correntes de turbidez. Essas correntes dependem de um fator fundamental na sua definição: deve haver diferença de densidade entre o fluxo de sedimentos e a água do mar (PUHL, 2009, p. 29). Quando a densidade do fluxo é maior que a da água do mar, a diferença de densidade permite a formação de uma corrente de turbidez que se propaga junto ao leito oceânico, o chamado fluxo hiperpicinal. Já fluxos de sedimentos com densidade menor que a da água do mar desenvolvem uma pluma de flutuação sobre a água do mar, sendo esse fluxo chamado de fluxo hipopical (BATES¹³, 1953 apud PUHL, 2009). Esses fluxos estão ilustrados na figura 10.

Figura 10 – Fluxos hiperpicinal e hipopical



(fonte: BATES¹⁴, 1953 apud BAPTISTA NETO et al., 2004)

¹³ BATES, C. C. Rational Theory of Delta Formation. *AAPG Bulletin*, [Tulsa], v. 37, [n. 9], p. 2119-2162, [Sept.] 1953.

¹⁴ op. cit.

5.2.2 Rearranjo de sedimentos previamente depositados

O rearranjo de sedimentos previamente depositados acontece, mais comumente, pela instabilização de taludes que possuem um elevado gradiente de declividade, frequentes nas regiões de quebra da plataforma continental. Também podem decorrer de eventos tectônicos (soerguimento de placas ou abalos sísmicos) ou de erupções vulcânicas. Dependendo do grau desses eventos, os fluxos sedimentares oriundos desses processos podem se converter em correntes de turbidez (BAPTISTA NETO et al., 2004 p. 36).

5.2.3 Desenvolvimento das correntes de turbidez

Uma vez em movimento, as correntes de turbidez podem agregar sedimentos no decorrer da sua trajetória ganhando massa e velocidade suficientes para percorrer grandes distâncias – de até centenas de quilômetros – e causar grandes danos. Isso acontece porque, no processo de desenvolvimento, as correntes de turbidez são capazes de levantar material a partir do leito e, a partir da turbulência própria da corrente, manter suspenso esse material, agregando-o à sua estrutura e aumentando o seu excesso de densidade. Através desse processo, as correntes de turbidez são consideradas de extrema importância na formação do relevo marinho, já que têm a capacidade de erodir canais e cânions enormes, transportando quantidades imensas de sedimentos no leito oceânico (SIMPSON, 1997, p. 5).

5.3 ESTRUTURA

A corrente de turbidez apresenta duas partes na sua constituição: a cabeça e o corpo. Essas duas porções organizam-se de uma forma na qual a diferenciação de cada não é tão óbvia. Ainda assim, essas duas partes constituintes da corrente são descritas nos próximos itens.

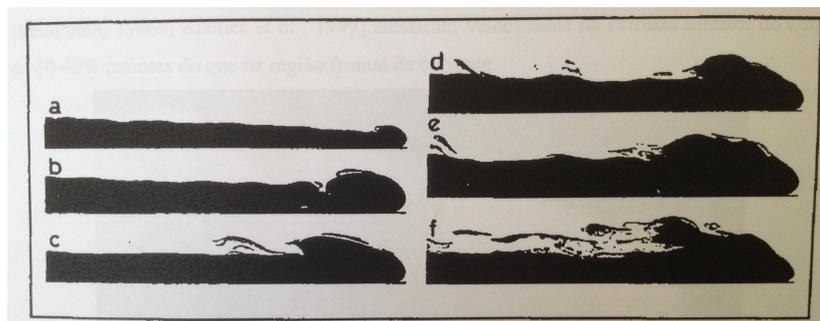
5.3.1 Cabeça

De acordo com Simpson (1997, p. 140), as correntes de densidade apresentam uma extremidade frontal bem definida, em que uma cabeça característica, mais pronunciada que o fluxo que a segue, se faz presente. Essa cabeça é uma zona que cumpre um papel importante controlando a corrente que a sucede. Quando a corrente de turbidez ocorre em uma região de gradiente baixo, se movendo horizontalmente, a corrente permanece estável. O contrário

ocorre quando a corrente se propaga em taludes de gradientes acentuados de declividade. Isso se deve ao fato de que o tamanho da cabeça cresce cada vez mais quanto maior for o gradiente de declividade. Nessas condições, um grande volume de sedimentos se incorpora rapidamente à corrente de turbidez.

Não é possível determinar um formato generalizado para descrever essas cabeças das correntes de turbidez. Isso acontece porque, independentemente dos efeitos viscosos, elas são muito modificadas por turbulências no seu entorno e por fluxos tanto opostos à direção da corrente quanto fluentes na mesma direção dela. Os efeitos viscosos foram examinados em laboratório e concluiu-se que eles afetam o comportamento das correntes de turbidez tanto no perfil da cabeça quanto na taxa de movimentação das correntes. A figura 11 mostra que, com o crescimento da variação de temperatura em uma corrente de densidade, a cabeça da corrente de turbidez formada muda radicalmente. (SIMPSON, 1997, p. 140-141)

Figura 11 – Evolução da cabeça de uma corrente de turbidez. Em (a), a diferença de temperatura entre a corrente e o meio é bem pequena. Em (f), ela chega a 35°C.



(fonte: SCHMIDT¹⁵, 1911 apud SIMPSON, 1997)

5.3.2 Corpo

Segundo Puhl (2009, p. 33), não há um consenso na definição da separação entre a região frontal e a posterior da corrente. Visualmente é possível perceber uma descontinuidade na espessura da corrente. Investigações feitas no interior das correntes de turbidez mostraram que as camadas superior e inferior do corpo da corrente apresentam comportamentos distintos. Uma maior concentração de sedimentos na camada inferior é constatada e explicada pela formação de um fluxo que visa compensar a diluição de sedimentos ocorrida na parte frontal da corrente.

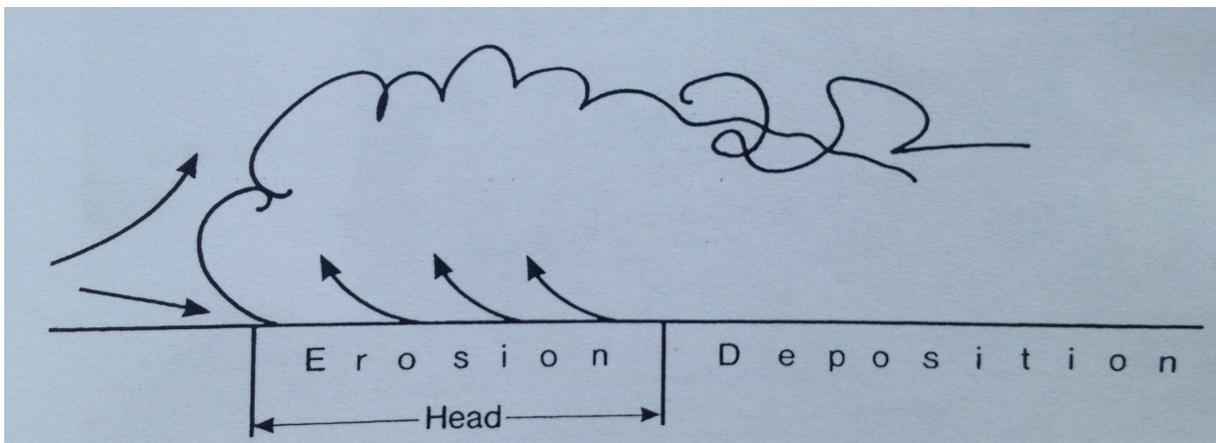
¹⁵ SCHMIDT, W. Zur Mechanik der Boen. **Z. Meteorol.** [S.l.], v. 28, p. 355-362, 1911.

É possível observar ainda uma cauda na estrutura das correntes de turbidez. No entanto, essa região apresenta baixas velocidades e pouca concentração de sedimentos em suspensão, o que faz com que a região seja associada a uma região da corrente com predominância de sedimentos finos.

5.4 SEDIMENTAÇÃO DAS CORRENTES DE TURBIDEZ

Segundo Puhl (2009, p. 43), os processos de deposição e erosão dos sedimentos das correntes de turbidez está intimamente ligado à dinâmica interna das mesmas. Em trechos nos quais as correntes tendem a erodir canais marinhos, o valor da energia inserida na corrente aumenta junto com a velocidade e a diferença de densidade. A figura 12 identifica as regiões da corrente de turbidez que geram erosão e deposição. Quando sofrem processos de deposição, as correntes tendem a desacelerar, depositando elementos de sua composição no leito marinho, diminuindo sua diferença de densidade e, assim, perdendo força.

Figura 12 – Zonas das correntes de turbidez que geram erosão ou sedimentação



(fonte: SIMPSON, 1997, p. 221)

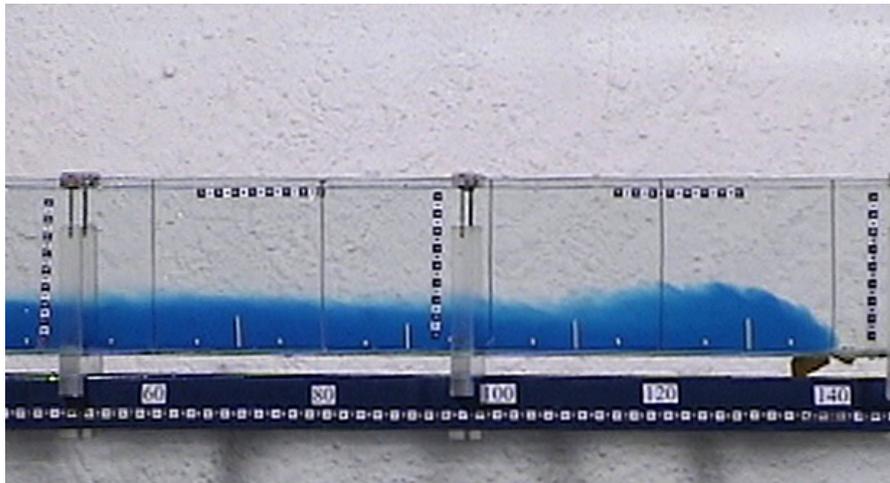
Os cânions submarinos, formados também pelas correntes de turbidez, podem se constituir na forma de uma série de canais com origem em um ponto em comum, de onde os fluxos de sedimentos se espalham no fundo oceânico, formando uma estrutura morfológica semelhante a um leque. Esses leques podem ter tamanhos variados, chegando a abranger transversalmente uma distância de 2000 km. A sedimentação nesses leques é mantida principalmente pelas correntes de turbidez, que perdem velocidade na superfície do leque. Isso cria um padrão de deposição no qual os sedimentos mais grossos se consolidam próximo à região de onde

partem os canais que compõem o leque e os sedimentos mais finos se sedimentam a distâncias bem maiores dessa região (BAPTISTA NETO et al., 2004, p. 234).

5.5 EXPERIMENTOS COM CORRENTES DE TURBIDEZ

Dada a importância das correntes de turbidez na formação do leito marinho, estudos já foram realizados tendo as mesmas como objeto de estudo. Nessa seção, são apresentadas algumas formas de gerar correntes de turbidez em laboratório, assim como são descritos experimentos feitos anteriormente. A figura 14 mostra uma corrente de turbidez de duas fases gerada experimentalmente.

Figura 13 – Corrente de turbidez de duas fases gerada em laboratório



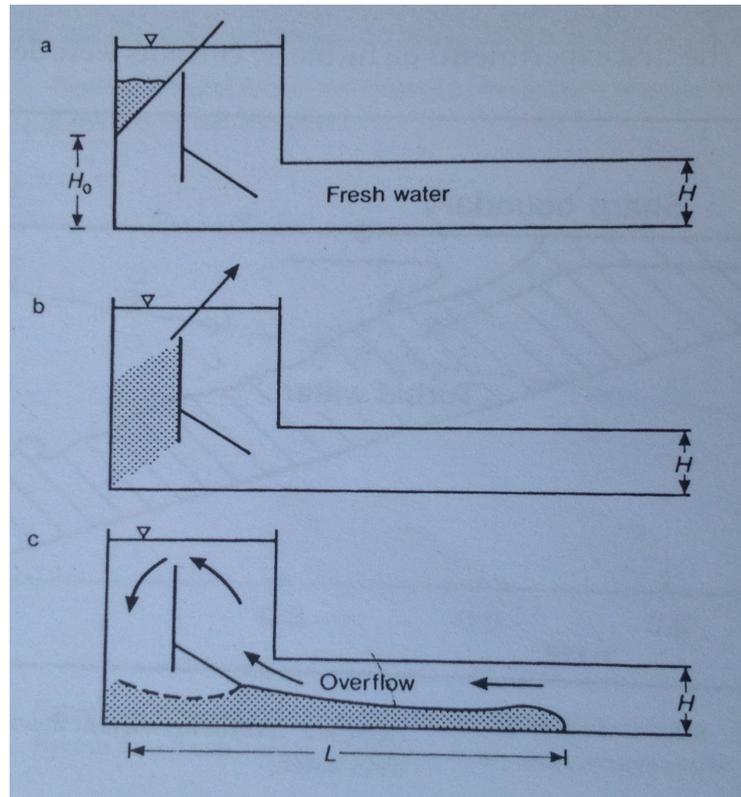
(fonte: DÜCKER, 2007, p. 3)

Riddell¹⁶ (1969 apud SIMPSON, 1997) foi um dos primeiros pesquisadores a gerar correntes de turbidez em laboratório. Conforme mostra a figura 14, um tanque com formato em “L” possuía algumas divisórias internas que visavam regular o movimento da corrente de turbidez gerada no mesmo e facilitar a observação do fenômeno. Primeiramente, uma mistura de areia, silte e água foi colocado sobre uma comporta inclinada (figura 14 a). Quando essa comporta era removida, o material sofria uma queda de alguns centímetros, vertendo em direção ao canto do tanque (figura 14 b) e, a partir daí, se comportando como uma corrente de turbidez, formando um fluxo subaquático (figura 14 c) de onde o material se sedimenta ao longo do tanque. A partir desse experimento, pôde-se concluir que as correntes de turbidez geradas

¹⁶ RIDDELL, J. F. A laboratory study of suspension-effect density currents. **Canadian Journal of Earth Sciences**. [S.l.], v. 6. p. 231-246, 1969.

apresentavam características semelhantes àsquelas já observadas em correntes de densidade salinas como, por exemplo, a natureza da mistura na cabeça da corrente e a vinculação entre velocidade, profundidade e diferença de densidade.

Figura 14 – Experimento de Riddell

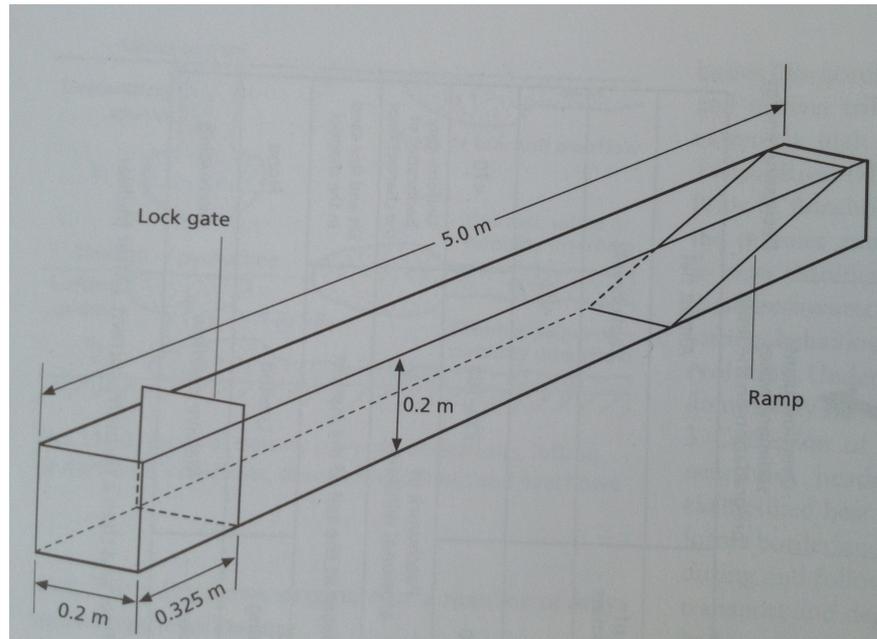


(fonte: RIDDELL¹⁷, 1969 apud SIMPSON, 1997)

Experimentos como o de Riddell, que utilizam comportas móveis para a geração das correntes de turbidez, utilizam a técnica de *lock-exchange*. Outro exemplo de experimento que utiliza essa técnica está ilustrado na figura 15, no qual o compartimento menor do tanque é preenchido com uma mistura que seja mais densa que o fluido que preenche o outro compartimento do tanque. Feito isso, a comporta que separa os dois compartimentos é removida e o fluido mais denso se mistura ao menos denso, se comportando exatamente como uma corrente de turbidez. Esse fluxo apresenta as estruturas da corrente de turbidez de uma forma muito bem definida, conforme ilustra a figura 16.

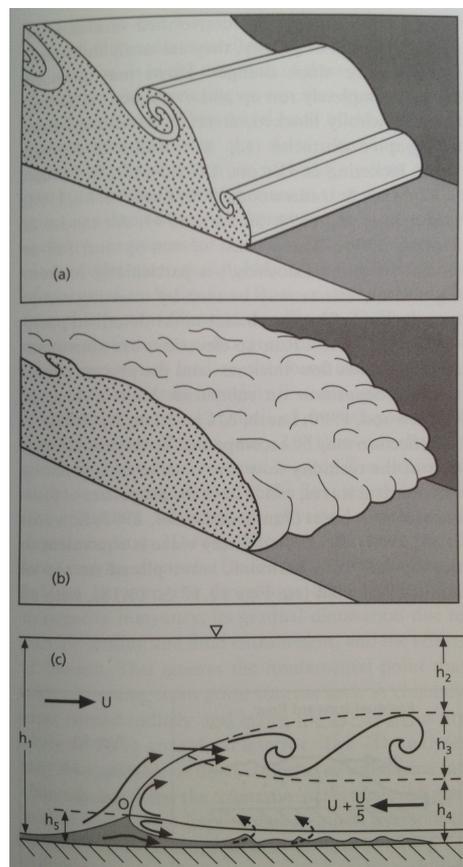
¹⁷ idem

Figura 15 – Tanque que utiliza a técnica de *lock-exchange*



(fonte: LEEDER, 1999, p. 218)

Figura 16 – Propagação da corrente de densidade gerada em experimento como o da figura 15



(fonte: LEEDER, 1999, p. 219)

6 TURBIDITOS

Os turbiditos constituem depósitos de larga ocorrência nos ambientes de mar profundo, os quais formam camadas sedimentares estratigraficamente superpostas e podem atingir vários quilômetros de espessura (BAPTISTA NETO et al., 2004, p. 234). A descoberta da importância das correntes de turbidez na formação de depósitos sedimentares em águas profundas – decorrente principalmente dos trabalhos de Kuenen e Migliorini –, representou uma grande revolução no campo de Sedimentologia. Em decorrência desses estudos, em 1962, foi publicado um trabalho clássico feito por Bouma, que permitiu reconhecer uma organização interna bem característica dos turbiditos (trabalho não publicado)¹⁸.

De acordo com Bruhn; Moraes (1988, p. 825), para a exploração de petróleo, é essencial a elaboração de uma modelagem tridimensional da geometria externa das rochas-reservatório e a descrição mais detalhada possível de suas heterogeneidades internas. Para que isso seja possível, deve-se trabalhar em uma escala intermediária entre a propiciada pelas linhas sísmicas (de poucos detalhes) e a pontual, correspondente aos poços testemunhados.

Ainda segundo esses autores, a descrição de um amplo conjunto de formações geológicas e a associação dos dados obtidos com informações de subsuperfície permitiu, através de um projeto de caracterização de geometria externa e heterogeneidades internas de reservatórios turbidíticos, agrupar os reservatórios em cinco tipos principais:

- a) complexos de canais;
- b) lobos canalizados;
- c) lobos não canalizados;
- d) franjas;
- e) cunhas clásticas subaquosas.

¹⁸ Notas de aula de Luiz J. Tomazelli com o título Sistema Depositional Marinho Profundo, da disciplina Ambientes de Sedimentação, dada pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

6.1 COMPLEXOS DE CANAIS

Os complexos de canais são caracterizados por um grupo de corpos arenosos e/ou conglomeráticos estreitos e alongados gerados pelo preenchimento de canais sinuosos e assimétricos, que se assemelham em planta aos canais fluviais meandranes de baixa sinuosidade. A origem desses canais está vinculada à grande capacidade de erosão do substrato por parte das correntes de turbidez. Tais canais são originados pelo próprio sistema deposicional, sem relação com calhas produzidas tectonicamente ou pela movimentação subjacente de camadas de sal ou folhelho. É importante salientar que esses complexos de canais representam feições erosionais em uma escala menor que a de cânions submarinos, que podem abrigar não só um, mas inúmeros canais ativos em sua zona de talvegue (BRUHN; MORAES, 1988, p. 825).

Segundo Bruhn; Moraes (1988, p. 825), o preenchimento dos canais turbidíticos se dá principalmente pela deposição de sedimentos a partir da carga oriunda de correntes de turbidez de alta densidade que sofrem uma desaceleração abrupta. Os complexos de canais apresentam tipicamente um preenchimento de arenitos e/ou conglomerados maciços cujo arcabouço é rico em intraclastos argilosos. Essa riqueza de intraclastos nos canais está associada ao grande poder erosivo das correntes de turbidez de alta densidade, que erodem canais de sedimentos finos em sítios de deposição próximos.

6.2 LOBOS CANALIZADOS

Segundo Bruhn; Moraes (1988, p. 826), os lobos canalizados se originam quando correntes de turbidez, relativamente mais carregadas de sedimentos grossos, chegam a áreas com declividade menor. Com isso, as correntes tendem a sofrer uma desaceleração e o fluxo tende a se distribuir por um conjunto de canais rasos e efêmeros. A contínua migração desses canais constrói extensos depósitos de areia amalgamados, denominados de lobos canalizados. Os lobos canalizados compõem, individualmente, corpos arenosos com ampla área, geralmente superior a 4 km². Em planta apresentam a geometria em leque, que eventualmente, se torna um tanto alongada.

6.3 LOBOS NÃO CANALIZADOS

Os lobos não canalizados têm origem quando correntes de turbidez transportando sedimentos essencialmente finos, que têm uma capacidade relativamente pequena de erodir canais, atingem sítios deposicionais com gradientes suaves (BRUHN; MORAES, 1988, p. 827). Esses lobos apresentam uma geometria semelhante àquela dos lobos canalizados, no entanto, uma importante diferença entre os dois é que nos lobos não canalizados, ocorrem camadas de folhelho com grande persistência lateral entre as camadas arenosas.

6.4 FRANJAS

De acordo com Bruhn; Moraes (1988, p. 828), as franjas são formadas a partir de correntes de turbidez diluídas que já perderam muita carga sedimentar na formação dos lobos (canalizados ou não). Se localizam em regiões mais distantes dos leques turbidíticos, apresentam grande continuidade lateral – a partir de 20 km² –, mas têm pequena espessura, na ordem do centímetro. Em sistemas turbidíticos com uma maior quantidade de sedimentos finos, as franjas tendem a ser mais desenvolvidas do que as que ocorrem em lugares com uma carga sedimentar essencialmente grossa. Essa sedimentação de material mais fino causa uma intensa sedimentação, diminuindo a porosidade da formação. Por isso, as franjas têm reduzido potencial como reservatório de petróleo.

6.5 CUNHAS CLÁSTICAS SUBAQUOSAS

Segundo Bruhn; Moraes (1988, p. 829), as cunhas clásticas subaquosas ocorrem quando há um suprimento contínuo de sedimentos ao longo de margens falhadas e curvas de uma bacia de sedimentos. Antigamente, esses sedimentos eram interpretados como leques aluviais ou leques deltaicos. No entanto, pesquisas posteriores indicaram que a maior parte desses sedimentos foi depositada por correntes de turbidez. As cunhas clásticas subaquosas atingem entre 1 e 2 km de espessura, definem faixas alongadas de 5 até 20 km de largura e centenas de quilômetros. Esses depósitos têm uma característica muito heterogênea, o que torna difícil o estabelecimento de parâmetros típicos dos mesmos.

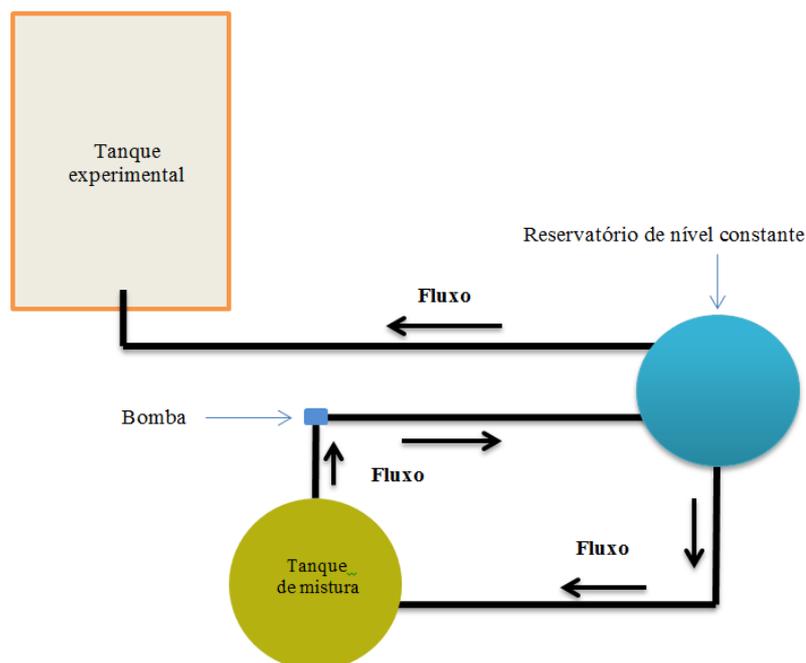
7 PESQUISA: INSTALAÇÕES, ENSAIOS E RESULTADOS

Neste capítulo, são descritos as instalações, os ensaios, os métodos empregados para a geração e injeção das correntes de turbidez, a forma de coleta de dados e o processamento dos mesmos.

7.1 LABORATÓRIO

O Instituto de Pesquisas Hidráulicas conta com alguns núcleos de estudos onde temas diferentes de pesquisas são abordados. Dentro desse contexto, o Neced (Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade) conta com três pavilhões nos quais são realizados diversos estudos que têm, no comportamento das correntes de turbidez, o seu principal foco. Assim, o tanque experimental em que foram realizados os ensaios deste trabalho já estava construído, bem como suas estruturas auxiliares necessárias para a realização dessa pesquisa (croqui na figura 17). Nos subitens a seguir, é apresentada uma descrição detalhada destes aparatos experimentais utilizados.

Figura 17 – Croqui esquemático dos aparatos utilizados



(fonte: elaborado pelo autor)

7.1.1 Tanque de mistura

O tanque de mistura é um tanque de seção circular, com 5,8 metros de diâmetro. Ele é munido de misturadores que têm a função de homogeneizar a mistura de água e sedimentos. Neste tanque, a água e os sedimentos são inseridos separadamente e agitados pelos misturadores, transformando-se em uma mistura que posteriormente formará a corrente de turbidez a ser injetada no tanque experimental.

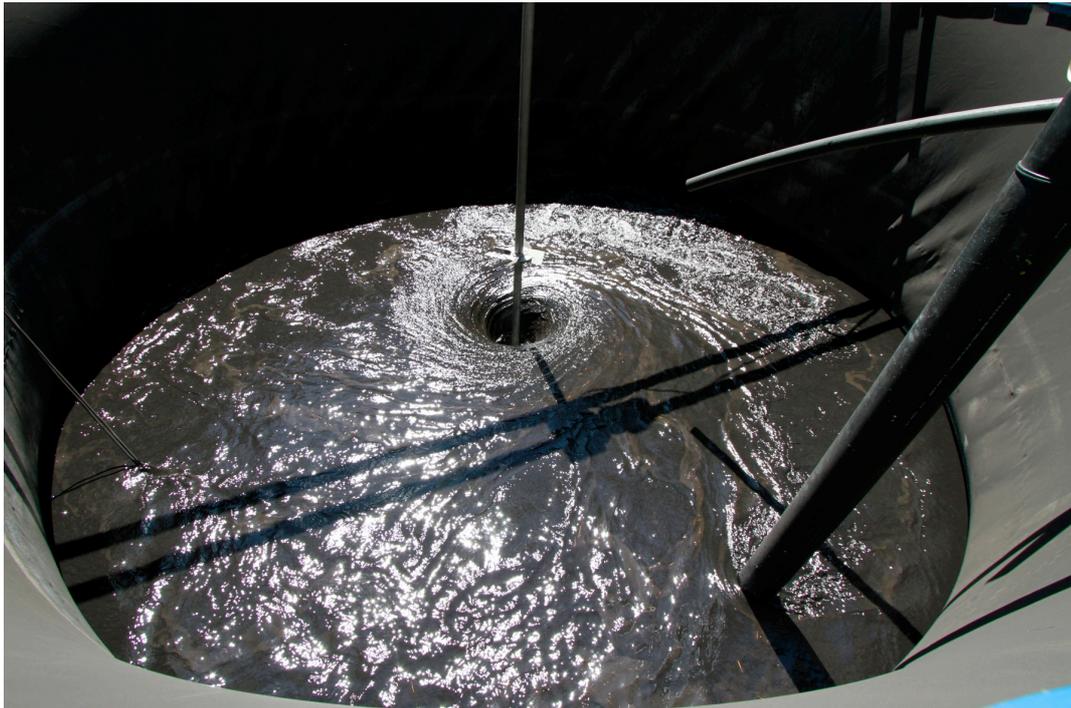
São dois os misturadores que homogeneizam a mistura a ser utilizada no ensaio dentro do tanque de mistura. Um deles está posicionado na parte central, junto ao fundo do tanque. O outro também está posicionado no centro do tanque, a uma altura superior à do primeiro misturador. Ambos funcionam com uma frequência que pode ser controlada por um inversor de frequência instalado concomitantemente aos dois misturadores. As figuras 18 e 19 ilustram o tanque de mistura.

Figura 18 – Tanque de mistura visto de fora



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 19 – Misturadores homogeneizando água e sedimentos



(fonte: trabalho não publicado)¹⁹

7.1.2 Reservatório de nível constante

O reservatório de nível constante fica acima do nível do tanque experimental e tem uma capacidade de 5.000 litros. Ele recebe a mistura do tanque de mistura por intermédio de uma bomba centrífuga e fornece essa carga hidráulica para inserir a mistura no tanque experimental, gerando assim as correntes de turbidez. Ele também é utilizado para gerar uma recirculação da mistura excedente entre este reservatório e o tanque de mistura, favorecendo a homogeneização das misturas que foram produzidas no tanque de mistura. Essa recirculação é possível pois há um circuito hidráulico composto por tubulações auxiliares

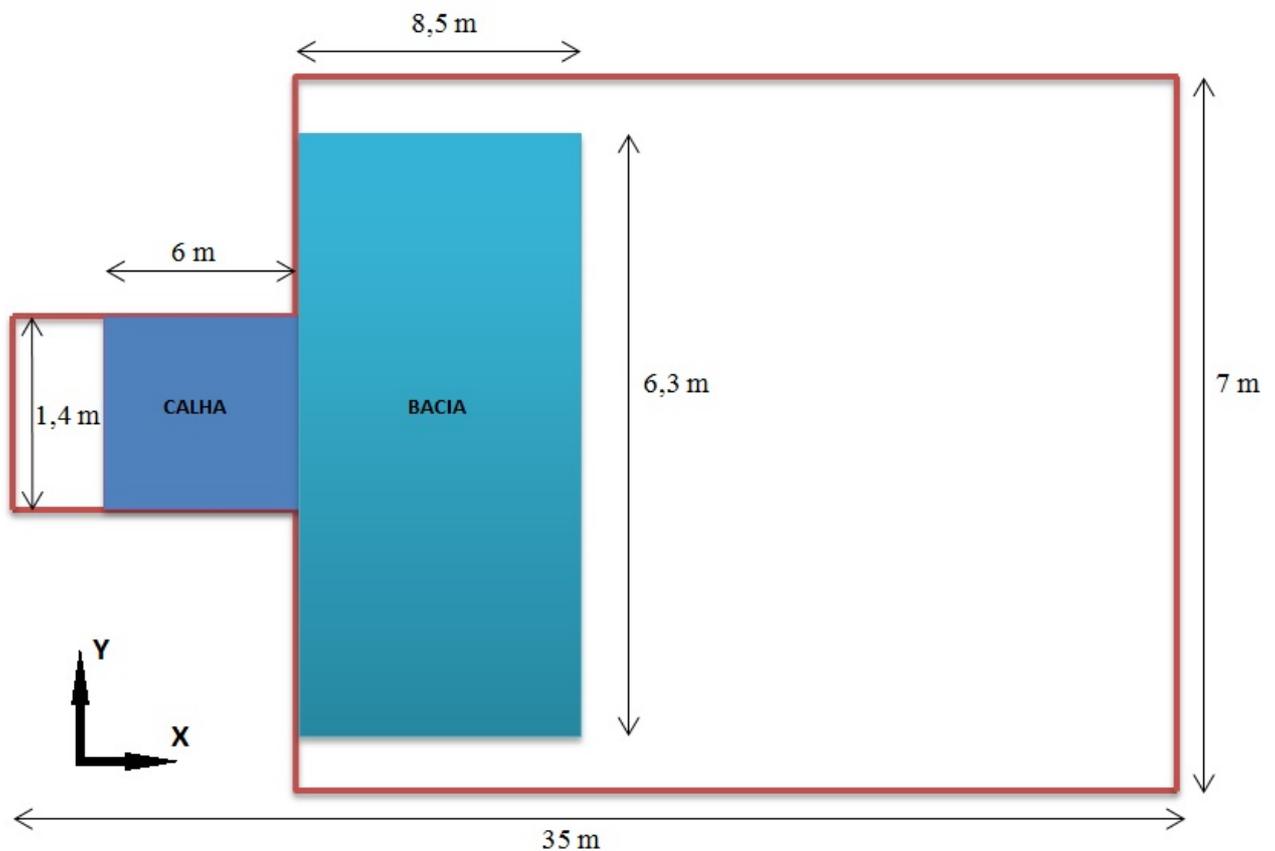
7.1.3 Tanque experimental

O tanque experimental, de grande escala, possui 35 metros de comprimento, 7 m de largura e 4 m de profundidade, totalizando um volume de aproximadamente 1 milhão de litros. No seu interior, ele foi subdividido em duas regiões: calha e bacia. A calha é a região inicial do tanque, onde fica o bocal que injeta a mistura que forma as correntes de turbidez utilizadas nos ensaios. Essa região tem 1,4 metros de largura, se desenvolve por 7,5 metros ao longo do

¹⁹ Fotos cedidas por Richard Eduard Dücker.

comprimento do tanque, onde possui uma declividade de 35% e deságua na região de bacia do tanque. Na região chamada bacia, a largura do tanque aumenta de 1,4 para 7 metros e o seu comprimento segue por mais 28 metros. Este trabalho limitou a sua região de avaliação em 6 m do comprimento da calha e em uma área da bacia de 8,5 m de comprimento por 6,3 m de largura. A figura 20 apresenta um croqui esquemático do tanque experimental e das áreas consideradas no trabalho.

Figura 20 – Tanque experimental em planta



(fonte: elaborado pelo autor)

O tanque experimental foi construído especialmente para pesquisar o comportamento das correntes de turbidez em ambientes marinhos profundos e é um tanque único a nível mundial por suas grandes dimensões. Nele está instalado um *scanner* perfilador a laser que coleta dados da topografia do depósito gerado junto ao fundo do tanque. A figura 21 mostra o tanque experimental visto em perspectiva a partir da sua região de jusante.

Figura 21 – Tanque experimental visto em perspectiva



(fonte: trabalho não publicado)²⁰

7.1.4 Scanner perfilador

O *scanner* perfilador foi desenvolvido pela Universidade de Minnesota, dos Estados Unidos, sendo especialmente dedicado ao tanque experimental. Ele consiste em um *scanner* perfilador munido de um feixe de laser, um sonar e uma câmera fotográfica. O feixe de laser delimita uma faixa do terreno que é lida pelo perfilador. Este coleta os dados sobre a posição de cada ponto dessa faixa varrida e gera um arquivo bruto com as informações coletadas. O equipamento tira inúmeras fotos do terreno e, através da sobreposição das mesmas, gera um arquivo de imagem da topografia analisada. O processamento do arquivo bruto dado pelo laser fornece a posição dos pontos do terreno em um sistema de coordenadas XYZ, arbitrado em função dos limites do tanque experimental. O sonar instalado no *scanner* serve, justamente, para determinar o quanto o perfilador pode se aproximar da superfície para a coleta de dados. Ele permite que o laser colete dados sem se chocar com a superfície do fundo analisado.

O *scanner* perfilador é guiado no tanque experimental, através de trilhos fixados nas laterais, por um aplicativo próprio, programado em Visual Basic. Este aplicativo controla o

²⁰ Fotos cedidas por Richard Eduard Dücker.

movimento nas três direções, varrendo a sua superfície por todo o espaço definido pelo tanque. Esse aplicativo também é responsável pela aquisição e processamento do arquivo bruto dos dados provenientes das leituras topográficas. A figura 22 mostra a estrutura de movimentação na qual o perfilador está instalado.

Figura 22 – *Scanner* perfilador



(fonte: trabalho não publicado)²¹

7.2 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Para este trabalho, foram utilizados os dados provenientes de três ensaios de uma série oficial de um projeto de pesquisa em andamento, realizados durante o primeiro semestre de 2013. Cabe salientar que essa série de ensaios não foi concluída até a presente data. Em cada um dos ensaios, foi medido o seu tempo de duração total e houve coleta de amostras da mistura que foi inserida no tanque experimental. A partir do momento em que a corrente começou a ser inserida no tanque, não houve interrupções no seu fluxo. Em todos os ensaios os procedimentos adotados foram semelhantes.

²¹ Fotos cedidas por Richard Eduard Dücker.

Os procedimentos experimentais constaram de: primeiro, o tanque de mistura recebia a água e os sedimentos que mais tarde seriam injetadas no tanque experimental dando origem às correntes de turbidez simuladas. Com os materiais dentro do tanque, ocorria a homogeneização da mistura com o funcionamento simultâneo dos dois misturadores instalados no interior do tanque de mistura. Aliado a isso, um sistema de recalque fazia a mistura circular entre o tanque de mistura e o reservatório de nível constante, visando uma maior homogeneização e diminuindo o volume de sedimentos decantados no fundo do tanque de mistura. Com a mistura devidamente homogeneizada, era aberto o registro da canalização que levava a mistura do reservatório de nível constante até o tanque experimental. Desta forma, o ensaio estava pronto para ser realizado. Antes, porém, ocorria a amostragem desta mistura a ser injetada. Três béqueres coletavam a mistura através de uma derivação da canalização e, após esse procedimento, a mistura era injetada no tanque continuamente com um volume pré-definido, simulando as correntes de turbidez. Nessa etapa, foi observado qualitativamente como se dava o desenvolvimento das correntes de turbidez ao longo da região da calha e da bacia. Após a quantidade de mistura inserida atingir o volume pré-estabelecido, os registros eram fechados e o ensaio finalizado. Ainda, após a passagem da corrente era necessário aguardar que a mesma sedimentasse no fundo do tanque, já que o perfilador é incapaz de fazer a varredura da topografia do tanque enquanto a água estiver excessivamente turva. Para acelerar este processo de sedimentação das partículas, foi adicionado floculante – sulfato de alumínio em pó – e, assim, realizar mais ensaios em menos tempo. A figura 23 mostra o momento inicial do ensaio 3, com a formação da corrente de turbidez no tanque experimental.

Figura 23 – Injeção de corrente de turbidez no tanque experimental



(fonte: trabalho não publicado)²²

7.2.1 Primeiro ensaio

O primeiro ensaio da série foi realizado em fevereiro de 2013. Para esse ensaio foi inserida no tanque uma mistura de carvão (1.500 kg) com água (~36.000 litros). Foram medidos os níveis de água no tanque de mistura no início e no fim do ensaio, para o controle do volume pré-estabelecido da mistura e da sua vazão. Três amostras da mistura foram coletadas para a verificação de parâmetros como granulometria e concentração de sedimentos injetados. As amostras mostraram que o diâmetro médio das partículas inseridas foi de 44,30 micra. A concentração média das três amostras injetadas foi de 19,71 gramas por litro de água. Nos dias que decorreram da realização do ensaio, verificou-se um excesso de turbidez no tanque experimental que foi contornado com a adição de floculante, conforme explicado anteriormente. Além disso, foi necessária a adição manual de uma pequena quantidade de areia no tanque, como forma de criar uma camada fina de contraste na superfície, a qual facilitava a leitura do *scanner* perfilador.

²² Fotos cedidas por Richard Eduard Dücker.

7.2.2 Segundo ensaio

O segundo ensaio da série foi realizado em abril de 2013. Dentro do tanque de mistura foi colocado água (~36.000 litros), carvão (3.500 kg) e caulim (125 kg). Posteriormente, foi acrescido à essa mistura um volume de aproximadamente 4 m³ de areia grossa, visando dar uma coloração mais clara à mistura e evitando assim que houvesse a necessidade de inserção manual de areia no tanque experimental quando a corrente de turbidez estivesse sedimentada. Os níveis de água no tanque de mistura foram medidos, assim como no ensaio anterior, para controle de vazão e volume da inserção da mistura no tanque experimental. As três amostras da mistura retiradas durante o experimento indicaram um diâmetro médio de partículas de 80,65 micra e uma concentração de sedimentos de 40,95 g/l. Foram utilizados 8 kg de floculante para precipitar os grãos mais finos presentes nessa corrente de turbidez gerada.

7.2.3 Terceiro ensaio

O terceiro ensaio da série foi realizado em junho de 2013. Este ensaio foi realizado inserindo no tanque experimental apenas a mistura de água (~36.000 litros), carvão (2.000 kg), caulim (125 kg) e areia remanescente do ensaio anterior. Foram medidos os níveis de água no tanque de mistura e amostras foram retiradas durante a realização do ensaio. O diâmetro médio das partículas verificado foi de 79,10 micra e a concentração média de sedimentos das três amostras foi de 76,48 g/l. Nos dias seguintes ao ensaio, 8 kg de floculante foram inseridos manualmente no tanque para precipitar a sedimentação das partículas.

7.2.4 Parâmetros dos ensaios

Durante a realização de cada ensaio, três amostras da mistura que era inserida no tanque experimental foram coletadas para posterior análise da sua composição. Essas amostras foram analisadas em um granulômetro para a determinação dos respectivos tamanho de grãos dos sedimentos. Como as amostras continham partículas de areia, caulim e carvão, não foi possível determinar o volume e a concentração de cada substância. A tabela 1 apresenta um resumo dos parâmetros dos três ensaios.

Tabela 1 – Síntese dos dados dos ensaios

Ensaio	Vazão (l/s)	Volume (m ³)	D médio (micra)	Concentração média (g/L)
1	7,00	37,80	44,30	19,71
2	5,64	36,04	80,65	40,95
3	5,38	41,96	79,10	76,48

(fonte: elaborado pelo autor)

7.3 FORMAÇÃO DE *GRIDS*

Após cada ensaio, os depósitos gerados pelas correntes de turbidez foram medidos pelo *scanner* perfilador, o qual gerou os arquivos brutos com os dados das leituras realizadas. Cada um desses arquivos brutos, era processado pelo aplicativo Matlab®, que transformava os dados de entrada em pontos com coordenadas XYZ. Estes dados coletados e processados, juntamente com os parâmetros da mistura e do fluxo, permitiram avaliar e interpretar a formação destes depósitos turbidíticos no tanque experimental.

Com os pontos gerados pelo Matlab, foi possível plotar duas superfícies digitais dos depósitos gerados: uma com informações a respeito da região de calha (entrada) do tanque e outra com dados correspondentes à região de bacia do tanque. Posteriormente esses dados foram analisados. Para este trabalho de plotagem das duas superfícies, foi utilizado o aplicativo *Surfer 8*®. O *Surfer* é largamente utilizado por engenheiros, geólogos, oceanógrafos, hidrólogos e climatologistas, entre outros.

Devido à grande precisão que o laser possui, sendo capaz de obter um ponto por milímetro de superfície varrida, a leitura do perfilador gerou dados sobre milhões de pontos somente na região analisada para este trabalho. Como se torna inviável manipular tamanha massa de dados, algumas simplificações foram adotadas. O *Surfer* é um aplicativo capaz de plotar uma superfície a partir da entrada de coordenadas dos pontos que descrevem tal superfície. A partir das informações desses pontos, o aplicativo os agrupa em nós, cujo número pode ser definido pelo usuário de acordo com a necessidade de detalhamento da superfície. Uma rede de nós, chamada de *grid*, é mais detalhada quanto maior for o número de nós gerados. Assim, quanto maior o número de nós que descrevem a superfície, maior a dimensão do *grid*. No entanto, quando há uma redução do número de pontos em relação ao número de pontos que foi inserido na entrada dos dados, alguns cuidados devem ser tomados. Um exemplo desses cuidados vem do fato de que, quando é modificado o número de pontos do *grid*, muda também o espaçamento entre eles, tendo em vista que a área descrita pelo número reduzido de

pontos é igual àquela descrita pela totalidade dos pontos catalogados anteriormente. Se o espaçamento entre os pontos não for semelhante entre linhas e colunas da rede de pontos, haverá uma distorção do relevo da superfície gerada com o número reduzido de pontos. Por isso, para haver uma descrição adequada das superfícies analisadas neste trabalho, foi necessário respeitar uma proporção ótima entre o número de nós na direção Y e na direção X. Essa proporção é indicada pelo *Surfer*, que mostra qual é o espaçamento entre nós em função do número de nós do *grid*.

7.3.1 Região de calha

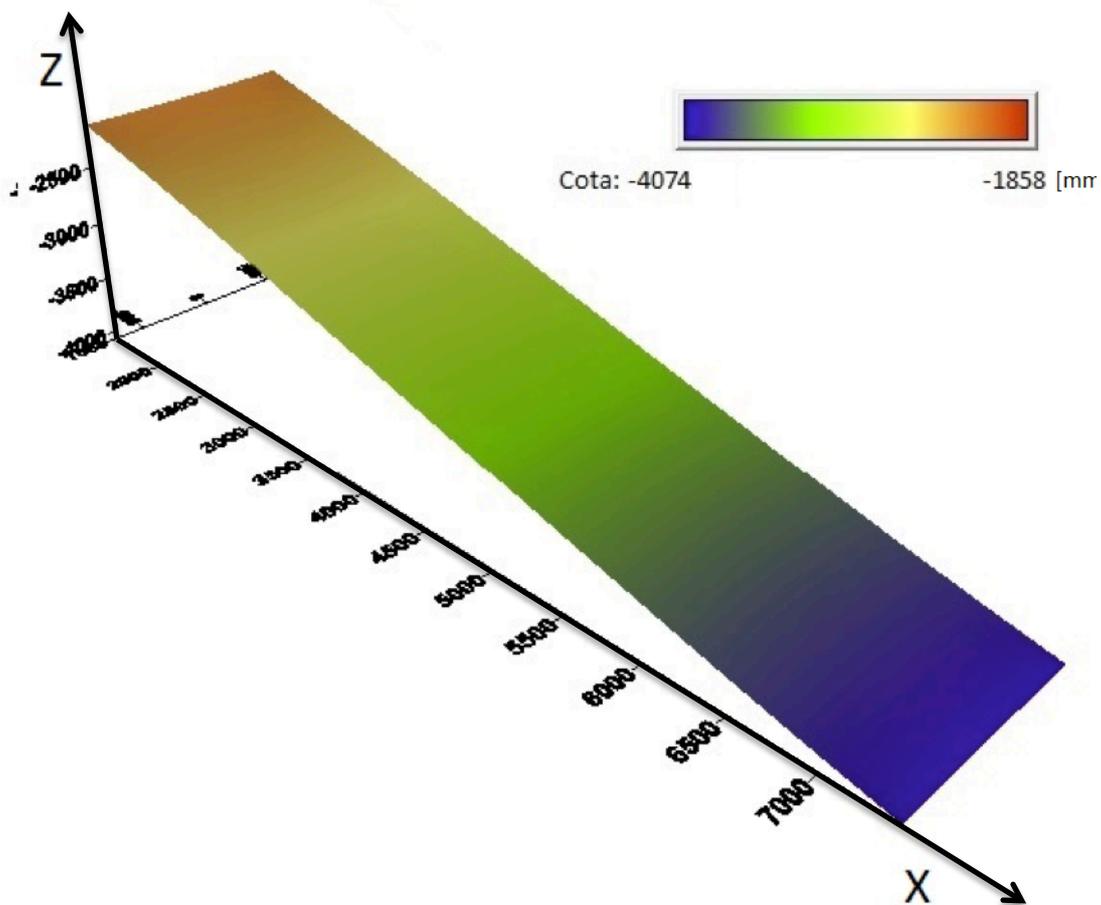
Para a região de calha, verificou-se que um espaçamento razoável entre pontos para manter a correspondência entre o que foi lido pelo perfilador e o depósito se dava quando o número de linhas de nós do arquivo reduzido era equivalente a um quarto do número de colunas de nós. Os arquivos gerados a partir dessas leituras resultaram numa rede de aproximadamente 530 mil pontos identificados no terreno, agrupados em um *grid* de 25 linhas por 100 colunas de nós (2.500 nós). Nenhum *grid* de resolução mais baixa foi adotado para não distorcer excessivamente a informação proveniente das leituras. Esse *grid*, de 2.500 nós, foi o utilizado para analisar a superfície.

Para analisar os depósitos gerados pelas simulações, foram feitas comparações da batimetria dos mesmos entre dois ensaios sucessivos. É importante ressaltar que, antes da realização do primeiro ensaio, havia uma pequena quantidade de material depositado no fundo do tanque. Esse material foi inserido durante alguns testes previamente realizados no projeto, os quais não fazem parte do escopo deste trabalho. Também, durante a realização essa série de experimentos que ainda está em andamento, não há a leitura do *scanner* perfilador do fundo do tanque experimental, ou seja, o marco zero do depósito. Para contornar essa dificuldade operacional e permitir uma análise qualitativa dos ensaios, em especial do primeiro, foi criada um marco zero artificial (fundo do tanque numérico).

Ao arbitrar essa superfície de fundo, utilizou-se a declividade conhecida da região de calha do tanque (35%) e as coordenadas Z, disponíveis a partir da primeira leitura, dos pontos mais próximos ao bocal de injeção das correntes de turbidez que, visualmente, não apresentavam deposição acentuada.

Então, a superfície de fundo foi gerada utilizando os pontos que limitam a região de calha do tanque lida pelo perfilador, o ponto de coordenadas $Z = -2138,44$ mm, $X = 1500$ mm e outro ponto, $Z = -4102,72$ mm, $X = 7416$, obtido através da inclinação conhecida da região de calha. Ainda foram utilizadas as coordenadas X e Y dos pontos que limitavam a região de calha do tanque. Esses dados foram utilizados no *Surfer*, que gerou a superfície de fundo do tanque. As superfícies geradas no *Surfer* apresentam uma escala de cores onde as mesmas variam de acordo com a profundidade de cada ponto da superfície. Para avaliar melhor os depósitos resultantes dos ensaios realizados, a palheta de cores foi a mesma utilizada para avaliar os depósitos na região da calha. A figura 24 mostra a superfície gerada para a região de calha. A coordenada Z possui seu valor zero na superfície superior do tanque e esse valor decresce com a profundidade (valores negativos).

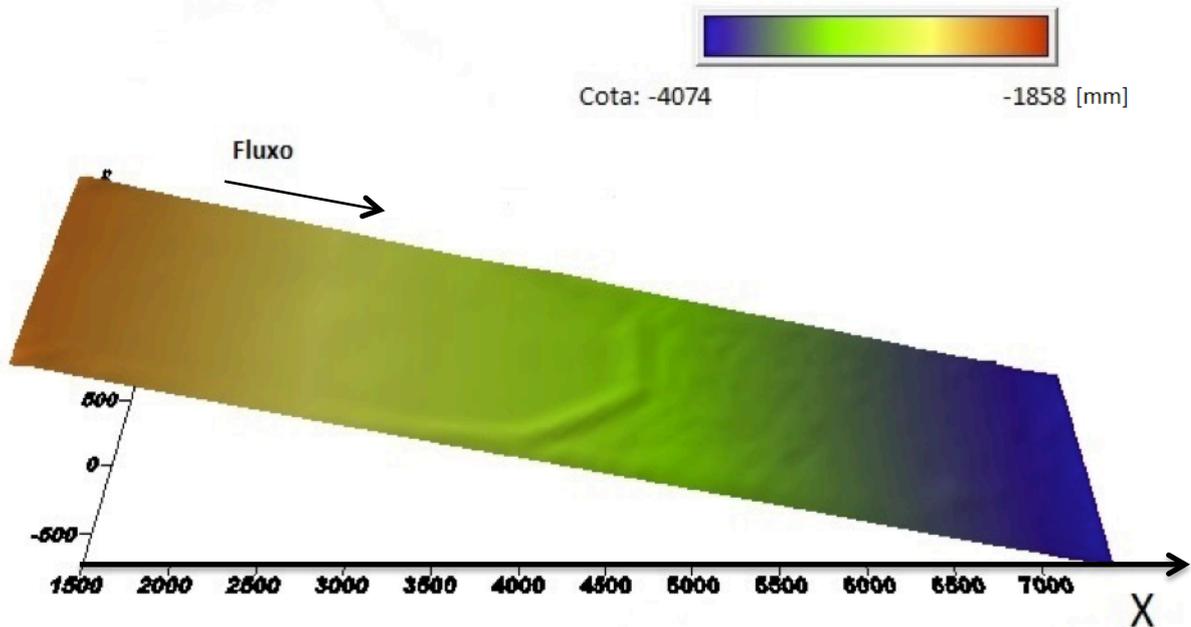
Figura 24 – Superfície da calha do tanque gerada no *Surfer*



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 25 apresenta o resultado do depósito gerado no ensaio 1.

Figura 25 – Superfície gerada no *Surfer* a partir de dados do ensaio 1

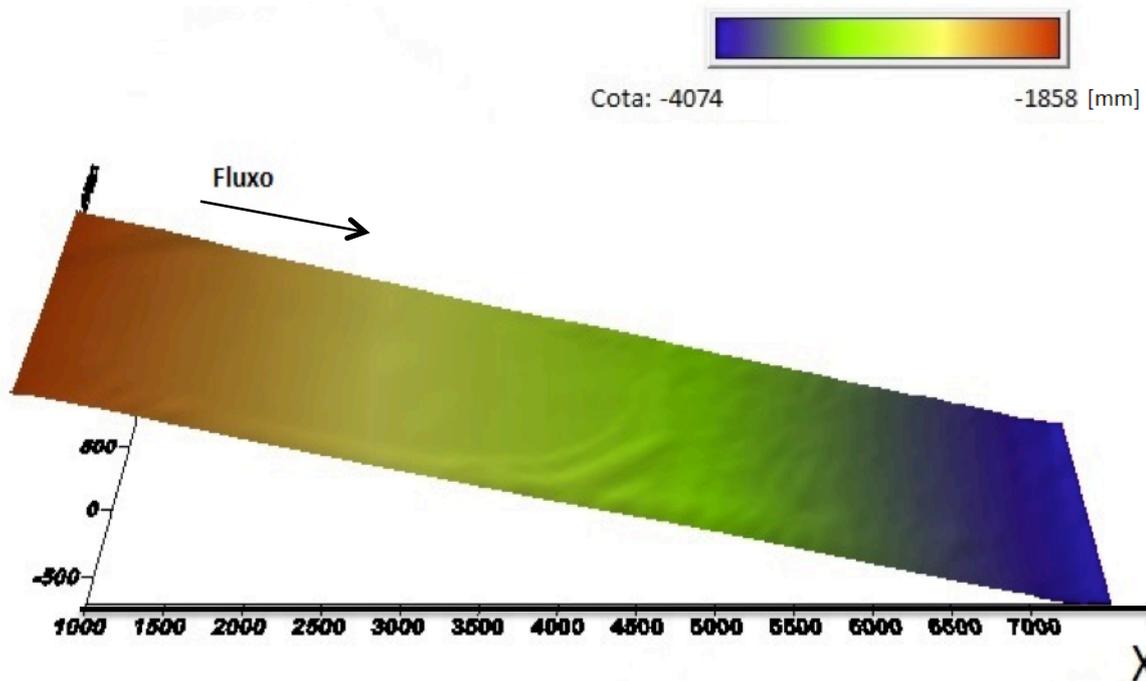


(fonte: elaborado pelo autor)

Observa-se na figura 25 que não houve deposição de sedimentos na porção inicial da calha do tanque. Somente a partir da coordenada $x = 4000$ mm é que é possível observar uma pequena acumulação de sedimentos. Isso significa que, próximo ao bocal de injeção, houve uma influência do efeito do jato formado pela injeção da corrente, não permitindo a deposição de sedimento. A partir daquele ponto, a influência do jato foi menor, iniciando o processo deposicional das partículas. Pequenas formas de fundo são observadas no início do depósito ($X = 4000$ mm a 5000 mm).

Já na superfície gerada com os dados do segundo ensaio ressaltaram os padrões já observados após o primeiro ensaio. A figura 26 ilustra essa situação

Figura 26 – Superfície gerada no *Surfer* a partir de dados do ensaio 2

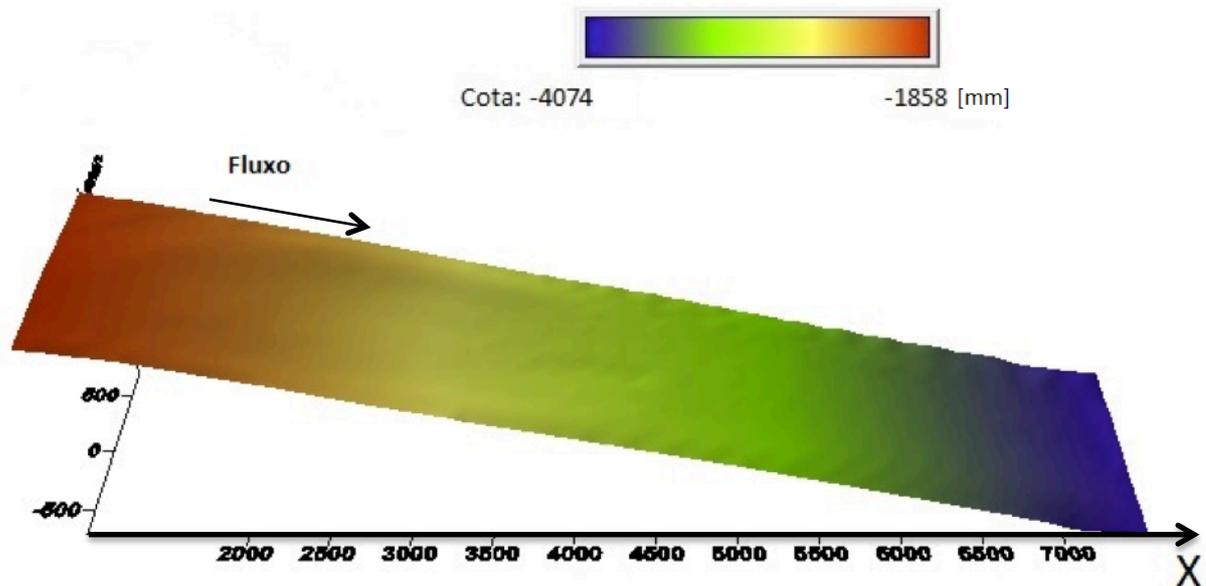


(fonte: elaborado pelo autor)

Novamente, foi verificado um padrão de zona erosiva junto ao bocal até 4500 mm, seguido de deposição. Entretanto, a espessura e as formas de fundo ficaram ainda mais evidentes. Claramente, houve um acréscimo de deposição de sedimentos na região que não sofre mais a influência do jato gerado pela injeção das correntes.

A figura 27 mostra a superfície resultante do terceiro ensaio. Neste os resultados deposicionais foram levemente diferentes daquelas observados anteriormente. A região de erosão não está completamente definida, ou seja, não foi mais possível determinar com alguma exatidão até onde se estendia a região de influência do jato do bocal do tanque. No entanto, houve um aparecimento interessante de formas de fundo onduladas ao longo de toda a extensão da calha.

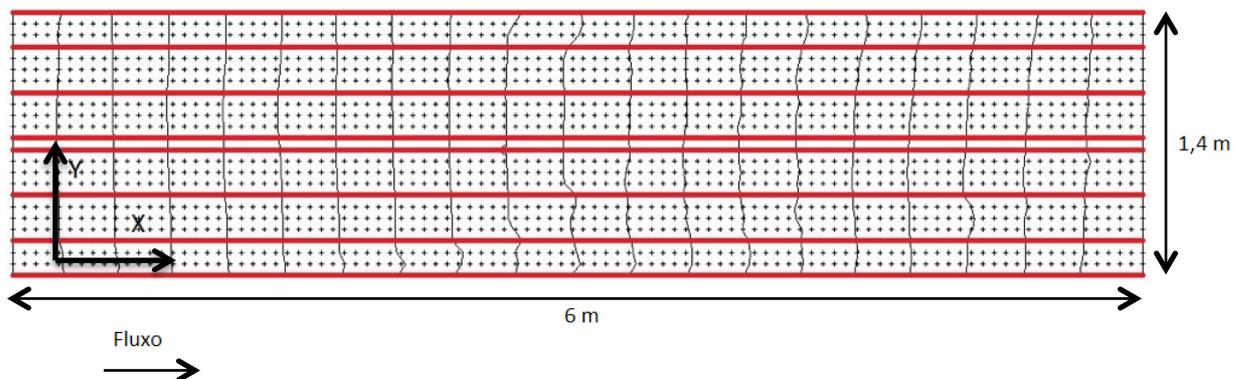
Figura 27 – Superfície gerada no *Surfer* a partir de dados do ensaio 3



(fonte: elaborado pelo autor)

O principal parâmetro de comparação entre as três superfícies digitais dos depósitos gerados após a realização de cada ensaio foi o acréscimo relativo de espessura de sedimentos. Para permitir tal avaliação, era necessário que os pontos observados fossem os mesmos em todas as análises. Por isso, foram escolhidos alguns pontos que tiveram suas coordenadas Z comparadas. Essa escolha foi arbitrária e feita a partir de linhas paralelas que, ao longo da coordenada Y dos *grids* gerados, desse uma boa ideia da evolução da seção transversal média da calha. A figura 28 mostra essas linhas (em vermelho), assim como curvas de nível da calha (linhas pretas em sentido vertical).

Figura 28 – Linhas arbitradas na região de calha do tanque

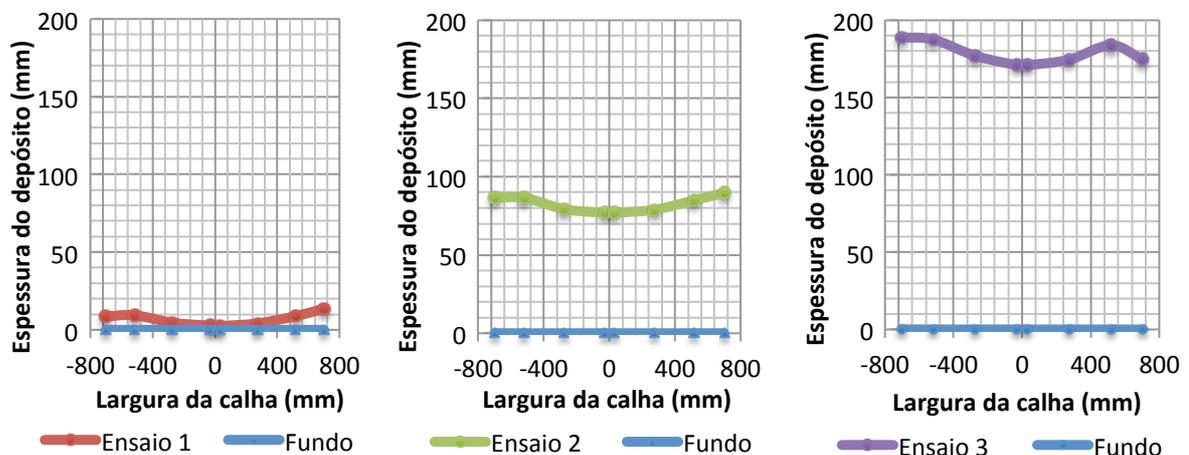


(fonte: elaborado pelo autor)

Através das linhas arbitradas, foi possível esboçar uma seção transversal média aproximada da região da calha. Para isso, as coordenadas Z dos pontos contidos ao longo das linhas foram inseridas em planilhas eletrônicas (Microsoft Excel®). Após fazer isso para todos os pontos de cada linha, era subtraído o valor da coordenada Z da superfície marco-zero (fundo do canal) e, a partir dos valores resultantes, se calculava a média de cada linha. Juntando-se essas médias, pode-se finalmente, estabelecer uma aproximação para a seção transversal média da região da calha.

A figura 29 mostra os gráficos traçados a partir dessa metodologia descrita acima.

Figura 29 – Aproximações para a seção transversal média da calha após cada ensaio



(fonte: elaborada pelo autor)

Os gráficos da figura acima mostram um acúmulo de sedimentos ocorrido próximo às paredes no tanque na região de calha. No entanto, esses resultados serão avaliados mais profundamente na sequência do trabalho.

7.3.2 Região de bacia

Para a região de bacia, o número de pontos catalogados pelo perfilador passou dos 3 milhões. Para tal, verificou-se que o espaçamento razoável entre nós se dava quando o número de colunas de nós do arquivo reduzido era equivalente a três quartos do número de linhas de nós na região de bacia do tanque. A partir disso, foram construídos *grids* em 3 resoluções diferentes que respeitam essa proporção. O *grid* mais detalhado tinha 100 linhas por 75 colunas de nós. Foram gerados também *grids* de 80 linhas por 60 colunas e de 40 linhas por

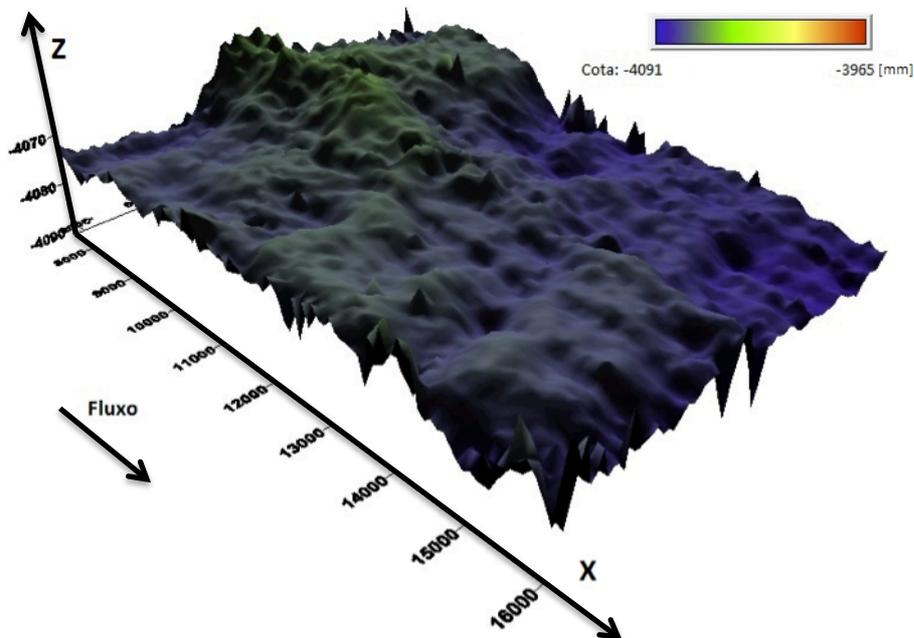
30 colunas. Entretanto, esses dois últimos não foram utilizados, por não apresentar uma riqueza de detalhes suficiente para as análises posteriores.

Também nessa região, foi gerada uma superfície de fundo numérica plana (marco zero da bacia), a qual foi baseada nos valores mínimos da coordenada Z do primeiro ensaio (plano mais a jusante do canal $x = 16.000$ mm) para todo o plano da superfície da bacia.

As superfícies geradas no *Surfer* apresentam uma escala de cores para a bacia que é diferente do que a calha, justamente para tornar mais fácil a diferenciação dos pontos com pequena diferença de cota. Com isso, foi possível identificar mais claramente nesta região a deposição dos sedimentos inseridos nas correntes de turbidez injetadas no tanque.

O resultado do primeiro ensaio revelou uma superfície praticamente plana, sem nenhuma região muito bem definida, apenas com uma elevação leve na saída da calha. A figura 30 ilustra essa superfície e é interessante observar como a escala de cores estabelecida é importante para verificar a diferença de profundidade entre os pontos, dado que essas diferenças de profundidade estão na ordem de grandeza do milímetro.

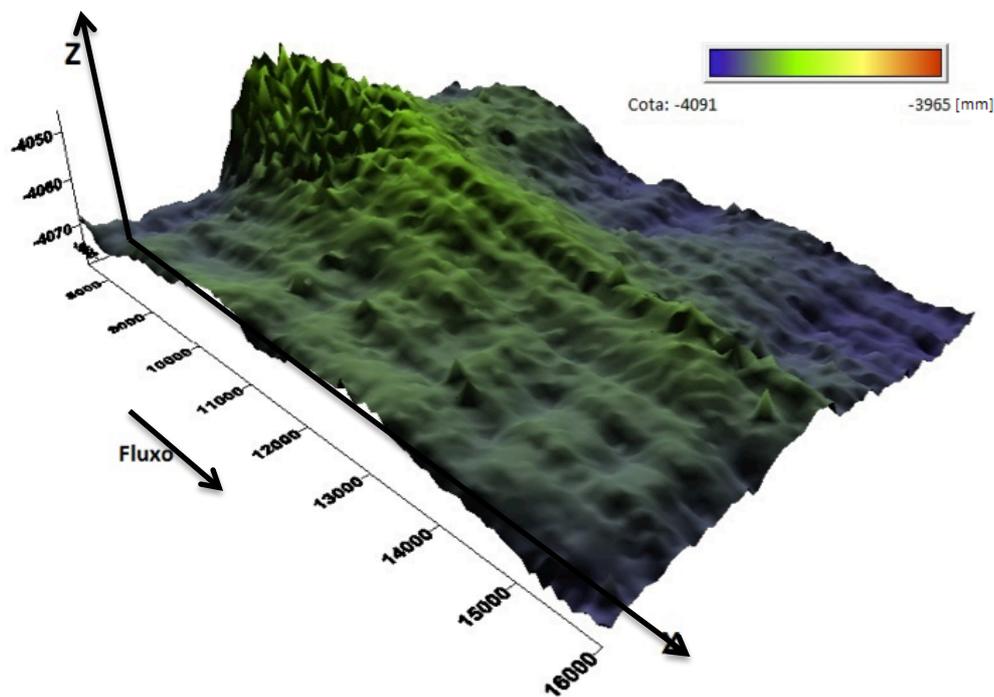
Figura 30 – Mapa topográfico do ensaio 1 com uma escala arbitrada de cores



(fonte: elaborado pelo autor)

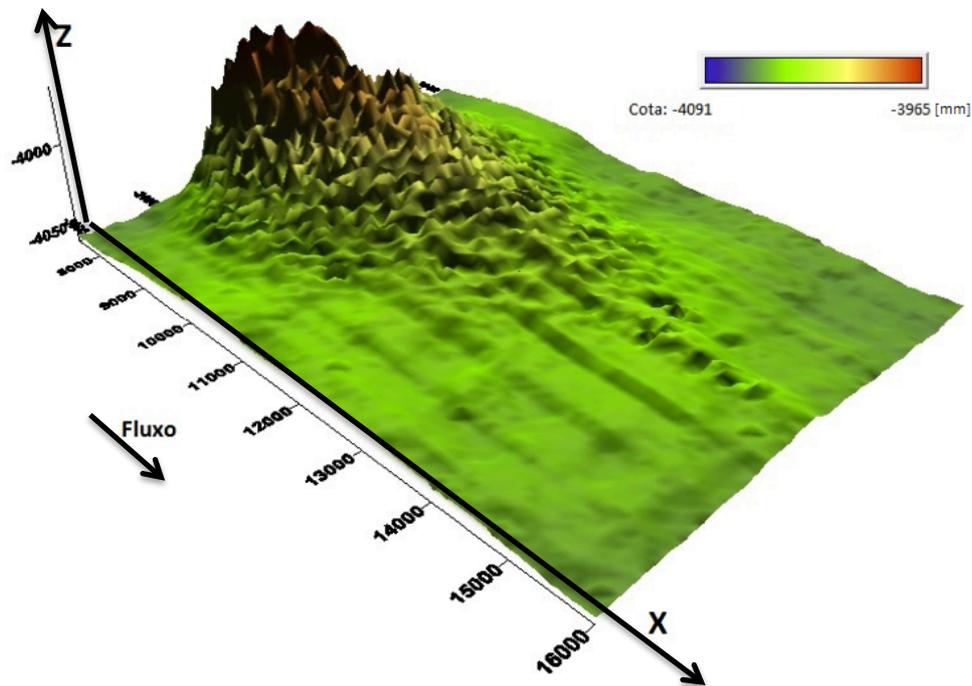
As figuras 31 e 32 mostram as superfícies geradas pelo *Surfer* a partir das leituras realizadas pelo perfilador após a realização do segundo e do terceiro ensaio. Nessas figuras, há uma região de acumulação de sedimentos bem definida na entrada da região de bacia. Esse lobo frontal formado nessa região é característico nos processos de sedimentação em zonas desconfiadas. Uma possível explicação para que esses depósitos lobados apareçam mais claramente somente nesses ensaios reside no fato de que, no primeiro ensaio, houve só a inserção de carvão misturado com água. No entanto, nos ensaios 2 e 3, houve a adição de caulim e areia à mistura de água e carvão já contida no tanque experimental. Sendo a areia de uma granulometria mais grossa que a do carvão, esses sedimentos seguiram a tendência de depositar mais rapidamente, não se mantendo no fluxo por longas distâncias, ou seja, de acumular-se próximo ao seu sítio de origem – no caso, a região de desembocadura da calha.

Figura 31 – Mapa topográfico do ensaio 2 com a mesma escala de cores



(fonte: elaborado pelo autor)

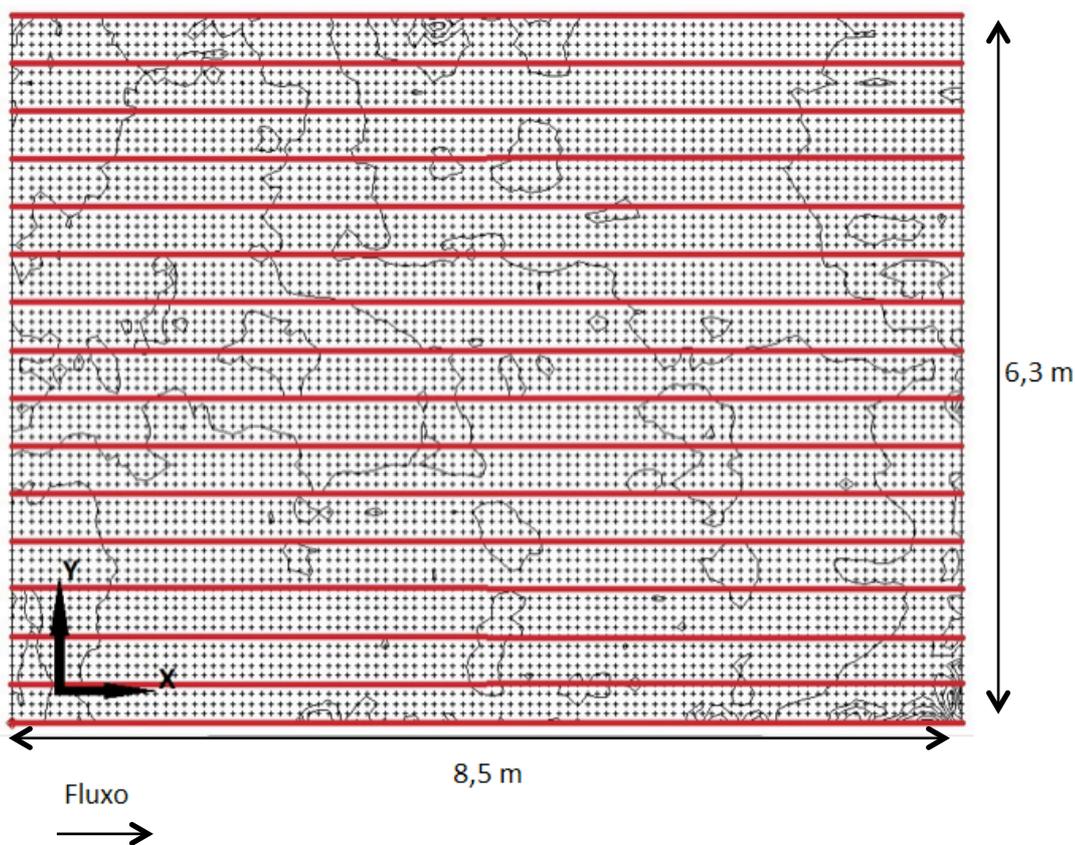
Figura 32 – Mapa topográfico do ensaio 3 com a mesma escala de cores



(fonte: elaborado pelo autor)

Para a avaliação do incremento de espessura causado por cada ensaio, novamente, seguiu-se procedimento semelhante ao adotado na avaliação da região de calha. Linhas de pontos foram arbitrariamente traçadas ao longo do eixo Y considerado e os pontos contidos nessas linhas tiveram suas coordenadas Z estudadas. A figura 33 mostra as linhas traçadas na região de bacia.

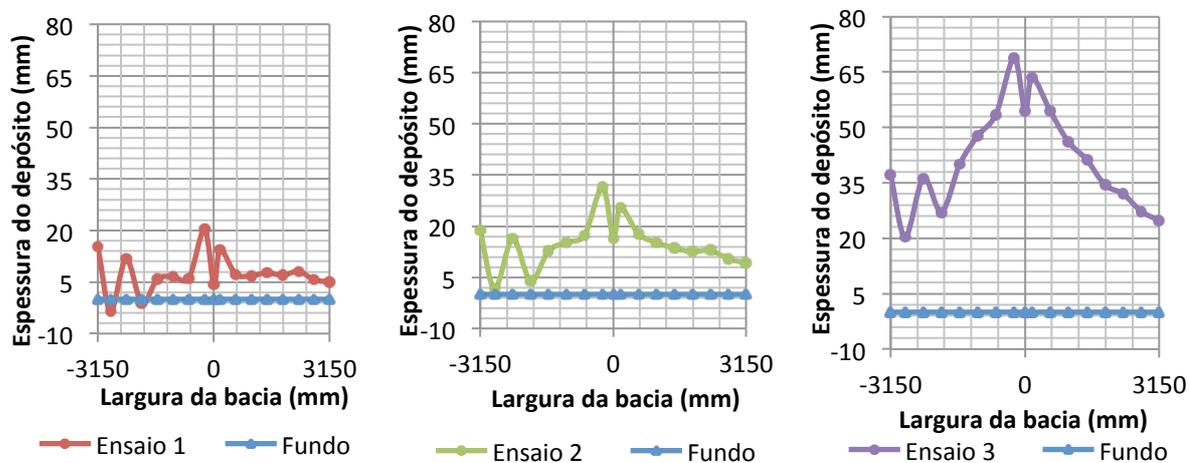
Figura 33 – Linhas arbitradas na região de bacia do tanque



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 34 apresenta os resultados da espessura média transversal da região da bacia do depósito.

Figura 34 – Aproximações para a seção transversal média da bacia após cada ensaio



(fonte: elaborado pelo autor)

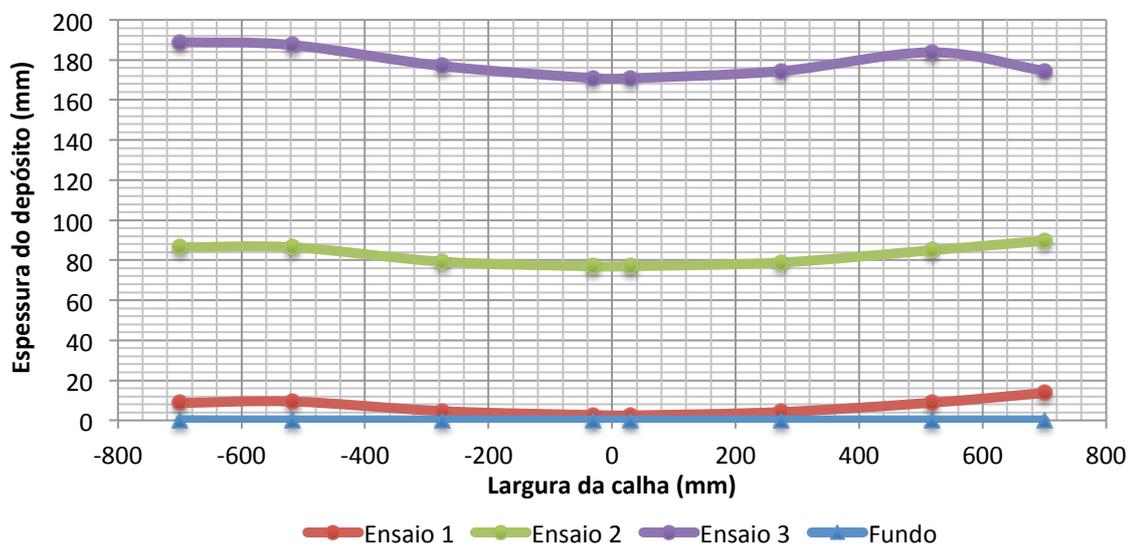
8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, buscou-se analisar que tipo de relações poderiam ser estabelecidas entre as características das correntes de turbidez formadas pelas misturas de sedimentos e os depósitos gerados. Foram comparadas várias relações entre características das misturas, dos sedimentos, lugar de sedimentação das mesmas, vazão e volume depositado, incremento de espessura, etc. As relações que mostraram padrões mais interessantes serão analisadas aqui.

8.1 ANÁLISE DAS FORMAS DOS DEPÓSITOS

Através das análises dos *grids* gerados (figuras 25 a 27 e 30 a 32) e da determinação da seção média do depósito (figuras 35 e 36), é possível extrair os seguintes observações para as regiões da calha e da bacia.

Figura 35 – Aproximação da seção transversal média da região de calha

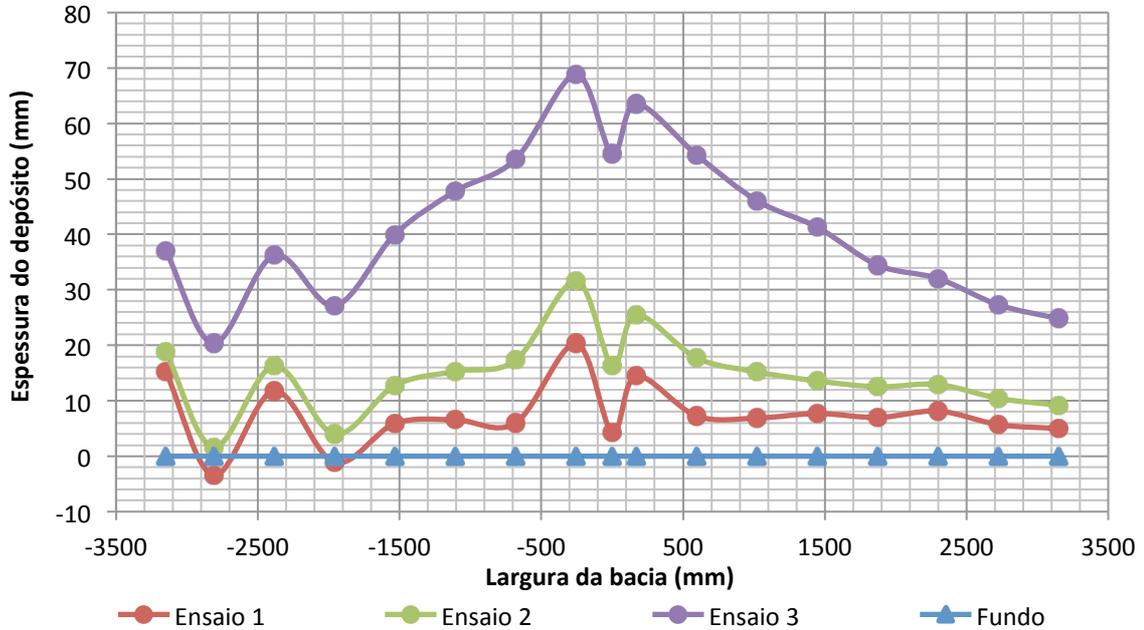


(fonte: elaborada pelo autor)

As aproximações da seção transversal média da calha mostram que, no decorrer dos ensaios, houve um aumento geral da espessura de sedimentos nas regiões próximas às paredes da calha do tanque experimental. Isso pode ser explicado pela presença, na região, do jato oriundo do bocal, que criou uma zona sem deposição nos trechos iniciais do canal. Após esse trecho, as

correntes de turbidez geradas se espalhavam radialmente até atingir as paredes da calha. Esse confinamento também pode ter contribuído para tal comportamento do depósito.

Figura 36 – Aproximação da seção transversal média da região de bacia



(fonte: elaborado pelo autor)

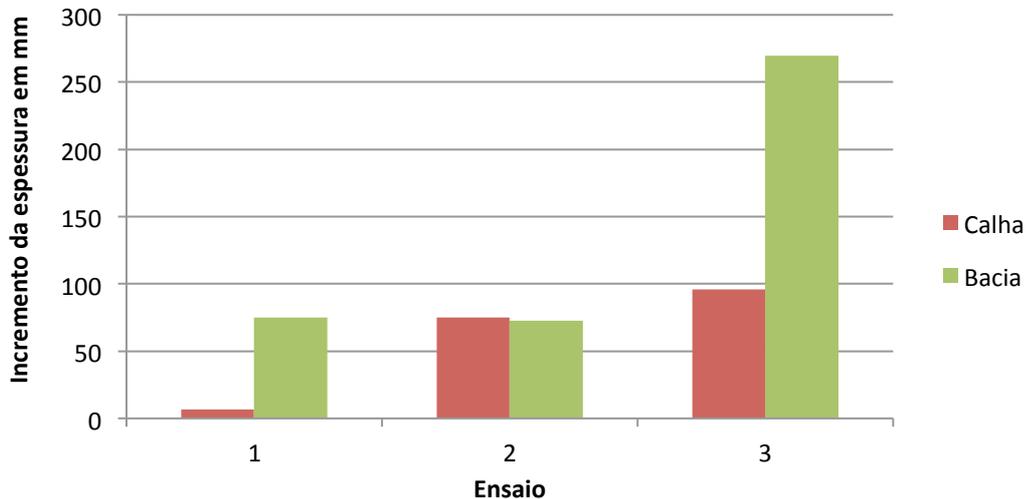
Analisando a figura 36 acima, nota-se um predomínio de deposição na parte central, com um decréscimo das espessuras lateralmente. Esse decréscimo lateral apresenta uma simetria entre o lado direito e esquerdo. Cabe salientar que no lado esquerdo do canal (de -2000 mm a -3150 mm), há alguns valores discrepantes (negativos) devido ao método de superfície marco-zero (analítica) não ter sido precisa naquela região. Com relação ao lobo frontal formado, uma possível explicação hidrodinâmica para sua presença é que o fluxo perde sua capacidade de transportar os sedimentos mais a jusante, uma vez que ele dissipa sua energia ao se espalhar radialmente na desembocadura do canal. Esse fenômeno foi acentuado (maior incremento), à medida que os sedimentos foram ficando mais grossos (Ensaio 2 e 3).

8.2 ANÁLISE DAS ESPESSURAS FINAIS

Plotando um gráfico do incremento relativo de espessura entre os ensaios, observa-se uma variação maior de espessura relativa na calha entre os ensaios 1 e 2, com essa variação mantendo-se constante no ensaio 3. Na bacia, a tendência verificada foi de estabilidade no

aumento relativo da espessura de sedimentos entre os ensaios 1 e 2, com um crescimento desse incremento relativo no ensaio 3. A figura 37 ilustra esse gráfico.

Figura 37 – Incremento relativo a cada ensaio em mm da espessura média de sedimentos nas regiões de calha e bacia

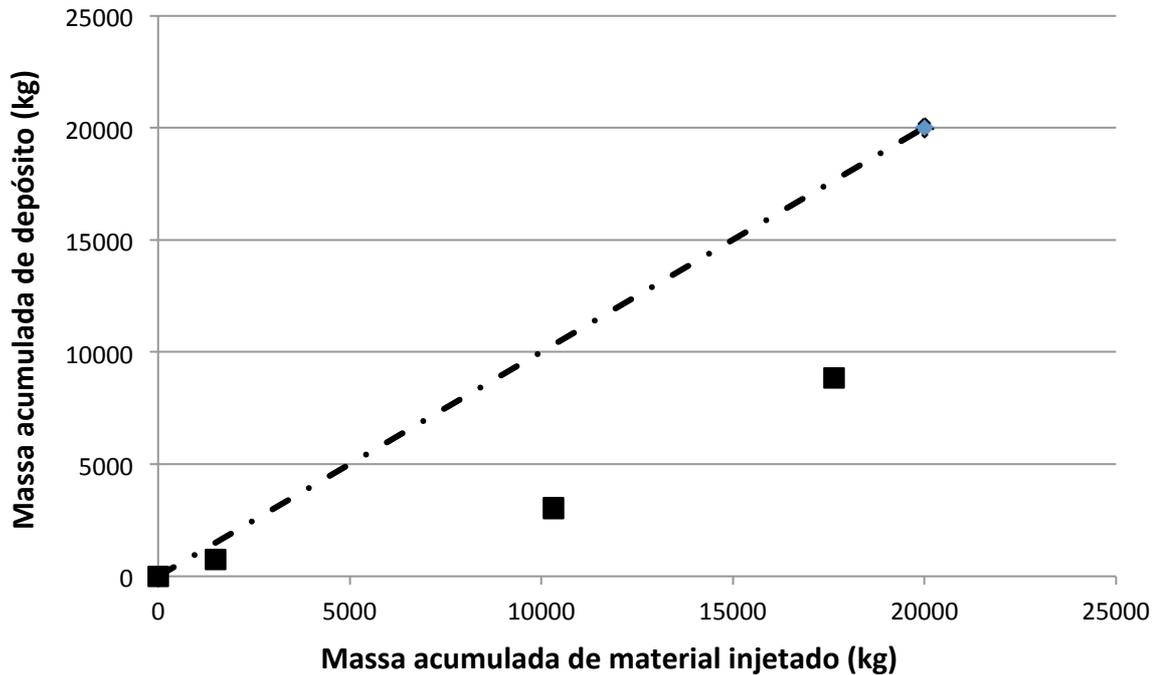


(fonte: elaborado pelo autor)

8.3 VOLUMES ACUMULADOS INJETADOS E DEPOSITADOS

Através de uma ferramenta do *Surfer*, é possível calcular o volume contido entre duas superfícies sobrepostas. O volume gerado por essa ferramenta permitiu que fosse estabelecida, através de relações entre volumes e massas específicas dos sedimentos inseridos nas correntes, qual foi a razão entre a massa de material inserido no tanque de mistura e a massa de material depositado no tanque experimental. A figura 38 apresenta esta relação. Cada ponto no gráfico representa um ensaio.

Figura 38 – Relação entre a massa de mistura injetada e a massa depositada no tanque experimental



(fonte: elaborada pelo autor)

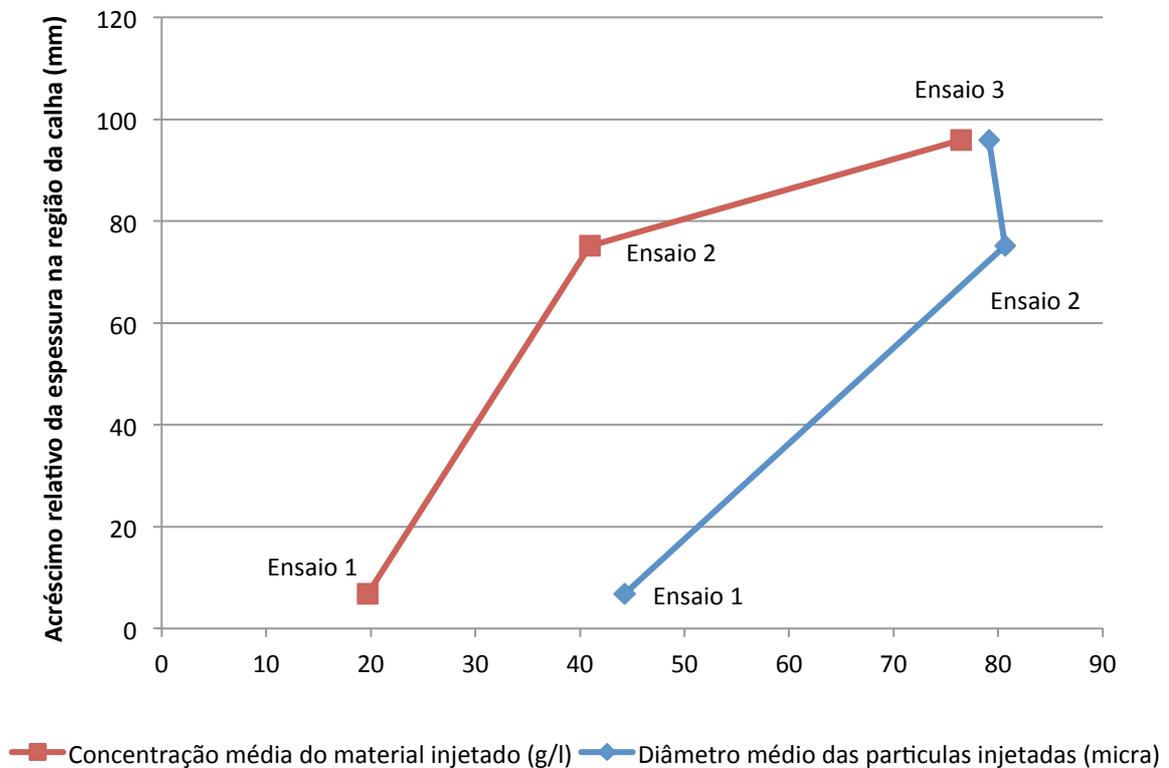
Através da análise da figura 38, pode-se concluir que a massa de material depositado nas regiões de análise foi significativamente menor que o volume de material injetado no tanque de mistura (valores abaixo da linha de igualdade). No primeiro ensaio, composto por carvão apenas, o valor foi mais próximo da igualdade. No entanto, nos ensaios que continham areia, essa diferença aumentou. Isso pode indicar que o sistema de mistura não foi muito eficiente ou que o material sedimentar presente nas correntes teria sido transportado para além dos 8 metros avaliados da bacia. Uma análise qualitativa (visual) no tanque de experimentos, não confirma esta segunda hipótese, o que reforça a ideia de que uma grande porção de areia inserida no tanque de mistura não chegou ao tanque experimental.

8.4 CONCENTRAÇÃO E DIÂMETRO

Neste item, debateremos de que forma a variação na concentração média e no diâmetro médio das correntes de turbidez injetadas afetou o acréscimo da espessura média das regiões de bacia e calha do tanque. A figura 39 mostra que o acréscimo de espessura da calha variou nos ensaios em função da concentração. Apesar dela praticamente ter duplicado a cada ensaio, o maior incremento de espessura se deu do primeiro para o segundo ensaio. Concomitantemente

a isso, houve um aumento significativo do diâmetro médio das partículas, causando essa maior variação nos dois primeiros ensaios. De maneira geral, o fato dos sedimentos mais grossos estarem presentes nas misturas inseridas nos últimos dois ensaios modificou o escoamento. Conclui-se que as correntes de turbidez injetadas não possuíam capacidade de manter as partículas grossas inseridas no seu corpo por muito tempo. Por isso, houve uma sedimentação precoce das partículas, que, por sua vez, permaneceram retidas na região de calha do tanque. A figura 39 ilustra essa interação.

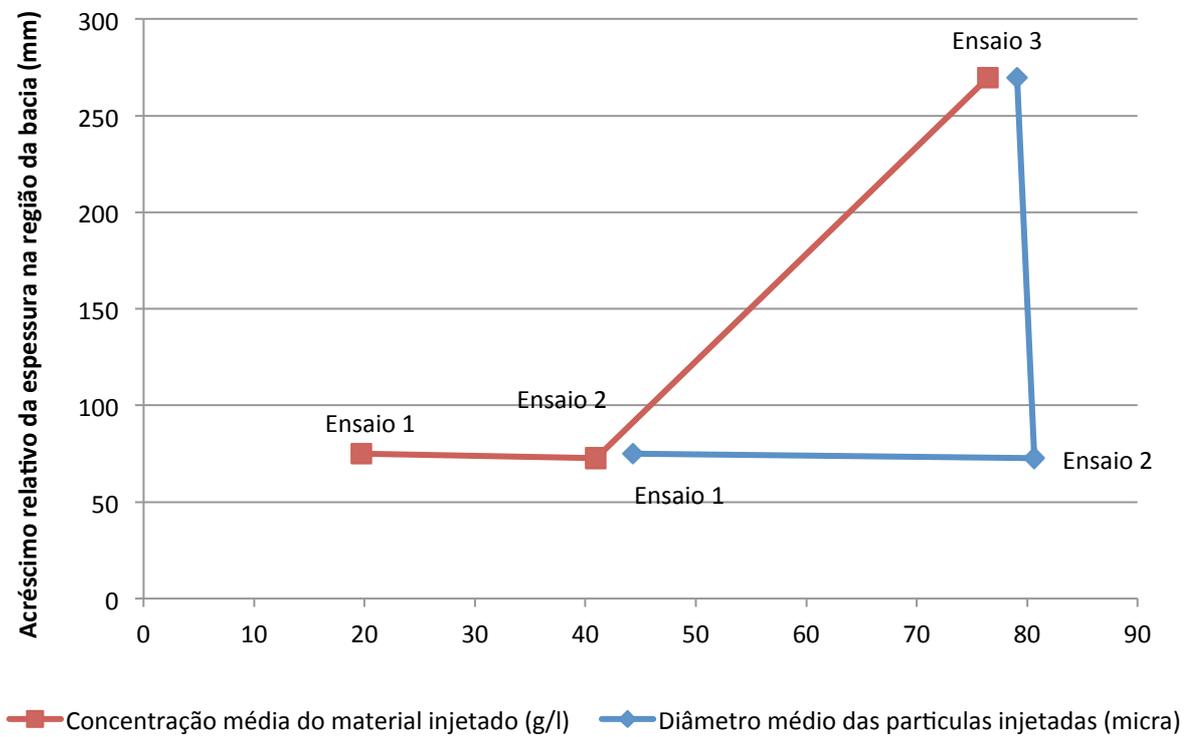
Figura 39 – Relações entre aumentos de espessura de sedimentos na calha com parâmetros das correntes



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 40 mostra que a região da bacia foi altamente influenciada pela região da calha, mostrando o comportamento contrário. Ou seja, com aumento significativo de espessura nos ensaios 2 e 3. As correntes só conseguiram levar o sedimento para jusante do tanque experimental quando houve uma concentração maior (~80 g/l).

Figura 40 – Relações entre aumentos de espessura de sedimentos na bacia com parâmetros das correntes



(fonte: elaborado pelo autor)

9 CONCLUSÕES

Após a implementação da metodologia desenvolvida nesse trabalho e posterior análise dos dados obtidos, foi possível avaliar os depósitos de sedimentos gerados por correntes de turbidez em um tanque experimental de grandes dimensões, bem como inferir o comportamento destes fluxos. Dentro desse contexto, foi possível observar na representação de um sistema calha/bacia do ambiente marinho profundo, onde ocorre acumulações de sedimentos na calha e que há um grande acúmulo junto a sua desembocadura (bacia). Correlacionado esse padrão deposicional encontrado com o estado da arte apresentado na revisão bibliográfica, indica-se que o depósito gerado apresenta uma configuração de lobo canalizado frontal. Também verificou-se, pelas condições de entrada (mistura de sedimentos, concentração e diâmetro dos grãos), que alguns parâmetros são mais determinantes que outros quando se avalia a deposição de sedimentos. No caso, o aumento da concentração de sedimentos da mistura e do diâmetro dos mesmos causaram um aumento significativo da espessura do depósito da bacia.

Cabe salientar que alguns parâmetros não puderam ser avaliados na sua totalidade pois apenas parte da série de ensaios, que ainda está em andamento, foi estudada por este trabalho. Soma-se a isso o fato de haver uma massa imensa de dados para análise. Este fato acarretou na adoção de uma série de simplificações que foram necessárias para que possível analisar dados de todos os experimentos. Por outro lado, a falta de leituras do *scanner* perfilador prévias ao começo da série de ensaios oficiais prejudicou uma análise mais precisa dos dados coletados, visto que a superfície gerada analiticamente apresentou algumas incoerências nas análises dos depósitos da região de bacia do canal. Além disso, o *scanner* perfilador apresentou muitos problemas de funcionamento durante período em que ocorreram os experimentos, impedindo que fosse possível a análise de um maior número ensaios na realização deste trabalho. Dentro desse contexto, a análise das acumulações geradas por sedimentos inseridos em correntes de turbidez foi feita, principalmente, através da avaliação de acréscimo médio de espessura de sedimentos entre um ensaio e outro em seções arbitradas do tanque experimental.

Na metodologia de trabalho, se faz um reparo quanto ao aplicativo utilizado para análise de dados. A intenção inicial era utilizar o programa *Go Cad*®. No entanto, problemas com a

licença do aplicativo impediram sua utilização, sendo assim necessário recorrer ao *Surfer* como ferramenta principal dessa análise.

Por fim, para os próximos estudos que venham a analisar o efeito que a sedimentação de partículas gera sobre uma superfície, recomenda-se que seja evitado sempre que possível a geração analítica de superfícies de fundo, ou seja, o esboço de uma superfície a partir do conhecimento de apenas alguns pontos da mesma. Essa incoerência, já observada neste trabalho, pode vir a comprometer os resultados dos estudos realizados.

REFERÊNCIAS

- BAPTISTA NETO, J. A.; PONZI, V. R. A.; SICHEL, S. E. **Introdução à geologia marinha**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.
- BLINDING sandstorm hits Kuwait and Saudi Arabia halting oil export. **The telegraph**. London, c2013. Disponível em <http://www.telegraph.co.uk/news/picturegalleries/worldnews/4967897/Blinding-sandstorm-hits-Kuwait-and-Saudi-Arabia-halting-oil-exports.html>. Acesso em: 14 jan. 2013.
- BRUHN, C. H. L.; MORAES, M. A. S. Turbiditos brasileiros: caracterização geométrica e faciológica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., Belém. **Anais...** [S.l.: s.n.], 1988, p. 824-838.
- DÜCKER, R. E **Avaliação da capacidade portante de frações finas nas correntes de turbidez**. 2007, 87 f., Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.
- LEEDER, M. **Sedimentology and sedimentary basins**. Oxford: Blackwell Science, 1999.
- NELSON, C. H. Turbidity-current observations and experimental studies. In: SEPM SHORT COURSE NO. 14, 2, 1984, Tulsa, USA. **Lecture notes for SEPM short course no. 14**. Tulsa: SEPM. p. 16-37.
- PUHL, E. **Processos hidrodinâmicos e sedimentológicos de correntes de turbidez**. 2009, 75, Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- SIMPSON, J. E. **Gravity currents in the environment and the laboratory**. 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997.
- YALIN, M. S. **Mechanics of sediment transport**. Oxford: Pergamon, c1972.