



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

PATRICIA BUFFON

**MODELAGEM FÍSICA DE UMA REGIÃO DO FUNDO
OCEÂNICO PARA O ENTENDIMENTO DOS PADRÕES DE
PREENCHIMENTO DE MINIBACIAS POR CORRENTES DE
DENSIDADE**

Porto Alegre

Dezembro 2014

PATRICIA BUFFON

**MODELAGEM FÍSICA DE UMA REGIÃO DO FUNDO
OCEÂNICO PARA O ENTENDIMENTO DOS PADRÕES DE
PREENCHIMENTO DE MINIBACIAS POR CORRENTES DE
DENSIDADE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO APRESENTADO
AO CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
DO SUL COMO PARTE DOS REQUISITOS
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRA AMBIENTAL.

Orientador: Rafael Manica

Coorientadora: Ana Luiza de Oliveira Borges

Porto Alegre

Dezembro 2014

PATRICIA BUFFON

MODELAGEM FÍSICA DE UMA REGIÃO DO FUNDO
OCEÂNICO PARA O ENTENDIMENTO DOS PADRÕES DE
PREENCHIMENTO DE MINIBACIAS POR CORRENTES DE
DENSIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em **05/12/2014** pela Comissão avaliadora constituída pelos integrantes:

Banca Examinadora:

.....
Prof. Dra. Ana Luiza de Oliveira Borges – DHH/IPH/UFRGS

.....
Ma. Carolina Holz Boffo – PPGRHSA/IPH/UFRGS

.....
Prof. Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres – DHH/IPH/UFRGS

Conceito:.....

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Jorge e Carmen, aos meus irmãos, Lucas e Vanessa e à minha vó, Maria, por todo carinho, incentivo, compreensão nos momentos em que estive ausente e auxílio financeiro durante a graduação. Muito obrigada, família!

Agradeço aos meus colegas e amigos da Engenharia Ambiental, por esses seis anos de convívio e amizade. Em especial, agradeço à /09, por terem sido meus parceiros nessa jornada. Agradeço à Juliana, pela sua amizade especial nos dois últimos anos. Muito obrigada, família Ambiental!

Agradeço ao NECOD pela oportunidade de fazer parte deste grupo de pesquisa e de realizar este trabalho, recebendo todo o auxílio necessário. Agradeço à equipe, em especial ao Prof. Manica e à Carolina, pelo conhecimento transmitido no dia a dia ao longo dos últimos 18 meses. Agradeço ao Prof. Manica e à Profa. Ana, pela orientação prestada na realização deste trabalho. Agradeço ao Cristiano pela ajuda com o “geologuês”. Agradeço a toda equipe do NECOD, em especial ao Cristian e ao Felipe, pelo auxílio na realização dos ensaios “intermináveis”. Agradeço a todo grupo, que faz do NECOD um ambiente muito agradável, divertido e de muito aprendizado! Muito obrigada, família NECOD!

Agradeço também ao Paulo Paraizo e a Petrobrás, pela parceria na realização deste trabalho e pelo financiamento da minha bolsa de Iniciação Científica. Muito obrigada!

“...Quando escolhi a selva
Para aprender a ser,
Folha por folha,
Estendi minhas lições
E aprendi a ser raiz, barro profundo,
Terra calada, noite cristalina,
E pouco a pouco mais, toda a selva.”

O caçador de raízes - Pablo Neruda

RESUMO

Correntes de densidade podem ser definidas pelo movimento relativo entre fluidos de diferentes massas específicas que pode ser causado pela diferença de concentração de sólidos suspensos. Nesse caso, as correntes de densidade são denominadas não conservativas e estão relacionadas com a formação de depósitos turbidíticos no ambiente marinho profundo. Muitas vezes esses depósitos possuem características que permitiram o armazenamento de hidrocarbonetos e, por isso, o entendimento deste fenômeno é de interesse na indústria petrolífera. Para a compreensão dos processos relacionados a esse fenômeno faz-se uso da modelagem física, pois a visualização na natureza é inviável. Nesse escopo, o trabalho foi desenvolvido em um modelo físico construído nas dependências do Núcleo de Estudos em Correntes de Densidade (NECOD), que representa em escala uma área do fundo oceânico da costa leste brasileira, de aproximadamente 144 km², onde se objetiva buscar melhor entendimento sobre o transporte e deposição de sedimentos por correntes de densidade nas depressões existentes no relevo (minibacias). O modelo foi construído utilizando escala horizontal 1:3000 e escala vertical 1:1000, possuindo dimensões de aproximadamente 4 metros por 4 metros. Após testes para ajuste de metodologia foram realizadas 5 séries de ensaios, divididas em duas fases que diferem nas características da mistura sedimentar e da sua forma de injeção no modelo, totalizando a injeção de aproximadamente 8800 litros de mistura sedimentar. Através da realização destes experimentos no modelo físico e da análise dos dados observados e coletados, avaliou-se a forma como se deu o preenchimento das minibacias (direções preferenciais e velocidade), avaliou-se o depósito formado (espessuras e distribuição granulométrica) e os resultados foram extrapolados para o ambiente natural.

Palavras-chave: correntes de turbidez, fisiografia, depósitos turbidíticos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação das correntes de densidade. Fonte: adaptado de MULDER e ALEXANDER (2001).	19
Figura 2: Esquema ilustrativo da geometria de uma corrente de densidade.	20
Figura 3 Corrente de densidade simulada em canal bidimensional. Fonte: Imagens captadas por uma câmera de alta velocidade no NECOD (2014) durante experimentos do projeto “Processos I”.	20
Figura 4: Cone deposicional hipotético de um lobo turbidítico, segundo BOUMA (1962). Fonte: adaptado da ilustração de DEL REY (2006).	21
Figura 5: Ambiente marinho e minibacias, no Golfo do México. Fonte: imagem de satélite do <i>Google Earth</i> [®]	23
Figura 6: Perfil longitudinal do sistema Brazos-Trinity e seu modelo de preenchimento. Fonte: adaptado de WINKER (1998).	24
Figura 7: Modelo de preenchimento de minibacias de talude proposto por SINCLAIR e TOMASSO (2002). Fonte: adaptado de SINCLAIR e TOMASSO (2002).	25
Figura 8: Depósito resultante do modelo proposto SINCLAIR e TOMASSO (2002). Dois ciclos estão representados, com soerguimento da topografia devido subsidência (diapirismo). Os números indicam o depósito relacionado com a fase de preenchimento. Fonte: adaptado de SINCLAIR e TOMASSO (2002).	26
Figura 9: Configuração observada por LAMB <i>et al.</i> (2004) em seus experimentos.....	27
Figura 10: Batimetria da área de estudo. As cores que variam de branco a azul representam as depressões que existem no relevo. <i>Software</i> utilizado para a confecção do mapa: Surfer [®] 8.0.....	31
Figura 11: Visualização 3D da área de estudo (perspectiva: 135° anti-horário) com a indicação da área principal de interesse e locais de entrada e saída da corrente. <i>Software</i> utilizado para a confecção do mapa: Surfer [®] 8.0.	32
Figura 12: Área aproximada (interna ao retângulo com contorno cinza) replicada no modelo e localização dos perfis longitudinais utilizados na construção do modelo.	34

Figura 13: Etapas da construção do modelo. A-chapa metálica (base da topografia), B-lançamento dos perfis e preenchimento com areia, C- modelagem do relevo com argamassa, D-modelo finalizado.....	34
Figura 14: Dimensões do tanque de 107 cm de profundidade (vista superior) onde o modelo foi construído, e dimensões da área ocupada pelo modelo. Também está indicado o sentido de entrada e saída do fluxo.....	35
Figura 15: Esquema da infraestrutura que alimenta o modelo e foto do momento do ensaio: 1 e 2-misturador e reservatório de 2000 litros, 3-tubulação com registro, 4 e 5-misturador e reservatório de 80 litros, 6-tubulação com registro, 7-medidor e controlador de vazão, 8-tubulação e registro que alimenta o modelo, 9-tubulação e registro utilizada para retirar amostras da mistura injetada, 10-recipiente de 200 litros para coletar o excedente de mistura, 11-câmera fotográfica.	36
Figura 16: Medidor de vazão eletromagnético Siemens MAG500 acoplado ao sistema de alimentação do modelo.	37
Figura 17: Analisador de partículas a laser modelo Cilas 1180.	38
Figura 18: Laser MD250ADV acoplado à mesa de coordenadas, realizando leitura topográfica do depósito do modelo.....	38
Figura 19: Curva de frequências acumuladas X diâmetro da partícula do carvão 205 e carvão 205 fino. As curvas representadas por cores mais escuras representam as análises (A, B e C) das amostras (am1 e am2) do carvão 205 (205), já as cores mais claras representam as análises (A, B e C) das amostras (am1 e am2) do carvão fino (fino).	40
Figura 20: Difusor de tijolos instalado no local da injeção.....	44
Figura 21: Sifão hidráulico para retirada de sedimentos acumulados no local da injeção da mistura.	47
Figura 22: Foto do depósito formado após a Série de ensaios E2 com esquema demonstrativo da localização dos panos da varredura a laser.	48
Figura 23: Malha de amostragem após Série de ensaios E2, com detalhe para as amostras 4-5-B e 5-6-B, exemplificando a organização da nomenclatura.....	48
Figura 24: Vazões médias para cada ensaio realizado nas Fases II e III. Cada coluna no gráfico contempla um ensaio realizado, conforme a legenda.	49

Figura 25: Concentração volumétrica real da amostra de mistura de injeção retirada no início do ensaio. Cada grupo de colunas representa uma série de ensaios, onde cada coluna representa o ensaio (E2, E3, E4...) com terminologia correspondente à da respectiva legenda (A, B, C...). As cores mais claras referem-se à amostra coletada no início do ensaio (I) e as cores mais escuras referem-se à amostra coletada no final do ensaio (F).	50
Figura 26: Diâmetro característico D50 das amostras de mistura sedimentar, retiradas no início e no fim do ensaio. Cada grupo de colunas representa uma série de ensaios, onde cada coluna representa o ensaio (E2, E3, E4...) com terminologia correspondente à da respectiva legenda (A, B, C...). As cores mais claras referem-se à amostra coletada no início do ensaio (I) e as cores mais escuras referem-se à amostra coletada no final do ensaio (F).	52
Figura 27: Fração de sedimentos classificada como areias das amostras de mistura sedimentar, retiradas no início e no fim do ensaio. Cada grupo de colunas no gráfico representa uma série de ensaios, onde cada coluna representa o ensaio com terminologia correspondente à da respectiva legenda (A, B, C...). As cores mais claras referem-se à amostra coletada no início do ensaio (I) e as cores mais escuras referem-se à amostra coletada no final do ensaio (F).	52
Figura 28: Processo de análise da velocidade de avanço das trajetórias para o ensaio E2: foi desenhada a frente de avanço da corrente através da inserção das fotografias em ordem cronológica que, por fim, foram conectadas por uma trajetória.	54
Figura 29: Esquema ilustrativo da mudança do nível de referência para representação do relevo no <i>software</i> Surfer®8.0.....	55
Figura 30: Análise qualitativa das trajetórias observadas no modelo.	57
Figura 31: Análise quantitativa das trajetórias. A imagem mostra as trajetórias em que a velocidade média foi quantificada para o primeiro ensaio das séries de ensaios E2, E3, E5 e E6.	59
Figura 32: Gráficos de Velocidade média (Vm) de avanço para cada trajetória (1, 2 e 3) e para cada ensaio (E2, E3, E5 e E6) do modelo (esquerda) e do protótipo (direita).....	59
Figura 33: Topografia do modelo e topografia resultante após cada série de ensaios. Cada valor de cota (Z) é representado pela mesma cor em todos os mapas, sendo o limite superior da legenda de cores o valor máximo apresentado.	62

Figura 34: Mapas da superfície do modelo e após cada série de ensaios.....	62
Figura 35: Mapa de espessuras para a série de ensaios E4, E5 e E6. Cada valor de espessura (Z) é representado pela mesma cor em todos os mapas, sendo o limite superior da legenda de cores o valor máximo apresentado.	64
Figura 36: Mapa de diferença de espessuras entre os depósitos formados a série E5 e E4 e entre os depósitos formados após a série E6 e E5. Cada valor de incremento de espessuras (Z) é representado pela mesma cor em todos os mapas, sendo o limite superior da legenda de cores o valor máximo apresentado.	65
Figura 37: Mapas de representação do diâmetro característico D50 dos sedimentos amostrados do depósito, após cada séries de ensaios. O contorno preto tracejado delimita a fronteira aproximada de amostragem do depósito e as setas indicam as trajetórias da corrente. Cada valor de D50 é representado pela mesma cor em todos os mapas, sendo o limite superior da legenda de cores o valor máximo apresentado.	67
Figura 38: Mapas de representação do grau de seleção dos sedimentos amostrados do depósito, após cada séries de ensaios. O contorno preto tracejado delimita a fronteira aproximada de amostragem do depósito e as setas indicam as trajetórias da corrente. Cada valor de grau de seleção é representado pela mesma cor em todos os mapas, sendo o limite superior da legenda de cores o valor máximo apresentado.	68
Figura 39: Mapas de representação da fração areia dos sedimentos amostrados do depósito, após cada séries de ensaios. O contorno preto tracejado delimita a fronteira aproximada de amostragem do depósito e as setas indicam as trajetórias da corrente. Cada valor de % de areia é representado pela mesma cor em todos os mapas, sendo o limite superior da legenda de cores o valor máximo apresentado.....	69
Figura 40: Ilustração do modelo de preenchimento de minibacias.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização do carvão 205.....	41
Tabela 2: Caracterização do carvão fino	41
Tabela 3: Ensaios realizados e suas características. As datas de realização dos ensaios são referentes ao ano 2014.....	42
Tabela 4: Graus de seleção (Fonte: adaptado de FOLK e WARD, 1957).	56
Tabela 5: Tempo de análise para determinação das velocidades médias de avanço, a vazão média (Q_m) e o desvio padrão durante o período.	60
Tabela 6: Volume de depósito formado após cada série de ensaios.	63
Tabela 7: Cálculo da eficiência dos ensaios.	63
Tabela 8 Escala granulométrica (adaptado de WENTWORTH, 1922), onde D é o diâmetro em mm.	77
Tabela 9: Velocidades verticais (V_y) para a faixa granulométrica areia média, fina e muito fina para o protótipo (p) e para o modelo (m), com o diâmetro (d) correspondente.....	78
Tabela 10: Valores de vazão média e desvio padrão para cada ensaio.	79
Tabela 11: Concentração volumétrica (C_v) real das amostras da mistura de injeção, retiradas no início e no fim do ensaio, o desvio padrão e a média para cada ensaio.	80
Tabela 12: Valores de diâmetro característico D_{50} das amostras coletadas da mistura de injeção, no início e no fim de cada ensaio.	81
Tabela 13: Valores da fração de sedimentos representados pela classe areia, nas amostras coletadas da mistura de injeção, no início e no fim de cada ensaio.	82

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 QUESTÃO DA PESQUISA	17
3 OBJETIVOS.....	17
3.1 Objetivo geral.....	17
3.2 Objetivos específicos.....	18
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
4.1 Correntes de densidade.....	18
4.1.1 Caracterização básica das correntes de turbidez	19
4.1.2 Modelos deposicionais	21
4.2 Ambiente marinho e minibacias.....	22
4.3 Modelagem física	28
5 APARATO E METODOLOGIA	30
5.1 Área de estudo.....	30
5.2 Concepção do modelo físico	32
5.2.1 Escalas geométricas.....	33
5.2.2 Construção do modelo.....	33
5.2.3 Equipamentos e instrumentação	36
5.3 Mistura sedimentar	39
5.4 Ensaio realizados	41
5.4.1 Fase I:	42
5.4.2 Fase II.....	43
5.4.3 Fase III.....	44
5.5 Procedimento experimental.....	45
5.5.1 Preparo do ensaio	45
5.5.2 Ensaio.....	46

5.5.3 Pós-ensaios/Coleta de dados	47
6 RESULTADOS	49
6.1 Dados de vazão.....	49
6.3 Dados de concentração volumétrica real e de granulometria da mistura injetada	50
6.4 Registros fotográficos	53
6.5 Dados batimétricos do laser	54
6.6 Dados de granulometria do depósito	55
7 ANÁLISE DOS RESULTADOS	56
7.1 Dinâmica	56
7.1.1 Avaliação qualitativa.....	57
7.1.2 Avaliação quantitativa.....	58
7.2 Depósito gerado.....	61
7.2.1 Topografia e volumes.....	61
7.2.3 Espessuras	64
7.2.4 Granulometria e grau de seleção	66
7.3 Extrapolação dos dados para o ambiente natural	70
8 CONCLUSÕES.....	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ANEXO I.....	75
Adimensionalização das correntes de densidade.....	75
ANEXO II	79
Tabelas referentes a dados dos experimentos realizados	79

1 INTRODUÇÃO

Os fluxos gravitacionais são responsáveis por muitos fenômenos na natureza: deslizamento de encostas, dispersão de poluentes, avalanches de neve, erupções vulcânicas, tempestades de areia, massas de ar, plumas de contaminação, entre outros, como as correntes de densidade (SIMPSON, 1997). As correntes de densidade são assim denominadas, pois nelas ocorre o movimento relativo entre fluidos que possuem diferentes massas específicas, sendo essa diferença a força motriz para o movimento. A alteração da massa específica de um fluido pode ocorrer pela variação da temperatura, da salinidade ou da concentração de sólidos dissolvidos e suspensos. O foco deste trabalho está particularmente nas correntes oriundas de fluidos com diferentes concentrações de sólidos suspensos, sendo denominadas de correntes de densidade não conservativas.

Uma das formas de classificar as correntes de densidade não conservativas é pelo mecanismo predominante de suporte de grãos. Quando esse mecanismo é a turbulência, as correntes de densidade podem ser chamadas de correntes de turbidez (MIDDLETON, 1993). O resultado do transporte e deposição dos sedimentos presentes nesses fluxos, no ambiente marinho profundo, são os depósitos turbidíticos (ou, simplesmente, turbidito) que, por sua vez, podem resultar em potenciais reservas de hidrocarbonetos, justificando o interesse em ampliar o entendimento do processo.

A modelagem física é aplicada aos estudos de correntes de densidade em ambiente marinho profundo, pois o fenômeno tem longa duração e ocupa grandes áreas de extensão, tornando difícil sua visualização em tempo real. Através de um modelo reduzido é possível reproduzir o fenômeno em algumas horas e em condições controladas. O modelo pode reproduzir, por exemplo, um canal por onde o fluxo se desenvolve (duas dimensões) ou uma área ampla representando uma bacia onde o fluxo possa se desenvolver nas três dimensões. Ainda, pode desprezar a topografia reproduzindo uma região com uma única declividade e seção, ou, como no presente estudo, reproduzir a fisiografia levantada do fundo, reproduzindo as depressões e os obstáculos existentes no relevo, os quais podem confinar as correntes de densidade. O confinamento destas correntes pode gerar depósitos espessos que, em uma evolução

natural, pode vir a criar importantes turbiditos. Essas depressões, dependendo de suas características, são chamadas de minibacias.

Nesse sentido, este trabalho foi desenvolvido em um modelo físico reduzido construído nas dependências do Núcleo de Estudos em Correntes de Densidade (NECOD). O modelo representa em escala uma área do fundo oceânico da costa leste brasileira, onde se objetiva buscar melhor entendimento sobre o transporte e deposição de sedimentos por correntes de densidade nas depressões existentes no relevo oceânico brasileiro, caracterizando um estudo de minibacias.

2 QUESTÃO DA PESQUISA

“Através da modelagem física, pode-se simular os processos dinâmicos de preenchimento natural das minibacias?”.

A pesquisa pretende responder essa questão, tendo em vista as limitações da aplicação da modelagem física na simulação das correntes de densidade, uma vez que, a calibração do modelo depende de informações sobre a área que se deseja reproduzir e sobre as características das correntes de densidade no ambiente natural, como por exemplo, o aporte sedimentar e volume depositado. Por outro lado, a interpretação geológica do processo de preenchimento das minibacias também se constitui um fator limitante para a definição do sucesso deste estudo.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Contribuir para o entendimento sobre o transporte e deposição de sedimentos por correntes de densidade nas minibacias, através da realização de experimentos no modelo físico e da análise dos dados observados e coletados. Servindo, assim, de ferramenta complementar na tomada de decisão na indústria do petróleo.

3.2 Objetivos específicos

- Desenvolver metodologia para os experimentos no modelo reduzido que reproduz em escala minibacias da costa leste brasileira;
- Avaliar o mecanismo de preenchimento e deposição das minibacias;
- Extrapolar os resultados para o ambiente natural.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Correntes de densidade

As correntes de densidade são fluxos gerados pela força de empuxo agindo sobre fluidos com diferentes massas específicas. Quando a diferença de massa específica é causada pela presença de sólidos em suspensão, as correntes de densidade podem ser denominadas não conservativas. O termo “não conservativa” é aplicado, visto que o fluido em movimento realiza trocas com o fluido ambiente, através de processos erosivos, deposicionais e também de mistura com o fluido ambiente, aumentando e/ou diminuindo a diferença de massa específica entre os fluidos até que o movimento relativo entre eles cesse.

São justamente as correntes de densidade não conservativas subaquosas (mais especificamente as correntes de turbidez) as responsáveis por formar os depósitos sedimentares denominados turbiditos, transportando sedimentos da margem continental até a planície abissal. MULDER e ALEXANDER (2001) destacam os tipos de transporte das correntes de densidade subaquosas em quatro grupos, diferenciados pela comparação de sua massa específica (ρ_c) com a massa específica do fluido ambiente (ρ_a), conforme a Figura 1:

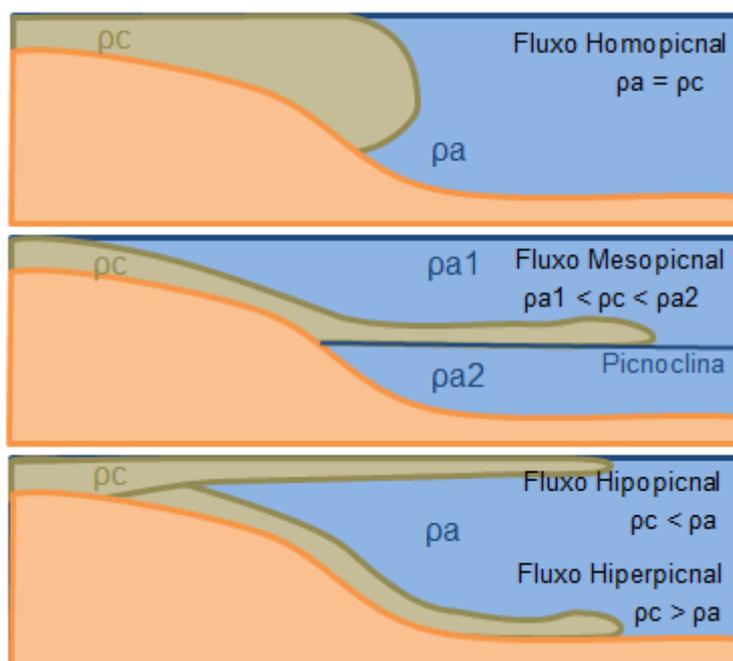


Figura 1: Classificação das correntes de densidade. Fonte: adaptado de MULDER e ALEXANDER (2001).

No campo da geologia/sedimentologia, quando o depósito gerado por qualquer um desses tipos de corrente apresentam camadas espessas ricas em sedimentos não coesivos (areia) cobertas por camada de matriz coesiva (argila), apresenta as condições ideais para o armazenamento de hidrocarbonetos. Através da simulação física, procura-se melhorar a compreensão da relação entre o processo gerador e o registro geológico do depósito. Na prática, isso não é tão simples. MULDER e ALEXANDER (2001) e MANICA (2009) ressaltam a dificuldade de interpretar o fluxo original através do depósito, devido à complexidade do fenômeno e às diferentes interpretações de como se dá o processo de transporte e deposição destes sedimentos, gerando diferentes nomenclaturas para os fenômenos envolvidos, conforme será discutido no item 4.1.2 deste trabalho.

4.1.1 Caracterização básica das correntes de turbidez

Ao longo do seu escoamento, uma corrente de turbidez pode ser dividida em três partes principais: cabeça, corpo e cauda (Figura 2).

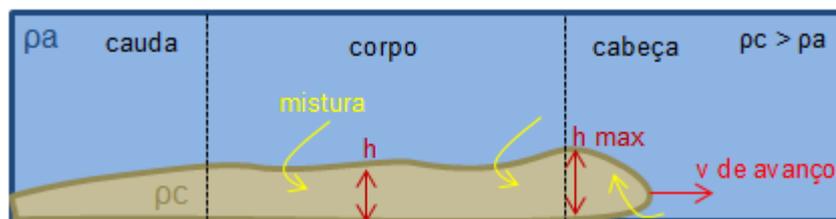


Figura 2: Esquema ilustrativo da geometria de uma corrente de densidade.

No extremo de uma corrente de turbidez existe uma “cabeça” característica, uma zona de intensa mistura que desempenha um papel importante no comportamento da corrente. A altura da cabeça de uma corrente que flui horizontalmente é praticamente constante e, muitas vezes, com valor maior da altura do restante do fluxo. Na dianteira da cabeça, ocorre a formação de um “nariz” que possui um ângulo de desprendimento do fundo. O vetor velocidade do fluxo nesse ponto é a velocidade de avanço da corrente, mas não existe um perfil típico de velocidades na cabeça, pois sua geometria é extremamente variável, mesmo em fluxos menos turbulentos (SIMPSON, 1982).

Como se pode visualizar na Figura 3, a geometria da cabeça difere muito da geometria do corpo da corrente, pois sofre maior resistência do fluido ambiente. Em virtude dessa resistência ocorre a formação de lobos frontais e vórtices na parte superior da corrente de turbidez, também chamada de camada de mistura (MIDDLETON, 1993). Portanto, a corrente de turbidez pode ser considerada bipartida, onde a camada inferior é menos turbulenta e mais concentrada do que a camada superior. A cauda, por sua vez, representa o fim de uma corrente de turbidez e possui menor importância na formação dos depósitos.



Figura 3 Corrente de densidade simulada em canal bidimensional. Fonte: Imagens captadas por uma câmera de alta velocidade no NECOD (2014) durante experimentos do projeto “Processos I”.

4.1.2 Modelos deposicionais

Durante seu escoamento e após a sua parada, as correntes de turbidez formam depósitos sedimentares das mais variadas configurações e com diferentes tipos de gradação (variação do tamanho do grão na vertical), formando sequencias estratigráficas características.

A sequência estratigráfica mais conhecida chama-se sequência de BOUMA (1962) que representa a deposição ao longo do escoamento em cinco partes (Ta, Tb, Tc, Td, Te) representando um cone deposicional (T1, T2, T3, T4, T5), ou seja, considerando uma área fonte (início da corrente de turbidez), em T1 (zona proximal) o depósito formado apresentaria os horizontes Ta, Tb, Tc, Td e Te, enquanto que em T5 (zona distal), o depósito apresentaria apenas o horizonte Te (Figura 4).

No intervalo gradacional representado por Ta o material mais grosso (areia grossa) deposita-se primeiro, diminuindo a granulometria em direção ao topo, ou seja, a gradação é normal. Em Tb, com o regime supercrítico do fluxo, areias mais finas depositam-se com laminação paralela e em Tc ocorre laminação com marcas de corrente (“ripples”, também chamadas de ondulações). Em Td, já com o regime subcrítico do fluxo, ocorre laminação paralela, e Te, deposição pelágica, ocorre deposição da fração mais fina (lama).

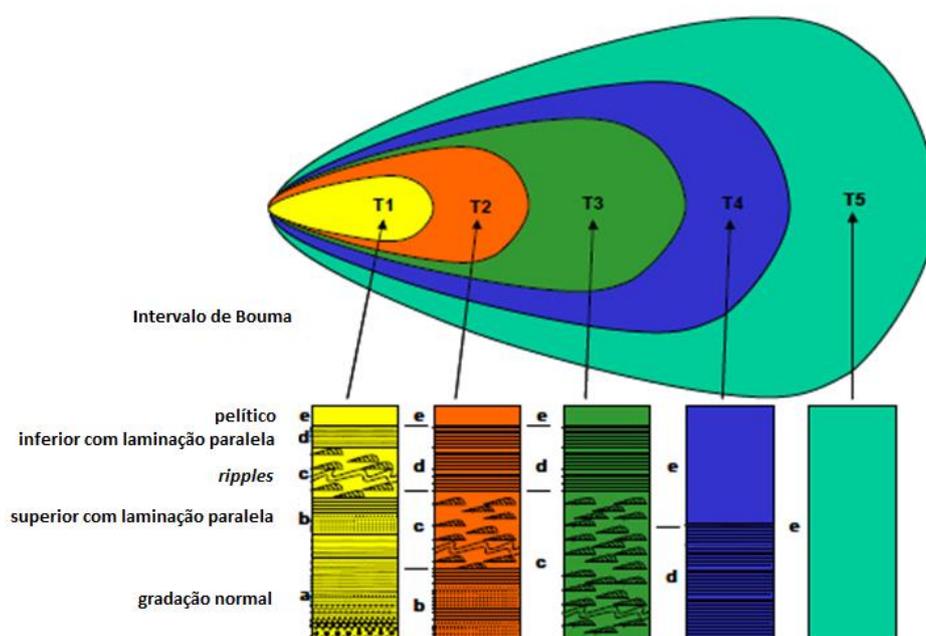


Figura 4: Cone deposicional hipotético de um lobo turbidítico, segundo BOUMA (1962). Fonte: adaptado da ilustração de DEL REY (2006).

Essa sequencia é base de muitos outros estudos que visam complementar o entendimento dos modelos deposicionais de correntes de turbidez, como LOWE (1982), MANICA (2009) e outros. Nesse trabalho esses estudos não serão abordados, no entanto, modelos deposicionais característicos de minibacias serão apresentados a seguir.

4.2 Ambiente marinho e minibacias

O ambiente marinho é formado pela plataforma continental (marinho raso), talude continental e planície abissal (marinho profundo). A plataforma continental é uma parte do continente levemente submergida com superfície plana e levemente inclinada. Na sua borda inicia-se o talude continental que possui inclinação mais acentuada ($\sim 4^\circ$) e relevo irregular marcado por cânions submarinos e outras formações, por exemplo, depressões no relevo formadas por diapirismo¹ de camadas de sal, as minibacias. No sopé do talude continental existe uma elevação continental, um leque de sedimentos, que diminui sua inclinação gradativamente até a planície abissal, grande área plana que cobre o fundo oceânico com profundidades de 4000 a 6000 metros (PRESS *et al.*, 2006).

Quando as correntes de turbidez passam pelo talude continental, podem preencher as depressões existentes no relevo (minibacias), formando espessos pacotes de areia. O preenchimento das minibacias, localizadas no noroeste do Golfo do México, é bastante estudado, devido à importância econômica dessas formações, pois se constituem na principal fonte de exploração de petróleo nesse local. Essas minibacias (Figura 5) são depressões no relevo do talude continental formadas pelo diapirismo, devido à instabilidade de um substrato móvel (camada de sal, por exemplo) recoberto por uma carga de sedimentos densa, podendo ter dimensões da ordem de 100 metros de amplitude e áreas de 10 a 100 km². Algumas dessas formações estão conectadas por canais submarinos, formando uma rede de drenagem que eventualmente produz descargas na planície abissal do Golfo do México (LAMB *et al.*, 2004).

¹ processo de ascensão de diápiro (massa rochosa menos densa do que as encaixantes) devido à pressão gerada pela massa rochosa encaixante.



Figura 5: Ambiente marinho e minibacias, no Golfo do México. Fonte: imagem de satélite do *Google Earth*[®].

WINKER (1998) introduziu o termo “*fill and spill*” (preenchimento e extravasamento) no modelo de preenchimento de minibacias, formulado a partir de uma análise de dados de sísmica de alta resolução do sistema Brazos-Trinity no talude continental do Golfo do México, onde se acredita às correntes de turbidez o seu preenchimento. O perfil longitudinal do sistema Brazos-Trinity é composto por três minibacias (bacias I, II e IV) formadas por diapirismo de camadas de sal e uma depressão de origem tectônica (bacia III). Primeiramente, as bacias I e III foram preenchidas totalmente (fase “*fill*”), a próxima fase foi marcada pela formação de canais que transportaram sedimentos para as bacias a jusante (II e IV): “*by-pass*” de sedimentos (fase “*spill*”). O modelo de preenchimento pode ser visualizado na Figura 6.

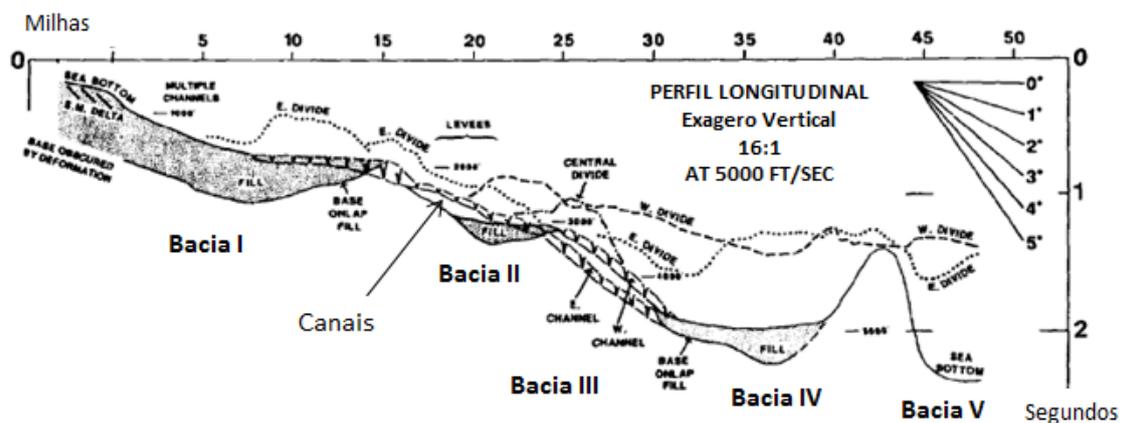


Figura 6: Perfil longitudinal do sistema Brazos-Trinity e seu modelo de preenchimento. Fonte: adaptado de WINKER (1998).

A Bacia IV (Figura 6) foi descrita por BEAUBOUEF e ABREU (2006) que utilizou, além de sísmica, testemunhos de sedimentos. Nesse estudo conclui-se que existem duas camadas principais ricas em areia, que podem ser interpretadas como duas fases de preenchimento da minibacia: a primeira chamada de “*ponded*”, com o preenchimento nas maiores profundidades da minibacia, sendo representada, por tanto, pela parte baixa e média do depósito; e a segunda, “*perched*”, gerando o depósito localizado na parte alta da minibacia, resultante da formação de canais. Também se observou que as frações mais lamosas (fluxo com a porção mais fina de sedimentos) atingiram distâncias mais longas, enquanto que as camadas ricas em areia restringiram-se à zona proximal e medial da bacia.

SINCLAIR e TOMASSO (2002), através de dados de afloramentos de Arenitos na França e na Suíça (Bacias Alpinas do Terciário) e, também, de dados sísmicos do Golfo do México, definiram um modelo de preenchimento das minibacias de talude dividido em quatro fases (Figura 7):

Fase 1: “*Flow ponding*”, onde o fluxo é completamente capturado na bacia, depositando espessos lobos de areia e lama.

Fase 2: “*Flow Stripping*”, onde o fluxo formado por grãos mais finos (parte mais diluída do fluxo) conseguem escapar da bacia, depositando em outro local. Como consequência a razão areia/lama, na bacia, aumenta.

Fase 3: “*Flow by-pass*”, onde o fluxo atravessa a bacia preenchida (incisão) ou ocorre a mudança da direção do canal de alimentação para fora da bacia (abandono).

Fase 4: “*Blanketing*”, a topografia da bacia e do seu redor são cobertas (elevação do nível de base), geralmente formando canais (“*levees*”) com baixa razão areia/lama.

Considerando um suprimento constante de sedimentos e nenhuma mudança no nível do mar, Sinclair e Tomasso montaram a sequência de quatro fases de uma bacia confinada que pode ser visualizada na Figura 7.

Evolução do preenchimento de minibacias por correntes de turbidez

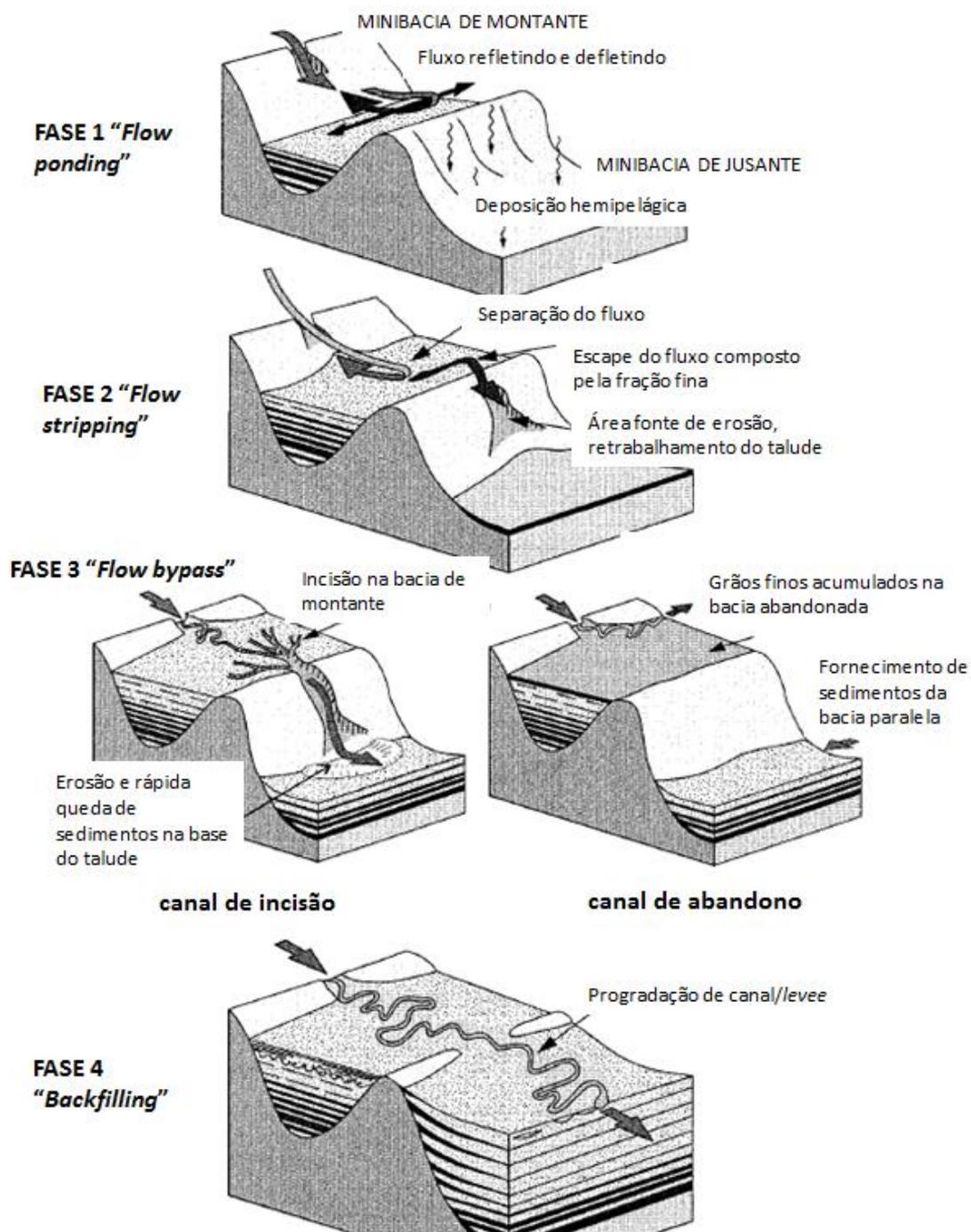


Figura 7: Modelo de preenchimento de minibacias de talude proposto por SINCLAIR e TOMASSO (2002). Fonte: adaptado de SINCLAIR e TOMASSO (2002).

A evolução vertical do depósito, segundo o modelo proposto por SINCLAIR e TOMASSO (2002) pode ser visualizada na Figura 8. A primeira fase forma depósitos contínuos e intercalados de lama e areia, sendo perceptível também a remobilização de sedimentos. A segunda fase forma um depósito rico em areia que será coberto por canais quando a bacia alcançar o ponto de extravasamento. Na bacia de jusante, a fase 2 formará depósito lamoso (oriundo do fluxo diluído que escapou da bacia de montante) na parte proximal e, durante as fases 3 e 4, a área fonte (talude) fica rica em areia, onde ocorrem processos de erosão e rápida sedimentação. Durante as fases 3 e 4 ocorrem a formação de canais de incisão e recobrimento da região, respectivamente.

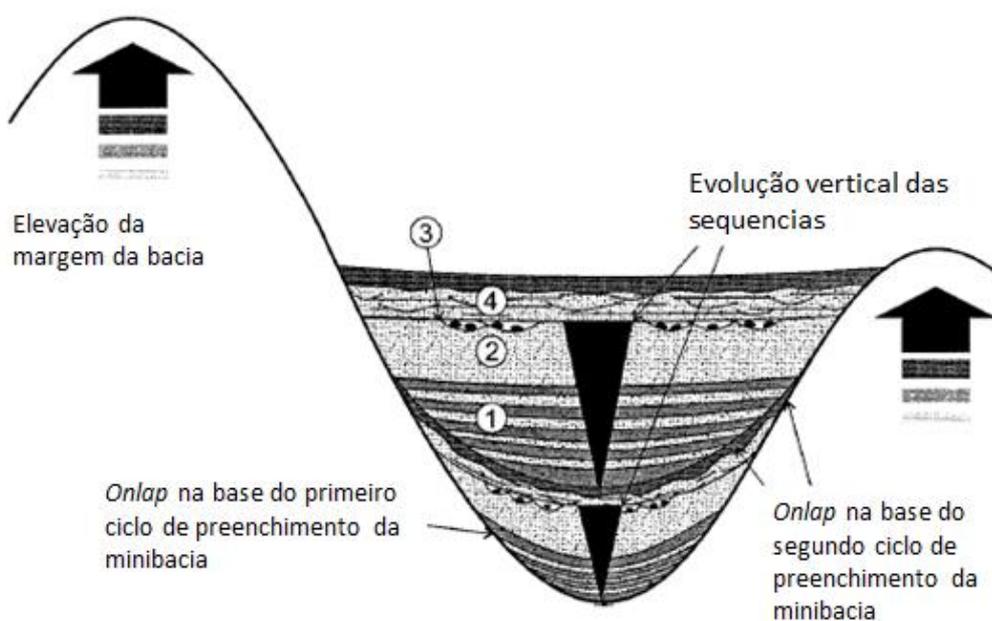


Figura 8: Depósito resultante do modelo proposto SINCLAIR e TOMASSO (2002). Dois ciclos estão representados, com soerguimento da topografia devido subsidência (diapirismo). Os números indicam o depósito relacionado com a fase de preenchimento. Fonte: adaptado de SINCLAIR e TOMASSO (2002).

Vários experimentos foram realizados para investigar o processo “*fill and spill*” de forma a analisar a relação entre a dinâmica das correntes de turbidez e as fácies dos depósitos associados.

LAMB *et al.* (2004) simularam correntes de turbidez contínuas (liberação contínua da mistura de água e sedimentos que forma a corrente de turbidez) em uma minibacia e verificaram que o fluxo pode percorrer mais de uma bacia ao mesmo tempo, preenchendo e extravasando nas partes altas, podendo formar cânions parcialmente escavados. Ou seja, o processo “*fill and spill*” ocorre concomitantemente em várias

minibacias. Após, também simularam correntes de turbidez por pulso (liberação instantânea e abrupta da mistura) e verificaram que apenas uma minibacia foi preenchida por vez, só atingindo a minibacia seguinte após o preenchimento completo da primeira, demonstrando dinâmicas de preenchimento diversas segundo o tipo de injeção do fluxo (contínuo ou por pulso).

Ainda, no trabalho de LAMB *et al.* (2004), as correntes de turbidez simuladas via fluxo contínuo (utilizadas nos experimentos deste trabalho, como será descrito a diante) tiveram suas trajetórias fortemente influenciadas pela topografia da minibacia. A cabeça da corrente atravessou a bacia e colidiu com a borda, de tal modo que parte transbordou a bacia e o restante migrou para o sentido contrário do fluxo, formando um ressalto hidráulico bem definido ou sendo afogado pela injeção. A corrente se estabilizou na parte proximal da bacia, quando a configuração do fluxo ficou completa, passando a sofrer influência apenas da topografia que mudou ao longo do tempo pela deposição de sedimentos. A porção da cabeça que transbordou a bacia se assemelha a uma alimentação por pulso, mesmo que sua origem seja de um fluxo contínuo, que preencheria a minibacia a jusante (Figura 9).

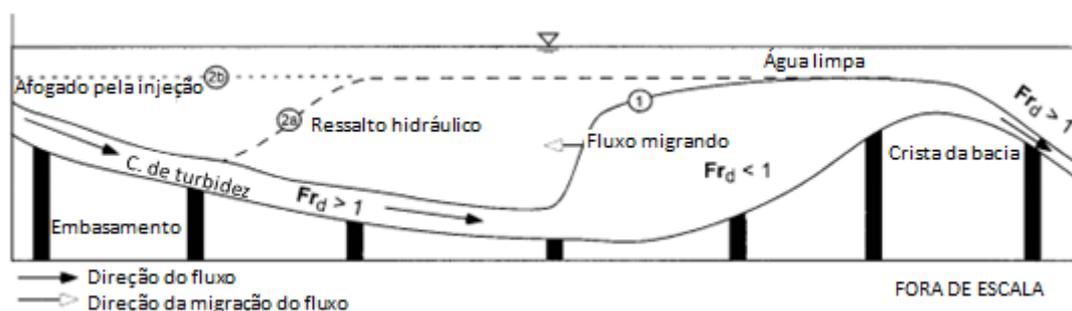


Figura 9: Configuração observada por LAMB *et al.* (2004) em seus experimentos.
Fonte: adaptado de LAMB *et al.* (2004).

VIOLET *et al.* (2005) realizaram experimentos em três dimensões (3D) para investigar os depósitos formados por correntes de densidade em uma minibacia passível de subsidência, com os quais encontraram fortes correlações com os estudos da bacia IV do sistema Brazos-Trinity (Figura 6). Os experimentos foram realizados com injeção contínua, pequenos pulsos (repetindo os fluxos simulados por LAMB *et al.* (2004), em 3D) e grandes pulsos, com o sistema de subsidência acionado e depois sem acioná-lo. As principais conclusões desse trabalho foram:

- a corrente por fluxo contínuo foi capaz de formar um pequeno canal submarino (“*levees*”) na parte proximal da região mediana da minibacia, posteriormente preenchido pelos fluxos por pulso;
- a corrente por fluxo contínuo tende a formar depocentros em regiões mais proximais do que fluxos por pulso;
- fluxos contínuos são favoráveis para a formação e preservação da topografia (“*levees*”), enquanto os fluxos por pulso são melhores para preencher a topografia;
- os depocentros (maior espessura) não corresponderam à zona de máxima subsidência da bacia e o padrão de deposição não mudou na fase de experimentos em que a subsidência estava inativada, ou seja, o padrão de deposição não é sensível à tectônica. Isso sugere que os fluxos são na maior parte puramente deposicionais respondendo pouco às mudanças da topografia.
- significativa erosão ocorreu somente na zona proximal e com menor importância na zona medial. Estruturas como formação de canal e seu preenchimento, formação de lobos e “*ripples*” também ocorreram na zona mediana. A zona distal foi dominada por depósitos uniformes, formados pela deposição do fluxo remanescente.

4.3 Modelagem física

Segundo MOTTA (1972) a modelagem física consiste em observar um sistema (modelo), que se comporte de modo semelhante ao outro sistema cujo comportamento se quer prever (protótipo), mas com dimensões menores. A Teoria da Semelhança é o conjunto de princípios que devem ser seguidos para que o modelo seja construído, operado e interpretado corretamente. Essa teoria permite estabelecer as relações de transferência entre os modelos e protótipos e estabelecer a relação entre as diversas grandezas presentes nos fenômenos físicos. Todavia, a modelagem física apresenta limitações (efeitos de escala).

Para garantir a semelhança em modelos, utiliza-se uma ferramenta chamada análise dimensional. Essa ferramenta identifica todas as variáveis que influenciam um determinado fenômeno e agrupa-as em equações adimensionais utilizadas para classificar o fenômeno físico, prever a forma das relações entre as grandezas que

intervêm no fenômeno e, também, estabelecer condições de semelhança para a concepção, construção, operação e interpretação dos modelos físicos (MOTTA, 1972).

Segundo MIDDLETON (1966) os grupos adimensionais que descrevem o comportamento das correntes de densidade não conservativas são o número de Froude densimétrico (1), número de Reynolds (2) e o número de Reynolds do grão (3).

$$\frac{V}{\sqrt{g'H}} \quad (1)$$

$$\frac{VH}{\nu} \quad (2)$$

$$\frac{uD}{\nu} \quad (3)$$

Onde V é a velocidade do fluxo (m/s), H é a espessura da corrente (m) e g' é a aceleração da gravidade reduzida pela diferença de densidade dos fluidos, expressa por (4), ν é o coeficiente de viscosidade cinemático (m²/s), u é a velocidade de cisalhamento do grão junto ao fundo (m/s), expressa por (5), e D é o diâmetro do grão (m).

$$g' = g \frac{\rho_a - \rho_c}{\rho_a} = g(\beta_c - 1) \quad (4)$$

Onde:

g = aceleração da gravidade (m/s²)

ρ_a = massa específica do fluido ambiente (kg/m³)

ρ_c = massa específica da corrente (kg/m³)

β_c = densidade da corrente

$$\sqrt{\frac{\tau}{\rho_c}} \quad (5)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento da corrente junto ao fundo (Pa)

ρ_c = massa específica da corrente (kg/m³)

O número adimensional utilizado para a modelagem física das correntes de densidade é o Froude densimétrico (1), que reflete a razão entre as forças de inércia e as

gravitacionais. A determinação das escalas utilizadas nesse estudo, a partir da igualdade do número de Froude densimétrico entre o modelo e o protótipo, seguindo os passos de BAAS *et al.* (2014) e NECOD (2005), podem ser visualizados detalhadamente no ANEXO I.

MIDDLETON (1966) fez algumas observações acerca da modelagem física via Froude densimétrico, como por exemplo: a perda de carga e a mistura na interface superior devem ser iguais no modelo e no protótipo; a velocidade no modelo será menor do que no protótipo; a velocidade de queda deve ter escala proporcional à da velocidade do fluxo e sofre influência da concentração volumétrica de sedimentos.

5 APARATO E METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritos os aparatos experimentais e a metodologia utilizados para a realização desta pesquisa. Este capítulo está dividido nos seguintes itens:

- Área de estudo: descrição da área de estudo modelada;
- Modelo físico: concepção, construção e instrumentação;
- Mistura sedimentar utilizada nas simulações;
- Ensaio realizados;
- Procedimento experimental: pré, durante e pós-ensaio;

5.1 Área de estudo

A área de estudo compreende uma região da planície abissal da costa do estado do Sergipe, nordeste brasileiro. O local possui 15 por 12 quilômetros de extensão e, portanto, 180 km² de área. A diferença entre a cota máxima e mínima é de aproximadamente 345 metros. A batimetria do relevo está ilustrada na Figura 10.

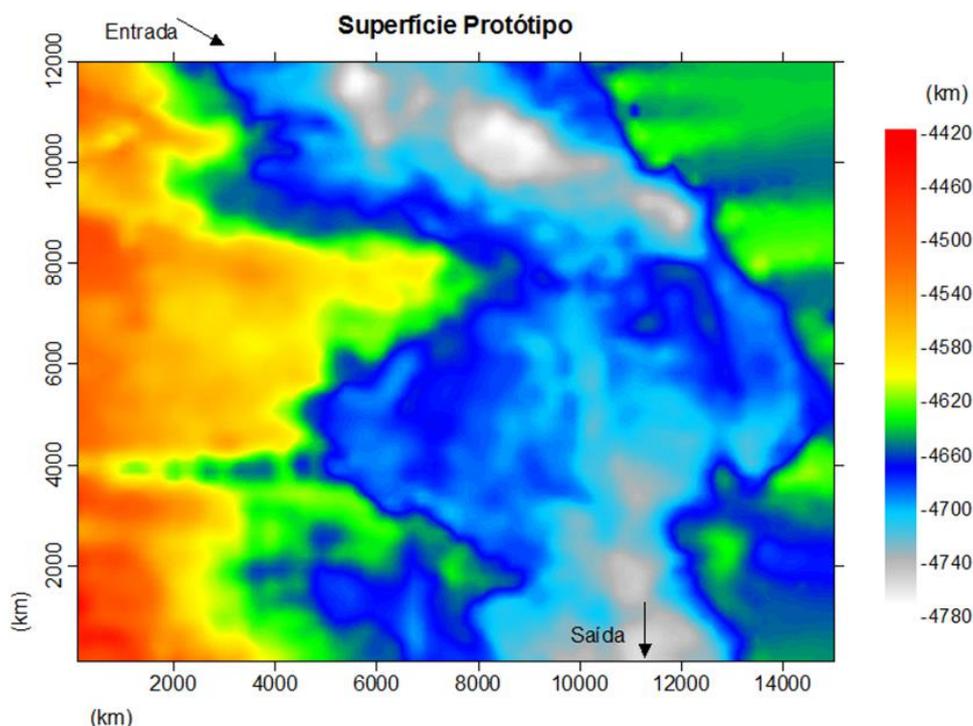


Figura 10: Batimetria da área de estudo. As cores que variam de branco a azul representam as depressões que existem no relevo. *Software* utilizado para a confecção do mapa: Surfer®8.0.

A topografia do relevo ilustrada na Figura 10 advém de dados de sísmica². As cotas e coordenadas foram fornecidas pela empresa Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobrás) e representa a superfície do relevo antes do preenchimento das minibacias na natureza.

A área de maior interesse nesse estudo compreende a parte central, indicada na Figura 11, onde a espessura do depósito possui aproximadamente 35 metros. Ainda indicado na Figura 11 estão os dois locais onde se acredita que as correntes de densidade deram início à passagem pelas minibacias e, também, está ilustrado o sentido de sua saída.

² A sísmica é um método que utiliza a propagação de ondas (geradas artificialmente na superfície) através do meio que se deseja investigar, com base no fato de que as velocidades de propagação dessas ondas variam em função das propriedades elásticas de solos e rochas. Através da análise do tempo de percurso das ondas entre o momento de sua geração e o registro do sinal sísmico, podem ser calculadas a velocidade de onda dos meios investigados e as profundidades das interfaces.

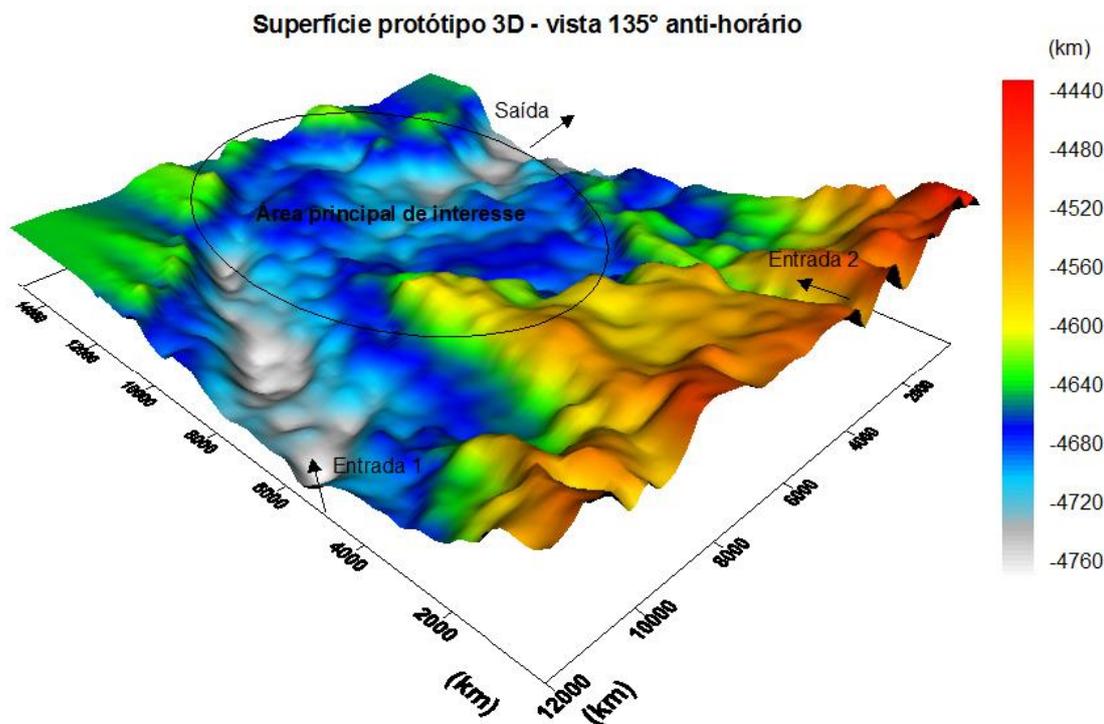


Figura 11: Visualização 3D da área de estudo (perspectiva: 135° anti-horário) com a indicação da área principal de interesse e locais de entrada e saída da corrente. *Software* utilizado para a confecção do mapa: Surfer®8.0.

Para finalizar, através da análise dos sedimentos coletados em testemunhos no depósito presente na minibacia a montante (entre a entrada 1 e a área de interesse) e nas minibacias a jusante (demarcada pela área de interesse), sabe-se que a região está preenchida por areia com tamanho de grão principalmente representado pela areia média segundo WENTWORTH, 1922 (Tabela 8 – Anexo II) e também que, a areia encontrada no depósito a montante é mais antiga do que a areia encontrada a jusante.

5.2 Concepção do modelo físico

O modelo físico foi construído no âmbito do projeto intitulado “Processos I”, desenvolvido no NECOD, em parceria com a Petrobras, o qual tem por objetivo estudar os processos hidrodinâmicos e deposicionais das correntes de densidade, correlacionando-os com o depósito gerado.

A concepção do modelo físico se deu pela redução geométrica da área de estudo e da adimensionalização dos parâmetros que caracterizaram as correntes de densidade.

Dentre as duas opções para a entrada de aporte sedimentar na área de estudo, foi definido, após reuniões com a equipe técnica do projeto, que a injeção dos sedimentos seria feita na entrada 1 (Figura 11).

5.2.1 Escalas geométricas

O modelo físico foi construído em um tanque pré-existente nas dependências do NECOD e, portanto, as suas dimensões se adequaram ao espaço físico disponível para a sua construção.

O modelo foi construído em escala horizontal (E_x) 1:3000 e escala vertical (E_y) 1:1000, ou seja, com exagero vertical ou distorção geométrica (Δ), relação entre a escala horizontal e a escala vertical, igual a 3. Sendo assim, a área modelada representa uma área do protótipo de aproximadamente 12 por 12 quilômetros. Segundo a escala de redução geométrica: 1m de comprimento no modelo representa 3 km de comprimento no protótipo; 1 mm de profundidade no modelo representa 1 m de profundidade no protótipo; 1 m² de área no modelo representa 9 km² de área no protótipo e 1 litro de volume no modelo representa 3000 m³ de volume no protótipo. No ANEXO I, encontra-se o detalhamento das escalas de cálculo utilizadas.

5.2.2 Construção do modelo

Para a construção do modelo foram extraídos perfis longitudinais do relevo a cada quilômetro ao longo da extensão da região a ser modelada (protótipo) totalizando 13 perfis (Figura 12), o que representa que estes perfis possuem afastamento de 33 cm no modelo, reproduzidos em madeira e fixados sobre uma chapa metálica. Os espaços entre os perfis foram preenchidos com areia e, por fim, o relevo foi moldado com argamassa. As etapas de construção do modelo podem ser visualizadas na Figura 13.

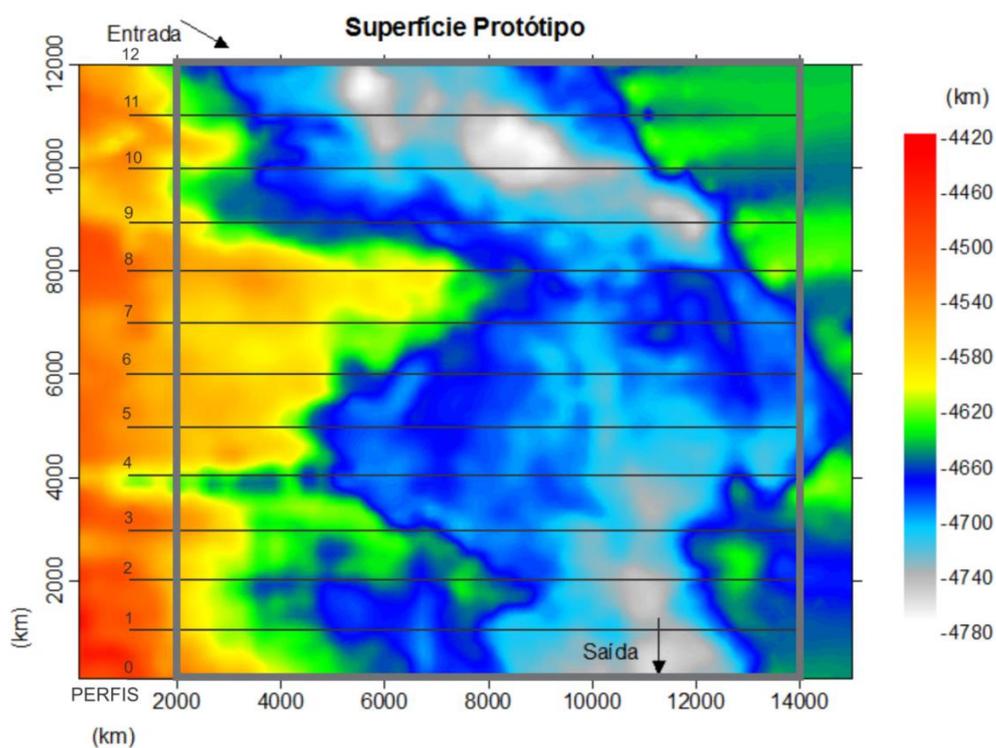


Figura 12: Área aproximada (interna ao retângulo com contorno cinza) replicada no modelo e localização dos perfis longitudinais utilizados na construção do modelo.



Figura 13: Etapas da construção do modelo. A-chapa metálica (base da topografia), B-lançamento dos perfis e preenchimento com areia, C- modelagem do relevo com argamassa, D-modelo finalizado.

O tanque, nas dimensões de cerca de 10 x 4 m, onde o modelo foi construído, pode ser visualizado na Figura 14. Nela se nota a área ocupada pelo modelo (4,18 x 3,74 m) e o sistema de alimentação do tanque, composto por uma tubulação de alimentação, com 85 mm de diâmetro, e duas de saída, com 32 mm de diâmetro cada.

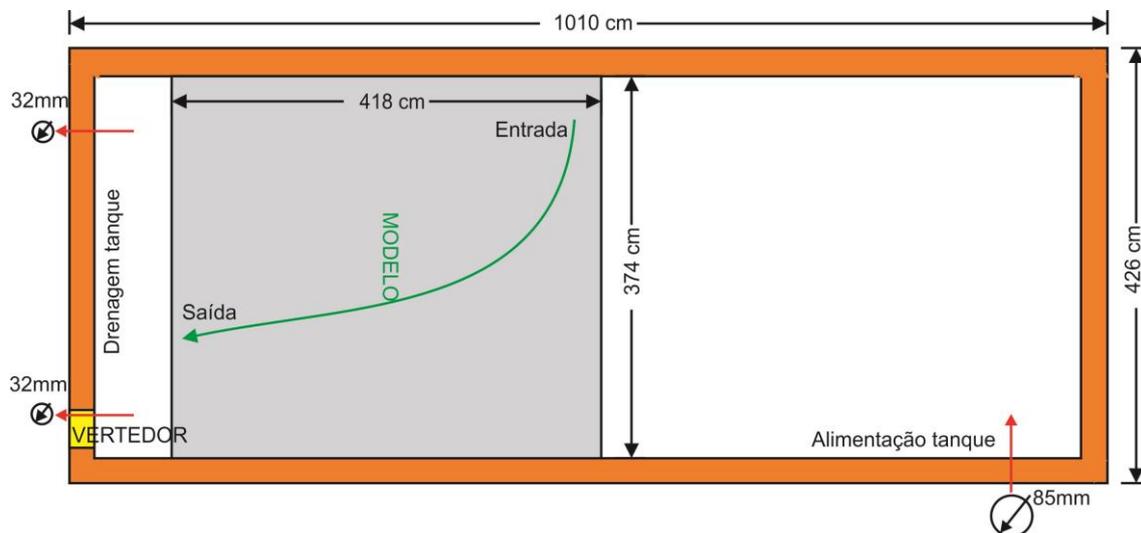


Figura 14: Dimensões do tanque de 107 cm de profundidade (vista superior) onde o modelo foi construído, e dimensões da área ocupada pelo modelo. Também está indicado o sentido de entrada e saída do fluxo.

Uma imagem do momento do ensaio e um esquema ilustrativo do aparato utilizado durante o experimento, que será detalhado nas próximas seções deste capítulo, podem ser vistos na Figura 15.

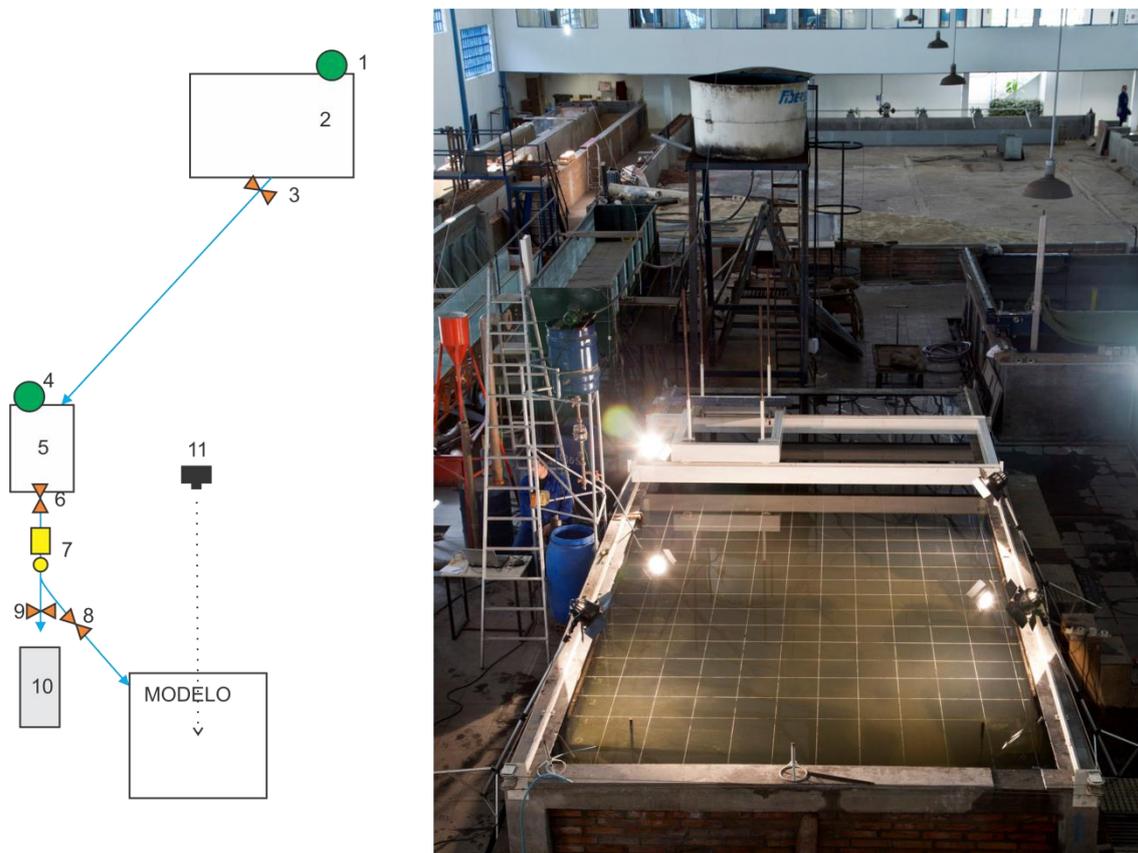


Figura 15: Esquema da infraestrutura que alimenta o modelo e foto do momento do ensaio: 1 e 2-misturador e reservatório de 2000 litros, 3-tubulação com registro, 4 e 5-misturador e reservatório de 80 litros, 6-tubulação com registro, 7-medidor e controlador de vazão, 8-tubulação e registro que alimenta o modelo, 9-tubulação e registro utilizada para retirar amostras da mistura injetada, 10-recipiente de 200 litros para coletar o excedente de mistura, 11-câmera fotográfica.

5.2.3 Equipamentos e instrumentação

Para a realização da pesquisa foram utilizados os seguintes equipamentos e instrumentos:

Câmera fotográfica

Câmera fotográfica NIKON D5000 18-55 mm: instalada perpendicularmente à superfície do modelo, registra momentos do ensaio a cada 5 segundos. Quatro holofotes de 1000 W cada são posicionados nos quatro cantos do modelo para assegurar a iluminação necessária aos registros fotográficos.

Medidor de vazão

Medidor de vazão eletromagnético Siemens MAG500 (Figura 16): garante o controle da vazão de injeção e do volume de mistura injetado. Os dados são transmitidos,

monitorados e armazenados em um computador através de um módulo e *software* de aquisição myPCLab NOVUS, adquirindo os dados a uma taxa de 4 Hz.



Figura 16: Medidor de vazão eletromagnético Siemens MAG500 acoplado ao sistema de alimentação do modelo.

Agitadores

Dois reservatórios foram utilizados para a preparação da mistura: um de 2000 litros que alimenta outro reservatório, de 80 litros. Para garantir a homogeneidade da mistura, cada reservatório possui um agitador eletromecânico. O agitador é composto por um motor cujo eixo está conectado a uma hélice de quatro pás. A velocidade de rotação da hélice é controlada através de um conversor de frequência, podendo ser ajustada conforme a necessidade.

Analizador de partículas a laser

Para realizar a análise granulométrica das amostras coletadas após cada série de ensaios foi utilizado um analisador de partículas a laser modelo Cilas 1180 (Figura 17) que permite diferenciar partículas com diâmetros variando entre 0,04 μm e 2500 μm através dos fenômenos da difração e da difusão de um feixe de raio laser. O equipamento opera com pequenas quantidades de material e permite analisá-lo mesmo em estado úmido.



Figura 17: Analisador de partículas a laser modelo Cilas 1180.

Mesa de coordenadas a Laser

Para o levantamento topográfico das superfícies resultantes após cada série de ensaios, utilizou-se um medidor de distâncias a laser acoplado a uma mesa de coordenadas (Figura 18). O medidor é do tipo MD250ADV, que realiza medidas com uma velocidade de 100 medidas por segundo e que possui incerteza da ordem de até 0,1 mm nas medições.

A mesa de coordenadas foi desenvolvida pelo NECOD e permite o deslocamento controlado do laser nas direções X (1 metro) e Y (0,585 metros), sendo necessário o deslocamento da mesa de coordenadas 24 vezes para a varredura de toda a área do modelo.



Figura 18: Laser MD250ADV acoplado à mesa de coordenadas, realizando leitura topográfica do depósito do modelo.

Outros equipamentos

- Estufa

Uma estufa da marca FANEM, modelo 311 CG foi utilizada no processo de secagem do material para a determinação da concentração volumétrica real da mistura injetada.

- Balança de precisão

A balança da marca Marte, modelo AS5500C, com precisão de 0,01 gramas foi utilizada no procedimento de determinação da concentração volumétrica real da mistura.

- Balança da marca TOLEDO modelo 3400-IV

Utilizada para pesagem do carvão.

- Termômetro de mercúrio

Utilizado para verificação da temperatura da água do tanque e da mistura.

5.3 Mistura sedimentar

Tradicionalmente, o sedimento utilizado nas simulações físicas, no NECOD, é o carvão mineral do tipo Cardiff, pois possui características físicas que representam satisfatoriamente a areia (sedimento presente no protótipo) nas simulações experimentais (MANICA, 2002), além de ser viável economicamente. Neste trabalho, a fim de representar o sedimento natural encontrado na costa leste brasileira, duas faixas granulométricas distintas foram utilizadas nos experimentos, são elas:

- Carvão mineral Cardiff 205 – carvão 205: $0,04 \mu\text{m} < \text{Diâmetro} < 242 \mu\text{m}$
- Carvão mineral Cardiff 205 fino – carvão fino: $0,04 \mu\text{m} < \text{Diâmetro} < 140 \mu\text{m}$

Nota-se que a faixa granulométrica do carvão fino está contida na faixa granulométrica do carvão 205, no entanto, a distribuição granulométrica destes dois tipos de carvão é diferente, resultando em diâmetros característicos (D50) diversos, como será exposto a seguir.

Para caracterizar o sedimento utilizado no modelo físico foram realizadas três repetições de análises granulométricas de duas amostras diferentes de cada tipo de carvão. Do gráfico de distribuição de frequências acumuladas do carvão 205 e do carvão 205 fino (Figura 19), é possível caracterizar a amostra através do seu diâmetro característico

(D50) que representa o diâmetro em que 50% das partículas, em massa, apresentam valores inferiores (ou superiores) do referido diâmetro. As Tabelas 1 e 2 mostram uma média dos valores de D50 para cada amostra de carvão 205 e de carvão fino.

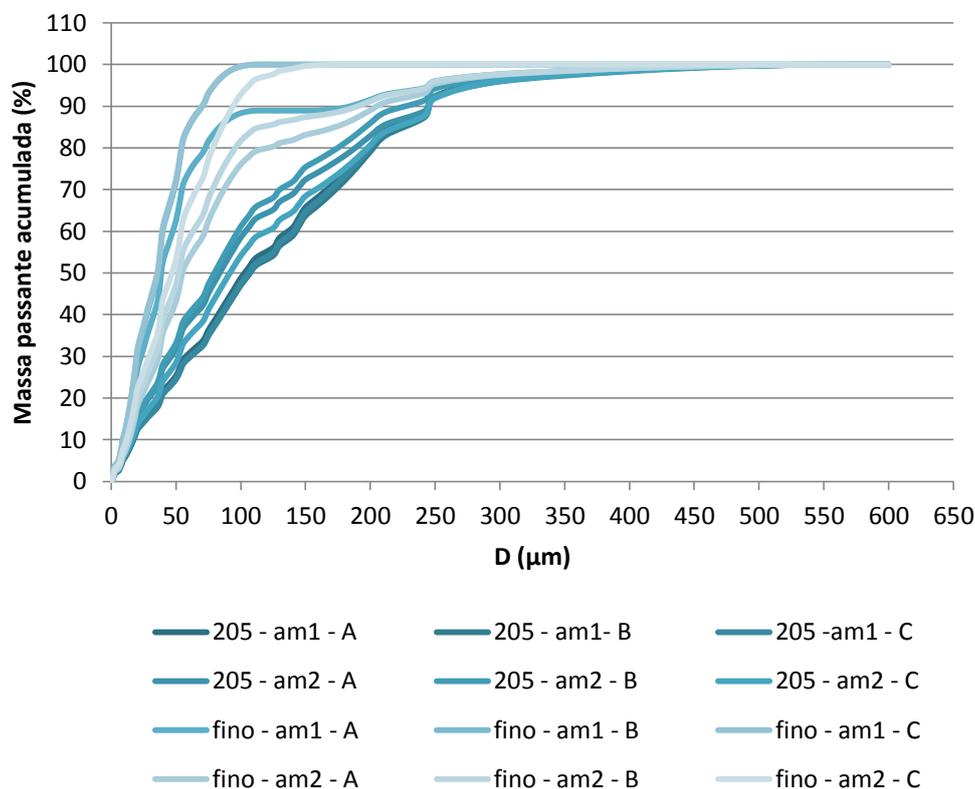


Figura 19: Curva de frequências acumuladas X diâmetro da partícula do carvão 205 e carvão 205 fino. As curvas representadas por cores mais escuras representam as análises (A, B e C) das amostras (am1 e am2) do carvão 205 (205), já as cores mais claras representam as análises (A, B e C) das amostras (am1 e am2) do carvão fino (fino).

WENTWORTH (1922) definiu tamanhos de grão para classificar os sedimentos em 10 classes que podem ser visualizadas na Tabela 9 do ANEXO I. As Tabelas 1 e 2 também mostram uma média das frações de sedimentos de cada amostra que foram classificadas como areias (nesse caso, as areias são representadas por areia fina e areia muito fina) e como siltes e argila, segundo WENTWORTH (1922).

Para realizar as análises estatísticas (D50 e classificação dos sedimentos) da distribuição granulométrica dos sedimentos analisados, foi utilizado o *software* GRADISTAT versão 8.0.

Tabela 1: Caracterização do carvão 205

Característica	Carvão 205 - Amostra 1	Carvão 205 - Amostra 2
D ₅₀ (µm)	89,26	75,08
Areias (%)	64,21	56,68
Siltes e argila (%)	35,79	43,32

Tabela 2: Caracterização do carvão fino

Características	Carvão fino - Amostra 1	Carvão fino - Amostra 2
D ₅₀ (µm):	38,29	52,32
Areias (%)	19,27	39,80
Siltes e argila (%)	80,73	60,20

Com a utilização do carvão 205 e do carvão fino, é possível representar as frações mais finas até as mais grossas presentes no ambiente natural. É possível construir os tamanhos de grãos simulados no ambiente natural com suas respectivas faixas granulométricas no modelo, como demonstra a metodologia desenvolvida no ANEXO I, com a qual se estimou as faixas granulométricas areia fina e areia muito fina como correspondentes à areia média, presente na área de interesse do protótipo (Figura 11).

5.4 Ensaios realizados

Os ensaios realizados foram divididos em três fases, subdivididas em séries - que, por sua vez, contemplam os ensaios propriamente ditos. A Tabela 3 apresenta todos os ensaios realizados.

Tabela 3: Ensaios realizados e suas características. As datas de realização dos ensaios são referentes ao ano 2014.

Fase	Série	Ensaio	Data	Cv (%)	ρ (kg/m ³)	% carvão 205	Vazão (l/min)	Volume de mistura injetado (l)	Volume total (l)	
FASE I	SÉRIE E0	E0	10/3	10	1017,2	100	1	43,32	161,11	
		E0_B	11/3	10	1017,2	100	1	59,09		
		E0_C	12/3	10	1017,2	100	1	58,70		
	SÉRIE E1	E1	28/3	10	1017,2	20	2	59,58	362,83	
		E1_B	28/3	10	1017,2	20	2	59,58		
		E1_C	31/3	10	1017,2	20	2	59,93		
		E1_D	31/3	10	1017,2	20	3	57,55		
		E1_E	1/4	10	1017,2	0	3	61,35		
		E1_F	2/4	2	1001,8	0	3	64,83		
	FASE II	SÉRIE E2	E2	5/5					68,49	1123,38
			E2_B	7/5					248,17	
			E2_C	9/5	5	1007,6	20	2	188,50	
E2_D			12/5					204,52		
E2_E			12/5					413,70		
SÉRIE E3		E3	2/6					475,35	2163,87	
		E3_B	3/6					473,89		
		E3_C	4/6	5	1007,6	20	2	217,86		
		E3_D	4/6					296,17		
		E3_E	5/6					237,09		
SÉRIE E4	E4	27/6					290,40	2180,01		
	E4_B	9/7					353,61			
	E4_C	10/7	5	1007,6	20	2	418,77			
	E4_D	10/7					184,24			
	E4_E	11/7					933,00			
FASE III	SÉRIE E5	E5	27/8					402,60	1080,23	
		E5_B	29/8	5	1007,6	5	2,5	94,40		
		E5_C	1/9					185,41		
		E5_D	5/9					397,82		
	SÉRIE E6	E6	24/9					222,76	2203,89	
		E6_B	24/9	5	1007,6	5	2,5	427,04		
		E6_C	25/9					593,23		
		E6_D	26/9					960,86		

Como forma de organizar e deixar mais clara a análise e visualização dos resultados serão apresentadas as características fase a fase do trabalho.

5.4.1 Fase I:

Durante essa fase foram realizadas as séries de ensaios E0 e E1, conforme a Tabela 3. Nessa fase, os principais elementos característicos das simulações das correntes de densidade foram variados para que pudesse ser avaliado o seu comportamento no modelo e, então, definir como seria melhor operá-lo.

A vazão variou de 1 litro/min (série E0), para 2 l/min (E1 a E1_C), até 3 l/min (E1_D a E1_F). A quantidade de carvão 205 variou de 100% (série E0) para 20% (E1 a E1_D), até zero (E1_E e E1_F). Já a concentração volumétrica testada foi de 10%, com exceção do último, onde foi 2%.

Dessa fase preliminar, resultou que a operação das simulações seria com as seguintes características: $C_v = 5\%$, $Q = 2$ l/min, quantidade de carvão 205 na mistura = 20%. Essa fase também contemplou outros ajustes metodológicos, como a posição de equipamentos.

A concentração volumétrica foi assim definida para operar o mais próximo possível do que se acredita ser uma corrente de densidade na natureza. A vazão foi definida como sendo 2 l/min em uma primeira tentativa de que a corrente de densidade avançasse no modelo, respeitando a sua topografia. A quantidade de carvão 205 foi definida em 20% porque a capacidade da corrente de transportar grãos com diâmetros maiores nas condições do modelo é limitada, bem como, devido aos relatos repassados das características do depósito natural. Em suma, foi estabelecido um conjunto de características definidas experimentalmente, para o adequado funcionamento do modelo.

5.4.2 Fase II

Uma estimativa do volume a ser injetado foi feita através das características da área de estudo. Sabendo que se deseja chegar a uma espessura de aproximadamente 3,5 cm no modelo, na área principal de interesse, o volume a ser preenchido é de aproximadamente 500 litros (cálculo através da função volume do *GRID – software Surfer®8.0*, utilizando o *GRID* da batimetria do modelo). Como a concentração volumétrica da mistura injetada é de 5% de sedimentos, estimou-se que, aproximadamente, 11100 litros de mistura seriam suficientes para que se alcance o objetivo (esse valor pode ser superestimado ou subestimado, por não ser conhecida a porosidade do depósito e ter sido considerado que todas as depressões das minibacias da região tivessem 3,5 cm de espessura de depósito).

Tendo em vista que a vazão é de 2 l/min, o tempo necessário de simulações (excluindo as etapas pré e pós-ensaio) seria de aproximadamente 93 horas e, tendo como ponto de

partida a meta de injetar no modelo 11100 litros de mistura, foram estabelecidas as metas para cada série de ensaios: 1100 litros ou múltiplos de 1100, seguindo, portanto, um padrão para facilitar a comparação dos resultados. Sendo assim, na série E2 foram injetados aproximadamente 1100 litros e em E3 e E4 aproximadamente 2200 litros cada para acelerar o processo experimental, totalizando 5500 litros. As características dos ensaios podem ser visualizadas na Tabela 3.

5.4.3 Fase III

Durante a Fase III, foram realizados os ensaios E5 e E6 (Tabela 3) que seguiram a mesma lógica dos ensaios E2 e E3 (Fase II), respectivamente, no que se refere ao volume de mistura injetado. Aqui foi proposta uma mudança em alguns dos padrões da mistura de injeção utilizados na Fase II: a vazão passou a ser 2,5 l/min, a quantidade de carvão 205 passou a ser 5% e um difusor foi instalado no local da injeção da mistura (Figura 20), sendo a tubulação, que permite a entrada da mistura no modelo, instalada a aproximadamente 10 cm do fundo, enquanto que, nas Fases anteriores, a tubulação foi instalada junto ao fundo.

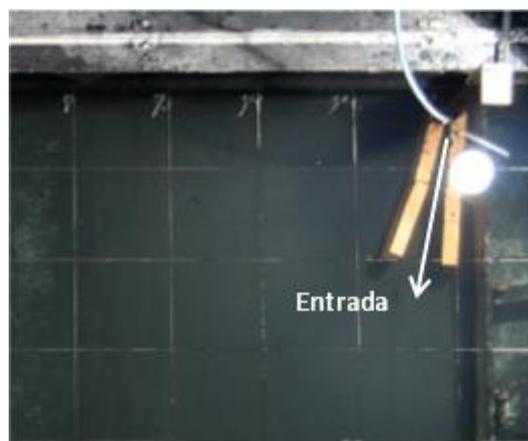


Figura 20: Difusor de tijolos instalado no local da injeção.

Essas mudanças na metodologia, fruto de observações durante os ensaios e também da análise do depósito formado em termos de volume (que estava abaixo do esperado, após a conclusão das 3 séries de ensaios, devido ao uso do sifão hidráulico – detalhado na próxima seção), pretendiam direcionar o fluxo e amenizar o acúmulo de sedimentos próximo ao local de injeção da mistura.

Ainda, durante a série de Ensaios E6, após o esvaziamento do tanque, observou-se que parte do material vazou para a área externa ao modelo através de uma passagem entre a parede do tanque e o difusor. No total, foram injetados aproximadamente 3300 litros de mistura durante a Fase III.

5.5 Procedimento experimental

O procedimento experimental está dividido em três etapas: preparação do ensaio, simulação e após o mesmo, sendo as atividades realizadas em cada etapa descritas na sequência.

5.5.1 Preparo do ensaio

Primeiramente é realizado o enchimento do tanque e o preparo da mistura a ser injetada no modelo, no reservatório de 2000 litros (Figura 15).

O enchimento do tanque é feito inicialmente com uma vazão baixa para não perturbar o depósito formado em ensaios anteriores, demorando em torno de um dia para ser finalizado (salvo na Fase I e no primeiro ensaio da Fase II, quando não havia depósito pré-existente).

O cálculo da quantidade de carvão a ser adicionado junto à água no reservatório é feito através da fórmula:

$$M = V \cdot C_v \cdot \rho_s$$

Onde:

M = massa de carvão a ser adicionada na mistura (kg)

V = volume de mistura a ser preparada (m³)

ρ_s = massa específica do sedimento (1190 kg/m³)

C_v = Concentração volumétrica (-)

Ou seja, para preparar 1500 litros de mistura com $C_v = 5\%$ são necessários 89,25 kg de carvão e 1425 litros de água. Utilizando mais de um tipo de carvão, a massa a ser adicionada é dividida proporcionalmente.

Após o carvão ser adicionado, o misturador eletromecânico é ligado, permanecendo assim até o final do ensaio. Quando a mistura está bem homogeneizada (aproximadamente 30 min depois), o reservatório de 80 litros é alimentado e seu misturador também é ligado, permanecendo assim até o final do ensaio. Em seguida, o medidor de vazão, os holofotes e a câmera são ajustados. A posição desses equipamentos pode ser visualizada na Figura 15.

Uma amostra da mistura a ser injetada é coletada em um *Becker* previamente pesado e identificado, que é novamente pesado após a coleta da amostra, secado em estufa e pesado novamente. Após, o sedimento é submetido à análise granulométrica. Esse procedimento permite o cálculo da concentração volumétrica real da mistura que está sendo injetada, bem como o conhecimento da sua granulometria. Esse procedimento é repetido nos momentos finais do ensaio.

Para iniciar o ensaio, é necessário ajustar a vazão para o valor pretendido. Também a temperatura da água do tanque e da mistura no reservatório de 80 litros foi medida.

5.5.2 Ensaio

Após a preparação do ensaio estar concluída, o mesmo inicia e é necessário monitorar a vazão, assim como o reservatório de 80 litros precisa ser alimentado novamente a cada 60 litros de mistura injetados, aproximadamente. Durante o ensaio o tanque foi mantido vertendo para remover impurezas da superfície da água, permitindo registros fotográficos nítidos.

Durante o ensaio verificou-se que ocorreu acúmulo de sedimento no local de injeção da mistura. Devido ao grande volume de mistura injetado, o sedimento acumulado foi capaz de prejudicar o desenvolvimento da corrente no canal de entrada e até congestionar a saída da mistura do difusor. Para solucionar esse problema, a cada 30 litros de mistura injetada, o material acumulado era retirado parcialmente através de um sifão hidráulico (Figura 21).

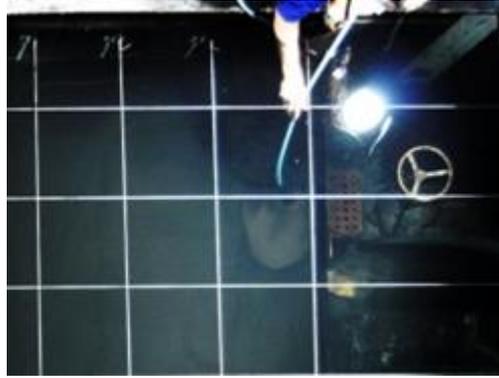


Figura 21: Sifão hidráulico para retirada de sedimentos acumulados no local da injeção da mistura.

Na Fase II, o sifão hidráulico foi utilizado somente após a injeção de, aproximadamente, 350 litros de mistura para descongestionar o difusor (Figura 20). Também, sempre antes do início de cada série de ensaios, a elevação formada próxima ao final do difusor, também fruto das condições de estabilização do fluxo, era removida parcialmente.

Cessado o ensaio, coleta-se mais uma amostra da mistura que estava sendo injetada no modelo e, após um ou dois dias, dá-se início à drenagem do tanque, de forma lenta, para permitir a coleta do material depositado.

5.5.3 Pós-ensaios/Coleta de dados

A coleta de dados foi padronizada desde a Fase I. Porém, diferentemente da Fase I, onde após cada série de ensaios o material retido no modelo era retirado, pois esta etapa objetivava apenas testar as características da mistura de injeção e os procedimentos metodológicos, durante a Fase II e a III, os depósitos foram empilhados.

Após o material injetado depositar, iniciou-se o processo de esvaziamento do tanque, que durava em torno de uma semana. Quando esvaziado completamente, deu-se início à varredura com laser e, após, a coleta da malha de amostras que foram submetidas à análise granulométrica.

O levantamento topográfico feito pelo laser é realizado em 19 panos, como mostra a Figura 22, abrangendo quase toda a área do modelo. A área que não foi coberta pelos panos não causa um prejuízo na análise do depósito, pois estava concentrada na parte alta do relevo, onde não ocorreu formação de depósito, e no local da injeção, onde o depósito é perturbado pelas condições de entrada.

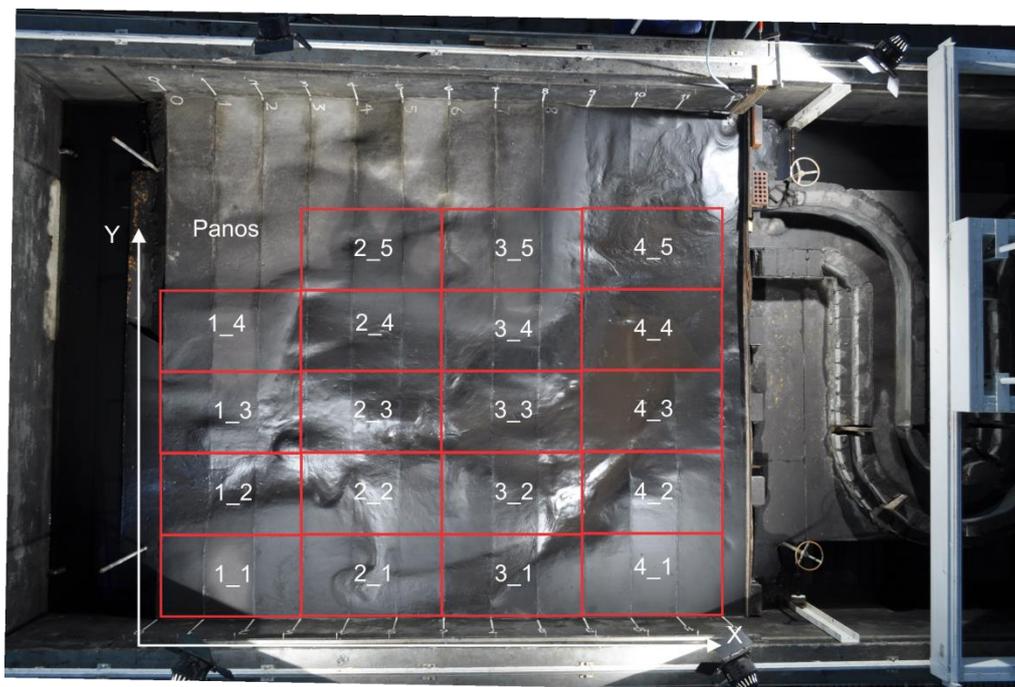


Figura 22: Foto do depósito formado após a Série de ensaios E2 com esquema demonstrativo da localização dos panos da varredura a laser.

Já a coleta das amostras é realizada com uma espátula, procurando seguir a mesma malha de amostragem para todas as séries de ensaios, aumentando a malha conforme ocorra a evolução da extensão do depósito. A Figura 23 ilustra os locais de amostragem no depósito formado pela Série E2 de ensaios.

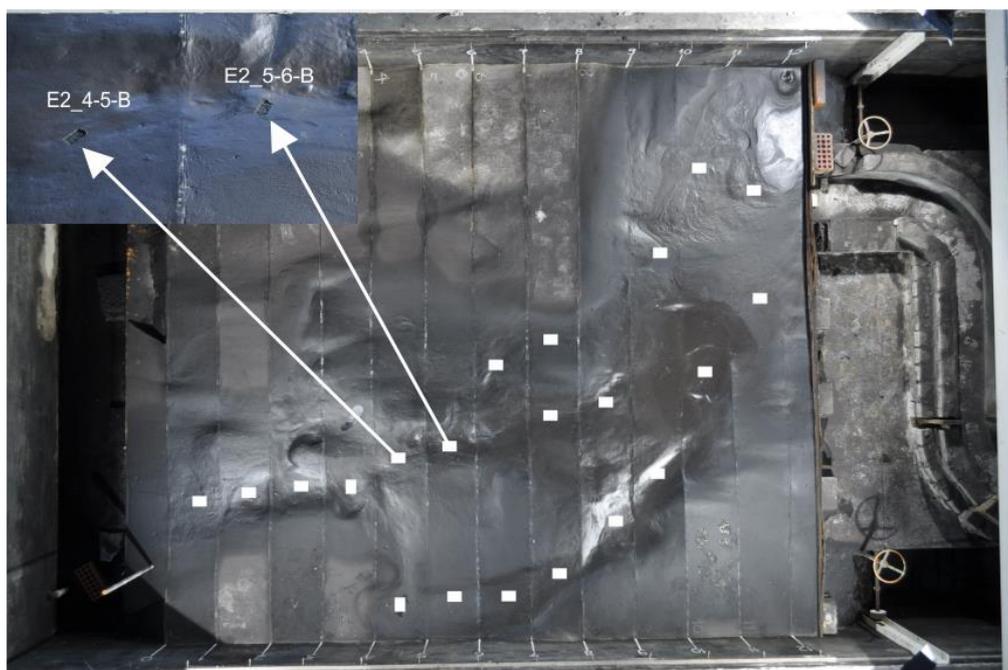


Figura 23: Malha de amostragem após Série de ensaios E2, com detalhe para as amostras 4-5-B e 5-6-B, exemplificando a organização da nomenclatura.

6 RESULTADOS

Cada ensaio gerou um banco de dados brutos extenso, composto por fotografias, dados de vazão, de análises granulométricas e de levantamento topográfico. Portanto, as seções deste capítulo serão divididas de forma a contemplar a análise de cada grupo de dados.

6.1 Dados de vazão

A partir dos dados de vazão, calculou-se a média e o desvio padrão³ das vazões instantâneas registradas. Através dos tempos registrados de duração do ensaio, foram obtidos os volumes de mistura sedimentar injetados no modelo para cada ensaio, já representados na Tabela 3 referente aos ensaios realizados. A vazão média, para cada ensaio, está representada na Figura 24.

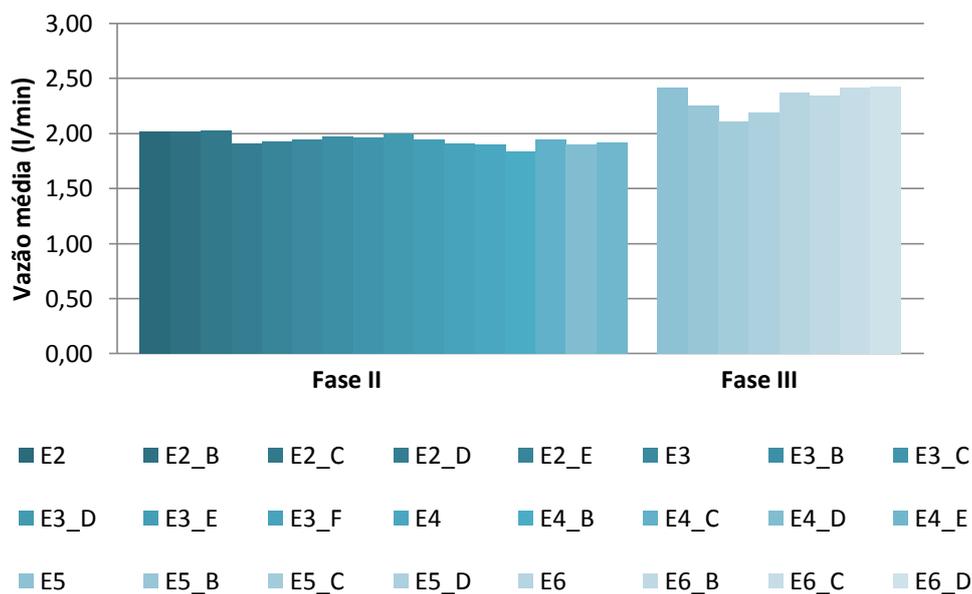


Figura 24: Vazões médias para cada ensaio realizado nas Fases II e III. Cada coluna no gráfico contempla um ensaio realizado, conforme a legenda.

Nota-se que a vazão média geralmente ficou um pouco abaixo do valor pretendido (2 l/min na Fase II e 2,5 l/min na Fase III), principalmente nas séries E5 e E6. Isto

³ Medida de dispersão em torno da média. Foi calculado através da função DESVPAD do Excel®.

ocorreu devido ao processo de enchimento do reservatório pequeno (conforme descrito na seção 5.5.2), a cada 60 litros de mistura injetados, que causava desestabilização da vazão, chegando a zero em alguns momentos. Além disso, o controle da vazão (realizado conforme consta na seção 5.2.3) não é primoroso, podendo acarretar tanto em diminuição da vazão, como pode gerar picos. Os valores de vazão média, o desvio padrão e o tempo de duração dos ensaios, podem ser visualizados na Tabela 10 que está no ANEXO II deste trabalho.

6.3 Dados de concentração volumétrica real e de granulometria da mistura injetada

Através da pesagem da quantidade de sedimentos presente em uma amostra da mistura, no início e no fim de cada ensaio, calculou-se o valor da concentração volumétrica real da mistura que foi injetada no modelo, conforme descrito na seção 5.5.1. Os resultados desta análise estão expostos na Figura 25. Esse dado trata apenas de uma condição de entrada, já que, após a entrada da corrente no tanque, ela sofre processos de mistura e interação com o fluido ambiente, processos deposicionais e outros.

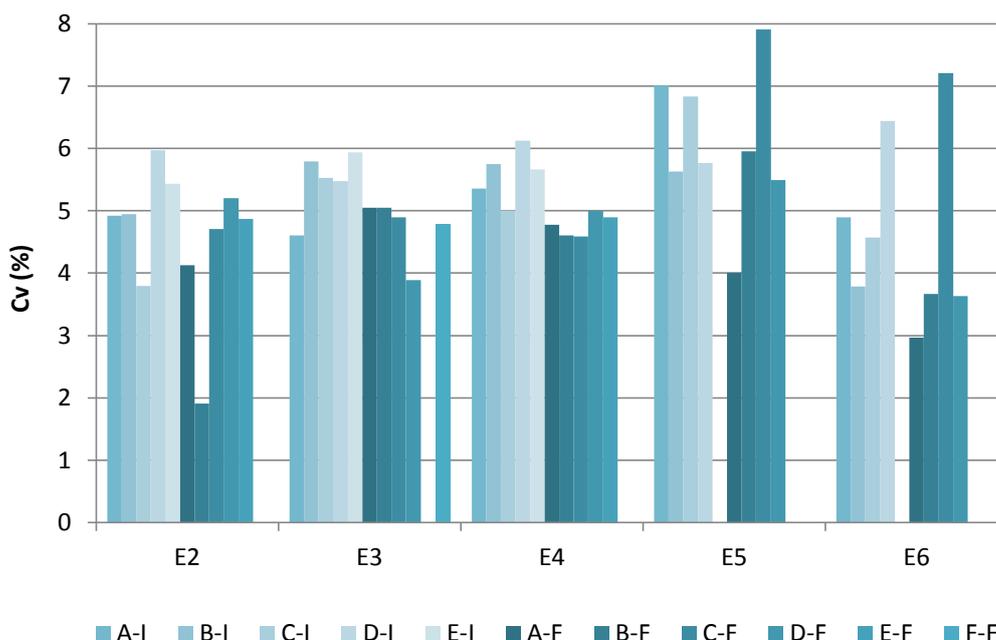


Figura 25: Concentração volumétrica real da amostra de mistura de injeção retirada no início do ensaio. Cada grupo de colunas representa uma série de ensaios, onde cada coluna representa o ensaio (E2, E3, E4...) com terminologia correspondente à da respectiva legenda (A, B, C...). As cores mais claras referem-se à amostra coletada no início do ensaio (I) e as cores mais escuras referem-se à amostra coletada no final do ensaio (F).

Pela análise da figura, nota-se que, muitas vezes, os valores de concentração volumétrica variaram consideravelmente do início para o fim de cada ensaio e, também, na grande maioria das amostras coletadas, fugiram do valor pretendido para a concentração volumétrica (5%). Alguns fatores podem justificar a variação apresentada na Figura 25, como: homogeneização insuficiente da mistura nos reservatórios pelo agitador eletromecânico e procedimento imperfeito de amostragem da mistura.

Os valores apresentados na Figura 25 são essenciais para a verificação de diferenças significativas que podem resultar de falhas metodológicas, como descrito acima; por isso, foi calculado o desvio padrão da concentração volumétrica real para cada ensaio. Contudo, para o cálculo do volume de sedimentos injetado no modelo, conforme será descrito na seção 7.2.1 deste trabalho, foi utilizado um valor médio da concentração volumétrica para cada ensaio. Os valores de concentração volumétrica real das amostras de cada ensaio, o desvio padrão e a média, podem ser visualizados na Tabela 11 que está no ANEXO II deste trabalho.

O sedimento coletado nessas amostras foi submetido a análises granulométricas, em três repetições. A média das repetições das análises referentes às amostras iniciais e finais do ensaio foi adotada como característica granulométrica do material que está sendo injetado. A Figura 26 representa a média do diâmetro característico D50 das três repetições para a amostra inicial e final do material injetado, assim como a Figura 27 representa uma média da fração de sedimentos que podem ser classificados como areias, segundo WENTWORTH (1922). Estas análises estatísticas foram realizadas através do *software* GRADISTAT[®] versão 8.0.

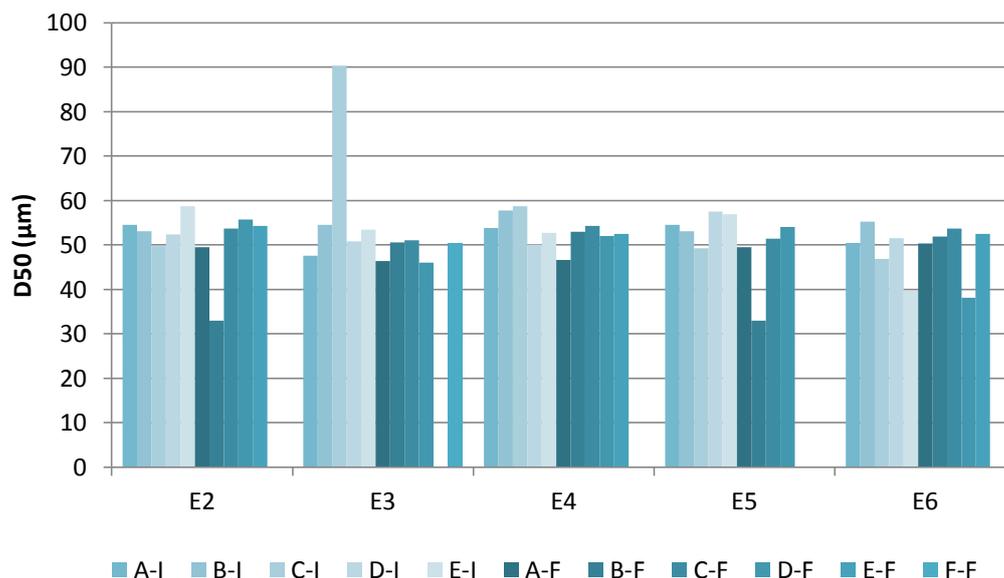


Figura 26: Diâmetro característico D50 das amostras de mistura sedimentar, retiradas no início e no fim do ensaio. Cada grupo de colunas representa uma série de ensaios, onde cada coluna representa o ensaio (E2, E3, E4...) com terminologia correspondente à da respectiva legenda (A, B, C...). As cores mais claras referem-se à amostra coletada no início do ensaio (I) e as cores mais escuras referem-se à amostra coletada no final do ensaio (F).

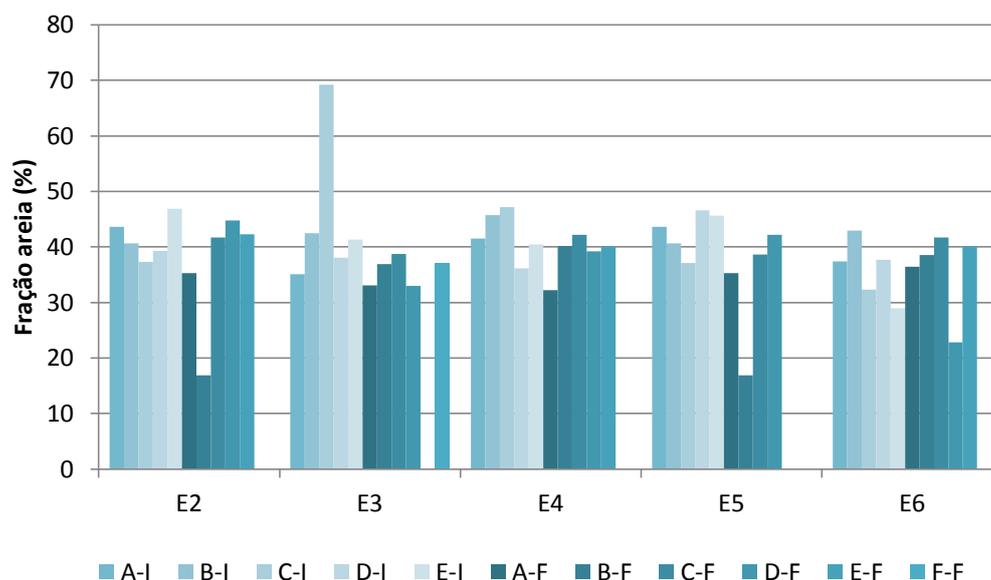


Figura 27: Fração de sedimentos classificada como areias das amostras de mistura sedimentar, retiradas no início e no fim do ensaio. Cada grupo de colunas no gráfico representa uma série de ensaios, onde cada coluna representa o ensaio com terminologia correspondente à da respectiva legenda (A, B, C...). As cores mais claras referem-se à amostra coletada no início do ensaio (I) e as cores mais escuras referem-se à amostra coletada no final do ensaio (F).

Percebe-se que, em média, os valores de diâmetro característico D50 variaram em torno de 50 μm e a fração areia em torno de 40 %. Nota-se, também, que as variações bruscas de D50 correspondem às mesmas variações da quantidade de sedimentos classificados como areia. Ainda, os valores não variaram consideravelmente da Fase II para a Fase III, onde se passou a usar 5% de carvão 205 na composição da mistura, ao invés de 20%, como na Fase II. Estas divergências podem ter sido causadas pelos mesmos motivos apresentados acima, como possíveis justificativas para as variações da concentração volumétrica real da mistura, que foram: homogeneização da mistura nos reservatórios pelo agitador eletromecânico e procedimento de amostragem da mistura imperfeitos. Os valores de D50 e da fração areia apresentados nas Figuras 26 e 27 podem ser visualizados, respectivamente, nas Tabelas 12 e 13 do ANEXO II.

6.4 Registros fotográficos

Os registros fotográficos obtidos a cada 5 segundos de intervalo de tempo serviram, principalmente, para acompanhar o primeiro ensaio de cada série, pois, depois, a turbidez da água, gerada pela injeção de carvão mineral, impediu a completa visualização dos ensaios posteriores.

Para o cálculo da velocidade de avanço do fluxo e acompanhamento mais detalhado das trajetórias ao longo do tempo, foram analisadas as fotografias entre o intervalo de tempo em que a corrente entra no modelo e o momento em que chega ao último perfil longitudinal, próximo à saída. As trajetórias principais foram traçadas, marcando pontos em locais estratégicos para todos os ensaios. Através da distância percorrida entre os pontos e do tempo necessário para que a corrente alcançasse os pontos de referência, estimou-se a velocidade de avanço. O tempo foi determinado sabendo que o intervalo entre cada foto é de 5 segundos. Exemplo dessa análise, realizada com auxílio do *software* CorelDRAW X5®, pode ser visualizado na Figura 28.

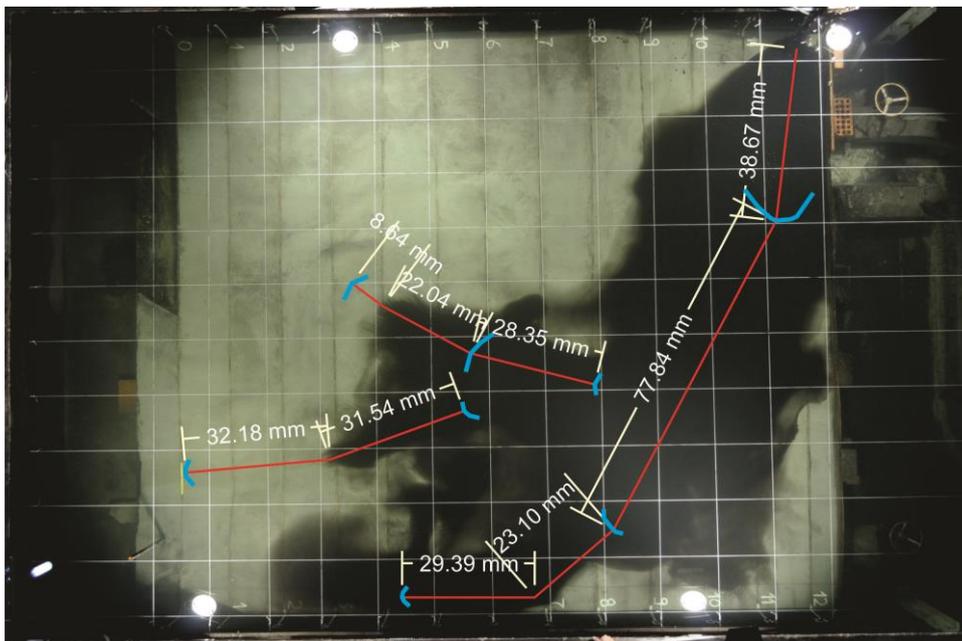


Figura 28: Processo de análise da velocidade de avanço das trajetórias para o ensaio E2: foi desenhada a frente de avanço da corrente através da inserção das fotografias em ordem cronológica que, por fim, foram conectadas por uma trajetória.

A análise fotográfica do ensaio E4 não foi realizada porque o início do ensaio aconteceu com um pico de vazão, devido a um erro de ajuste da vazão, impedindo a visualização das trajetórias.

6.5 Dados batimétricos do laser

Os dados resultantes da leitura realizada pela mesa de coordenadas a laser (arquivos em formato.txt) foram submetidos a uma rotina de cálculos no Excel. As leituras de Z (cotas) para cada pano foram realizadas de 50 em 50 mm no eixo X e a cada milímetro no eixo Y (segundo eixo de coordenadas exposto na Figura 22).

Primeiramente os valores de cota Z de todos os panos foram referenciados para o mesmo sistema de coordenadas (pano 1_1 – Figura 22). Esse procedimento foi realizado para a leitura da topografia do modelo, antes do início dos ensaios, e para a topografia levantada após cada série de ensaios.

A leitura do laser é a medida da distância do feixe de luz até a superfície presente no modelo, logo, os baixios, no dado bruto, estavam representados pelos maiores valores de cota Z e os locais mais altos estavam representados por depressões. Para tornar a representação do relevo adequada, os valores de Z, lidos de zero até Z, foram passados

para a referência 1000, invertendo a representação do relevo para a forma correta, como indica a Figura 29. Assim sendo, é possível fazer a junção de todos os panos e representar a topografia, através do *software* Surfer®8.0.

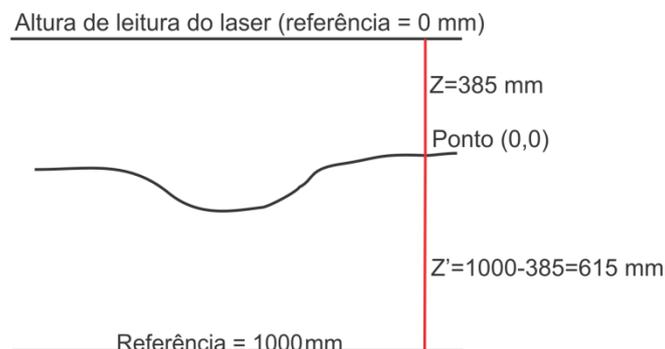


Figura 29: Esquema ilustrativo da mudança do nível de referência para representação do relevo no *software* Surfer®8.0.

O próximo passo foi calcular as espessuras do depósito, diminuindo as cotas do relevo do modelo das cotas resultantes após a deposição dos sedimentos injetados em cada série de ensaios realizada. Algumas diferenças foram verificadas para os valores de espessuras localizados nas abcissas $X= 350, 1450, 2500$ e 3600 , portanto, esses valores foram excluídos, verificando que não condiziam com o que se encontrava no modelo.

É importante salientar, também, que os mapas de espessuras para a série de ensaios E2 e E3 só poderão ser finalizados quando o laser mapear novamente a superfície do modelo, sem depósito, pois a leitura destas topografias ficaram defasadas em até 5 cm do fundo.

6.6 Dados de granulometria do depósito

As amostras foram coletadas utilizando uma malha de amostragem que procurou cobrir espacialmente toda a área onde houve formação de depósito (material transportado), mantendo a mesma malha para cada série de ensaios e aumentando-a conforme houve a expansão da extensão do depósito, no decorrer dos experimentos.

O *software* GRADISTAT® versão 8.0 foi utilizado para analisar estatisticamente os resultados das análises granulométricas das amostras. O depósito foi analisado através do diâmetro característico D50 e do desvio padrão ou grau de seleção dos sedimentos. O D50 representa, como descrito na seção 5.3, o diâmetro de uma malha na qual 50% das partículas (em massa) ficariam retidas, isto é, o diâmetro pelo qual 50% das partículas

passariam. Esse valor pode ser encontrado através de um gráfico que representa a massa acumulada (%) (passante ou retida) pelo diâmetro da partícula (μm). O desvio padrão foi calculado através do método logarítmico de FOLK e WARD (1957) que divide os graus de seleção em sete classes:

Tabela 4: Graus de seleção (Fonte: adaptado de FOLK e WARD, 1957).

Grau de seleção	Grau de seleção σ (μm)
Muito bom	<0,35
Bom	0,35-0,50
Moderadamente bom	0,50-0,70
Moderado	0,70-1,00
Ruim	1,00-2,00
Muito ruim	2,00-4,00
Extremamente ruim	>4,00

Através do registro fotográfico do depósito foi possível identificar as coordenadas das amostras no modelo e, então, gerar os respectivos mapas de D50 e grau de seleção, através do *software Surfer*®8.0.

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados foi dividida em dois focos principais: a dinâmica de preenchimento das minibacias e o depósito gerado.

7.1 Dinâmica

A dinâmica de preenchimento das minibacias foi avaliada através de uma análise qualitativa das trajetórias que o fluxo percorreu ao longo do tempo e da análise quantitativa da velocidade de avanço do fluxo.

7.1.1 Avaliação qualitativa

Através da análise das fotografias e de observações realizadas nos momentos do ensaio, foi possível observar as trajetórias percorridas pelo fluxo. As trajetórias foram divididas em três tipos:

- Principais: foram as primeiras trajetórias a se desenvolverem e ocorreram durante todo o tempo.
- Principais (intermitentes): foram continuação de uma trajetória principal, mas não ocorreram durante todo o tempo e que foram mais lentas.
- Secundárias: derivaram das trajetórias principais e intermitentes, conectando os fluxos e percorrendo outras áreas que não foram atingidas pelas trajetórias principais. Possuem comprimentos menores.

A Figura 30 indica a análise resultante:

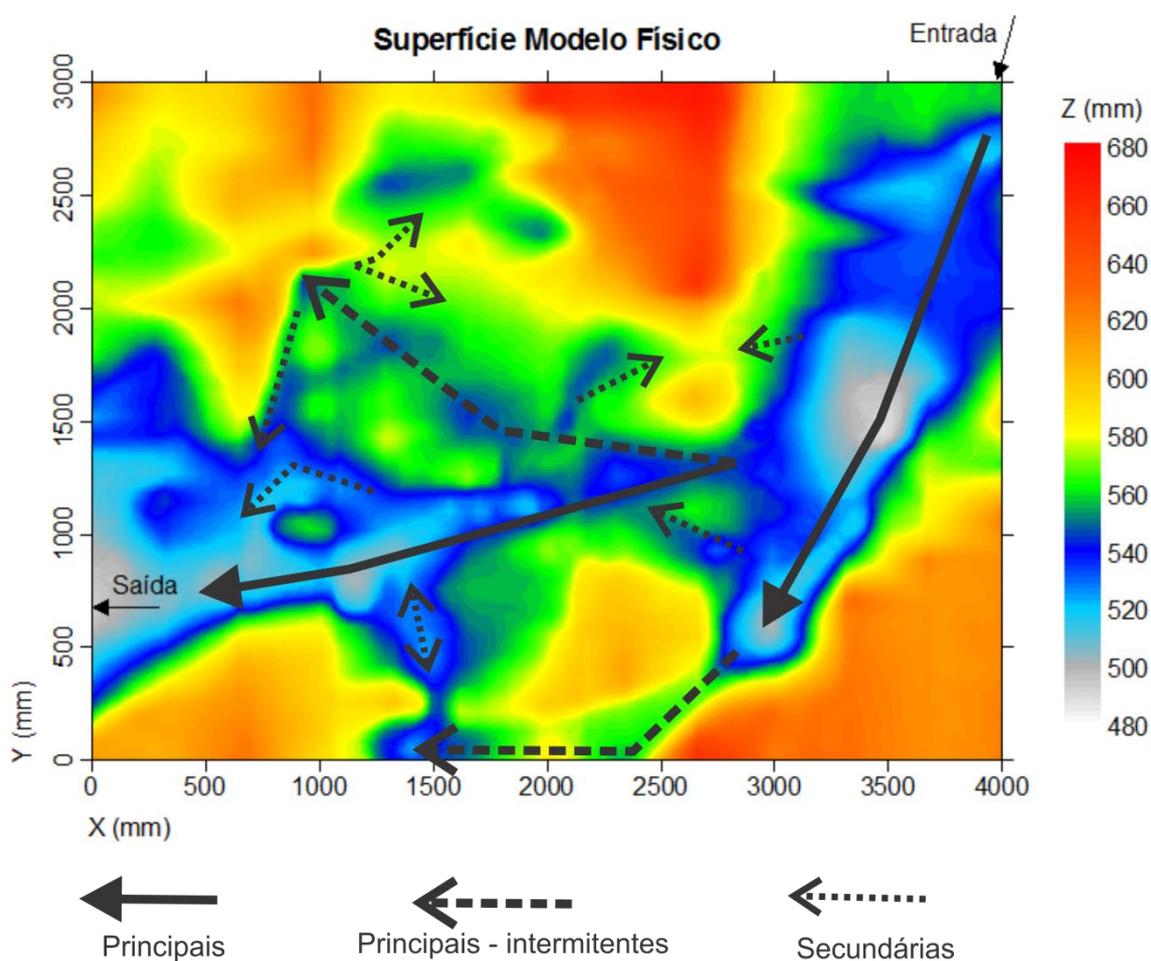


Figura 30: Análise qualitativa das trajetórias observadas no modelo.

A primeira trajetória principal a se formar é a trajetória que se desenvolveu após a entrada da mistura no modelo. Quando ela chegou à região próxima à coordenada $X=3000$ e $Y=500$ (Figura 30), passou a ser intermitente e se formaram outras duas trajetórias (que iniciaram aproximadamente na coordenada $X=2750$ e $Y=1250$): uma principal, no sentido da saída do modelo, e outra intermitente, no sentido crescente do eixo das ordenadas (Y). As trajetórias secundárias se formaram no decorrer da evolução das trajetórias principais e das intermitentes.

7.1.2 Avaliação quantitativa

Foi possível quantificar a velocidade média de avanço do fluxo das trajetórias principais identificadas na análise qualitativa (Figura 30), para os ensaios E2 (efeito da fisiografia do fundo sem depósito pré-formado), E3 (efeito da fisiografia do fundo com o depósito formado após as séries de ensaios E2), E5 (efeito da fisiografia do fundo com o depósito formado após as séries de ensaios E2, E3 e E4) e E6 (efeito da fisiografia do fundo com o depósito formado após as séries de ensaios E2, E3, E4 e E5). A Figura 31 indica as três trajetórias principais para as quais foram calculadas as velocidades médias (V_m) de avanço, que, por sua vez, estão expostas na Figura 32, indicando também a extrapolação das velocidades médias de avanço para o ambiente natural, segundo a escala de velocidades horizontais (E_{vx}), detalhada no ANEXO I deste trabalho. Ainda, ressalta-se que a velocidade de avanço média, discutida nesta seção, representa uma ideia genérica do comportamento do fluxo nas trajetórias identificadas e que análises mais detalhadas seriam pertinentes.

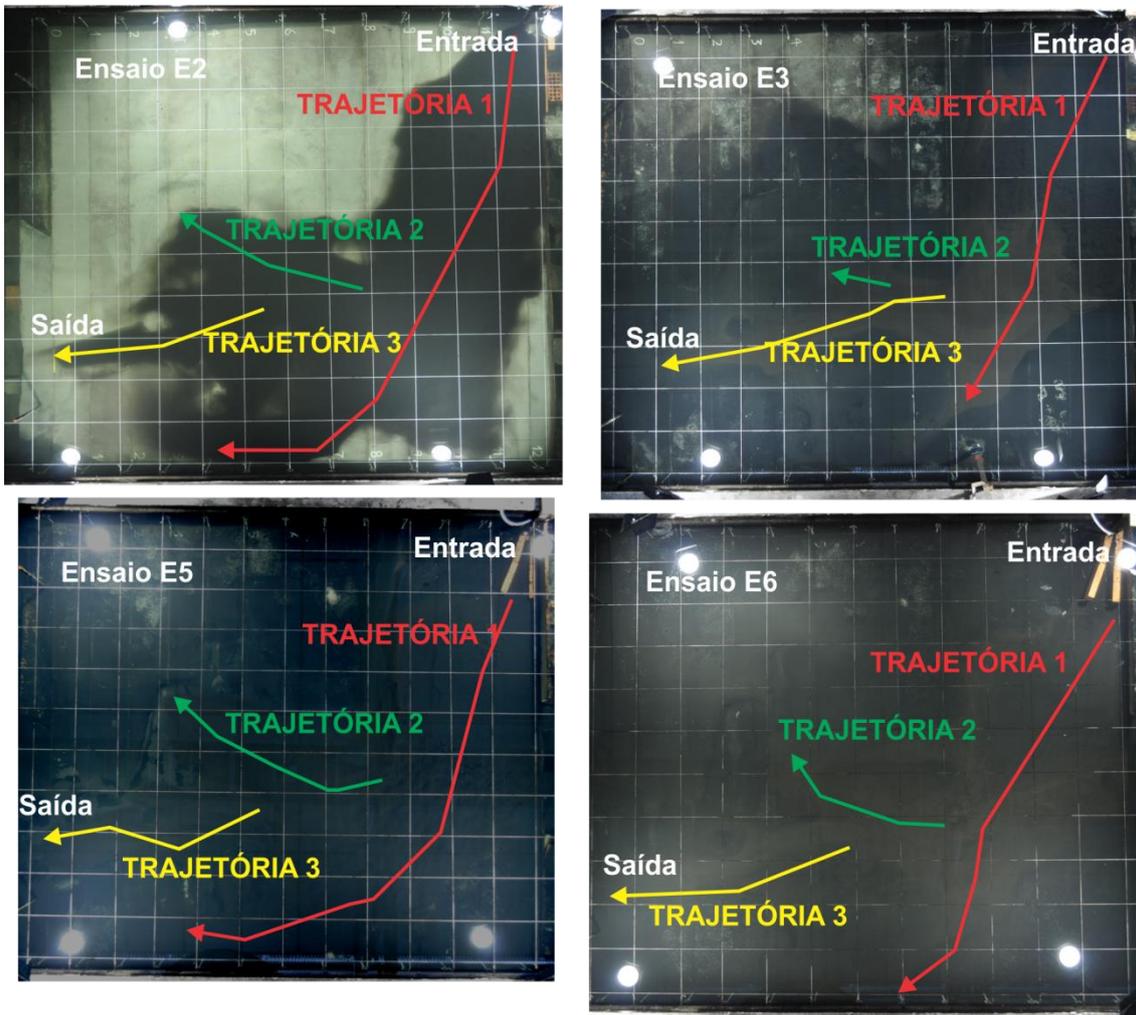


Figura 31: Análise quantitativa das trajetórias. A imagem mostra as trajetórias em que a velocidade média foi quantificada para o primeiro ensaio das séries de ensaios E2, E3, E5 e E6.

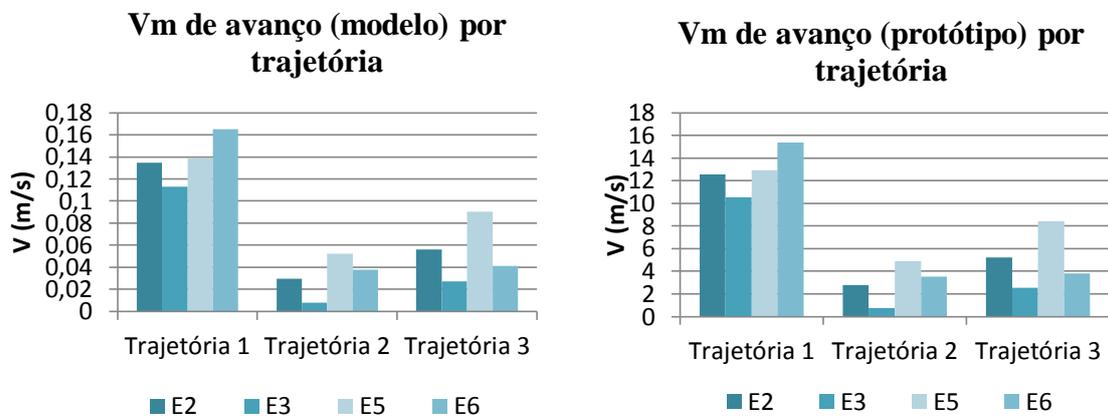


Figura 32: Gráficos de Velocidade média (V_m) de avanço para cada trajetória (1, 2 e 3) e para cada ensaio (E2, E3, E5 e E6) do modelo (esquerda) e do protótipo (direita).

A trajetória 1 se desenvolveu por primeiro, representando a entrada no fluxo no modelo, e se estendeu ao longo da minibacia de montante. As maiores velocidades ocorrem nessa trajetória, apresentando valores médios (no modelo) da ordem de 0,11 m/s no ensaio E3 a 0,16 m/s no ensaio E6. A diferença significativa na velocidade média dessa trajetória, quando comparada com as trajetórias 2 e 3, deve-se ao fato de possuir maior energia pela velocidade de entrada do fluxo no modelo e pelo declive do relevo nesse local.

As trajetórias 2 e 3 começaram a se desenvolver com velocidades mais significativas quando a trajetória 1 atingiu seu ponto mais distante e sua velocidade, portanto, caiu consideravelmente. A trajetória 2 apresentou os menores valores de velocidade média devido à dificuldade da corrente de superar o obstáculo imposto pelo relevo. Já que essa região é relativamente mais alta do que as outras, a corrente segue a trajetória 3 pela qual ganha velocidade devido ao declive do relevo.

A velocidade também sofreu influência da mudança do relevo devido à formação de depósito. Em E2 as velocidades médias são superiores às velocidades em E3, pois a presença do depósito causa maior perda de energia no fluxo devido às interações do fluxo com o substrato. Com o preenchimento parcial da minibacia de montante, notou-se um maior desenvolvimento da trajetória 2, pela diminuição do aclave do relevo na passagem de uma região para a outra.

A vazão, nos momentos iniciais, foi analisada com maior atenção para que pudesse ser relacionada com as velocidades encontradas, já que os dados podem ser sincronizados temporalmente. Portanto, foi calculada a vazão média durante o tempo de análise das imagens e o seu desvio padrão, que permite estimar a variação da vazão em torno da vazão média. Esses valores podem ser visualizados na Tabela 5.

Tabela 5: Tempo de análise para determinação das velocidades médias de avanço, a vazão média (Q_m) e o desvio padrão durante o período.

Ensaio	Tempo de análise (min)	Q média (l/min)	Desvio padrão (l/min)
E2	13,00	2,02	0,24
E3	31,25	1,96	0,16
E5	8,25	2,49	0,30
E6	13,08	2,49	0,16

O desvio padrão apresentado na Tabela 5 se deve ao processo de controle da vazão através do registro acoplado ao medidor de vazão (Figura 16). Nota-se que as vazões maiores coincidiram com as velocidades mais altas apresentadas pelas trajetórias analisadas. Percebe-se também, uma relação entre o tempo de análise e a velocidade da trajetória 3, que determinou o fim da análise quando atingiu o último perfil longitudinal, ou seja, quanto maior a velocidade da trajetória 3, menor foi o tempo de análise.

7.2 Depósito gerado

A análise do depósito se deu através da quantificação do volume, da espessura e da granulometria do depósito gerado.

7.2.1 Topografia e volumes

Os mapas da topografia resultante dos depósitos formados após cada série de ensaios, gerados como descrito na seção 6.5, podem ser visualizados na Figura 33.

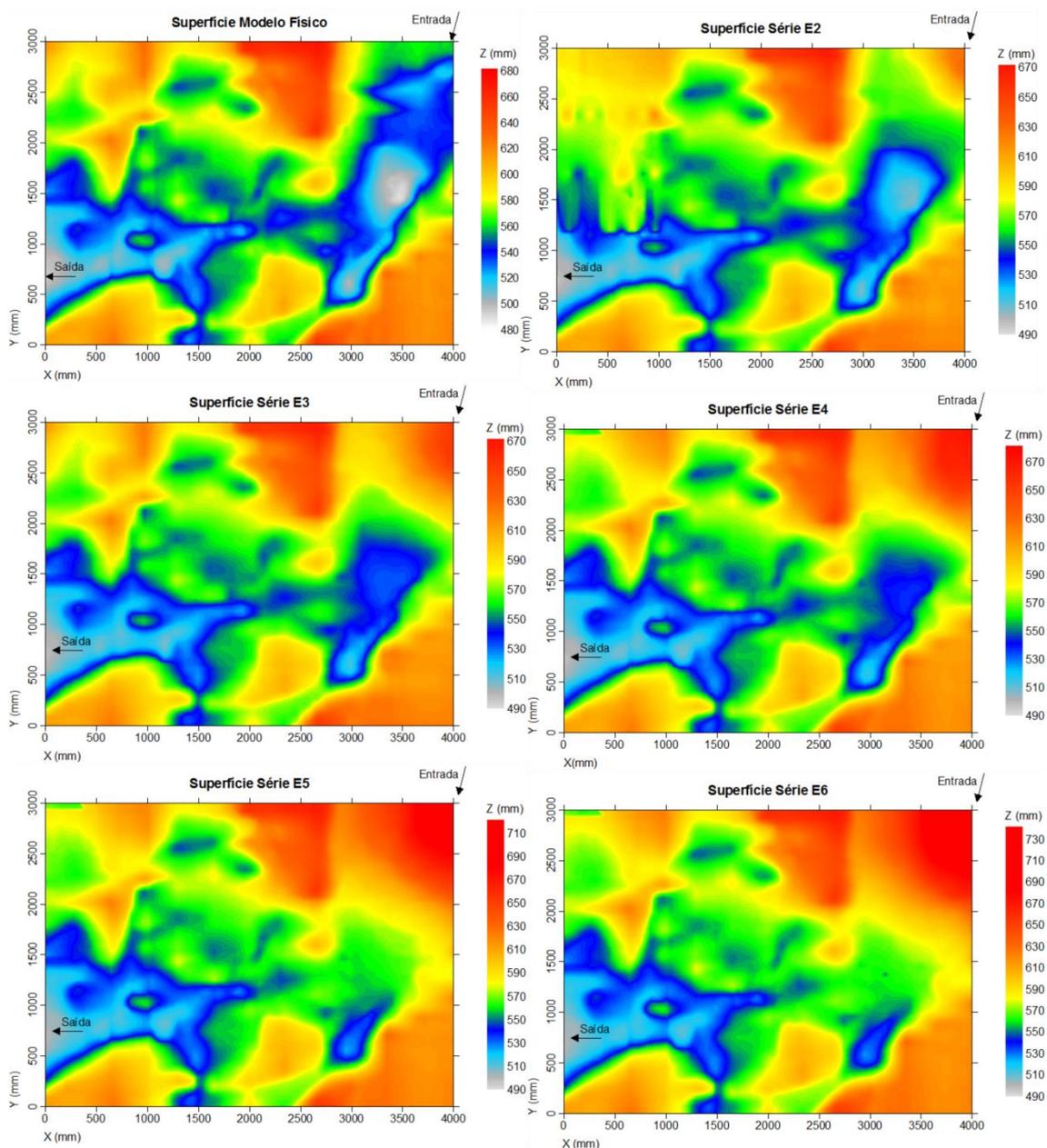


Figura 33: Topografia do modelo e topografia resultante após cada série de ensaios. Cada valor de cota (Z) é representado pela mesma cor em todos os mapas, sendo o limite superior da legenda de cores o valor máximo apresentado.

A evolução da topografia devido à formação de depósito, no decorrer dos experimentos realizados, mostra que houve elevação da base da topografia, principalmente na minibacia de montante, enquanto que, nas minibacias de jusante esta evolução ocorreu em menor quantidade.

Utilizando a função volume do *GRID* do *software* Surfer® 8.0, foi possível estimar o volume correspondente ao depósito gerado após cada série de ensaios (Tabela 6), através do levantamento topográfico representado na Figura 33.

Tabela 6: Volume de depósito formado após cada série de ensaios.

Ensaio	Volume (litros)
E2	22,98
E3	39,88
E4	22,60
E5	58,33
E6	23,15

Através da análise visual apresentada na Figura 33, pode-se inferir que os volumes de depósitos gerados, apresentados na Tabela 6, ocorreram principalmente na zona proximal do modelo, ou seja, próximo da entrada do fluxo no modelo.

Calculou-se a eficiência dos ensaios através da relação entre o volume de depósito formado (Tabela 6) e o volume injetado de sedimentos no modelo, que foi estimado para cada ensaio através do conhecimento do volume de mistura de injetado (Tabela 3) e da concentração volumétrica real média da mistura (Tabela 11 – ANEXO II). A Tabela 7 indica a eficiência de geração de depósito, estimada para cada série de ensaios e, também, a eficiência geral de todos os experimentos realizados, através de uma média.

Tabela 7: Cálculo da eficiência dos ensaios.

Ensaio	Volume injetado (litros)	Volume depósito (litros)	Eficiência (%)
E2	52,34	22,98	43,90
E3	110,13	39,88	36,21
E4	112,57	22,60	20,07
E5	63,68	58,33	91,59
E6	108,00	23,15	21,44
Total/Média	446,73	166,93	37,37

Como se pode notar, a eficiência dos ensaios melhorou após as mudanças metodológicas realizadas na Fase II de ensaios (comparação entre os ensaios da Fase I - E2, E3 e E4 - e E5, da Fase II). A baixa eficiência da série de ensaios E6, deve-se ao volume de sedimentos que vazou para o lado oposto do modelo devido à falha da vedação, como descrito na seção 5.4.3. Ainda, cabe ressaltar, que os valores de eficiência apresentados na Tabela 7 são superestimados, visto que não se tem conhecimento da porosidade do depósito. Por isso, um valor real da eficiência dos

ensaios poderá ser determinado no final do estudo quando o depósito for coletado e quantificado.

7.2.3 Espessuras

Os mapas de espessuras (Figura 35), gerados conforme descrito no item 6.5, permitem visualizar onde ocorreu a formação do depósito e, portanto, acompanhar a evolução dos depocentros (maior espessura) do depósito.

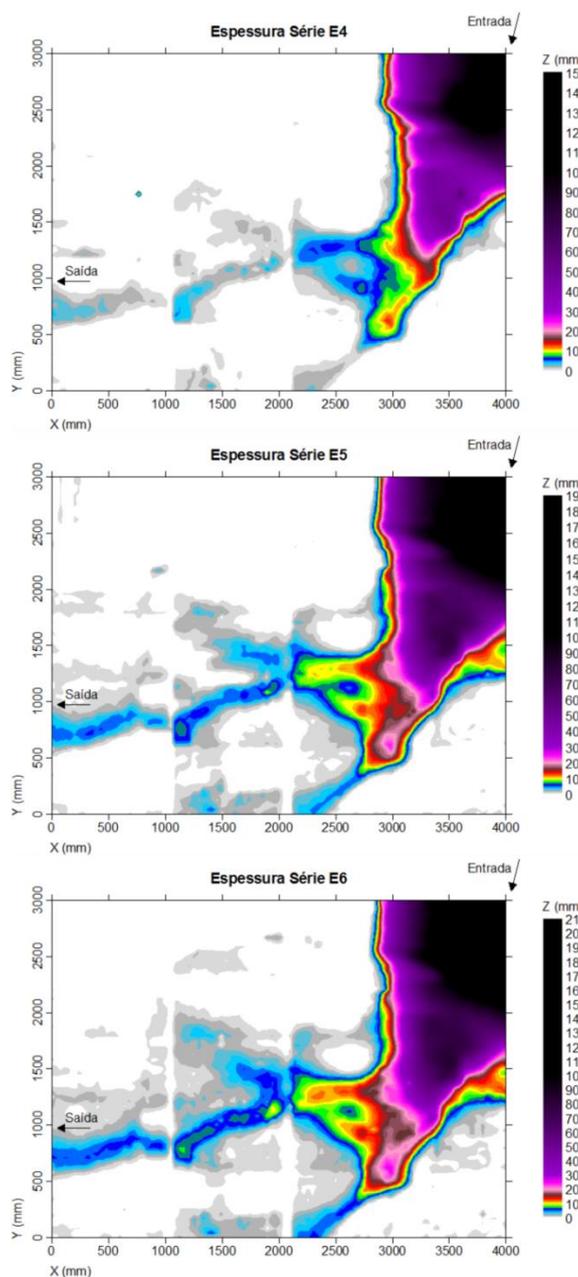


Figura 35: Mapa de espessuras para a série de ensaios E4, E5 e E6. Cada valor de espessura (Z) é representado pela mesma cor em todos os mapas, sendo o limite superior da legenda de cores o valor máximo apresentado.

Nota-se que o depósito se formou principalmente na ocorrência das principais trajetórias identificadas, conforme apresentado na seção 7.1, e que, conforme ocorreu o preenchimento da zona proximal do modelo, as trajetórias principais intermitentes e as trajetórias secundárias ganharam maior importância, ocorrendo geração de depósito também nos locais de ocorrência destas trajetórias. Nota-se, ainda, que inicialmente os depocentros ocorreram na zona proximal, mas que, com o andamento dos experimentos, os depocentros começaram a avançar na direção das trajetórias 2 e 3, ou seja, os sedimentos alcançaram distâncias maiores, devido ao gradual preenchimento das depressões a montante. Após a série de ensaios E6, alguns locais da área principal de interesse (Figura 11) apresentaram mais de 1 cm de espessura de depósito, aproximadamente 1/3 do valor pretendido (3,5 cm).

Através da diferença entre as cotas (Z) que representam as espessuras dos depósitos gerados após a série E5 e a E4 de ensaios, e a série E6 e E5, foi possível gerar um mapa de incremento de espessuras (Figura 36).

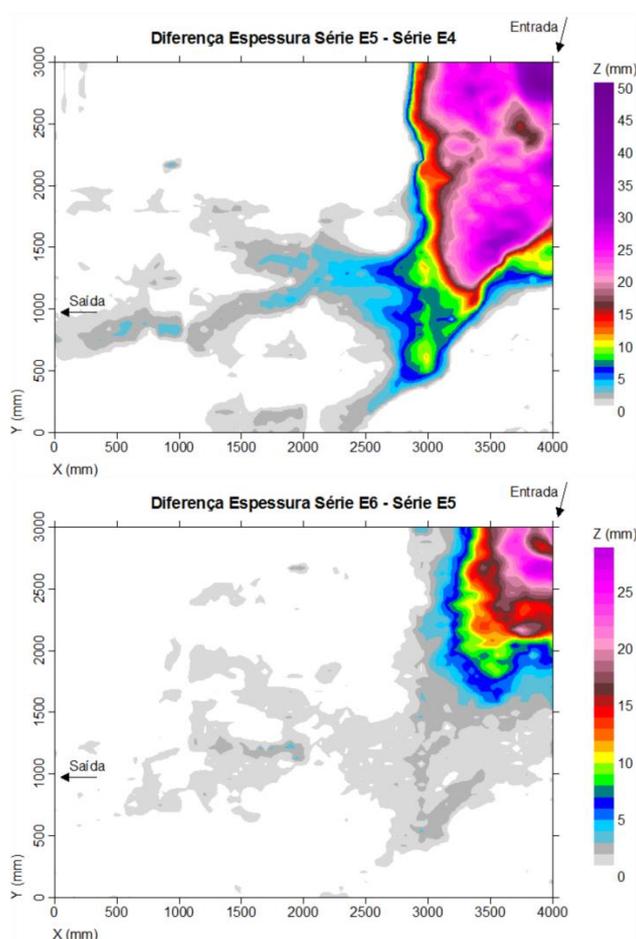


Figura 36: Mapa de diferença de espessuras entre os depósitos formados a série E5 e E4 e entre os depósitos formados após a série E6 e E5. Cada valor de incremento de espessuras (Z) é representado pela mesma cor em todos os mapas, sendo o limite superior da legenda de cores o valor máximo apresentado.

Pode-se verificar que a minibacia a montante, mesmo após a conclusão da série E6 de ensaios, ainda é responsável pela maior parte do acúmulo de sedimentos.

7.2.4 Granulometria e grau de seleção

Os mapas resultantes da representação do diâmetro característico do depósito (D50), confeccionados como descritos na seção 6.6, estão expostos na Figura 37. Estes mapas revelam que valores de D50 maiores ficaram restritos à zona próxima do local de injeção, na minibacia a montante, e que o depósito gerado nas minibacias a jusante foram formados por sedimentos com diâmetro característico mais fino, em todas as séries de ensaios.

Nota-se um gradual aumento de valores de D50 ao longo da trajetória 1, dirigindo-se na direção das trajetórias 2 e 3. Também, verificou-se que, na zona próxima ao local de injeção, o D50 vinha apresentando valores crescentes, analisando os mapas da sequência das séries E3, E4 e E5, mas o mesmo não ocorre da série E2 para a E3 e da série E5 para a E6. Esse resultado pode ser fruto das interferências que ocorreram nessa área (condições de entrada, uso de sifão, instalação do difusor), ou pela maior dificuldade de retirar uma amostra representativa, devido à maior espessura do depósito.

Os mapas resultantes da representação do grau de seleção dos sedimentos que formaram o depósito, confeccionados, também, como descrito no item 6.6 deste trabalho, estão expostos na Figura 38. Observando estes mapas, nota-se que os sedimentos encontrados no depósito são mal selecionados, pertencendo à classe ruim (1 - 2 μm) e muito ruim (2 - 4 μm), segundo FOLK e WARD (1957).

Os grãos melhores selecionados estão presentes na bacia de montante e, também para o grau de seleção, nota-se uma tendência de melhora do mesmo ao longo da trajetória principal 1, avançando para as trajetórias principais 2 e 3 (minibacias a jusante), no decorrer das séries de ensaios realizadas.

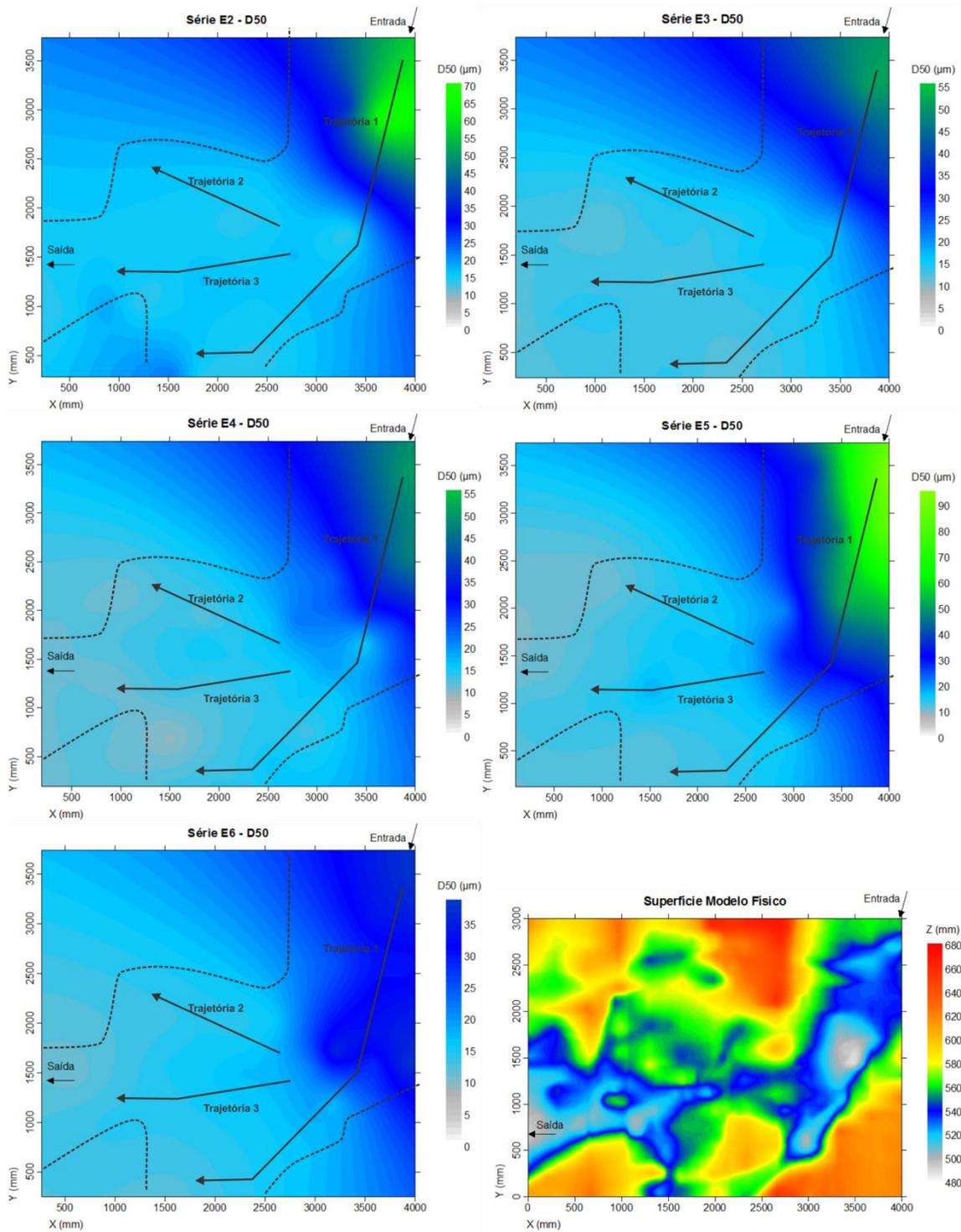


Figura 37: Mapas de representação do diâmetro característico D_{50} dos sedimentos amostrados do depósito, após cada séries de ensaios. O contorno preto tracejado delimita a fronteira aproximada de amostragem do depósito e as setas indicam as trajetórias da corrente. Cada valor de D_{50} é representado pela mesma cor em todos os mapas, sendo o limite superior da legenda de cores o valor máximo apresentado.

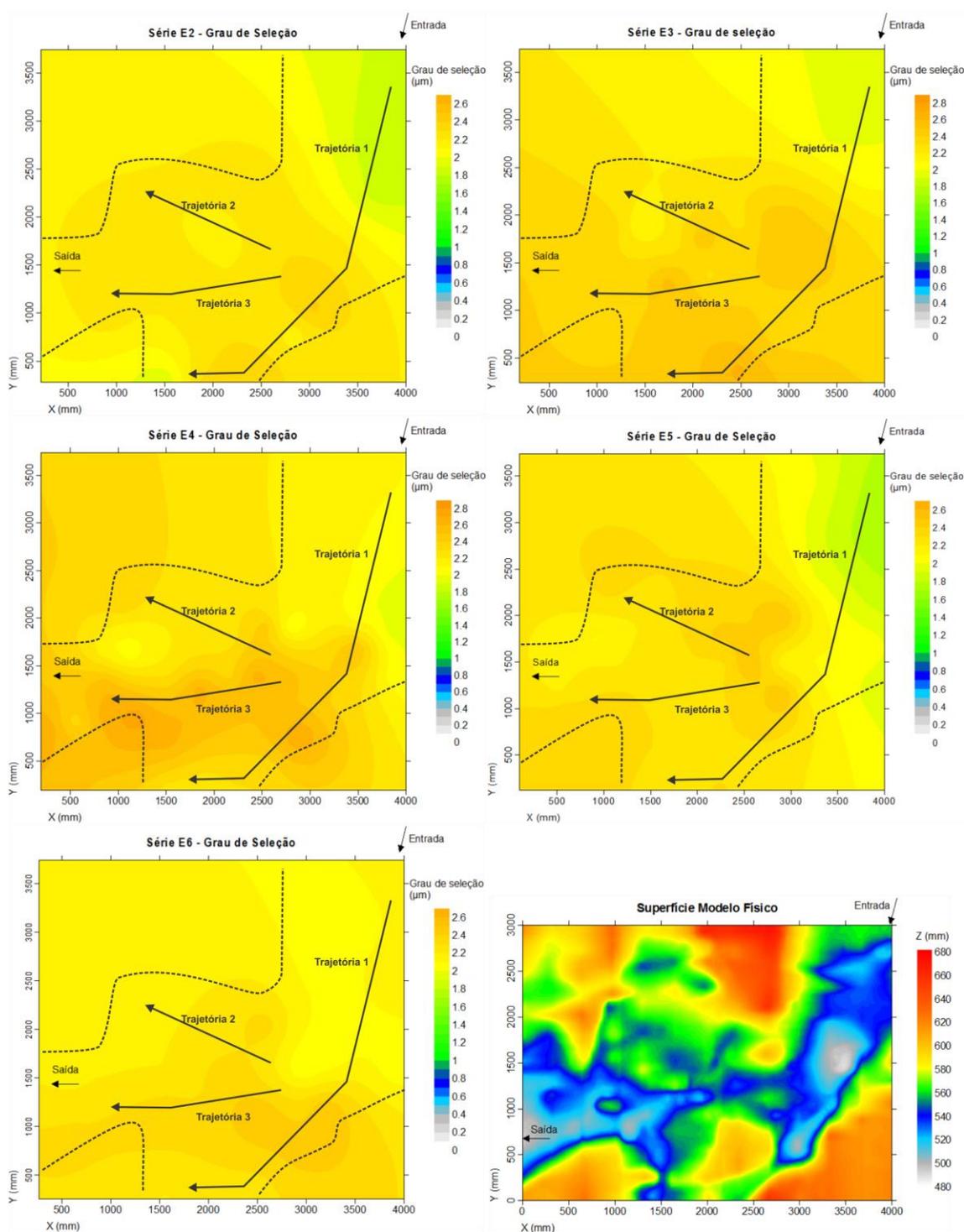


Figura 38: Mapas de representação do grau de seleção dos sedimentos amostrados do depósito, após cada séries de ensaios. O contorno preto tracejado delimita a fronteira aproximada de amostragem do depósito e as setas indicam as trajetórias da corrente. Cada valor de grau de seleção é representado pela mesma cor em todos os mapas, sendo o limite superior da legenda de cores o valor máximo apresentado.

Analisando somente a fração de sedimentos classificada como areia, segundo WENTWORTH (1922), percebe-se que essa fração praticamente não atingiu as minibacias a jusante, durante as fases I e II de ensaios. No entanto, analisando os mapas

de representação da fração areia no modelo (Figura 39), após as séries E5 e E6 de ensaios, percebe-se que os sedimentos arenosos começaram a avançar em direção às minibacias a jusante na direção das trajetórias 2 e 3, similar ao que foi observado para o diâmetro característico D50 e o grau de seleção dos sedimentos.

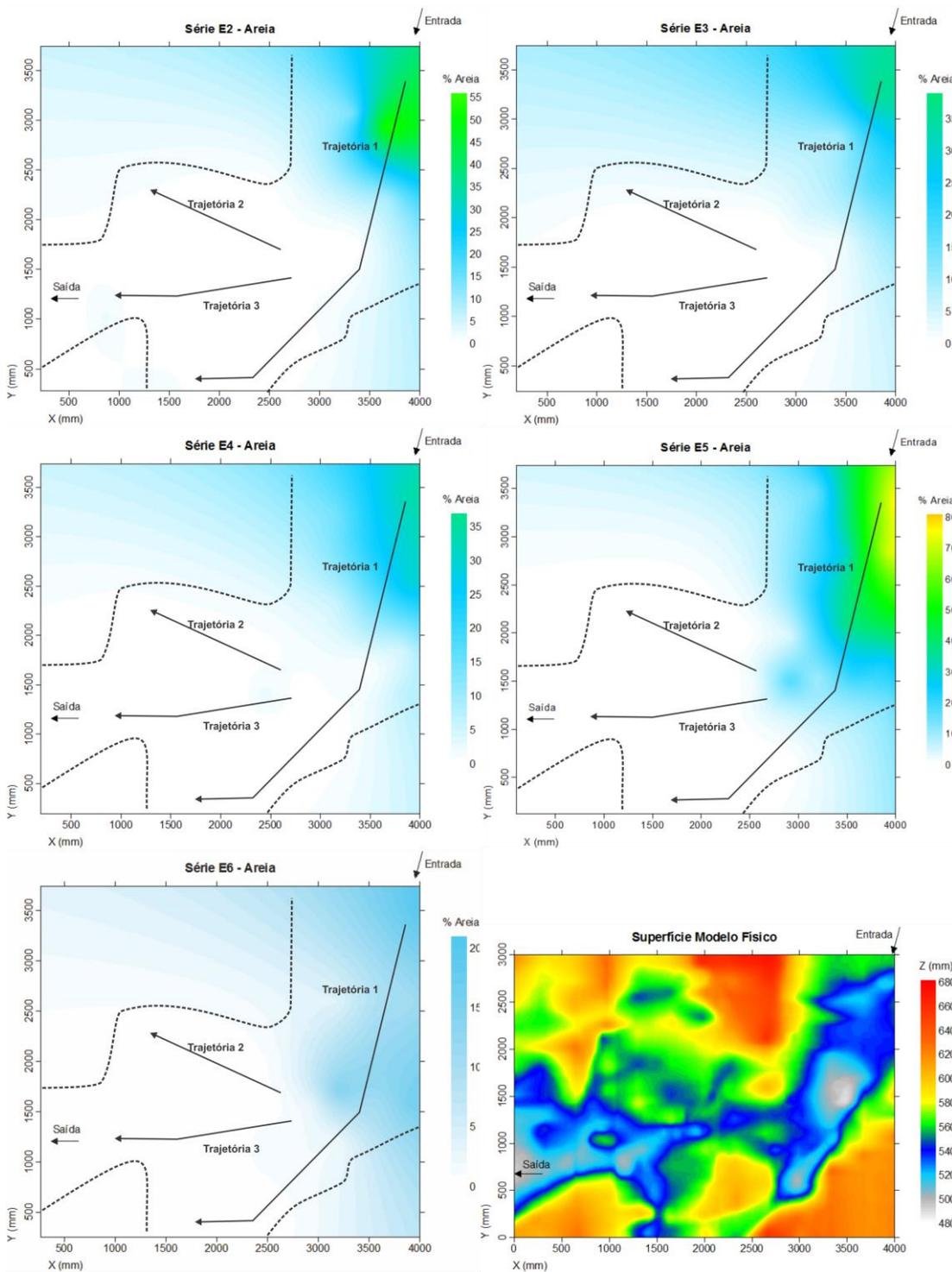


Figura 39: Mapas de representação da fração areia dos sedimentos amostrados do depósito, após cada séries de ensaios. O contorno preto tracejado delimita a fronteira aproximada de amostragem do depósito e as setas indicam as trajetórias da corrente. Cada valor de % de areia é representado pela mesma cor em todos os mapas, sendo o limite superior da legenda de cores o valor máximo apresentado.

7.3 Extrapolação dos dados para o ambiente natural

Os modelos de preenchimento das minibacias encontrados na literatura e apresentados neste trabalho, na seção 4.2, configuram duas fases principais de preenchimento que estão resumidas na Figura 40. A primeira fase se caracteriza pelo preenchimento da primeira minibacia, a montante, através da captura da corrente de densidade na depressão do relevo, seguida da passagem da fração fina do fluxo para a segunda minibacia, a jusante. A segunda fase é caracterizada pela passagem total do fluxo, após o preenchimento da primeira minibacia, ocorrendo, portanto, o preenchimento da minibacia a jusante também com a fração mais grossa de sedimentos presente na corrente.

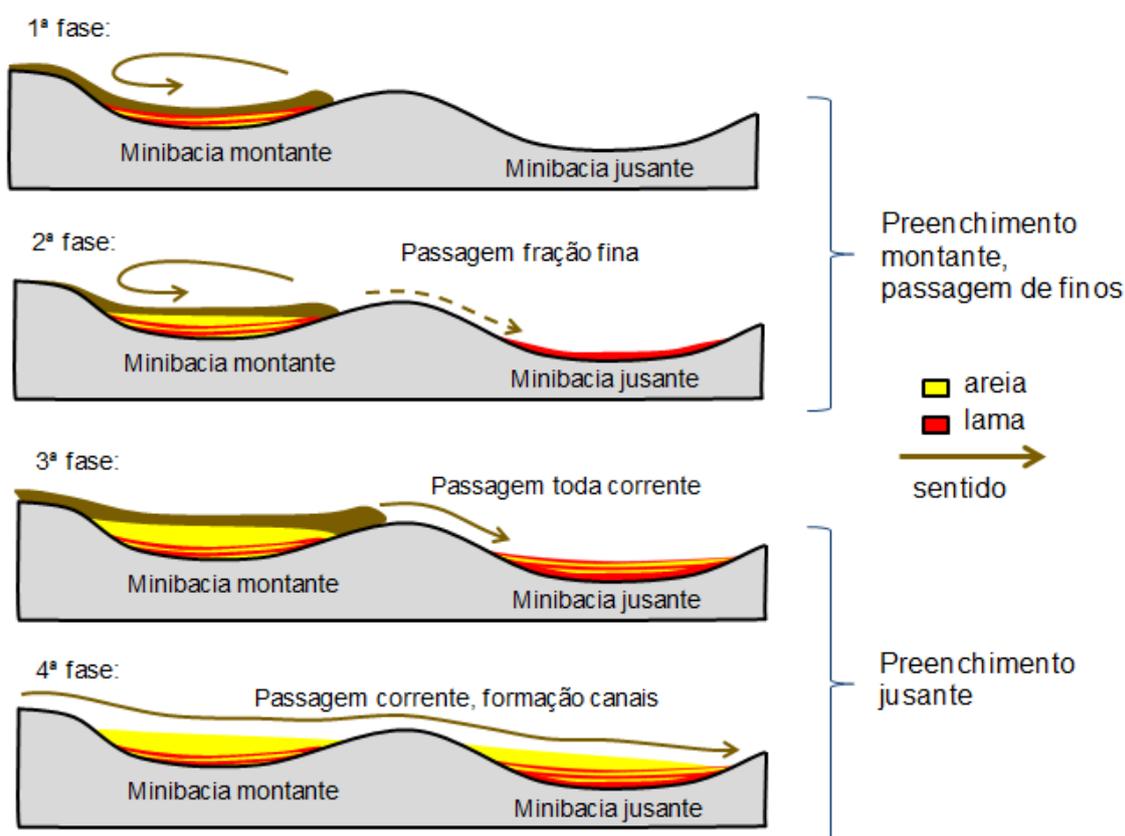


Figura 40: Ilustração do modelo de preenchimento de minibacias.

Comparando os resultados apresentados até o momento com o modelo de preenchimento descrito na literatura na seção 4.2 e ilustrado na Figura 40, podemos afirmar que esse processo, descrito acima, está sendo verificado no modelo físico estudado nesta pesquisa.

Na Fase II de ensaios o preenchimento da minibacia a montante foi mais significativo, com a passagem da fração de sedimentos finos para jusante. Já na Fase III, é possível observar o preenchimento quase completo dessa região, o que causa o início da passagem direta da corrente para jusante, bem como, o avanço da fração de sedimentos classificados como areia para a região intermediária do modelo, a qual é a área de interesse (Figura 11). Esse resultado permite inferir que a escolha da entrada 1 para representar a entrada de sedimentos no modelo é uma condição plausível com o que ocorreu no ambiente natural, não significando que a entrada 2 não tenha participado do processo de preenchimento das minibacias.

8 CONCLUSÕES

Com a realização deste trabalho foi possível responder a questão de pesquisa proposta e conclui-se que é possível simular os processos dinâmicos de preenchimento natural das minibacias, no entanto, as limitações apresentadas no início deste trabalho se constituem importantes fatores na modelagem aplicada e sugere-se um estudo aprofundado sobre o aporte sedimentar das correntes de densidade existentes na natureza, de forma a avaliar mais precisamente a vazão utilizada nestes experimentos.

Os experimentos realizados permitiram acompanhar uma evolução do preenchimento das minibacias na área de estudo similar àquelas encontradas na literatura e compatíveis com as características naturais da área estudada. Ainda, através da análise dos dados observados e coletados foi possível contribuir para o entendimento sobre o transporte e deposição de sedimentos por correntes de densidade nas minibacias.

Pode-se concluir também que, referente à metodologia adotada para os experimentos desenvolvidos nesta pesquisa:

- A análise crítica do processo metodológico aplicado, com base no volume de depósito gerado, contribuiu para algumas modificações importantes ao longo do desenvolvimento dos ensaios. A principal questão metodológica foi a entrada da corrente no modelo de modo com que o material mais grosso, subitamente depositado na entrada da injeção, não obstruísse o fluxo. Esse problema foi parcialmente solucionado com as alterações realizadas na Fase II, as quais foram: a instalação do

difusor, a diminuição da fração de carvão 205 na composição da mistura e a interrupção do uso do sifão hidráulico com alta frequência.

- Conclui-se também que, em ensaios longos, como os propostos para essa modelagem, o ideal é a realização de (séries de) ensaios com injeção de no máximo 1100 litros de mistura, para o melhor controle do que está acontecendo durante o ensaio, já que, após a injeção de aproximadamente 1000 litros a água fica turva de tal modo que não é possível visualizar abaixo da linha d'água do tanque.

- Sugere-se a investigação dos motivos que geraram valores de concentrações volumétricas tão variados do início para o fim dos ensaios, bem como em relação ao valor pretendido de 5%.

No que se refere ao mecanismo de preenchimento e de deposição das minibacias estudadas:

-A análise da dinâmica de preenchimento das minibacias, através da análise qualitativa e quantitativa, sugere que os depósitos de montante e de jusante estão conectados através das trajetórias principais e das trajetórias intermitentes, bem como o depósito gerado a jusante foi conectado pelas trajetórias secundárias.

-Os resultados referentes às espessuras do depósito revelam que durante as Fases II e III ocorreu principalmente o preenchimento da minibacia a montante. Nas minibacias a jusante ocorreu a formação de depósito concomitantemente com o preenchimento dessa primeira minibacia, inicialmente por onde passa a trajetória principal 3 e depois também nas trajetórias principais intermitentes e secundárias, formado apenas pela fração de sedimentos mais fina.

Por fim, reitera-se a necessidade de continuação dos experimentos de forma a confirmar se as características das correntes simuladas, bem como o depósito gerado, estão de acordo com os modelos de registro geológico inferidos para a área de interesse no protótipo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAAS, J. H. Processes and products of turbidity currents entering soft muddy substrates - Appendix: upscaling of experimental to natural turbidity currents. **Geology**, v. 42, n. 5, p. 371-374, May 2014.
- BEAUBOUEF, R. T.; ABREU, V. Basin 4 of the Brazos-Trinity slope system: anatomy of the terminal portion of an intra-slope lowstand systems tract. **Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions**, v. 56, p. 39-49, 2006.
- BLOTT, S. J. GRADISTAT: A grain Size Distribution and Statics Package for the Analysis of Unconsolidated Sediments. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 26, p. 1237-1248, October 2001.
- BOUMA, A. H. **Sedimentology of some flysch deposits**: a graphic approach to facies interpretation. Amsterdam: Elsevier, 1962.
- DEL REY, A. C. **Simulação física de Processos Gravitacionais Subaquosos**: uma aproximação para o entendimento da sedimentação marinha profunda. Tese de Doutorado (Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geociências. Porto Alegre, RS - BR. 2006.
- FOLK, R. L.; WARD, W. C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 27, p. 3-26, 1957.
- LAMB, M. P. et al. Surging versus continuous turbidity currents: flow dynamics and deposits in an experimental intraslope minibasin. **Journal of Sedimentary Research**, SEMP (Society for Sedimentary Geology), v. 74, n. 1, p. 148-155, January 2004.
- LOWE, D. R. Sediment gravity flows: II. Depositional models with special reference to the deposits of high density currents. **Journal of Sedimentary Petrology**, Tulsa, v. 52, p. 279-297, 1982.
- MANICA, R. **Modelagem física de correntes de densidade não conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada**. Porto Alegre, RS - BR. Dissertação de Mestrado, PPGRHSA/IPH/UFRGS, 2002.

- MANICA, R. **Geração de correntes de turbidez de alta densidade:** condicionantes hidráulicos e deposicionais. Porto Alegre, RS - BR. Tese de doutorado, PPRRHS/IPH/UFRGS, 2009.
- MIDDLETON, G. V. Sediment deposition from turbidity currents. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 21, p. 89-114, 1993.
- MIDDLETON, G. V. Small-scale models of turbidity currents and the criterion for auto-suspension. **Journal of Sedimentary Petrology**, Tulsa, v. 36, n. 1, p. 202-208, 1966.
- MOTTA, V. F. **Curso de Teoria da Semelhança.** Porto Alegre: Editora da UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), 1972.
- MULDER, T.; ALEXANDER, J. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. **Sedimentology**, Oxford, v. 48, p. 269-299, 2001.
- Núcleo de Estudos em Correntes de Densidade (NECOD) - IPH/UFRGS. **Relatório Técnico:** Uso de modelos físicos e a escolha de materiais granulares não coesivos para o estudo de modelagem física de correntes de densidade. Porto Alegre, RS - BR, 2005.
- PRESS, F. et al. **Para Entender a Terra.** 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- SIMPSON, J. E. Gravity currents in the laboratory, atmosphere, and ocean. **Annual Reviews of Fluid Mechanics**, v. 14, p. 213-234, 1982.
- SIMPSON, J. E. **Gravity Currents in the environment and the laboratory.** 2nd ed. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- SINCLAIR, H. D.; TOMASSO, M. Depositional evolution of confined turbidite basins. **Journal of Sedimentary Research**, v. 72, p. 451-456, 2002.
- VIOLET, J. et al. Experiment on turbidity currents and their deposits in a model 3D subsiding minibasin. **Journal of Sedimentary Research**, SEMP (Society for Sedimentary Geology), v. 75, p. 820-834, 2005.
- WENTWORTH, C. K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. **The Journal of Geology**, Chicago, v. 30, p. 377-392, 1922.
- WINKER, C. D. High-Resolution Seismic Stratigraphy of a Late Pleistocene Submarine Fan Ponded by Salt-Withdrawal Mini-Basins on the Gulf of Mexico Continental Slope. **Offshore Technology Conference**, Houston, 6-9 May 1998. 619-628.

ANEXO I

Adimensionalização das correntes de densidade

Cálculos baseados em BAAS *et al.* (2014) e NECOD (2005):

O número adimensional utilizado na modelagem física de correntes de densidade é o número de Richardson ou Froude densimétrico, expresso por:

$$Fr' = \frac{V}{\sqrt{g' \cdot H}}$$

Onde V é a velocidade do fluxo (m/s), H é a espessura da corrente (m) e g' é a aceleração da gravidade reduzida pela relação expressa por:

$$g' = g \frac{\rho_a - \rho_c}{\rho_a} = g(\beta_c - 1)$$

Onde:

g = aceleração da gravidade (m/s²)

ρ_a = massa específica do fluido ambiente (kg/m³)

ρ_c = massa específica da corrente (kg/m³)

β_c = densidade da corrente

A massa específica da corrente (mistura de água e sedimentos) é dada por:

$$\rho_c = \rho_a + (\rho_s - \rho_a)Cv$$

Onde:

ρ_a = massa específica da água (kg/m³)

ρ_s = massa específica do sedimento (kg/m³)

Cv = concentração em volume do sedimento

Sendo assim, a aceleração reduzida pode ser expressa por:

$$g' = g(\beta_s - 1)Cv$$

A semelhança entre o modelo e o protótipo se dá, igualando o número de Fr' no modelo (Fr'_m) com o Fr' no protótipo (Fr'_p):

$$\frac{Vm^2}{g'm.Hm} = \frac{Vp^2}{g'p.Hp}$$

$$\frac{Vm^2}{gm.Hm(\beta s - 1)m Cvm} = \frac{Vp^2}{gp.Hp(\beta s - 1)p Cvp}$$

Considerando $gm = gp$ e chamando $\aleph = \frac{(\beta s - 1)m}{(\beta s - 1)p}$, temos:

$$EVx = \sqrt{\frac{Vm^2}{Vp^2}} = \sqrt{\aleph \frac{Cvm Hm}{Cvp Hp}} = \sqrt{\aleph ECvEy}$$

Adotando $Cvm = Cvp$, temos:

$$EVx = \sqrt{\aleph Ey}$$

No NECOD tradicionalmente usa-se carvão mineral para simular os sedimentos. MANICA (2002) testou diferentes materiais para simular a areia e concluiu que o carvão mineral é adequado por possuir características físicas (como a massa específica) que permitem reproduzir, em escala, as características hidrodinâmicas da areia. Logo, $\beta m = 1,19$. Na natureza, o sedimento é a areia, logo $\beta p = 2,65$, assim, tem-se que:

$$\aleph = \frac{(\beta s - 1)m}{(\beta s - 1)p} = \frac{(1,19 - 1)m}{(2,65 - 1)p} = 0,1152$$

$$EVx = \sqrt{\aleph Ey} = \sqrt{0,1152 \cdot 1/1000} = 0,01073$$

Assim, uma corrente com velocidade de 0,02 m/s no modelo representa um fluxo na natureza se deslocando com velocidade de 6,7 km/h.

Também é importante calcular a escala de tempo (Et) e de vazões (EQ) entre o modelo e o protótipo. A escala de tempo pode ser deduzida através da relação entre a escala de distâncias horizontais e a escala de velocidades horizontais:

$$EVx = \frac{Ex}{Et}$$

$$Et = \frac{Ex}{EVx} = \frac{1/3000}{0,01073} = 0,03106$$

E a escala de vazões:

$$EQ = \frac{Ex^2 \cdot Ey}{Et} = \frac{(1/3000)^2 \cdot (1/1000)}{0,03106} = 3,5770E - 09$$

Em simulações físicas é necessário que o sedimento utilizado represente em escala o sedimento encontrado na natureza que se deseja simular. A escala de velocidades verticais (EV_y) é utilizada para determinar qual faixa de diâmetro de grãos de carvão mineral deve ser utilizada nos experimentos. A escala de velocidades verticais pode ser determinada de forma semelhante à escala de velocidades horizontais:

$$EV_y = \frac{E_y}{E_t} = \frac{1/1000}{0,01073} = 0,03219$$

A escala granulométrica de sedimentos, proposta por WENTWORTH (1922), está descrita na Tabela 8.

Tabela 8 Escala granulométrica (adaptado de WENTWORTH, 1922), onde D é o diâmetro em mm.

D (mm)	Nomenclatura
2	areia muito grossa
1	areia grossa
0,5	areia média
0,25	areia fina
0,125	areia muito fina
0,0625	silte grosso
0,031	silte médio
0,0156	silte fino
0,0078	silte muito fino
0,0039	argila

Como dito anteriormente, no protótipo, a areia possui tamanho de grãos principalmente na faixa de $0,5 < D < 0,25$, ou seja, areia média, contudo as outras faixas granulométricas também estão presentes. A velocidade de queda dos sedimentos pode ser calculada através da Fórmula de Rubey, calibrada para materiais não coesivos, expressa por:

$$\omega = -4 \frac{k_2 v}{k_1 D} + \sqrt{\left(4 \frac{k_2 v}{k_1 D}\right)^2 + \frac{4}{3k_1} \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} g \cdot D}$$

Onde:

k_1 e k_2 = constantes determinadas experimentalmente (2 e 3 respectivamente)

v = viscosidade cinemática (cm^2/s)

D = diâmetro (m)

ρ_s = massa específica do sedimento (kg/m^3)

ρ_a = massa específica do fluido ambiente (kg/m^3)

g = aceleração da gravidade (m/s^2)

Através da fórmula de Rubey, calculou-se a velocidade de queda para a faixa granulométrica da areia média, areia fina e areia muito fina (V_{yp}) e aplicando a escala de velocidades verticais pode-se encontrar a velocidade de queda dos sedimentos no modelo (V_{ym}). Através da função *solver* do Excel, encontrou-se que a faixa granulométrica representante das velocidades encontradas é 0,1410 e 0,0328 mm, ou seja, está inserida na faixa de transição entre areia fina e areia muito fina até silte grosso (Tabela 9).

Tabela 9: Velocidades verticais (V_y) para a faixa granulométrica areia média, fina e muito fina para o protótipo (p) e para o modelo (m), com o diâmetro (d) correspondente.

dp (mm)	Vyp (cm/s)	Vym(cm/s)	dm (mm)
0,5	0,0624	0,0020	0,1410
0,45	0,0576	0,0019	0,1353
0,4	0,0524	0,0017	0,1288
0,35	0,0466	0,0015	0,1214
0,3	0,0403	0,0013	0,1126
0,25	0,0332	0,0011	0,1021
0,2	0,0253	0,0008	0,0890
0,15	0,0167	0,0005	0,0722
0,125	0,0124	0,0004	0,0623
0,1	0,0084	0,0003	0,0511
0,075	0,0049	0,0002	0,0391
0,0625	0,0034	0,0001	0,0328

Nota-se que a areia média no protótipo é representada por areia fina/areia muito fina no modelo, que a areia fina no protótipo é representada por areia muito fina no modelo e, por fim, que a areia muito fina no protótipo é representada pelo silte grosso no modelo.

ANEXO II

Tabelas referentes a dados dos experimentos realizados

Tabela 10: Valores de vazão média e desvio padrão para cada ensaio.

FASE	SÉRIE	ENSAIO	Tempo de ensaio (min)	Vazão média (l/min)	Desvio Padrão (l/min)
FASE II	SÉRIE E2	E2	34	2,01	0,18
		E2_B	123	2,02	0,25
		E2_C	93	2,03	0,18
		E2_D	107	1,91	0,32
		E2_E	215	1,92	0,31
	SÉRIE E3	E3	244	1,95	0,24
		E3_B	241	1,97	0,31
		E3_C	111	1,96	0,38
		E3_D	148	2,00	0,40
		E3_E	122	1,94	0,43
		E3_F	243	1,91	0,55
	SÉRIE E4	E4	153	1,9	0,28
		E4_B	193	1,83	0,61
		E4_C	215	1,95	0,35
		E4_D	97	1,9	0,53
E4_E		488	1,91	0,51	
FASE III	SÉRIE E5	E5	167	2,41	0,62
		E5_B	42	2,25	0,72
		E5_C	88	2,11	1,03
		E5_D	182	2,19	1,01
	SÉRIE E6	E6	94	2,37	0,41
		E6_B	182	2,35	0,48
		E6_C	246	2,41	0,32
		E6_D	396	2,43	0,44
Tempo total de ensaio (h)			70,4		

Tabela 11: Concentração volumétrica (Cv) real das amostras da mistura de injeção, retiradas no início e no fim do ensaio, o desvio padrão e a média para cada ensaio.

FASE	SÉRIE	ENSAIO	Cv real Início (%)	Cv real Fim (%)	Desvio Padrão (%)	Cv real médio (%)	
FASE II	SÉRIE E2	E2	4,92	4,13	0,56	4,52	
		E2_B	4,94	1,90	2,15	3,42	
		E2_C	3,80	4,71	0,65	4,25	
		E2_D	5,97	5,20	0,54	5,58	
		E2_E	5,43	4,87	0,40	5,15	
	SÉRIE E3	E3	4,61	5,04	0,31	4,83	
		E3_B	5,79	5,04	0,53	5,42	
		E3_C	5,53	4,89	0,45	5,21	
		E3_D	5,48	3,89	1,12	4,69	
		E3_E	5,94	-	-	5,94	
		E3_F	-	4,79	-	4,79	
	SÉRIE E4	E4	5,35	4,78	0,41	5,06	
		E4_B	5,75	4,61	0,81	5,18	
		E4_C	5,00	4,59	0,29	4,80	
		E4_D	6,12	4,99	0,80	5,56	
		E4_E	5,66	4,89	0,54	5,28	
	FASE III	SÉRIE E5	E5	7,01	4,01	2,12	5,51
			E5_B	5,62	5,95	0,23	5,79
E5_C			6,83	7,91	0,76	7,37	
E5_D			5,76	5,49	0,20	5,63	
SÉRIE E6		E6	4,90	2,96	1,37	3,93	
		E6_B	3,78	3,67	0,08	3,73	
		E6_C	4,57	7,20	1,86	5,89	
		E6_D	6,44	3,64	1,98	5,04	

Tabela 12: Valores de diâmetro característico D50 das amostras coletadas da mistura de injeção, no início e no fim de cada ensaio.

FASE	SÉRIE	ENSAIO	D50 Início (μm)	D50 Fim (μm)
FASE II	SÉRIE E2	E2	54,50	49,48
		E2_B	53,05	33,00
		E2_C	49,72	53,75
		E2_D	52,40	55,79
		E2_E	58,76	54,32
	SÉRIE E3	E3	47,62	46,35
		E3_B	54,49	50,60
		E3_C	90,31	51,11
		E3_D	50,78	46,03
		E3_E	53,43	-
		E3_F	-	50,33
	SÉRIE E4	E4	53,81	46,64
		E4_B	57,82	52,93
		E4_C	58,69	54,27
		E4_D	50,05	52,06
E4_E		52,78	52,48	
FASE III	SÉRIE E5	E5	54,50	49,48
		E5_B	53,05	33,00
		E5_C	49,22	51,42
		E5_D	57,57	54,09
	SÉRIE E6	E6	50,41	50,29
		E6_B	55,25	51,88
		E6_C	46,85	53,72
		E6_D	51,56	38,14

Tabela 13: Valores da fração de sedimentos representados pela classe areia, nas amostras coletadas da mistura de injeção, no início e no fim de cada ensaio.

FASE	SÉRIE	ENSAIO	Fração areias Início (%)	Fração areias Fim (%)
FASE II	SÉRIE E2	E2	43,67	35,25
		E2_B	40,71	16,90
		E2_C	37,26	41,74
		E2_D	39,29	44,77
		E2_E	46,92	42,30
	SÉRIE E3	E3	35,07	33,10
		E3_B	42,44	36,95
		E3_C	69,24	38,73
		E3_D	38,10	33,00
		E3_E	41,28	-
		E3_F	-	37,17
	SÉRIE E4	E4	41,49	32,26
		E4_B	45,76	40,22
		E4_C	47,14	42,20
		E4_D	36,17	39,23
E4_E		40,46	40,10	
FASE III	SÉRIE E5	E5	43,67	35,25
		E5_B	40,71	16,90
		E5_C	37,14	38,68
		E5_D	46,61	42,15
	SÉRIE E6	E6	37,40	36,45
		E6_B	42,96	38,51
		E6_C	32,34	41,73
		E6_D	37,71	22,86