

## 5 Simulação Física

O comportamento da corrente de turbidez foi avaliado segundo as observações dos experimentos conduzidos juntamente com o Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade, NECOD, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. O objetivo desses ensaios foi determinar os parâmetros hidráulicos e posicionais necessários para validação do modelo numérico proposto.

As correntes de turbidez são fluxos induzidos pela ação da gravidade sobre misturas de fluido e sedimentos, devido à diferença de densidade entre a mistura e o fluido ambiente. Assim, os ensaios consistem basicamente em liberar uma mistura composta de água e partículas sólidas em suspensão, *corrente de turbidez*, em um tanque cheio de água, *fluido ambiente*.

As simulações físicas foram constituídas por dois experimentos, variando-se apenas o diâmetro dos sedimentos, conforme Tabela 1. As correntes de turbidez têm sido ensaiadas pelo NECDO, no IPH, utilizando-se vazões que variam de 30 a 100 l/min, o que seria valores razoáveis para a vazão desse tipo de correntes. Assim, adotou-se neste trabalho a vazão de 40 l/min para todos os ensaios físicos. Conforme já mencionado anteriormente, a concentração das correntes de turbidez de alta densidade chega a atingir valores da ordem de 30% em volume. Entretanto, pretende-se simular neste trabalho corrente de turbidez de baixa densidade. Dessa forma, adoto-se o valor de 2% em volume para a concentração das partículas.

Ensiao	Diâmetro (µm)	Conc. em volume (%)	Vazão (l/min)
1	100	2%	40
2	150	2%	40

Tabela 1 - Características dos ensaios

Dessa forma, têm-se basicamente dois tipos de fluxo contínuo de material. O primeiro composto por sedimentos com diâmetro de aproximadamente 100 µm e concentração de 2% em volume. E o segundo com sedimentos de aproximadamente 150 µm e concentração de 2% em volume. O material

granular presente nas misturas foi composto por microesferas de vidro com massa específica de  $2600 \text{ kg/m}^3$ . O protocolo de ensaio prevê ainda que a mistura seja liberada no tanque como um fluxo contínuo durante 5 min e vazão média de 40 l/min.

### 5.1. Metodologia

A Figura 30 mostra a geometria do tanque utilizado nos ensaios. A parte externa do tanque é construída em concreto armado e alvenaria. A plataforma de ensaio é formada por duas rampas de policarbonato, com ajuste de declividade de  $0^\circ$  a  $4^\circ$ . Com isso, a inclinação da plataforma pode ser ajustada, de tal forma que cada protocolo de ensaio especificado seja devidamente atendido.

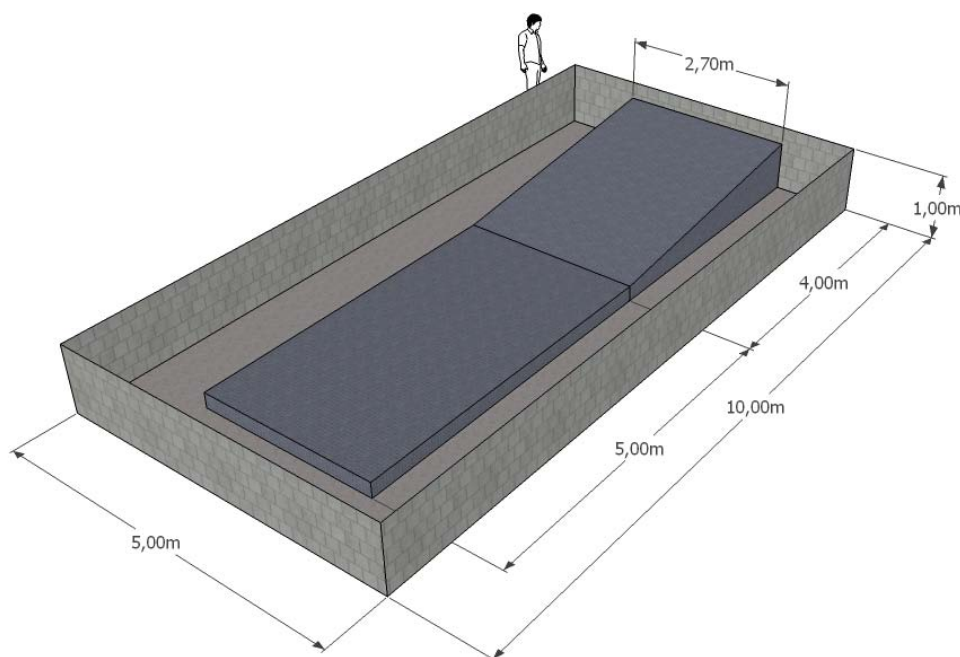


Figura 30 - Esquema do tanque utilizado nos ensaios

Nos ensaios deste trabalho adotou-se uma declividade de  $4^\circ$ , com uma projeção de 4,0 m, e uma plataforma com 5,0 m de comprimento.

Conectado a entrada do tanque há um difusor, Figura 31, que é ligado a dois reservatórios elevados, Figura 32, onde fica armazenado o fluido que será liberado no tanque durante o ensaio. O armazenamento do fluido mais denso nesses reservatórios elevados permite uma alimentação constante do tanque, da mesma forma que se tem nos casos de fluxos gravitacionais iniciados por fluxo contínuo.

O fluido nos reservatórios é composto por uma mistura de água e grãos e a homogeneização dessa mistura é garantida por um agitador eletromecânico posicionado dentro dos reservatórios. Esses grãos são constituídos por microesferas de vidro.

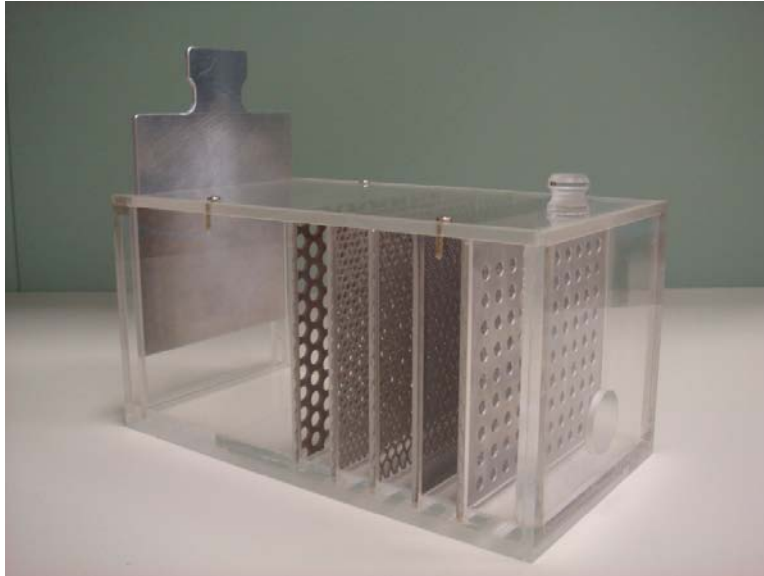


Figura 31 – Difusor acrílico usado para garantir a uniformidade do fluxo durante os ensaios

O difusor é uma caixa acrílica com 12 cm de largura, 11 cm de altura e 22,3 cm de comprimento. A função principal desse difusor, além de garantir a uniformidade do fluxo de entrada, é fornecer um controle adequado de todas as condições de contorno necessárias para a simulação computacional da corrente de turbidez.

Na parte frontal do difusor acrílico há uma comporta regulável, que serve para ajustar a altura exata da abertura por onde a mistura armazenada nos reservatórios adentra o tanque, logo, sabendo-se a altura e a largura da abertura do difusor em cada ensaio, é possível calcular a velocidade e a altura inicial do fluxo que serão usados como parâmetros de entrada do modelo numérico. Na parte traseira do difusor há uma abertura de 25 mm por onde a tubulação que sai dos reservatórios, onde se encontra a mistura, se conecta ao difusor.

Uma série de telas dentro do difusor é disposta de forma a garantir a uniformização do fluxo antes que este seja liberado no tanque. Por fim, tem-se a tampa superior que não permite que a mistura dentro do difusor entre em contato com o fluxo ambiente antes do lançamento no tanque.



Figura 32 - Reservatório elevado, utilizados para armazenar a mistura

Em seguida o tanque é cheio com água e todo o equipamento de iluminação e apoio é montado. É feito também o posicionamento da câmera de vídeo sobre o tanque, para que todo o ensaio possa ser registrado.

Concluída a etapa de preparação inicia-se então o ensaio propriamente dito. Um registro na tubulação é aberto e o fluido contido no reservatório é liberado no tanque durante aproximadamente 5 min com uma vazão média de 40 l/min, vazão esta monitorada por um computador conectado na tubulação durante todo o ensaio, gerando com isso um histórico de vazões, Figura 33.

Três amostras da mistura são retiradas do reservatório durante o decorrer do ensaio para verificar se a concentração da mistura está conforme o protocolo especificado. As amostras são coletadas nos tempos 0 min, 2,5 min e 5 min.



Figura 33 - Medidor de vazões conectado a entrada da tubulação

Após aproximadamente cinco minutos o registro é fechado, e com isso o fluido deixa de ser liberado no tanque. Depois de um período de decantação das partículas suspensas no tanque, o mesmo é esvaziado lentamente, com velocidades muito baixas, de modo que não ocorra nenhum tipo de perturbação, sejam elas ravinamentos ou mesmo destruição parcial do depósito.

A última etapa do ensaio consiste no levantamento da superfície resultante do depósito gerado pelos sedimentos durante os ensaios no tanque. Utilizou-se para essa tarefa um medidor de distância à laser, acoplado a um sistema de movimentação. O equipamento utilizado é um medidor de distância à laser de alta precisão, Figura 34, destinado à avaliação de distâncias, dimensões, posicionamentos relativo e comparação de cotas, realizando uma medida dinâmica, pontual ou contínua, sem contato físico entre o medidor e o objeto alvo, significando portanto maior precisão, durabilidade e rapidez (Manica, 2002). O laser mede as coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  de toda superfície deposicional e as armazena em um arquivo texto, com isso pode-se reconstituir cada superfície de deposição formada.

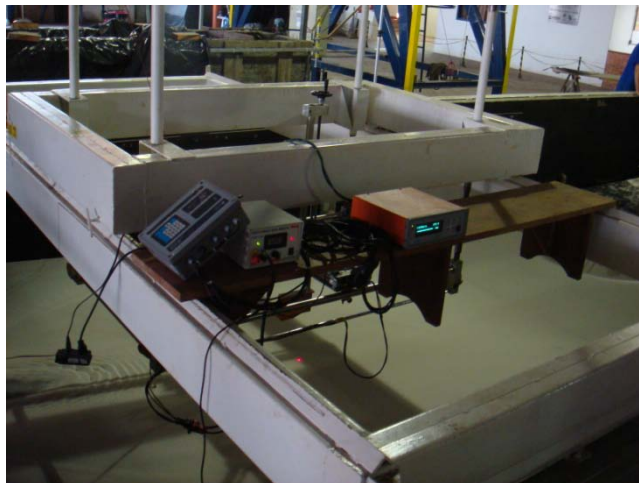


Figura 34 - Medição da espessura dos depósitos com a utilização de laser

## 5.2. Resultados

Nesta seção serão mostrados os resultados dos ensaios realizados. Conforme mencionado anteriormente, todos os experimentos tiveram duração de 5 min e vazão média de 40 l/min. A concentração da mistura utilizada em cada ensaio foi determinada pela média aritmética das amostras da mistura coletadas nos tempos 0 min, 2,5 min e 5,0 min de cada experimento.

### 5.2.1. Evolução

A Figura 35 mostra a evolução do ensaio com sedimentos de 100  $\mu\text{m}$  e concentração de 1,91%. As imagens na Figura 35 foram obtidas nos seguintes instantes de tempo: 10 s, 60 s, 120 s, 180 s, 240 s e 300 s, respectivamente.

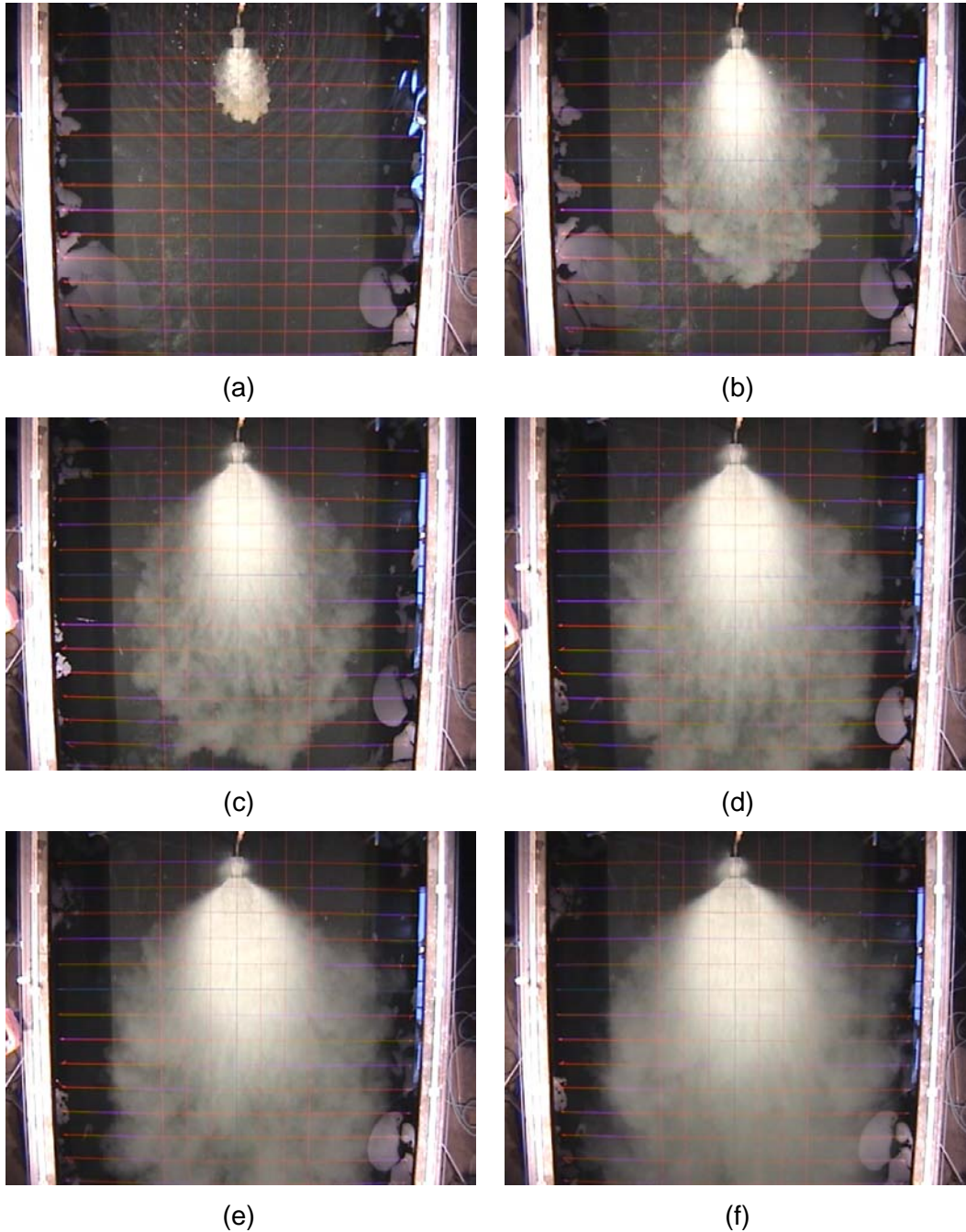


Figura 35 – Evolução da corrente de turbidez com concentração de 1,91% em volume e sedimentos de 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro, nos seguintes tempos: (a) 10 s, (b) 60 s, (c) 120 s, (d) 180 s, (e) 240 s e (f) 300 s

A Figura 36 mostra a evolução do ensaio com sedimentos de 150  $\mu\text{m}$  e concentração de 1,85%. As imagens na Figura 36 foram obtidas nos seguintes instantes de tempo: 10 s, 60 s, 120 s, 180 s, 240 s e 300 s, respectivamente.

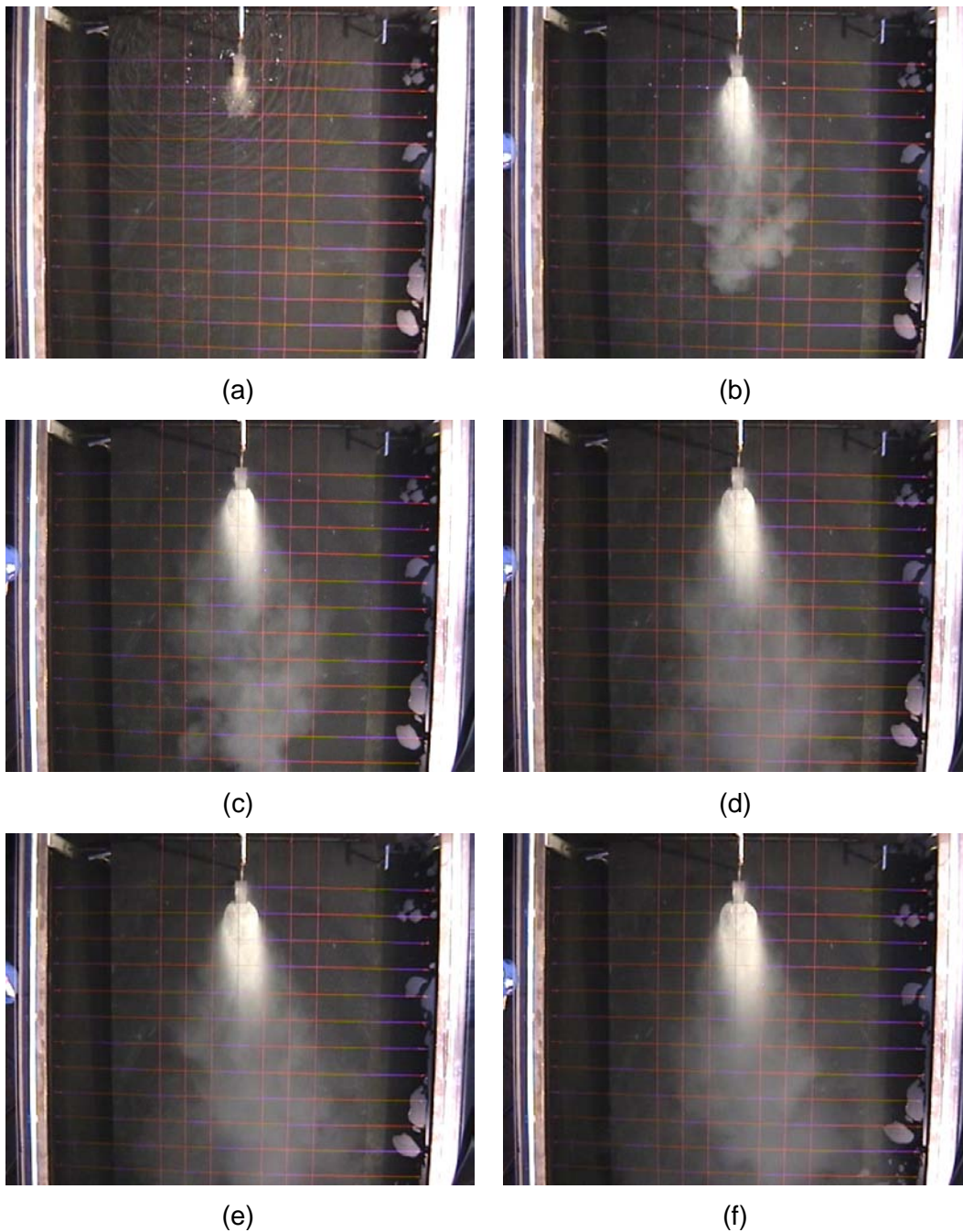


Figura 36 – Evolução da corrente de turbidez com concentração de 1,85% em volume e sedimentos de 150  $\mu\text{m}$  de diâmetro, nos seguintes tempos: (a) 10 s, (b) 60 s, (c) 120 s, (d) 180 s, (e) 240 s e (f) 300 s

Nota-se, Figura 35b e Figura 36b, que à medida que se aumenta o diâmetro dos grãos presente na mistura, ocorre uma conseqüente diminuição no espalhamento da mistura dentro do tanque. Isso ocorre porque a partícula é mantida em suspensão devido à turbulência do fluxo, ou seja, quando a velocidade de queda da partícula é menor que a velocidade do fluxo a partícula é carregada pela corrente por mais tempo. Assim, como a velocidade de deposição da partícula é diretamente proporcional ao diâmetro do grão em suspensão, tem-se uma deposição mais rápida das partículas na mistura com maior diâmetro de grão suspenso, em conseqüência, um menor espalhamento da mistura dentro do tanque, conforme verificado.

### 5.2.2. Deposição

Nas Figura 37 e Figura 38, nota-se que a maior parte do depósito concentrou-se a uma distância de 33 cm da saída do difusor e espalhou-se por um raio de aproximadamente 34 cm, além desta distância houve apenas uma fina camada de depósitos. Na saída do difusor formou-se ainda um *vale*, ou seja, uma zona de menor deposição, com comprimento de 15 cm e raio de 18 cm. A altura máxima de depósitos atingida foi de aproximadamente 4,0 cm. Observa-se ainda, a formação de lobos oriundos da sobreposição de camadas subseqüentes de depósitos.

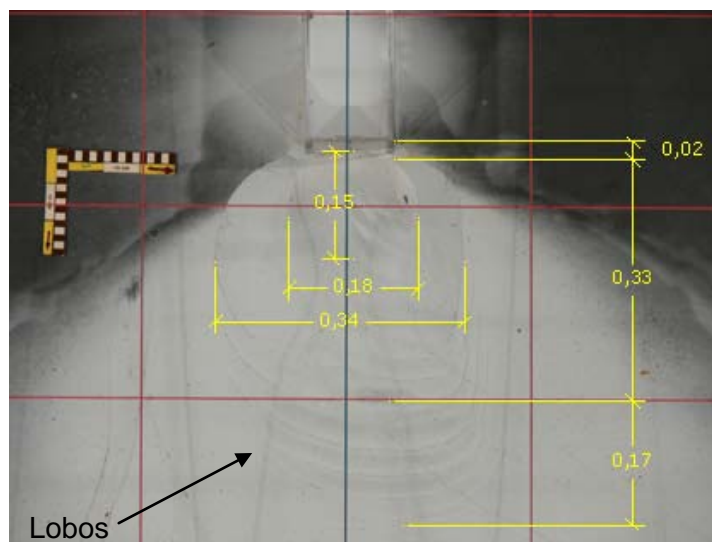


Figura 37 – Geometria da deposição gerada pela corrente de turbidez com concentração de 1,91% em volume e sedimentos de 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro, medidas em metros.





(b)

Figura 38 – Vista lateral da deposição gerada pela corrente de turbidez com concentração de 1,91% em volume e sedimentos de 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro. (a) Geometria da deposição.

As Figura 39 e Figura 40 referem-se ao ensaio com sedimentos de 150  $\mu\text{m}$  e concentração de 1,85% em volume. O comprimento do lóbulo formado pela deposição das partículas foi de 32 cm e o raio de espalhamento foi de 42 cm. O comprimento da zona de menor deposição formada na saída do difusor foi de 17 cm e o raio de espalhamento foi de 15 cm. Os leques formados possuem um comprimento de 19 cm de extensão. Nota-se pela imagem que não houve a formação de uma camada fina de deposição fora dessa área de deposição.

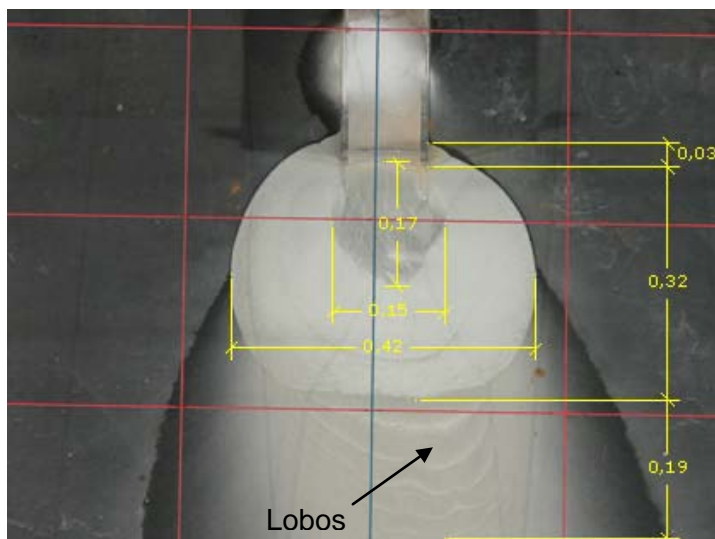


Figura 39 – Geometria da deposição gerada pela corrente de turbidez com concentração de 1,85% em volume e sedimentos de 150  $\mu\text{m}$ , medidas em metros.



(b)

Figura 40 – Vista lateral da deposição gerada pela corrente de turbidez com concentração de 1,85% em volume e sedimentos de 150  $\mu\text{m}$ , medidas em metros.

A Tabela 2 resume os resultados das deposições, conforme apresentada na Figura 37 e na Figura 39, obtidas pelas simulações físicas dos dois tipos de corrente de turbidez realizadas, o primeiro com sedimentos de 100  $\mu\text{m}$  e o segundo 150  $\mu\text{m}$ . A altura máxima na tabela foi obtida na parte frontal do lobo formado pelas partículas.

Ensaio	Sedimento ( $\mu\text{m}$ )	Conc. em volume (%)	Geometria da Deposição				
			L (cm)	R (cm)	l (cm)	r (cm)	$e_{\text{max}}$ (mm)
1	100	1,91%	33	34	15	18	40,66
2	150	1,85%	32	42	17	15	63,66

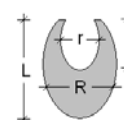
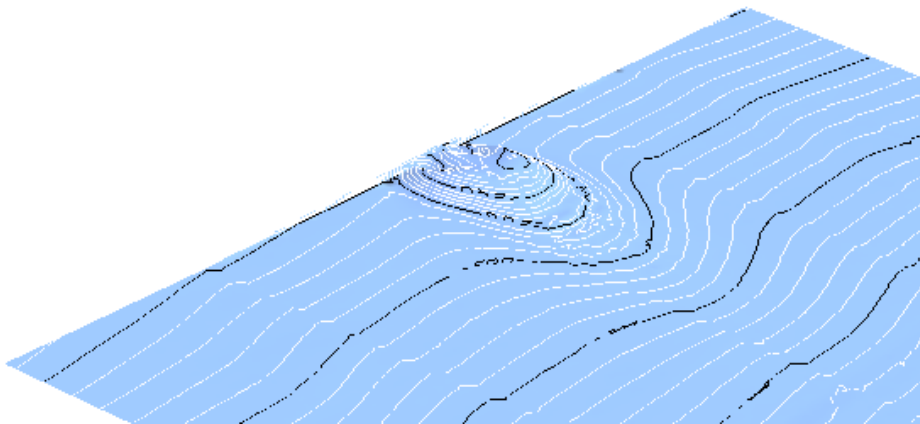


Tabela 2 - Resumo dos resultados dos ensaios

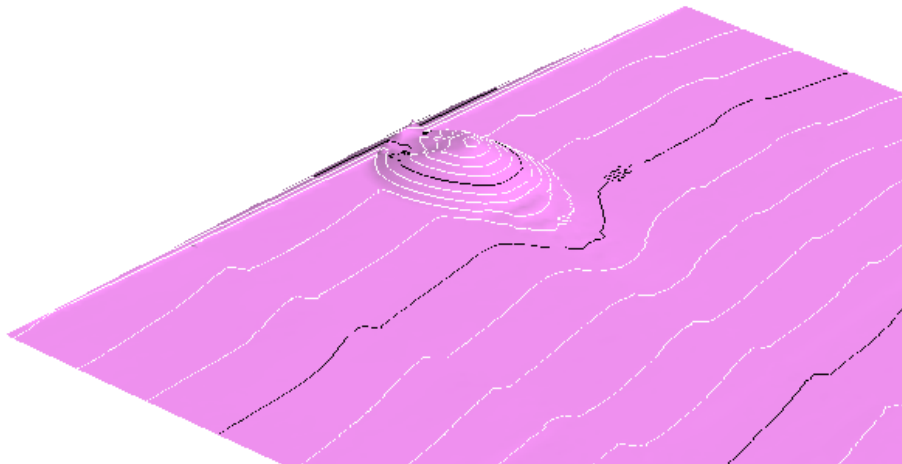
Com o arquivo de saída fornecido pelo medidor de distâncias à laser pode-se a reconstruir a superfície deposicional gerada em cada experimento, Figura 41. O arquivo de saída do medidor de distância fornece a coordenada  $z$  da superfície deposicional já descontada a coordenada da plataforma de ensaio, ou seja, a coordenada  $z$  já é a espessura de depósito em cada ponto. As

superfícies da Figura 41 foram geradas utilizando-se o software *GoCad*® da *Paradigm Software*.

Com as superfícies geradas pelo *GoCad*® é possível avaliar com precisão onde estão localizados os pontos de altura máxima e mínima, bem como, o valor de um dado ponto em uma posição qualquer da malha.



(a)



(b)

Figura 41 – Reconstrução das superfícies dos ensaios com o software *GoCad*®.

(a) Ensaio 1 (b) Ensaio 2