

6 Simulação Numérica

Para que o modelo proposto seja válido é necessário realizar a verificação dos resultados obtidos pela simulação numérica. Para isso, serão comparados os resultados obtidos nas simulações físicas conduzidas no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul com a simulação numérica realizada com o aplicativo *Turb3D*, que foi desenvolvido com base no modelo matemático apresentado neste trabalho.

Dessa forma, esse capítulo tem por objetivo apresentar uma validação, com base nas observações e dados coletados nos ensaios físicos, para o modelo numérico de correntes de turbidez proposto. No entanto, cabe ressaltar que essa comparação será feita levando em consideração apenas o resultado final da deposição e a geometria do fluxo durante a evolução da corrente, ou seja, apenas a parâmetros geométricos serão avaliados. Não foram obtidos dados referentes às velocidades e alturas do fluxo durante os ensaios físicos, esse estudo foi foco da pesquisa conduzida por Bitton (2008), que comparou os dados das velocidades provenientes das simulações físicas e numéricas.

Para a realização da simulação numérica com o programa *Turb3D* é necessário fornecer inicialmente um arquivo contendo as coordenadas x, y, z da superfície inicial, em seguida todos os demais parâmetros podem ser ajustados por meio da interface gráfica. O arquivo texto contendo as coordenadas da superfície inicial foi criado com base na geometria do tanque de ensaio, adotou-se uma malha com abertura de 0,05 m, com 55 nós na direção x e 181 nós na direção y para ambos os ensaios.

A superfície inicial de deposição, ou seja, as coordenadas x, y, z da plataforma do tanque de ensaio foram lidas pelo medidor de distância à laser antes do ensaio com o intuito de se calcular a rugosidade da superfície a ser utilizada na simulação numérica. Entretanto, a precisão do equipamento utilizado é de décimos de milímetro e de acordo com a literatura consultada, a rugosidade média absoluta do policarbonato é cerca de 0,001 mm, ou seja, o uso dos pontos coletados pelo laser para determinação da rugosidade da superfície tornou-se inadequado, sendo adotado o valor de 0,001 mm, que é a rugosidade média absoluta do policarbonato dado pela literatura.

Devido à insuficiência de dados e de estudos específicos sobre o tema, também não foi possível determinar a altura fracionária da camada limite turbulenta. Logo, adotou-se o valor de 0,05 sugerido por Kneller *et al* (1999) em seus estudos sobre correntes de densidade.

Outro ponto importante nas simulações é quanto ao critério de estabilidade empregado. A natureza explícita da integração temporal, usada neste trabalho, impõe restrições aos valores permitidos de Δt . Assim, como critério de estabilidade nas simulações numéricas, adotou-se usar o valor de 0,5 para a constante de Courant, que seria um valor mais conservativo segundo Osher & Fedkiw (2002).

6.1. Simulação do Ensaio 1

A previsão da evolução e da deposição do ensaio 1, corrente de turbidez com sedimentos de 100 μm , foi realizada com os mesmos parâmetros especificados para o ensaio físico, ou seja, vazão de entrada de 40 l/min, densidade do ambiente de 1000 kg/m^3 , densidade dos sedimentos de 2600 kg/m^3 e concentração de 1,91% em volume.

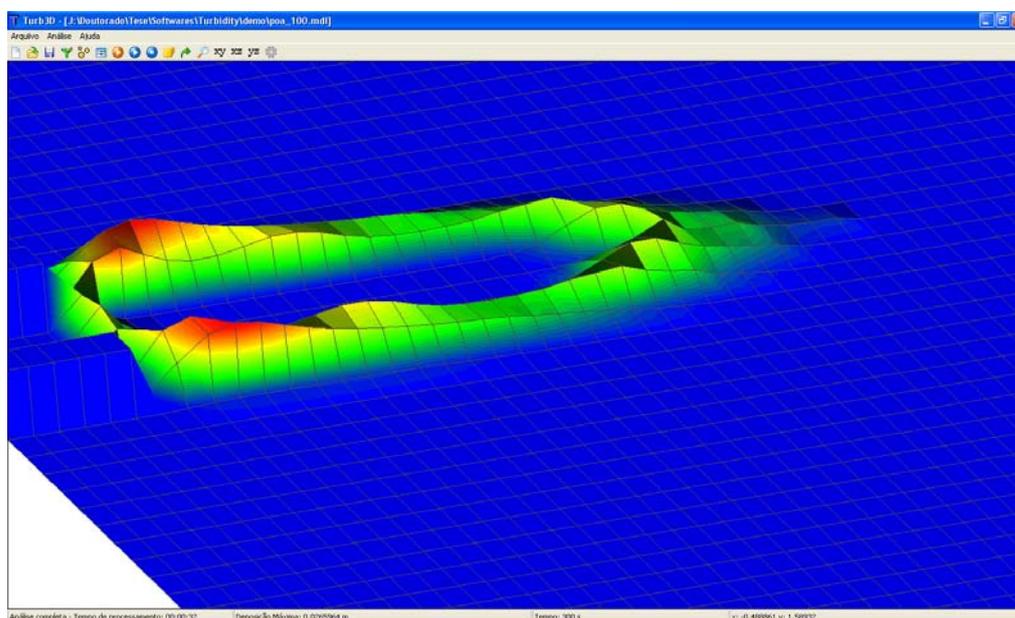


Figura 42 – Tela do programa Turb3D mostrando a deposição ocorrida para uma corrente de turbidez com sedimentos de 100 μm . Escala da deposição aumentada em 3 vezes

A Figura 42 mostra a tela do programa *Turb3D* com o resultado final da simulação. Pode-se visualizar o depósito gerado pela corrente após a análise, onde a cor vermelha representa maiores espessuras e a cor azul representa

menores espessuras. A escala de cores mostra que a deposição dos sedimentos originou um lobo, nota-se a formação de uma zona de menor deposição logo a frente do canal. O lobo tem comprimento de 1,55 m e a largura de 0,50 m. A altura máxima da deposição é de 26,60 mm.

Na Figura 43 apresenta-se a evolução da corrente nos instantes de tempo 10 s e 60 s. Nota-se pela escala de cores apresentada que a maior espessura da corrente acontece dentro do canal, uma vez que o canal continua a alimentar o tanque até que seja alcançado o tempo máximo de simulação. No instante 10 s a corrente atingiu uma distância aproximada de 0,75 m da saída do canal e 0,80 m de largura, Figura 43a. No instante seguinte, 60 s, a corrente alcançou 2,30 m de comprimento e 1,90 m de largura, Figura 43b.

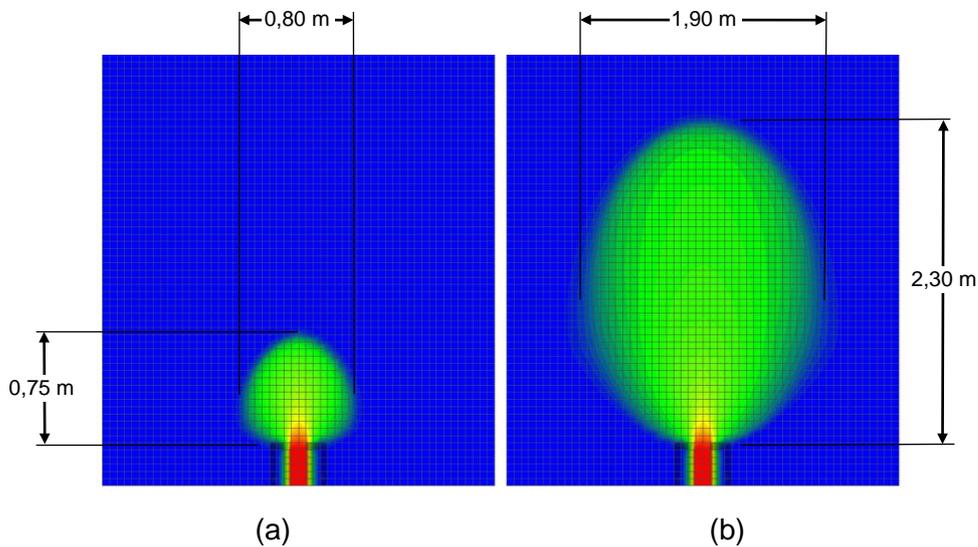


Figura 43 – Vista superior da evolução da corrente nos instantes (a) 10 s (b) 60 s

A vista lateral da simulação, Figura 44, mostra que houve uma rápida diminuição da cabeça da corrente. No instante 10 s, Figura 44a, ainda percebe-se que há uma clara distinção entre a cabeça e corpo da corrente, porém, a cabeça se dissipa rapidamente e já no instante 60 s, Figura 44b, já não é mais possível visualizar sua presença.

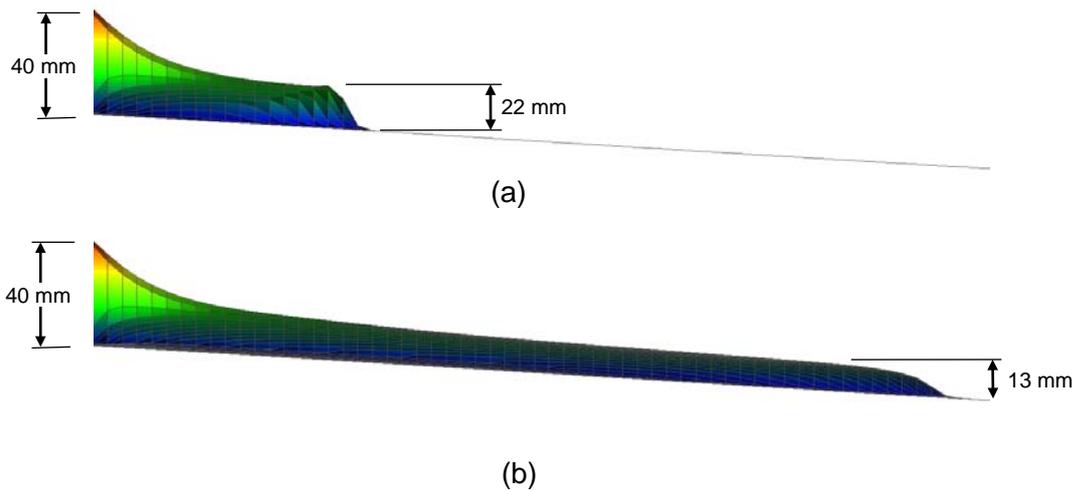


Figura 44 – Vista lateral da evolução da corrente nos instantes (a) 10 s (b) 60 s

Na Figura 45 tem-se a vista do lobo formado como resultado da deposição ocorrida após a simulação numérica, nota-se que não houve deposição no núcleo do lobo. Logo a frente ao canal tem-se uma pequena deposição de sedimentos, seguida da zona de não deposição.

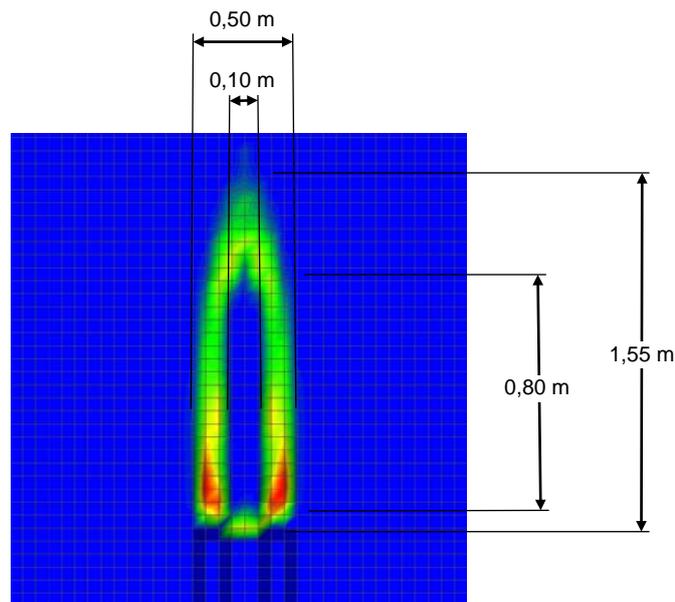


Figura 45 – Vista superior do deposito ocorrido devido a simulação numérica da corrente com sedimentos de 100 μm

O perfil longitudinal da superfície deposicional é mostrado na Figura 46, percebe-se pela escala de cores que a espessura máxima de sedimentos ocorreu perto da saída do canal, medindo 26,60 mm.

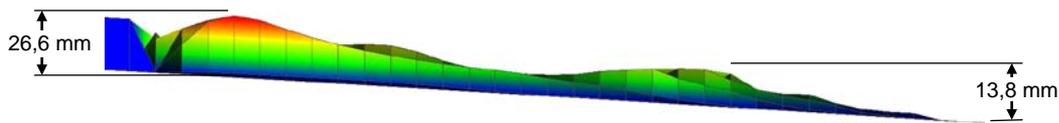


Figura 46 – Vista lateral do depósito ocorrido devido a simulação numérica da corrente com sedimentos de 100 μm

6.2. Simulação do Ensaio 2

A previsão da evolução e da deposição do ensaio 2, corrente de turbidez com sedimentos de 150 μm , também utilizou as mesmas especificações do ensaio físico 2, vazão de entrada de 40 l/min, densidade do ambiente de 1000 kg/m^3 , densidade dos sedimentos de 2600 kg/m^3 e concentração de 1,85% em volume, a Figura 47 mostra a tela do programa com a visualização 3D do resultado da deposição. O depósito gerado pela análise da corrente com sedimentos de 150 μm , formou um lobo com comprimento de 1,05 m e largura de 0,40 m. A altura máxima de sedimentos foi de aproximadamente 55,90 mm. A maior altura de sedimentos acontece logo à frente do canal, e diminui progressivamente com a distância. Na Figura 47 a cor vermelha da escala de cores representa valores máximos e a cor azul valores mínimos.

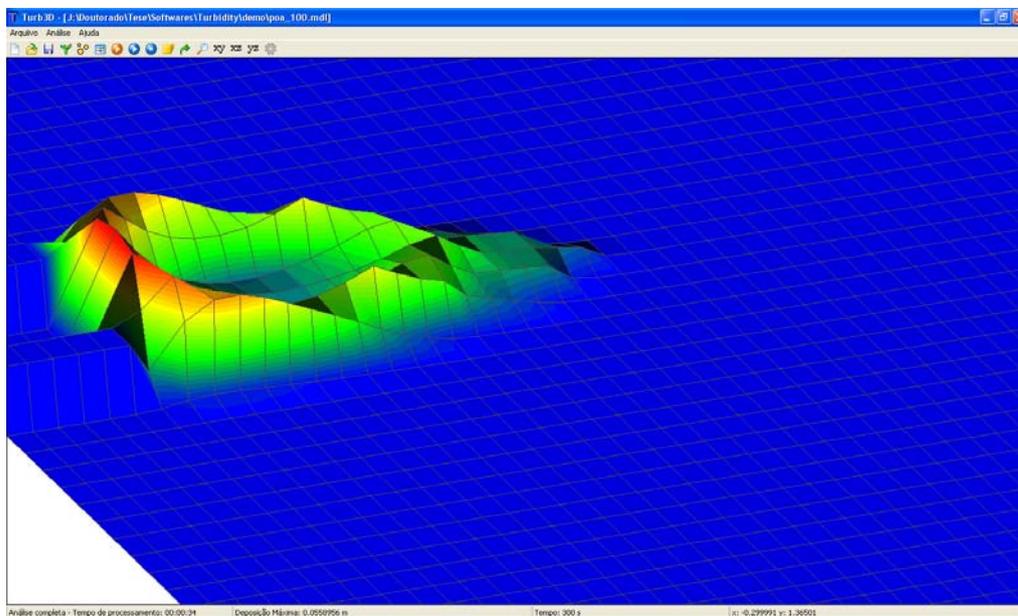


Figura 47 – Tela do programa Turb3D mostrando a deposição ocorrida para uma corrente de turbidez com sedimentos de 150 μm . Escala da deposição aumentada em 3 vezes

Analisando-se a evolução da corrente, Figura 48, constata-se que no instante 10 s ela mede 0,75 m de comprimento e 0,70 m largura. No instante 60 s o comprimento do fluxo mede 1,15 m e a largura mede 0,80 m. Como o canal alimenta o tanque até que seja alcançado o tempo máximo da simulação, 300 s, verifica-se, através da escala de cores, que a maior altura do fluxo acontece sempre dentro do canal e decresce à medida que o fluxo avança para dentro do tanque.

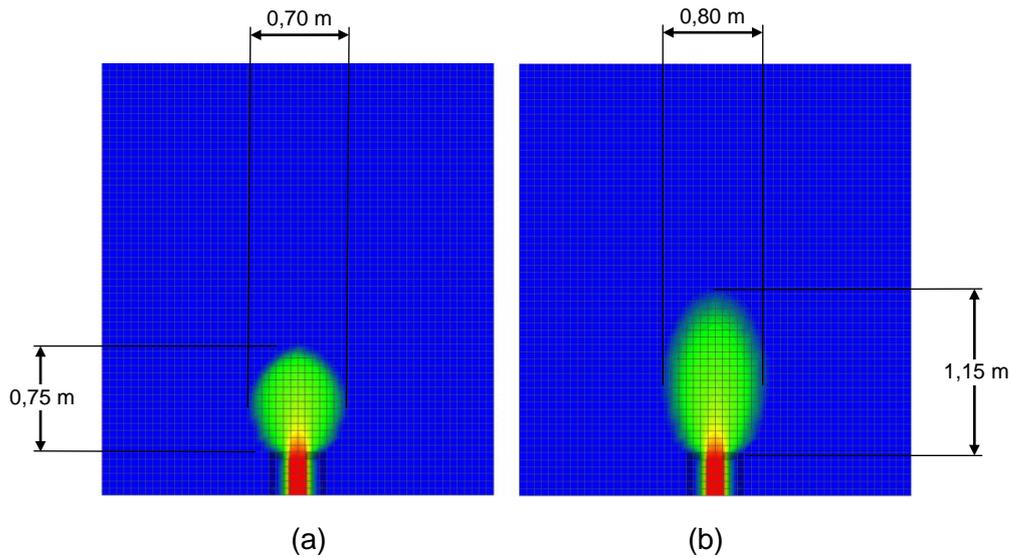


Figura 48 – Vista superior da evolução da corrente nos instantes (a) 10 s (b) 60 s

Nota-se a presença de uma cabeça bem pequena na corrente no instante 10 s, Figura 49a, com o corpo formando-se logo atrás. No instante 60 s o fluxo sai do canal, região vermelha na escala de cores da Figura 49b, e logo em seguida forma-se o corpo da corrente, neste caso, toda a cabeça já se dissipou e não é mais possível visualizar sua presença.

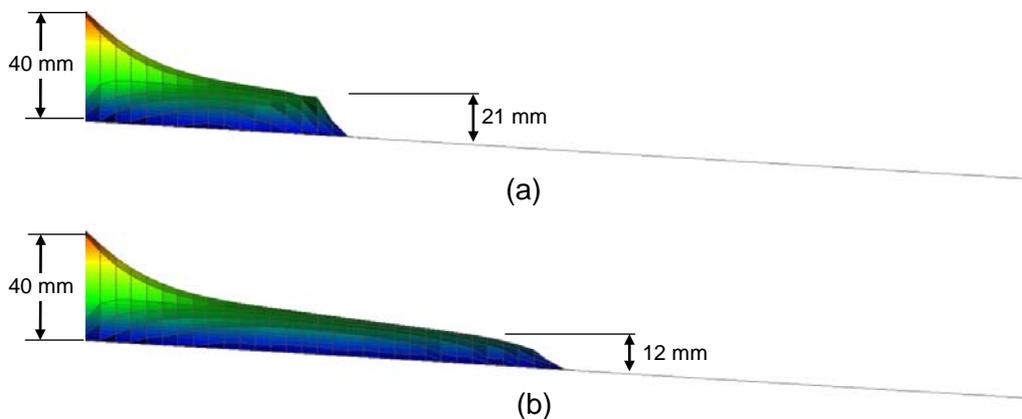


Figura 49 – Vista lateral da evolução da corrente nos instantes (a) 10 s (b) 60 s

O lobo formado pela simulação numérica é mostrado na Figura 50. A espessura máxima de sedimentos ocorreu na frente do canal, conforme verifica-se pela escala de cores, medindo 55,90 mm. Nesse caso, também houve a formação de uma zona de menor deposição no núcleo do lobo.

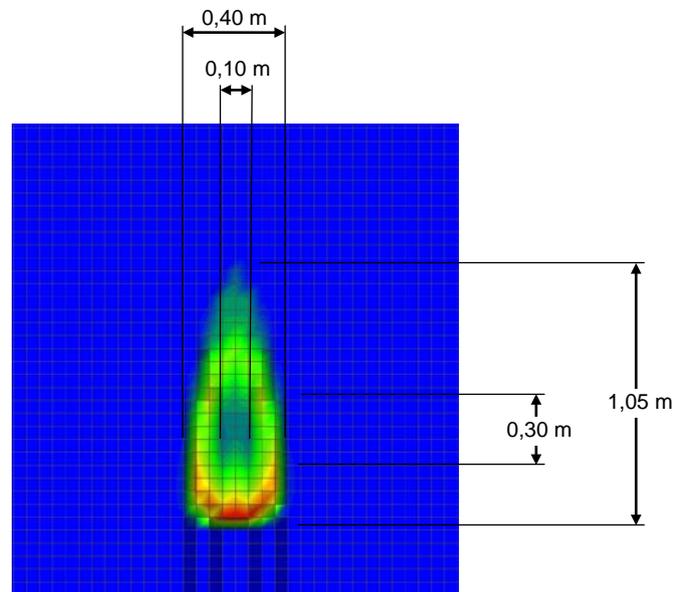


Figura 50 – Vista superior do depósito ocorrido devido a simulação numérica da corrente com sedimentos de 150 μm

A Figura 51 mostra o perfil longitudinal do lobo gerado pela deposição de sedimentos durante a simulação numérica. A escala de cores evidencia que a espessura máxima de sedimentos localiza-se imediatamente em frente ao canal de saída e vai diminuindo progressivamente.

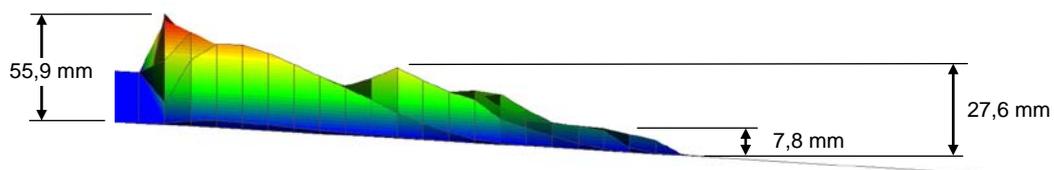


Figura 51 – Vista lateral do depósito ocorrido devido a simulação numérica da corrente com sedimentos de 150 μm

6.3. Discussão dos Resultados

6.3.1. Evolução

Comparando-se a evolução das simulações, numérica e física, para a corrente com sedimentos de 100 μm , Tabela 3, verifica-se que no instante 10 s a corrente na simulação física atingiu o comprimento de 0,82 m e a simulação numérica atingiu o comprimento de 0,75 m, ou seja, erro relativo percentual de 8,53%, a largura do fluxo na simulação física foi de 0,65 m e na simulação numérica foi de 0,80 m, um erro relativo percentual de 23,07%.

No instante 60 s o erro relativo percentual, entre o comprimento do fluxo na simulação física e numérica, foi de 11,54%, tendo o comprimento do fluxo na simulação física alcançado 2,60 m, e na simulação numérica 2,30 m. A largura do fluxo na simulação física foi de 1,85 m, contra 1,90 m na simulação numérica, resultando um erro relativo percentual de 2,70%.

Instante (s)	Tipo de Simulação			
	Numérica		Física	
	L (m)	D (m)	L (m)	D (m)
10	0,75	0,80	0,82	0,65
60	2,30	1,90	2,60	1,85

Tabela 3 - Resumo dos resultados da evolução da corrente com sedimentos de 100 μm

Para as correntes com sedimentos de 150 μm , Tabela 4, os valores dos erros relativos percentuais do comprimento e da largura do fluxo no instante 10 s foram de 87,5% e 125,8% respectivamente, sendo a comprimento e a largura da simulação numérica de 0,75 m e 0,70 m, e na simulação física de 0,40 m e 0,31 m. No instante 60 s o comprimento da simulação numérica foi de 1,15 m e o comprimento da simulação física de 2,10 m, um erro relativo percentual de 45,23%, já para a largura o erro foi 31,62%, medindo na simulação numérica 0,80 m e na física 1,17 m.

Instante (s)	Tipo de Simulação			
	Numérica		Física	
	L (m)	D (m)	L (m)	D (m)
10	0,75	0,70	0,40	0,31
60	1,15	0,80	2,10	1,17

Tabela 4 - Resumo dos resultados da evolução da corrente com sedimentos de 150 µm

Analisando-se os resultados das evoluções das correntes tomando-se como base apenas os erros relativos percentuais, é evidente que os resultados oriundos da simulação numérica com sedimentos de 150 µm foram insatisfatórios, pois se obteve erros bem elevados. No caso da corrente com sedimentos de 100 µm, esses erros foram bem menores e satisfatórios.

Entretanto, é importante salientar que a relação entre a altura fracionária da camada limite turbulenta, f , e a rugosidade da superfície do fundo desempenha um papel muitíssimo importante na evolução da corrente na simulação numérica, como pode ser visto nas equações matemáticas propostas neste trabalho, ou seja, esses parâmetros influenciam fortemente a maneira como a corrente se comporta. Quanto maior a relação f/z_0 maior é a distância que o fluxo atinge, porém com uma largura menor. Caso contrário, menor é a distância que o fluxo alcança, com uma largura maior, Figura 52. Assim, é possível obter resultados melhores para as simulações numéricas apenas ajustando essa relação.

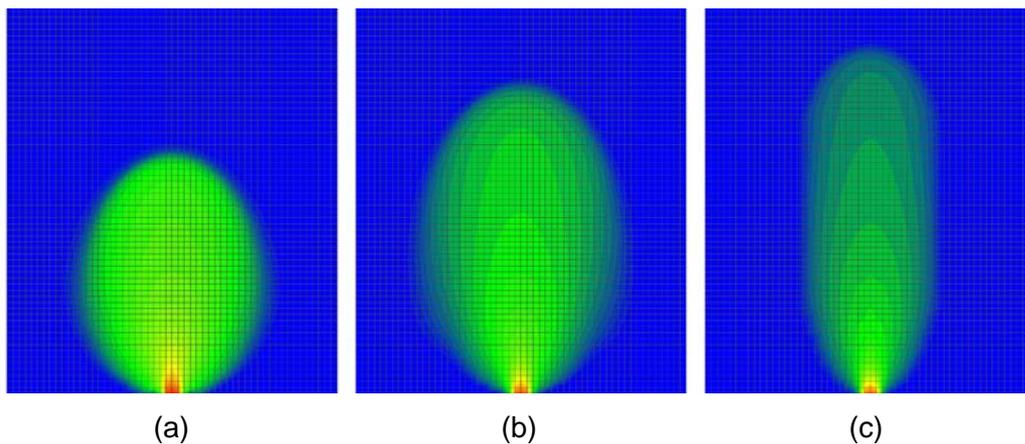


Figura 52 – Ajuste da relação f/z_0 . (a) $f/z_0 = 125$ (b) $f/z_0 = 250$ (c) $f/z_0 = 500$

Todavia, ainda que se utilizem valores de rugosidade e f obtidos na literatura, esses valores devem estar compreendidos entre certos limites para que seja garantida a compatibilidade com os ensaios físicos realizados. Por

exemplo, o valor da rugosidade para este trabalho deve ser algo em torno de 0,001 mm, que é o valor da rugosidade do material usado na confecção da plataforma de ensaio, sob pena desse valor não mais corresponder a um valor condizente com esse material.

Utilizou-se nos ensaios físicos as mesmas especificações, em ambos os ensaios a única diferença entre as correntes são os sedimentos, sendo 100 μm no primeiro ensaio e 150 μm no segundo ensaio. Logo, utilizou-se também os mesmos parâmetros para ambas as simulações numéricas. E apesar de tais parâmetros terem sido suficientes para produzirem bons resultados para a previsão da evolução da corrente com sedimentos de 100 μm , não foram suficientes para produzirem resultados satisfatórios para avaliação da evolução da corrente de 150 μm .

6.3.2. Deposição

As geometrias dos lobos formados pela sedimentação das partículas nos ensaios são apresentadas na Tabela 5. Verifica-se que no ensaio 1, corrente com sedimentos de 100 μm , a sedimentação da simulação numérica tem comprimento de 1,55 m, já na simulação física o comprimento do lobo é cerca de cinco vezes menor, 0,33 m. Na largura o erro relativo percentual é de quase 50%, medindo 0,50 m na simulação numérica e 0,34 m na física.

No ensaio 2, corrente com sedimentos de 150 μm , o lobo formado pela deposição da simulação física tem comprimento de 1,05 m e largura de 0,40 m, e na simulação numérica mede 0,32 m de comprimento e 0,42 m largura, ou ainda, um erro de 4,76% na largura e um erro maior que 200% no comprimento.

Sedimento (μm)	Tipo de Simulação	Geometria da Deposição			
		L (m)	R (m)	l (m)	r (m)
100	Física	0,33	0,34	0,15	0,18
100	Numérica	1,55	0,50	0,80	0,10
150	Física	0,32	0,42	0,17	0,15
150	Numérica	1,05	0,40	0,30	0,10

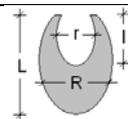


Tabela 5 – Resumo dos resultados das deposições das correntes

Em ambas as simulações, numérica e física, verifica-se um mesmo padrão deposicional, ou seja, forma-se um lobo com uma zona de menor deposição no

núcleo do lobo. Porém, como pode se observar na Tabela 5, as geometrias das superfícies deposicionais obtidas pelas simulações físicas e numéricas não são similares, sendo as dimensões da simulação numérica em alguns casos bem maiores que as da simulação física.

As espessuras máximas também apresentaram discrepância, principalmente no que diz respeito a sua localização. Nas simulações físicas as espessuras máximas de sedimentos localizaram-se, em ambos os casos, na extremidade do lobo oposta a saída do canal. Na simulação numérica ocorreu exatamente o oposto, as espessuras máximas de sedimentos localizaram-se próximo a saída do canal.