



Abordagem integrada no estudo de correntes de turbidez: uso de simulação física e numérica para o entendimento de mecanismo de transporte dos sedimentos.

Lucas Pereira¹, Rafael Manica²

NÚCLEO DE ESTUDOS DE CORRENTE DE DENSIDADE - INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

¹Bolsista FAURGS, ²Orientador.



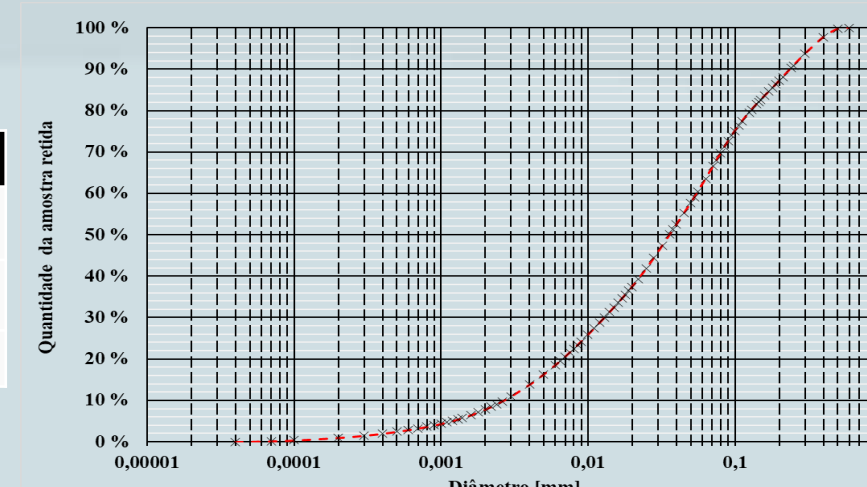
PETROBRAS

Introdução

As correntes de turbidez são fluxos gravitacionais de sedimentos nos quais o sedimento é transportado através da turbulência do escoamento. O estudo deste mecanismo de transporte ajuda no entendimento da formação de depósitos sedimentares – denominados turbiditos – encontrados em abundância na costa brasileira. Tais depósitos são potenciais reservatórios de hidrocarbonetos, sendo de interesse da indústria petrolífera a gênese destes. Atualmente o estudo da dinâmica das correntes de turbidez apresenta duas diferentes abordagens: a modelagem física e a simulação numérica. A utilização destas ferramentas em conjunto ajuda na compreensão em detalhe da estrutura da turbulência em uma escala espacial e temporal de grande resolução.

A partir de dados de simulações físicas de correntes de turbidez, realizadas para o projeto Processos do Núcleo de estudos de Correntes de Densidade (NECOD) com apoio da Petrobrás, foram definidas condições de contorno para serem implementadas em um domínio computacional a fim de estudar a estrutura da turbulência nestes escoamentos.

Ensaio	R1	R2
Concentração volumétrica	12%	8%
Volume da mistura [litros]	200	200
Vazão [litros/min]	50	50



Tab. 1. Dados de concentração, volume e vazão por ensaio.

Fig. 1: Granulometria do carvão mineral

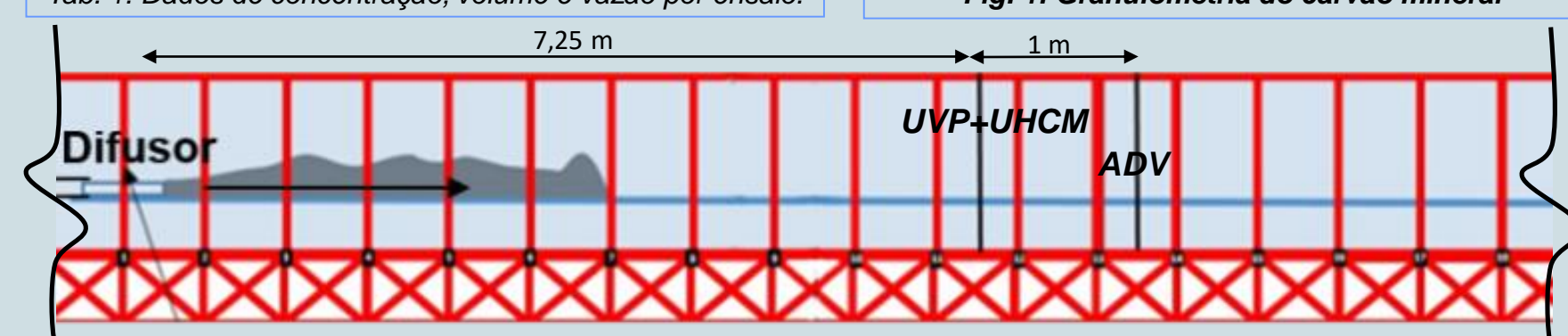


Fig. 2: Disposição dos equipamentos durante o ensaio.

Metodologia

Foram realizados dois ensaios nos quais foram injetadas misturas de água e carvão mineral com diferentes concentrações em um canal horizontal de 15 m de comprimento, 1 m de altura e 0,4 m de largura. A tabela 1 apresenta as características de cada ensaio e a figura 1 apresenta a curva granulométrica do sedimento.

Dados de perfis de velocidade – através de *Ultrasound Velocity Profiler*® (UVP) – e concentração – a partir de *Ultrasound High Concentration Meter*® (UHCM) – foram coletados a 7,25 m do ponto de injeção da mistura. A 8,25 m foram medidos dados de velocidade a alta frequência através de *Acoustic Doppler Velocimeter*® (ADV). A figura 2 apresenta um croqui do aparato experimental.

Simular numericamente os experimentos na sua totalidade demandaria um esforço computacional intangível, portanto o domínio computacional foi definido apenas desde o ponto de medição dos perfis de velocidade e concentração até o ponto de medição de velocidade em alta frequência. Assim, utilizaram-se os dados do UHCM e UVP para definição das condições de contorno e os dados do ADV para verificação das simulações.

O código aberto *Incompact3d* demonstrou-se uma excelente ferramenta na simulação numérica de correntes de turbidez (ver Frantz et al. 2017, Lucchese 2019). Utilizando a mesma metodologia de Frantz et al. (2019) foram definidos perfis de velocidade e concentração, obtidos através dos dados do UVP e UHCM, como condição de contorno de entrada no domínio computacional, a condição de contorno de saída como convectiva, condição de contorno de fundo como não deslizamento e condições de contorno laterais e superior de livre deslizamento. A figura 3 apresenta a esquematização do domínio computacional. Os parâmetros de adimensionalização são apresentados na tabela 2.

Equações governantes

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad \rightarrow \text{Conservação de massa}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_j \frac{\partial \phi}{\partial x_j} + w_s e_i^g \frac{\partial \phi}{\partial x_j} = \frac{1}{\text{ReSc}} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_j \partial x_j} \quad \rightarrow \text{Conservação de QDM}^* \text{ fase sólida}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \text{Ri} \phi e_i^g \quad \rightarrow \text{Conservação de QDM}^* \text{ fase líquida}$$

* quantidade de movimento

As equações governantes foram adimensionalizadas a partir da velocidade máxima de entrada (U_m), altura máxima da corrente (h_c) e concentração máxima de entrada (C_r) obtidos através dos dados experimentais. Para as simulações de teste de ambos os cenários foram utilizados domínios de $L_x \times L_y \times L_z = 3,2 \times 1,6 \times 1$, com uma malha de $dx \times dy \times dz = 0,008 \times 0,01 \times 0,01$, resultando em 4 milhões de pontos. As simulações de foram realizadas em um computador de mesa de 8 núcleos de 3,3 GHz e 32 GB de memória RAM, com um tempo total de aproximadamente 2 dias para 50 mil passos de tempo com um $dt = 0,0005$.

Entrada ϕ e u_i prescritos

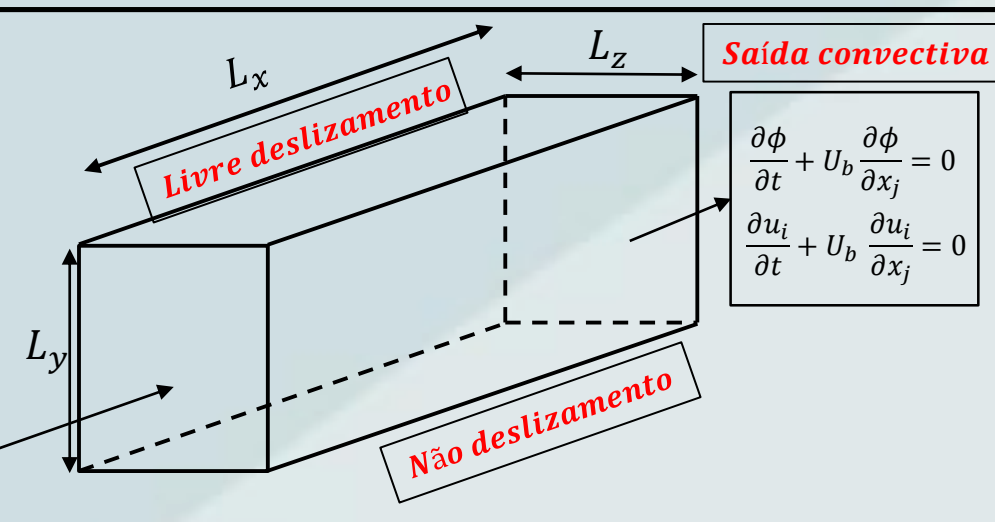
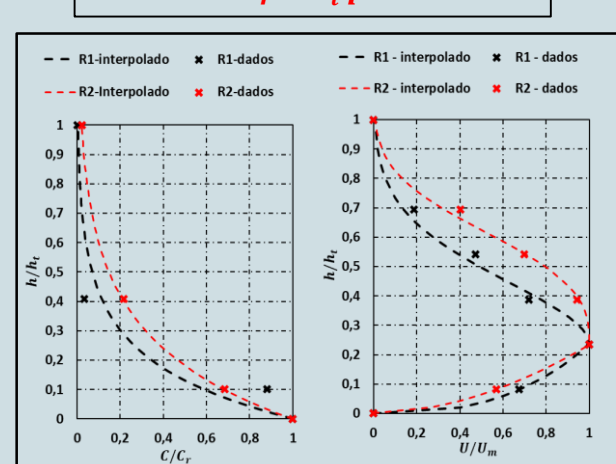


Fig. 3: Esquematização do domínio computacional.

Ensaio	U_m [m/s]	h_c [m]	w_s / U_m	C_r [%]	δ_s	Re	S_c	R_t
R1	0,108	0,098	0,046	4,5	1,403	10550	1	1,56
R2	0,084	0,098	0,059	2,4	1,403	8257	1	1,30

Tab. 2: Parâmetros de cada escoamento simulado.

Resultados

As simulações de teste possibilitam observar a evolução da corrente de turbidez e suas estruturas turbulentas, estiramento dos vórtices e incorporação de fluido ambiente semelhante ao observado nas correntes de turbidez simuladas modelo físico. A figura 4 apresenta a comparação entre imagens registradas nos experimentos físicos (Manica et al. 2017) e as correntes de turbidez simuladas para cada experimento no tempo $t = 3,75$, demonstrando as diferenças no desenvolvimento do escoamento em cada experimento. Nota-se claramente que o modelo numérico apresenta uma forma geométrica similar – menor altura, devido à maior diferença de densidade – e compatível com o modelo físico, possibilitando uma melhor visualização de estruturas como os vórtices de Kelvin-Helmholtz na camada de mistura da corrente. A variação de concentração ao longo da vertical foi verificada e assemelha-se àquela medida nos experimentos, com R1 apresentando uma camada de mistura menos diluída e um maior gradiente vertical em relação a R2, que apresenta uma maior camada de mistura.

O modelo matemático encontra-se com as condições de contorno implementadas, as próximas etapas do trabalho objetivam:

- Validar a implementação através da comparação do espectro da energia cinética da turbulência medido pelo ADV e simulado numericamente;
- Cálculo do balanço da energia cinética da turbulência.

Estas etapas visam discretizar a influência de cada parâmetro no transporte, incorporação e dissipação de energia cinética da turbulência, evidenciando seu papel no transporte do sedimento por este mecanismo.

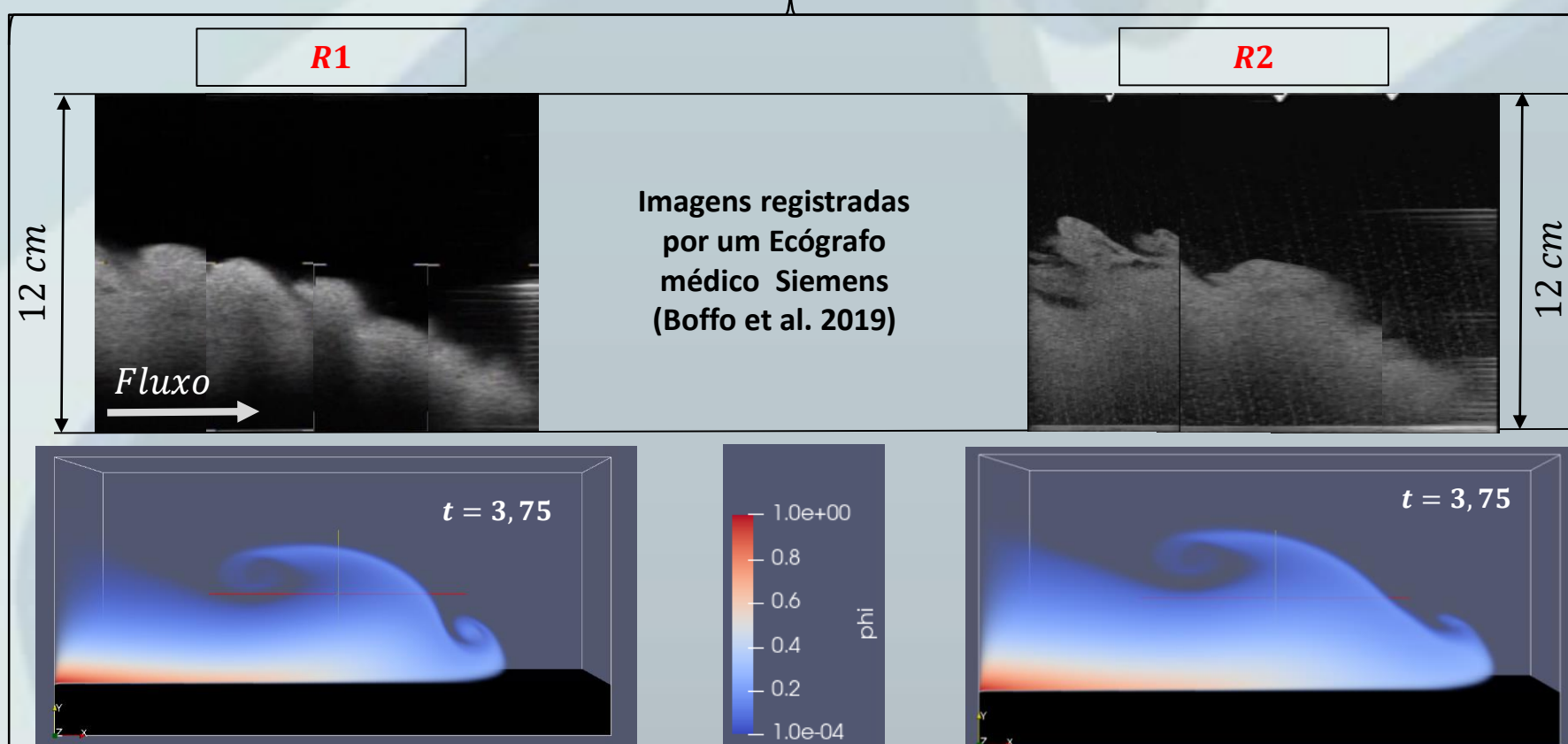


Fig. 4: Comparação entre as correntes modeladas fisicamente e simuladas.

Símbolos

u = velocidade;
 x = dimensão;
 t = tempo;
 p = pressão;
 Re = Número de Reynolds;
 S_c = número de Schmidt;
 ϕ = concentração de sedimento;
 δ_s = densidade do sedimento;
 w_s = velocidade de queda do sedimento;
 e_i^g = versor no sentido da aceleração da gravidade.

Referências

BOFFO, C. et al. MAPPING OF VERTICAL STRATIFICATIONS IN TURBIDITY CURRENTS THROUGH MEDICAL ULTRASOUND IMAGES. In: LIBRO DE RESÚMENES EXTENDIDOS DEL VI SIMPOSIO SOBRE MÉTODOS EXPERIMENTALES EN HIDRÁULICA, PAYSANDU, URUGUAY, 5-7 DE JUNIO DE 2019. Paysandu, Uruguay, Anais... Paysandu, Uruguay.

FRANTZ, Ricardo; LAIZET, Sylvain; SILVESTRINI, Jorge Hugo. Direct Numerical Simulations of Hyperviscous Flows in Open-Channel Configuration. 10th ABCM Spring School on Transition and Turbulence, [s. l.], 2016.

LAIZET, Sylvain; Li, Ning. Incompact3d: A powerful tool to tackle turbulence problems with up to O(10⁵) computational cores. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, [s. l.], v. 67, n. 11, p. 1735-1757, 2011. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/fld.2480>. Acesso em: 5 abr. 2019.

LUCCHESI, Luísa Vieira et al. Direct Numerical Simulations of turbidity currents with Evolutive Deposit Method, considering topography updates during the simulation. *Computers & Geosciences*, [s. l.], v. 133, p. 104306, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300418309312>. Acesso em: 15 set. 2019.