

# Simulação Numérica de Escoamento em Rios com Dunas de Fundo: Aplicação ao Rio Amazonas

Aluno: Daniel Rodrigues Acosta (eng.daniel.acosta@gmail.com)

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Edith Beatriz Camaño Schettini (bcamano@iph.ufrgs.br)

## INTRODUÇÃO

O Rio Amazonas é de importância vital para o Brasil e principalmente para a Região Norte, especialmente nas esferas ambiental e econômica. As formas de fundo do rio condicionam a navegação e produzem perda de energia. Com o intuito de realizar uma análise detalhada do fluxo e relacioná-la com as dimensões das formas de fundo, na presente pesquisa são simuladas situações hipotéticas de rios com dunas em formato senoidal. É utilizado o código computacional *SUL3D* [1]. Estas investigações preliminares servem de base para aplicar futuramente o mesmo método para o Rio Amazonas, que apresenta dunas em toda sua extensão, com alturas que variam entre 0,2 e 12m e comprimentos de até 400m. A Fig. 1 mostra um exemplo de dunas no leito do Rio Negro, que, a sua jusante, forma o Rio Amazonas.



Fig. 1 – Dunas no Rio Negro expostas durante o período de vazante. Foto: Chico Batata.

## METODOLOGIA

São simuladas numericamente as equações de Navier-Stokes, da Continuidade e sua particularização para o desnível “ $\eta$ ” da superfície livre, dadas por:

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + \rho g_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \int_{-h}^{\eta} u_x dz \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \int_{-h}^{\eta} u_y dz \right] = 0 \quad (3)$$

onde “ $u_i$ ” é a velocidade na direção  $i$  ( $i = x, y, z$ ), “ $h$ ” é a altura da lâmina d’água, “ $P$ ” é a pressão, “ $\rho$ ” a massa específica e “ $\mu$ ” a viscosidade dinâmica. Para a resolução numérica das equações (1-3) é utilizado o código computacional *SUL3D* [1], com uma abordagem bidimensional, com esquema de resolução semi-implícito em diferenças finitas. Para delimitar as formas de fundo é utilizado um método de fronteiras imersas e considerada nula a velocidade dentro das dunas [2]. Na Fig. 2 é apresentado o domínio utilizado para as simulações hipotéticas realizadas até o momento e os pontos onde foram obtidos os dados. Como condições de contorno esquerdo e direito foi definida a condição periódica, enquanto na borda superior foi a de superfície livre.

O tamanho do domínio escolhido foi de 10m na direção  $x$  e o comprimento escolhido para cada duna foi de 5m. Entre as diferentes simulações foi variada a altura inicial da lâmina d’água ( $h$ ), a amplitude da duna ( $a$ ) e a velocidade inicial ( $u_0$ ), com o objetivo de avaliar a influência destas grandezas no escoamento.

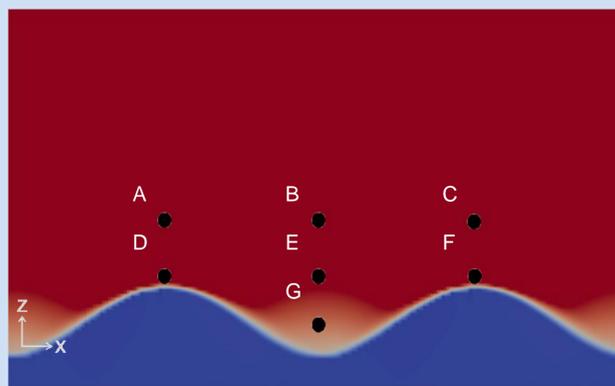


Fig. 2 – Esquema do domínio e posições de obtenção dos dados.

## RESULTADOS

As simulações realizadas para a análise das características do escoamento foram as seguintes:

Tabela 1 – Parâmetros dos diferentes casos.

Caso	$u_0$ (m/s) no eixo $x$	$a$ (m)	$h$ (m)
1	0,5	0,5	5
2	0,5	0,5	10
3	0,5	1,0	5
4	0,5	1,0	10
5	1,0	0,5	5
6	1,0	0,5	10
7	1,0	1,0	5
8	1,0	1,0	10

Identificou-se um comportamento muito semelhante, no início do escoamento (primeiros 100s), para os casos com “ $a$ ” e “ $u_0$ ” iguais e “ $h$ ” diferentes (1 com 2, 3 com 4, 5 com 6, 7 com 8), assim a análise prosseguiu apenas com os casos ímpares. Destes 4 casos foram obtidas séries temporais da componente da velocidade em  $X$  adimensionalizada ( $u_x/u_0$ ) das sondas B, E e G até 100s (Fig. 3). Assim, buscou-se avaliar a influência da velocidade inicial no comportamento das velocidades ao longo do tempo.

Na Fig. 3, observa-se que “ $u_x$ ” apresenta um período de oscilação da ordem de 22s para  $u_0=0,5\text{m/s}$  (casos 1 e 3, Fig. 3a), independente de “ $a$ ” e “ $h$ ”. Para  $u_0=1\text{m/s}$  (casos 5 e 7, Fig. 3b), o período é da ordem de 11s. Ou seja, a frequência de oscilação dos casos com  $u_0=0,5\text{m/s}$  é a metade da dos casos com  $u_0=1\text{m/s}$ . Considerando este efeito e adimensionalizando as velocidades, o comportamento das duas séries temporais mostra-se muito semelhante.

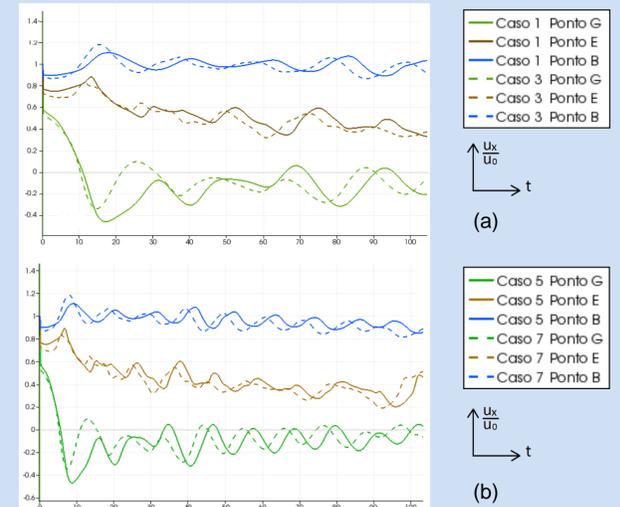


Fig. 3 – Séries temporais de  $u_x/u_0$  nos casos ímpares, nos pontos B, E e G até 100s.

Além disso, foram obtidos os campos instantâneos nos casos 1 e 3 de “ $u_x$ ”, da velocidade em  $z$  ( $u_z$ ) e da vorticidade ( $\omega$ ), para o instante  $t = 40\text{s}$  (Fig. 4), para avaliar a influência da amplitude das dunas no comportamento do escoamento.

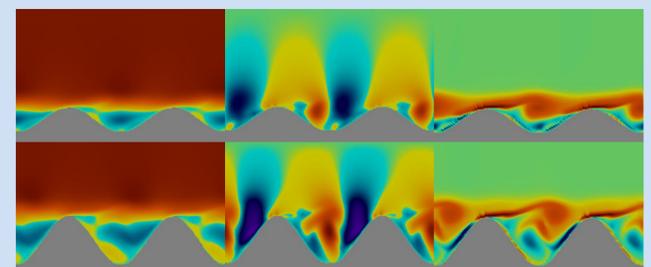


Fig. 4 – Campos instantâneos de  $u_x$  (esquerda),  $u_z$  (centro) e de  $\omega$  (direita) para  $u_0=0,5\text{m/s}$ ,  $h=5\text{m}$  e  $a=0,5\text{m}$  (acima) e  $1\text{m}$  (abaixo) (Casos 1 e 3). Cores quentes correspondem a valores positivos e cores frias a valores negativos.

Destaca-se a presença de regiões de recirculação, mais acentuadas para uma maior amplitude. Os campos de vorticidade mostram o desprendimento de vórtices a partir da crista da duna ( $\omega > 0$ ) impactando sobre a próxima duna. Para a região de menor recirculação, a esteira de vórtices se agrega com a própria região de recirculação. Já para o caso com maior região de recirculação, a esteira de vórtices é repelida.

## CONCLUSÕES

A análise das simulações mostra que o comportamento no início do escoamento não apresentou grandes mudanças entre diferentes “ $h$ ”, apresentou proporcionalidade entre “ $u_0$ ” e a frequência de oscilação de “ $u_x$ ” e apresentou uma recirculação mais definida para maiores amplitudes de duna. A sequência deste trabalho consistirá na simulação das dunas do Rio Amazonas.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à UFRGS pela concessão da bolsa de Iniciação Científica ao primeiro autor.

## REFERÊNCIAS

- [1] MONTEIRO, L. R.; SCHETTINI, E. B. (2015). “Comparação entre a aproximação hidrostática e a não-hidrostática na simulação numérica de escoamentos com superfície livre.”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Vol. 20, pp. 1051–1062.  
[2] CASULLI, V. (1990). “Semi-implicit finite difference method for two-dimensional shallow water equations”. *Journal of Computational Physics*, v. 86, n. 1, p. 56–74.