

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 simulados escoamentos em rios com dunas em formato senoidal. É utilizado o código computacional Sul3D [1]. A Fig. 1 mostra um exemplo de dunas no leito do Rio Negro, que, a sua jusante, forma o Rio Amazonas. O Amazonas serve de referência para as dimensões utilizadas nas simulações e apresenta dunas em toda a sua extensão.



Fig. 1 – Dunas expostas durante o período de vazante do Rio Negro em Set/2016. (Foto: Suelen Gonçalves/G1 AM)

APLICAÇÃO AO RIO AMAZONAS

STRASSER [2] mediu em campo, no Rio Amazonas, dunas com amplitude a entre 9m e 12m e comprimento λ entre 100m e 190m, com aspecto de duna λ/a entre 9 e 22. As simulações foram realizadas com formato simplificado senoidal, utilizando aspecto de duna λ/a entre 7 e 30 e uma face de montante com o dobro do comprimento da face de jusante. Em vez de utilizar a própria batimetria do rio, a abordagem permite uma melhor observação dos fenômenos essenciais do escoamento.

METODOLOGIA

São simuladas numericamente as equações de Navier-Stokes, da Continuidade e sua particularização para o desnível η da superfície livre, dadas por:

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-h}^{\eta} u_x dz \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-h}^{\eta} u_y dz \right) = 0 \quad [2]$$

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, ρ a massa específica e μ a viscosidade dinâmica. Para a resolução numérica das equações (1-2) é utilizado o código computacional *SUL3D* [1], com uma abordagem bidimensional, com esquema de resolução semi-implícito no tempo em diferenças finitas. Para delimitar as formas de fundo é utilizado um método de fronteiras imersas que considera nula a velocidade dentro das dunas [3].

Foram realizadas simulações variando as grandezas mostradas na Tab. 1 a fim de observar a influência que cada uma provoca no escoamento.

Grandeza	Valor mín.	Valor máx.	Quant. valores
Veloc. inicial em $x - u_0$ (m/s)	0,25	2,0	7
Amplitude da duna - a (m)	0,5	1,5	5
Comprimento da duna - λ (m)	3,75	11,25	8
Lâmina d'água - h (m)	6,5	19,5	4

Tab. 1 – Variação das grandezas entre simulações

O domínio utilizado nas simulações, as grandezas da Tab. 1 e os pontos onde foram obtidos os dados de velocidade e vorticidade são apresentados na Fig. 2. A condição de contorno na direção x é periódica, enquanto que no limite superior é de superfície livre.

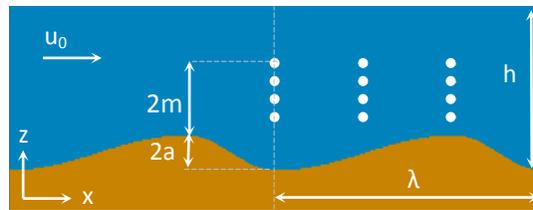


Fig. 2 – Domínio das simulações, grandezas geométricas e posição das sondas.

RESULTADOS

Influência da velocidade inicial u_0

A alteração da velocidade inicial na direção x leva a uma alteração proporcional na frequência de oscilação das velocidades. Considerando que f é a frequência de oscilação das velocidades e L um comprimento característico da duna, utilizamos o número de Strouhal ($St = fL/u_0$) para representar o fenômeno oscilatório. A partir das séries temporais obtidas na sonda mais próxima da crista da duna de simulações de $a = 0,5m$, $\lambda = 7,5m$ e cinco valores de u_0 , foram calculados os espectros de energia cinética e obtidas as frequências. O St foi calculado utilizando dois comprimentos característicos diferentes, $L = a$ e $L = \lambda$, obtendo-se sempre valores constantes para cada (Tab. 2).

u_0 (m/s)	f (Hz)	$St = fa/u_0$	$St = f\lambda/u_0$
0,25	0,008	0,0160	0,240
0,5	0,016	0,0161	0,241
1,0	0,031	0,0156	0,234
1,5	0,047	0,0158	0,236
2,0	0,063	0,0159	0,238

Tab. 2 – Valores de St em função de u_0 e f .

A Fig. 4a mostra as séries temporais de velocidade. Adimensionalizando a velocidade e o tempo com, respectivamente, u_0 e λ/u_0 , as curvas coincidem, mostrando semelhança no padrão de escoamento (Fig. 4b).

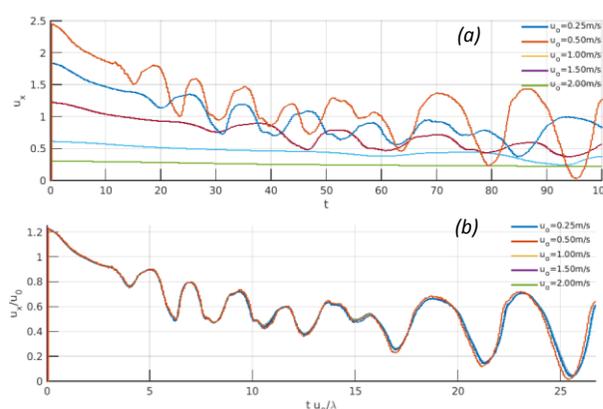


Fig. 4 – Séries temporais para cinco valores de u_0

Influência da amplitude da duna a

A alteração da amplitude da duna não é o comprimento característico L do coeficiente St , ou seja, a razão entre St e a não respeita f/u_0 constante.

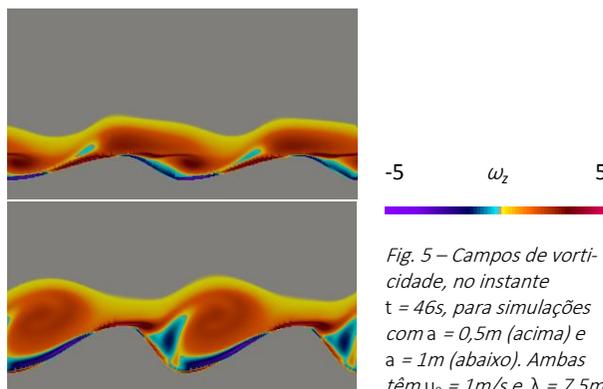


Fig. 5 – Campos de vorticidade, no instante $t = 46s$, para simulações com $a = 0,5m$ (acima) e $a = 1m$ (abaixo). Ambas têm $u_0 = 1m/s$ e $\lambda = 7,5m$.

Além disso, uma maior amplitude acentua as regiões de recirculação. Os vórtices se desprendem a partir da crista da duna ($\omega > 0$) impactando sobre a próxima duna (Fig. 5). Para a menor região de recirculação, a esteira de vórtices se une com a própria região de recirculação. Já para o caso com maior região de recirculação, a esteira de vórtices é desviada.

Influência do comprimento de duna λ

A alteração do comprimento da duna também leva a uma alteração proporcional na frequência de oscilação das velocidades no tempo. A Tab. 3 mostra as frequências das séries temporais obtidas na sonda mais próxima da crista da duna, para simulações com $a = 1m$, $u_0 = 1m/s$ e cinco valores diferentes de λ .

λ (m)	f (Hz)	$St = f\lambda/u_0$
3,75	0,068	0,255
5,625	0,044	0,255
7,5	0,034	0,255
9,375	0,027	0,255
11,25	0,023	0,255

Tab. 3 – Valores de St em função de λ e f .

Isso nos leva a concluir que λ é o comprimento característico L do coeficiente de Strouhal.

Influência da profundidade h

Foram simuladas diferentes profundidades de lâmina de água com o intuito de verificar a influência que as dunas produzem sobre o escoamento. Para $h > 13a$, a influência dos vórtices da duna fica restrita à região próxima a ela, sem atingir a superfície livre, como pode ser observado na Fig. 6. Também se observa que escoamentos com lâminas de água diferentes e menores que $13a$ se comportam de modo semelhante no início do escoamento. Isso se deve ao fato de que os vórtices causados pelas dunas levam certo tempo para se desenvolverem, ocuparem a lâmina de água e se diferenciarem de um caso para outro.

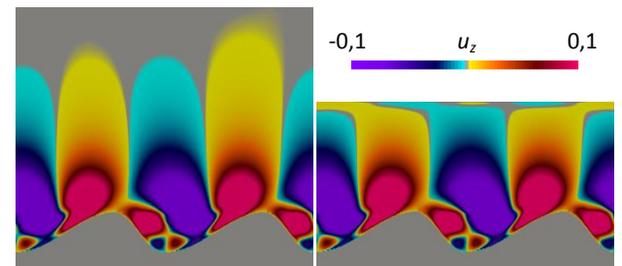


Fig. 6 – Campos de velocidade na direção z , no instante $t = 38s$, para simulações com $h = 19,5m$ (esquerda) e $h = 8m$ (direita). Ambas têm $u_0 = 1m/s$ e $a = 1m$.

CONCLUSÕES

A análise dos resultados mostra que a região dos vórtices causados pela duna não alcança a superfície livre para $h > 13a$. Mostrou-se também que u_0 e λ são os parâmetros que representam os fenômenos oscilatórios do escoamento de acordo com o Número de Strouhal. Ocorre uma maior recirculação para maiores amplitudes de duna. Tais conclusões se aplicam ao Rio Amazonas, pois as dunas simuladas encontram-se no intervalo de grandezas dos dados de campo [2].

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- 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.
- STRASSER, M. A. (2008). "Dunas fluviais no rio Solimões-Amazonas - Dinâmica e transporte de sedimentos" *Rio de Janeiro - Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE*. p. 30.
- 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.