

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

IMPORTÂNCIA RELATIVA DA EVOLUÇÃO DE PEQUENAS DUNAS NA MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA FLUVIAL

Vinícius Granadier¹ ; William Bonino Rauhen²

RESUMO – Objetivou-se quantificar a importância relativa do desenvolvimento temporal de formas de fundo em leitos fluviais no procedimento de determinação da resistência ao escoamento em modelos hidrossedimentológicos. Foram simulados dois cenários de vazão constante em um modelo matemático unidimensional de canal muito largo, retilíneo e com leito arenoso, de modo a conferir condições de alta e baixa mobilidade dos sedimentos e ocorrência de pequenas dunas. Foram comparadas as abordagens: (a) estática, na qual o cálculo da resistência foi feito em função das dimensões das formas de fundo estimadas para a condição de equilíbrio; e (b) dinâmica, na qual o cálculo da referida resistência considerou o desenvolvimento temporal das dimensões das formas de fundo, partindo de um leito plano até a condição de equilíbrio. Os resultados mostraram que a abordagem estática tende a superestimar substancialmente as profundidades médias durante uma parcela considerável da simulação; e, concomitantemente, a subestimar as descargas sólidas de fundo e suspensão, de tal modo a gerar estimativas de aporte sólido consideravelmente inferiores às obtidas com a abordagem dinâmica. Tais discrepâncias foram explicadas com base nas variações temporais de outros parâmetros hidrossedimentológicos, como o coeficiente n de Manning, a velocidade média e a velocidade de atrito (total e particionada).

ABSTRACT– Assessed herein is the relative importance of the temporal development of ripples in alluvial rivers as part of a procedure used to determine flow resistance in hydrossedimentological models. Two scenarios of constant discharge were simulated in a one-dimensional mathematical model of a wide straight channel, which conferred conditions of high and low sediment mobility and mini-ripples on a sandbed. Two calculation approaches were used and contrasted: (a) static, whereby the flow resistance was calculated based on the equilibrium bedform dimensions; and (b) dynamic, whereby such calculation involved the temporal development of bedforms, from a flat bed to the equilibrium state. The results indicated that the static approach tended to substantially overestimate the flow depth for a considerable part of the simulation period; and, concurrently, to underestimate sediment discharges to the point of generating much lower sediment load estimates than those obtained using the dynamic approach. Such discrepancies were explained by the temporal variation of other hydrossedimentological parameters, such as Manning's n , mean flow velocity and friction velocity (total and partitioned).

Palavras-Chave – transiente, resistência, incerteza.

1) Mestrando e bolsista CAPES no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA), Universidade Federal do Paraná (UFPR). E-mail: viniciusgranadier@gmail.com.

2) Professor Adjunto, Departamento de Hidráulica e Saneamento (DHS) & Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA), Universidade Federal do Paraná (UFPR). E-mail: wbrauen@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

Em modelos matemáticos de escoamentos fluviais, uma adequada representação dos fenômenos físicos depende, entre outros aspectos, do modelo conceitual utilizado para descrevê-los. A resistência ao escoamento se destaca em tal contexto, por seu papel de simular a dissipação de energia mecânica do fluxo ao longo de um trecho, com potencial de afetar expressivamente as características hidrossedimentológicas e os resultados de uma simulação (MORVAN et al., 2008).

No caso de modelos considerando leito móvel com transporte de sedimentos e excluindo-se outros efeitos – como a dissipação de energia causada por vegetação, entre outras causas – a resistência total ao escoamento pode ser avaliada por meio de três componentes, que se referem: (a) ao arrasto superficial causado pelo atrito com o leito e as margens, o qual se associa à textura e ao grau de uniformidade dessas fronteiras sólidas; (b) ao arrasto gerado por ondulações na interface água-sedimentos, as quais podem gerar a separação do escoamento e aumentar expressivamente o nível de turbulência na coluna de água; e (c) à transferência de quantidade de movimento do escoamento para a mobilização e o transporte de sedimentos (EINSTEIN; BANKS, 1950; VAN RIJN, 1993; SOULSBY, 1997, MORVAN et al., 2008). Como ressalta Soulsby (1997), em escoamentos fluviais sobre leitos planos com o transporte de sedimentos não sendo intenso, a resistência total se reduz à componente (a). Com formas de fundo, acrescenta-se a componente (b), que tende a dominar o valor da resistência total, sendo tal componente uma função das dimensões das ondulações (η : altura, λ : espaçamento). A componente (c) não é desprezível em condições de alta intensidade de transporte de sedimentos por suspensão, como no regime superior de leito plano.

As componentes de resistência ao escoamento causada pela interface com o leito sedimentar são associadas a componentes correspondentes da tensão de cisalhamento no leito (τ_0) e velocidade de atrito (u_*). Então, enquanto as grandezas totais governam processos na coluna de água – como o nível de água, a intensidade de turbulência e a difusão vertical de quantidade de movimento e de sedimentos – somente as respectivas componentes de atrito superficial interferem na mobilização de grãos do leito, na taxa de transporte por carga de fundo e na concentração suspensa de referência (SOULSBY, 1997). Matematicamente, tal distinção é refletida por um particionamento da tensão cisalhante e da velocidade de atrito, nas respectivas componentes associadas à resistência por atrito superficial e resistência de forma, para uso adequado na modelagem hidrossedimentológica.

Sob condições hidrossedimentológicas relativamente constantes no tempo com ocorrência de formas de fundo, as dimensões dessas ondulações tendem a alcançar valores de equilíbrio (η_e , λ_e) em termos médios ao longo de um trecho fluvial. Com isso, em modelos matemáticos fluviais, com certo embasamento físico considera-se constante no tempo o parâmetro utilizado para descrever a

resistência ao escoamento (como de Nikuradse, Chézy, Manning ou outro) – ainda que tal parâmetro não represente apenas os efeitos da rugosidade do leito e que sua determinação normalmente ocorra por meio de calibração (JULIEN et al., 2002; MORVAN et al., 2008; KNIGHT et al., 2010). Entre as formas de fundo citadas estão as pequenas e as grandes dunas, sendo tal distinção de tamanho feita de modo relativo à profundidade de água: enquanto que as pequenas dunas têm η_e e λ_e dependentes apenas da granulometria do sedimento, as grandes dunas têm dimensões de equilíbrio influenciadas, também, pela profundidade (RAUDKIVI, 1997; VAN RIJN, 1993).

Por outro lado, na simulação de escoamentos transientes, como durante ou após a passagem de uma onda de cheia por trecho fluvial, a variação das condições hidrossedimentológicas pode induzir apreciável alteração no padrão de conformação do leito e nas dimensões das formas de fundo, o que modifica temporalmente o efeito de resistência. Isso pode ser uma importante fonte de incertezas em simulações hidrossedimentológicas que considerem o parâmetro de resistência como constante no tempo (JULIEN et al., 2002; KNIGHT et al., 2010; REESINK et al., 2018).

Na modelagem hidrossedimentológica computacional, tal parâmetro é foco usual de procedimento de calibração, com valores de referência podendo estar vinculados ao tipo de forma de fundo esperado em dada condição de simulação (como a sugestão de valores do n de Manning feita no modelo HEC-RAS). Poucos modelos computacionais usados em simulações hidrossedimentológicas fluviais calculam o parâmetro associado à resistência ao escoamento como função das dimensões das formas de fundo (como a função Trachytopes do modelo Delft3D e o módulo morfológico do modelo Mike21). Mesmo assim, são consideradas formas de fundo na condição de equilíbrio, apesar da disponibilidade de métodos e algoritmos voltados à representação da dinâmica de sua evolução a partir de um leito liso, ou entre conformações onduladas distintas (COLEMAN et al., 2005; RAUEN et al., 2008; PAARLBERG, 2008).

Neste sentido, o objetivo deste estudo foi quantificar a importância relativa da evolução das formas de fundo no cômputo de parâmetros hidrossedimentológicos fluviais – com enfoque na evolução de pequenas dunas em um leito arenoso inicialmente liso – frente à respectiva condição estática de equilíbrio. Com isto, pretende-se subsidiar refinamentos futuros (se, quando e como implementar) da representação matemática de tal evolução em modelos hidrossedimentológicos fluviais, com o intuito de mitigar incertezas de modelagem associadas a esse transiente.

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Em relação ao objetivo e à natureza, este estudo se classifica como uma pesquisa aplicada e descritiva, de abordagem quantitativa, com foco na investigação do comportamento, das tendências

e das relações entre os parâmetros simulados por um modelo hidrossedimentológico unidimensional implementado em planilha eletrônica.

Foram simuladas e comparadas duas abordagens quanto à temporalidade: abordagem estática, com coeficiente de resistência ao escoamento constante durante toda a simulação e calculado em função das dimensões de equilíbrio de pequenas dunas em leito arenoso; e abordagem dinâmica, com coeficiente de resistência calculado em função das dimensões de pequenas dunas em evolução (crescimento partindo-se da condição de leito plano até a condição de equilíbrio). Os parâmetros utilizados para representar a resistência ao escoamento foram o coeficiente de rugosidade equivalente de Nikuradse (k_s) e o coeficiente de Manning (n).

As simulações foram projetadas para reproduzir um trecho fluvial idealizado como muito largo, retilíneo, com seção transversal retangular e uniformidade das características iniciais médias no plano horizontal, quanto a cada parâmetro modelado. Foram simulados cenários de provável ocorrência de pequenas dunas no leito aluvial, utilizando-se o diagrama de classificação de formas de fundo proposto por Van Rijn (1993) (região associada às *mini-ripples*). Um procedimento iterativo de projeto das condições das simulações levou à adoção de uma declividade suave para o leito ($I = 5 \times 10^{-5}$ m/m) e sedimento composto por areia fina uniforme silicosa (massa específica do grão $\rho_s = 2650$ kg/m³, densidade relativa do grão $S = 2,65$, diâmetro mediano $d_{50} = 0,2$ mm e 90º percentil da distribuição granulométrica acumulada $d_{90} = 0,4$ mm). Com isso, o diâmetro normalizado de grão foi $d^* = 5,06$ e a velocidade de sedimentação foi $w_s = 0,0253$ m/s (SOULSBY, 1997). A condição de iminência do movimento do leito foi caracterizada pelos valores críticos: $\theta_{cr} = 0,050$ (VAN RIJN, 1993), $\tau_{0cr} = 0,16$ Pa e $u^*_{cr} = 0,0127$ m/s, em que $\theta = u^*_s/[gd_{50}(S-1)]$ é o parâmetro de Shields, $\tau_0 = \rho \cdot u^*{}^2$ é a tensão de cisalhamento sobre o leito, $g = 9,81$ m/s² é a aceleração devido à gravidade, $\rho = 1000$ kg/m³ é a massa específica da água e u^*_s é a velocidade de atrito associada à resistência por atrito de superfície (vide abaixo).

Foram simulados dois cenários de vazão específica (q) constante, os quais conferiram escoamento subcrítico turbulento (caracterizados na Tabela 1). Valores da profundidade média (H) e velocidade média (U) foram determinados com a equação de Manning aplicada às condições de leito liso, com $k_s = k_{ss} = 2,5d_{50} = 0,00050$ m (resistência ao escoamento causada apenas pelo atrito superficial com o leito, na condição inicial) e $26n = k_s^{1/6}$. Também com base na consideração de escoamento uniforme foram calculados valores iniciais de τ_0 e u^* , sendo que os dois cenários simulados representaram uma condição com baixa mobilidade dos sedimentos ($T = 1,0$ e $\theta/\theta_{cr} = 2,0$) e outra com alta mobilidade ($T = 3,0$ e $\theta/\theta_{cr} = 4,0$) respectivamente (para a faixa de pequenas dunas), em que $T = (u^*_s/u^*_{cr})^2 - 1$ é o parâmetro de transporte (não ocorrendo transporte quando $T \leq 0$). No cenário de baixa mobilidade ocorreu apenas descarga sólida de fundo (com base no número de Rouse

$b = w_s/\kappa.u^* = 3,531$, onde κ é a constante de von Kármán = 0,4), ao passo que, no cenário de alta mobilidade, ocorreu também descarga sólida suspensa (com valor inicial $b = 2,497$). Estes cenários possibilitaram avaliar como o aumento da resistência ao escoamento entre as duas condições de T alteram a tendência dos resultados gerados pelas abordagens estática e dinâmica.

Tabela 1 – Valores iniciais dos parâmetros hidrossedimentológicos, para os dois cenários simulados

PARÂMETRO	$\theta/\theta_{cr} = 2,0$	$\theta/\theta_{cr} = 4,0$
n		0,0108
I (m/m)		0,00005
q (m ³ /s.m)	0,322	1,023
H (m)	0,65	1,31
τ_0 (Pa)	0,3211	0,6423
U (m/s)	0,49	0,78
η_e (m)		0,0155
λ_e (m)		0,1395
t_e (h)	120,49	15,92
u^* (m/s)	0,0179	0,0253
T	1,0	3,0
b	3,531	2,497
q_b (kg/s.m)	0,001	0,010
q_s (kg/s.m)	-	0,012

Então, foram selecionadas equações para simular a evolução das formas de fundo, segundo algoritmo proposto por Rauén et al. (2008). O período total de simulação para as abordagens estática e dinâmica foi dividido em 100 passos de tempo, e sua amplitude dependeu do tempo para alcance das dimensões de equilíbrio (t_e), estimado pela Equação (1) (COLEMAN et al., 2005). As dimensões de equilíbrio das pequenas dunas foram estimadas pelas equações definidas por Raudkivi (1997), sendo: $\eta_e = 18,16d^{0,097}$ e $\lambda_e = 245d^{0,35}$, com $d = d_{50}$ expresso em mm.

$$t_e = \frac{d_{50}}{u_*} 2,08 \times 10^{-8} \left(\frac{\theta}{\theta_{cr}} \right)^{-2,42} \quad (1)$$

em que $u_* = \sqrt{gHI}$ é a velocidade de atrito associada à resistência total ao escoamento e, segundo o modelo de Coleman et al. (2005), θ é calculado com u_* (e não com a componente associada ao atrito superficial – possíveis implicações disto serão discutidas na próxima seção).

A evolução temporal das pequenas dunas, desde o leito plano até as dimensões de equilíbrio, foi simulada como curvas de potência (COLEMAN et al., 2005), pelas Equações (2) e (3).

$$\frac{\eta}{\eta_e} = \left(\frac{t}{t_e} \right)^{0,22 d_*^{0,22}} \quad \text{para } 0,01 < \frac{t}{t_e} < 1 \quad (2)$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_e} = \left(\frac{t}{t_e} \right)^{0,14 d_*^{0,33}} \quad \text{para } 0,01 < \frac{t}{t_e} < 1 \quad (3)$$

A resistência total ao escoamento, representada por k_s e composta pelas parcelas de resistência por atrito (k_{ss}) e por efeito de forma (k_{sf}), foi calculada pela Equação (4) - como indica Soulsby (1997).

$$k_s = k_{ss} + k_{sf} = 2,5d_{50} + 30 \frac{\eta^2}{\lambda} \quad (4)$$

A descarga sólida total (q_t) foi determinada como a soma das descargas sólidas de fundo (q_b) e suspensa (q_s) por unidade de largura do escoamento. A primeira foi calculada com a Equação (5) (VAN RIJN, 1993), que considera apenas a parcela de cisalhamento no leito relativa à resistência por atrito representada por u_{*s} - ou seja, q_b não sofre influência direta da dissipação turbulenta de energia gerada pela resistência de forma (SOULSBY, 1997).

$$q_b = 0,053 \frac{T^{2,1}}{d_*^{0,3}} [g(S-1)]^{0,5} d_{50}^{1,5} \rho_s \quad (5)$$

Em $t = 0$, admitiu-se que $u_{*s} = u_* = \sqrt{gHI}$, visto que o leito é liso e u_* é formado apenas pela parcela de arrasto por atrito. No restante da simulação, o cálculo de u_{*s} foi feito segundo Baas (1993) pela Equação (6), em uma simplificação da fórmula original de Van Rijn (1993).

$$u_{*s} = \frac{U \sqrt{g}}{18 \log \left(\frac{4H}{d_{90}} \right)} \quad (6)$$

Já a descarga sólida suspensa foi calculada pela integração numérica do perfil de Rouse gerado a partir de uma altura de referência $Z_a = 0,01H$ acima do leito, na qual ocorre a concentração suspensa de referência C_a obtida conforme a Equação (7) (SOULSBY, 1997).

$$C_a = \frac{0,015 d_{50} T^{1,5}}{Z_a (d_*)^{0,3}} \quad (7)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com as abordagens estática e dinâmica de determinação da resistência ao escoamento, para os cenários de baixa intensidade ($\theta/\theta_{cr} = 2,0$ em $t = 0$) e alta intensidades ($\theta/\theta_{cr} = 4,0$ em $t = 0$) de transporte de sedimentos, são apresentados na Figura 1.

Para os dois cenários simulados, observa-se na Figura 1a que a abordagem estática superestimou a profundidade de escoamento durante todo o período de evolução das pequenas dunas, até o seu equilíbrio ($t_e \approx 120$ horas com $\theta/\theta_{cr} = 2,0$; $t_e \approx 16$ horas com $\theta/\theta_{cr} = 4,0$). As discrepâncias correspondentes foram de 19% no início do período simulado, e superiores a 5% no primeiro quarto das simulações - aqui considerado como o patamar de referência para a incerteza tipicamente associada à determinação de tal parâmetro, segundo Soulsby (1997).

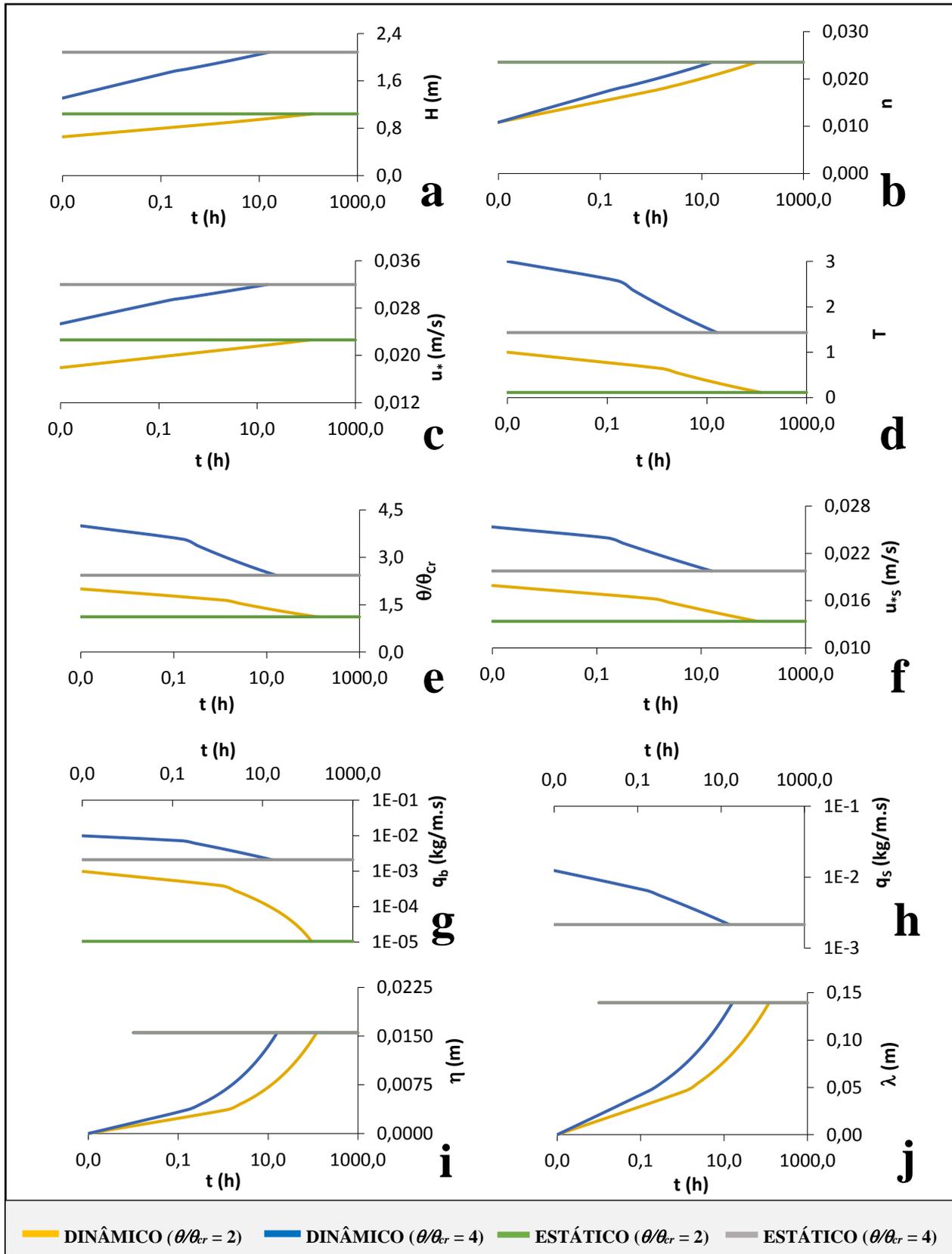


Figura 1 – Resultados obtidos para os parâmetros hidrossedimentológicos fluviais, sendo: a) profundidade média (H), b) coeficiente de Manning (n), c) velocidade de atrito associada à resistência total ao escoamento (u^*), d) parâmetro de transporte (T), e) proporção de Shields (θ/θ_{cr}), f) velocidade de atrito associada ao atrito superficial (u_{*s}), g) descarga sólida de fundo (q_b), h) descarga sólida suspensa (q_s), i) altura das formas de fundo (η) e j) espaçamento das formas de fundo (λ)

Conforme mostram as Figuras 1g e 1h, as descargas sólidas de fundo e de suspensão foram subestimadas com a abordagem estática frente à abordagem dinâmica durante o período de evolução das pequenas dunas. Conseqüentemente, com a abordagem estática o aporte sólido total estimado para o trecho foi 81% (5x) menor do que aquele calculado com a abordagem dinâmica para $\theta/\theta_{cr} = 2,0$ (diferença de 19 kg/m), e 27% (1,4x) menor para $\theta/\theta_{cr} = 4,0$ (diferença de 89 kg/m). Estas discrepâncias foram consideradas altas, mesmo em relação as incertezas usualmente envolvidas na determinação de descargas sólidas.

Tais desvios observados entre as abordagens estática e dinâmica ocorreram em função das variações temporais dos demais parâmetros plotados na Figura 1, as quais não são representadas na abordagem estática. Por exemplo, o valor do n de Manning (Figura 1b) aumentou gradualmente de $n = 0,0108$ (em $t = 0$, leito liso) para $n = 0,0235$ (em $t = t_e$, formas de fundo em equilíbrio) na abordagem dinâmica, tendo levado cerca de 7 horas para alcançar o valor de 0,020 no cenário de $\theta/\theta_{cr} = 2,0$. Em contrapartida, na abordagem estática tal parâmetro foi constante ($n = 0,0235$) durante todo o período de $t \leq t_e$. Concomitantemente, em ambos os cenários de escoamento simulados, os valores de U (não mostrados) e u_{*s} (Figura 1f) diminuíram com o tempo – considerando a relação diretamente proporcional entre essas grandezas pela Equação (6) – ao passo que u_* aumentou (Figura 1c). Esses comportamentos são condizentes com a relação entre U , τ_0 e u_{*s} explicitada por Raudkivi (1998) para o desenvolvimento de pequenas dunas a partir de leito liso. Entende-se que, com a diminuição gradativa de U , também decresce a importância relativa da parcela de arrasto por atrito na composição da resistência total ao escoamento, enquanto cresce a importância relativa da parcela de arrasto por forma (graças ao desenvolvimento das formas de fundo) (RAUDKIVI, 1998). Essa tendência foi observada ao longo de cada simulação, e também ocorreu quando se comparam os dois cenários de escoamento, onde para $t/t_e = 1$: $u_{*s}/u_* \approx 59\%$ para $\theta/\theta_{cr} = 2,0$ e $u_{*s}/u_* \approx 62\%$ para $\theta/\theta_{cr} = 4,0$. Então, com o decréscimo de u_{*s} , o parâmetro de transporte (T) e a proporção de Shields calculada com u_{*s} (θ/θ_{cr}) também decaíram com o tempo, conforme mostrado nas Figuras 1d e 1e, respectivamente. Isso explica a tendência decrescente nos valores das descargas de fundo e suspensa, conforme obtidos com a abordagem dinâmica.

Com o aumento no tempo de u_* (Figura 1c), conforme calculado com a abordagem dinâmica para $\theta/\theta_{cr} = 4$, houve uma redução concomitante no número de Rouse (não mostrada) de $b = 2,497$ na condição inicial para $b = 1,979$ na condição com as formas de fundo em equilíbrio. Com isso, aumentou a importância relativa da descarga sólida suspensa na composição da descarga sólida total (de 48% para 51%, respectivamente), como era esperado (VAN RIJN, 1993; SOULSBY, 1997). De um modo geral, uma redução em b decorre de um aumento na intensidade de turbulência na coluna de água, o qual pode ser explicado pelo crescimento das formas de fundo. Por sua vez, isso favorece

uma maior uniformidade do perfil vertical de concentração de sedimentos em suspensão, ainda que os valores de concentração correspondentes diminuam gradualmente à medida que as formas de fundo crescem (SOULSBY, 1997) – pois, conforme calculado com a Equação (7), ocorre uma redução dos valores de C_a causada pela redução de u_{*s} (que determina T).

Com a dependência da velocidade de atrito (u_*) na determinação de t_e pela Equação (1) (COLEMAN et al., 2005) e visto que u_* cresce durante a simulação, observou-se ser relevante refinar o procedimento de cálculo da abordagem dinâmica de modo a considerar o efeito da evolução das formas de fundo sobre sua própria taxa de crescimento, gerando uma retroalimentação morfodinâmica no cálculo de t_e , a cada passo de tempo. Nesse caso, para representar de modo mais fidedigno os processos físicos envolvidos – e refletir a associação que há entre a evolução das formas de fundo e a descarga sólida de fundo, que por sua vez é governada apenas pela parcela de arraste por atrito no leito (SOULSBY, 1997; RAUDKIVI, 1998) – entendeu-se que a Equação (1) poderia envolver u_{*s} em vez de u_* (inclusive no cálculo de θ). Com isso, em um cenário com retroalimentação de t_e , como a taxa de transporte de sedimentos por carga de fundo apresentou tendência decrescente, ocorreriam aumentos concomitantes nos valores de t_e a cada passo de tempo, em direção à condição de equilíbrio.

4 CONCLUSÃO

- As simulações deste estudo apontaram que podem ocorrer discrepâncias substanciais nos resultados obtidos para parâmetros hidrossedimentológicos entre as abordagens estática e dinâmica de representação da resistência ao escoamento, conforme afetada pelo desenvolvimento de pequenas dunas em leito aluvial. Implicações práticas importantes podem decorrer na modelagem computacional e na tomada de decisão no âmbito da gestão de recursos hídricos, que usa tais dados para elaborar mapas de alagamento e para estimar assoreamento em reservatórios, por exemplo.
- Reconhece-se haver outras incertezas envolvidas na modelagem da resistência ao escoamento em rios; isso deve ser levado em consideração quando da avaliação crítica dos conceitos e resultados aqui reportados, visando reduzir incertezas e melhorar a confiabilidade de modelos hidrossedimentológicos fluviais.
- Há indícios de que é necessário aplicar a retroalimentação morfodinâmica no cálculo do tempo para alcance das dimensões de equilíbrio das formas de fundo, mas após a adaptar a equação correspondente – Equação (1), de Coleman et al. (2005) – para representação mais coerente (particionada) da velocidade de atrito associada à evolução das formas de fundo.

- Estudos futuros podem ampliar a implementação de cenários de modo a considerar os efeitos da evolução de grandes dunas e/ou com leito inicial ondulado em equilíbrio para leito ondulado em condições diversas de vazão, seja envolvendo um único incremento instantâneo, seja para a condição de escoamento transiente durante a passagem de uma onda de cheia. Isso permitirá ampliar avaliações da importância relativa da evolução das formas de fundo sobre estimativas de parâmetros hidrossedimentológicos fluviais.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), que financia uma bolsa de mestrado ao primeiro autor do artigo.

REFERÊNCIAS

- BAAS, J. H. (1993) *Dimensional analysis of current ripples in recent and ancient depositional environments*. *Geologica Ultraiectina*, (106), 199 p.
- COLEMAN, S. E.; ZHANG, M. H.; CLUNIE, T. M. “*Sediment-wave development in subcritical water flow*”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131 (2) pp. 106-111, fev. 2005.
- EINSTEIN, H. A.; BANKS, R. B. “*Fluid resistance of composite roughness*”. *Transactions – American Geophysical Union*, 31 (4), pp. 603-610, 1950.
- JULIEN, P. Y.; KLAASSEN, G. J.; TEN BRINKE, W. B. M.; WILBERS, A. W. E. “*Case study: bed resistance of Rhine River during 1998 flood*”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128 (12), pp. 1042-1050, dez. 2002.
- KNIGHT, D. W.; MCGAHEY, C.; LAMB, R.; SAMUELS, P. G. (2010) *Practical channel hydraulics: roughness, conveyance and afflux*: Taylor & Francis, Leiden, 354 p.
- MORVAN, H.; KNIGHT, D.; WRIGHT, N.; TANG, X.; CROSSLEY, A. “*The concept of roughness in fluvial hydraulics and its formulation in 1D, 2D and 3D numerical simulation models*”. *Journal of Hydraulic Research*, 46 (2), pp. 191-208, out. 2008.
- PAARLBERG, A. J. *Modelling dune evolution and dynamic bed roughness in rivers*. 145 f. Tese (Doutorado em Sistemas Marítimos e Fluviais), Universidade de Twente, Enschede (Holanda), 2008.
- RAUDKIVI, A. J. (1998) *Loose Boundary Hydraulics*. CRC Press, Roterdã, 512 p.
- RAUDKIVI, A. J. “*Ripples on Stream Bed*”. *Journal of Hydr. Engineering*, 123 (1), pp. 58–64, 1997.
- RAUEN, W. B.; LIN, B.; FALCONER, R. A. (2008) “*Modelling dynamic bed roughness associated with bed form development*” in *Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS, Nanjing (China), 2008*.
- REESINK, A. J. H.; PARSONS, D. R.; ASHWORTH, P. J.; BEST, J. L.; HARDY, R. J.; MURPHY, B. J.; MCLELLAND, S. J.; UNSWORTH, C. “*The adaptation of dunes to changes in river flow*”. *Earth Science Reviews*, 185, pp. 1065-1087, set. 2018.
- SOULSBY, R. (1997) *Dynamics of marine sands*. Thomas Telford, Londres, 253 p.
- VAN RIJN, L. C. (1993) *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal areas*. Aqua Publications, Amsterdã, 690 p.