

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

CONFORMAÇÃO MORFOLÓGICA DE EQUILÍBRIO EM SIMULAÇÃO FÍSICA DE RIOS COM LEITO DE GRANULOMETRIA EXTENSA

Danrlei de Menezes¹ & Ana Luiza de Oliveira Borges²

Abstract: To enhance the understanding of the interaction between water and sediments, it is necessary to improve the physical modeling of a mobile bed through a preliminary phase of testing. These tests should allow the creation of a channel bed that closely reproduces the natural conditions, including morphological features, sediment distribution, and flow patterns. The objective of this study is to find an appropriate morphological configuration for the bed of an experimental channel in order to simulate the flow and sediment transport in gravel-bed rivers. For this purpose, we utilized an experimental channel measuring 10 meters in length, 0.56 meters in width, and 0.4 meters in height, divided into two sections: one with a fixed bed and another with a mobile bed. We conducted six tests, totaling 15 hours, in which we introduced flow into the channel, monitored the deformations on the mobile bed after each test, and collected the transported sediments. Over the course of the testing period, we observed a stabilization of the deformations and a decrease in sediment transport, indicating the attainment of a morphological equilibrium configuration in the mobile bed. This preliminary stage of the study will serve as a foundation for conducting future physical simulation tests and studies on an experimental scale in gravel-bed rivers.

Resumo: Para melhorar a compreensão da interação entre água e sedimentos, é necessário aprimorar a modelagem física de fundo móvel por meio de uma fase preliminar de ensaios. Esses ensaios devem permitir a criação de uma calha de canal que reproduza, o mais fielmente possível, as condições naturais, incluindo elementos morfológicos, distribuição dos sedimentos e padrões de fluxo. O objetivo deste estudo é encontrar uma configuração morfológica adequada para o leito de um canal experimental, a fim de simular o escoamento e o transporte de sedimentos em rios com leito de cascalho. Para isso, utilizamos um canal experimental com dimensões de 10 metros de comprimento, 0,56 metros de largura e 0,4 metros de altura, dividido em duas seções: uma com fundo fixo e outra com fundo móvel. Realizamos seis ensaios, totalizando 15 horas, nos quais injetamos uma vazão no canal, monitoramos as deformações no fundo móvel após cada ensaio e coletamos os sedimentos transportados. Ao longo do tempo dos ensaios, observamos uma estabilização das deformações e uma redução no transporte de sedimentos, indicando a obtenção de uma configuração morfológica de equilíbrio no fundo móvel. Essa etapa preliminar do estudo servirá como base para a realização de futuros ensaios e estudos de simulação física em escala experimental em rios com leito de cascalho.

Palavras-Chave – Modelagem física; Fundo móvel; Transporte de sedimentos.

INTRODUÇÃO

A superfície do leito de um rio aluvial representa a principal interface entre o fluxo de água e o sedimento disponível para ser transportado. Como tal, é um componente crítico do sistema fluvial, exercendo uma influência na hidráulica do escoamento (HARDY *et al.*, 2010; FERRARO *et al.*, 2019), na resistência ao fluxo (RICKENMANN e RECKING, 2011) e na taxa de transporte de

1) Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre / RS. E-mail: danrlei.menezes@ufrgs.com.br

2) Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre / RS. E-mail: ana.borges@ufrgs.br

sedimentos e na distribuição de tamanhos de grãos (WANG *et al.*, 2011). Além disso, devido à interação dinâmica entre o leito, o fluxo e o sedimento transportado, o leito do canal está livre para se ajustar às mudanças na vazão (POLVI, 2021; RACHELLY *et al.*, 2022) e no suprimento de sedimentos (DIETRICH *et al.*, 1989; LÓPEZ *et al.*, 2023). Assim, com o intuito de procurar uma maior estabilidade, a superfície de um leito de rio se molda livremente para acomodar os sedimentos disponíveis, resultando na formação de uma arquitetura característica do fundo. (FERGUSON, 2007; NELSON e DUBÉ, 2016).

Um exemplo disso são os projetos de restauração fluvial, que frequentemente envolvem a construção de novos canais ou leitos de rio que ainda não foram, necessariamente, modificados pela ação da água. De acordo com Cooper e Tait (2009), essa abordagem pode não ser apropriada para reproduzir fielmente os componentes hidráulicos e ecológicos de um rio com leito de cascalho, devendo o leito ser construído por meio de ciclos sequenciais de transporte e deposição de sedimentos.

Vários estudos têm utilizado configurações ideais de leitos de cascalho para isolar os efeitos de diferentes configurações superficiais de depósito (e.g. SCHMEEKLE *et al.*, 2007; FERRO, 2018; SMITH *et al.*, 2023), mas poucos desenvolveram técnicas para recriar as condições de leito encontradas em rios de cascalho naturais. Buffin-Bélanger *et al.* (2003) e Spiller *et al.* (2015) desenvolveram um procedimento de moldagem que reproduz com precisão a complexidade das superfícies de leitos de cascalho. Foram feitos moldes a partir de uma seção de um leito de cascalho no campo, e réplicas foram produzidas a partir desses moldes e colocadas no canal. Embora esse método crie uma superfície com a estrutura geométrica de um leito de cascalho natural, é importante observar que ela é impermeável, o fundo é estático e não reproduz a ordenação vertical subsuperficial.

Nesse sentido, para a compreensão da interação entre água e sedimentos, a modelagem física do fundo móvel exige uma fase preliminar de ensaios que permita a criação de uma calha de canal que apresente elementos morfológicos, distribuição dos sedimentos e caminhos de escoamento que reproduzam, o mais próximo possível, as suas condições naturais (calha de equilíbrio). Assim, o objetivo deste trabalho é, partindo de um fundo com material sedimentar reguado e disposto em um plano inclinado, gerar uma conformação morfológica que reproduza padrões característicos de calhas de rios de leito de cascalho. A busca da calha de equilíbrio, partiu da injeção, por um determinado tempo, de uma vazão no canal, até se obter uma geometria leito quase invariável, identificada através da quantificação do sedimento transportado.

MATERIAIS E MÉTODOS

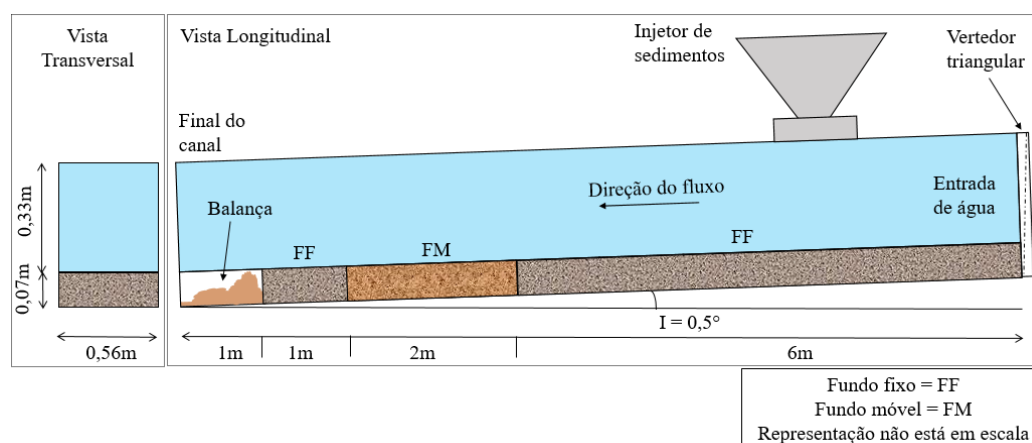
Configuração experimental

Os experimentos foram conduzidos em um canal experimental do Pavilhão Fluvial do Núcleo de Estudos em Correntes de Densidade (NECOD), no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

As dimensões do canal de seção retangular são 10m de comprimento, 0,56m de largura e 0,4m de altura (Figura 1). As paredes laterais do canal são feitas de vidro, permitindo observar e registrar as características do fluxo, bem como os dados hidrodinâmicos. O circuito de alimentação líquida é composto por um vertedor triangular, um reservatório de jusante e uma bomba para recircular a água. A inclinação do canal é ajustável por meio de um ponto de apoio onde atua um macaco hidráulico.

Junto da entrada de água, na saída do vertedor, existe uma região de transição ou de tranquilização do fluxo superficial. Nos próximos 4,5m foi moldado um fundo fixo (*FF*) com areia ($D_{50} = 1,0\text{mm}$) para que ocorra o desenvolvimento do escoamento, antes de atingir o trecho de fundo móvel (*FM*). Em seguida está localizada a região de *FM* (área efetiva de ensaio) de 2m de comprimento, onde são coletados os dados. Logo depois, tem-se novamente uma região de *FF* (1m) e por fim, a caixa coletora dos sedimentos transportados do *FM* (Figura 1).

Figura 1 - Representação esquemática do canal experimental



Análises de semelhança

Para a escolha da composição granulométrica do sedimento a ser ensaiado, foi utilizado como inspiração o rio Forqueta (localizado em Maquiné/RS). No trabalho de Menezes (2021) são detalhadas as características de um trecho desse rio, que serviu como inspiração para o desenvolvimento do modelo físico. Em relação as características deste rio, o D_{50} médio do leito é de 63,8 mm, classificado como cascalho muito grosso, possui uma largura média de 10 m e apresenta três diferentes tipos de morfologias (step-pool, cascade e plane-bed). Mais detalhes podem ser encontrados em outros trabalhos como Menezes *et al.*, (2021); Menezes; Kobiyama, (2021); Menezes; Kobiyama; Michel, (2022) e Menezes; Kobiyama (2023).

Foram aplicadas regras clássicas de similaridade de Froude para escoamento de líquido em superfície livre.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (1)$$

O fator de escala geométrica (r) foi estabelecido em função das dimensões do aparato experimental a ser empregado (0,56 m):

$$r = \frac{L_{modelo}}{L_{natural}} \quad (2)$$

Adimensionalizando todas as grandezas envolvidas, é possível mostrar que o fator de escala para os diâmetros das partículas pode ser tomado igual ao fator de escala geométrica r desde que o modelo não seja distorcido e que as densidades do sedimento natural e no modelo sejam as mesmas. Na Tabela 1 são mostradas as relações de escala considerando a escala geométrica de 1:20. Conforme destacado, essa escala foi determinada em virtude da limitação do canal experimental que possui apenas 0,56 m de largura. Além disso, essa escala permite que ambas escalas vertical e horizontal sejam as mesmas.

Tabela 1 – Relações de escala entre o modelo e o equivalente protótipo

	S	L	D_{50}	Q_{med}
Modelo 1:20	0,00937m/m	0,56m	1mm	234 L/min
Protótipo	0,00937m/m	10m	20mm	7 m ³ /s

Vazão de entrada

A alimentação da vazão injetada foi proveniente de um reservatório com capacidade para 2000 litros, localizado a jusante do canal. O sistema funciona por recirculação da vazão. Para o controle e medição da vazão (Q), é utilizada uma régua acoplada ao vertedor triangular (60°) instalado no início do canal para determinação da lâmina d'água no vertedor (H). O valor encontrado de Q é validado com a Q medida no final do canal e, assim, é calibrado o coeficiente de descarga do vertedor.

Na sequência, foi construída uma curva-chave de vazão. Para ajuste dos valores calculados com os medidos (observados) foi utilizado o Solver do Excel para encontrar os parâmetros a e n da Equação 3

$$Q = aH^n \quad (3)$$

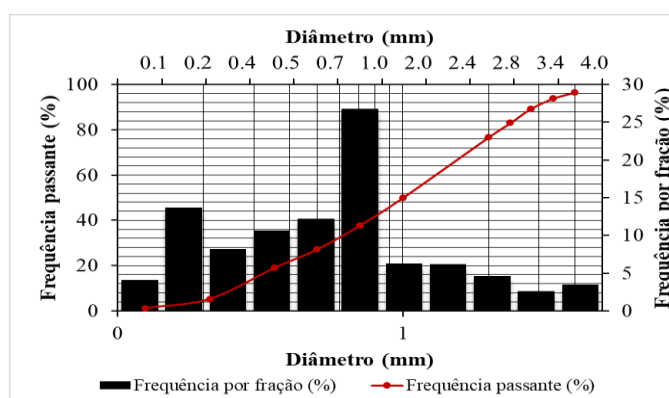
Onde a e n são valores adimensionais de ajuste da equação. Com os parâmetros a e n calculados, é encontrada a Equação 4. Assim, com base na leitura do nível de água no vertedor (H em cm), sabe-se a vazão (Q em L/min) que está entrando no canal pelo vertedor.

$$Q = 0,60067H^{2,6} \quad (4)$$

Caraterização do fundo móvel (FM)

Foi utilizado areia ($D_{50} = 1,0$ mm) como material do FM, apresentado na Tabela 1. A curva granulométrica do material utilizado pode ser observada na Figura 2.

Figura 2 - Curva granulométrica do material do fundo móvel do canal



Medição das deformações de fundo do canal

Para determinação das deformações do FM, foi utilizado um perfilômetro laser. Dessa forma, ao fim de cada ensaio foi levantada a topografia do fundo, sendo possível comparar as modificações do fundo ao longo do tempo. O equipamento medidor de distâncias a laser (modelo MD250 ADV) apresenta precisão de 0,1 mm e velocidade de leitura de 100 medidas por segundo. Como ele possui alta precisão, pode ser utilizado para a avaliação de distâncias, dimensões, posicionamento relativo e comparação de cotas, efetuando uma medida dinâmica, pontual e contínua, sem contato físico entre o medidor e o objeto alvo. Maiores detalhamentos estão expostos no trabalho de Manica (2002).

Este equipamento está acoplado a uma mesa de coordenadas, a qual permite o deslocamento bastante controlado do perfilômetro sobre o canal, garantindo alta precisão na varredura da topografia de fundo. A área de trabalho da mesa é de 0,5m², dessa forma, são usadas duas folhas de posição: no primeiro metro do FM e após no segundo metro.

Caixa coletora do material transportado

No fim do canal experimental, está localizado uma caixa coletora, onde são depositados os sedimentos transportados em cada ensaio. O material é coletado, secado em estufa a 105°C e realizado a granulometria para determinação dos diâmetros característicos (D_{10} , D_{16} , D_{50} , D_{84} e D_{90}).

Análise dos dados

Para visualizar os dados obtidos pelo perfilômetro, utilizamos o software Surfer. Comparamos os valores dos ensaios ao longo do tempo (0, 2, 6, 8, 10, 12 e 15 horas) e os comparamos com os valores dos sedimentos coletados na caixa coletora. Na Figura 3 é mostrado o canal nas condições iniciais e no final do ensaio.

Figura 3 - Canal de fundo móvel: pré (plano inclinado e reguado) e pós ensaios (mudança na textura e caminhos preferenciais)



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação da vazão e do sedimento transportado

O tempo total para estabilização do leito do canal foi de 15 horas. Primeiramente, iniciou-se o experimento com uma Q máxima próxima de 250L/min. Durante esse período, se observou que a quantidade de sedimentos transportada estabilizou em um único valor ($\sim 2\text{g}/\text{min}$). Na sequência, foi aumentada a Q para o valor de 318L/min, a qual corresponde a uma Q com tempo de retorno (TR) de 2 anos no protótipo. Essa Q foi mantida por 5 horas, até se observar a exaustão dos sedimentos suscetíveis a serem transportados no canal.

Na Figura 4 é mostrada a Q inserida no sistema e a quantidade de sedimentos transportada e coletada no final do canal. Observa-se que quando ocorre o aumento da Q para 318L/min, há um incremento no valor total de sedimentos transportados e que, após isso, os valores tendem a diminuir. De acordo com Masteller e Finnegan (2017), que avaliaram diferentes escalas de tempo de acomodação dos sedimentos do leito, em escalas de tempo curtas, as taxas de transporte de sedimentos do leito diminuem à medida que o leito se estabiliza.

Em relação as características do material transportado, o D_{10} , D_{16} , e D_{50} desse material apresentaram um aumento no primeiro fluxo de Q (Figura 5), que coincidiu com a maior parte do material transportado (Figura 4). Após 2 horas de ensaio, os valores diminuíram e mantiveram-se praticamente constantes indicando que apenas uma pequena fração do leito é móvel e, portanto, é transportada (KIRCHNER *et al.* (1990) até o novo incremento de Q .

Por outro lado, quando ocorreu o aumento de Q , o D_{84} e o D_{90} do material transportado foram maiores que os outros diâmetros analisados, conforme é observado na Figura 5. Na sequência, ambos tiveram uma diminuição, até às 12h de ensaio. Nas próximas 3 horas, que totalizaram 15h de ensaio,

os valores dos diâmetros do sedimento transportados apresentaram um aumento em suas grandezas, já que o sedimento mais fino que estava disponível já havia sido transportado. Paphitis e Collins, (2005) e Haynes e Pender, (2007), sugerem que, sob acomodação prévia, o leito nunca é totalmente estabilizado e que uma quantidade de grãos protuberantes está sempre disponível para transporte.

Figura 4 - Vazão e sedimento transportado ao longo dos ensaios

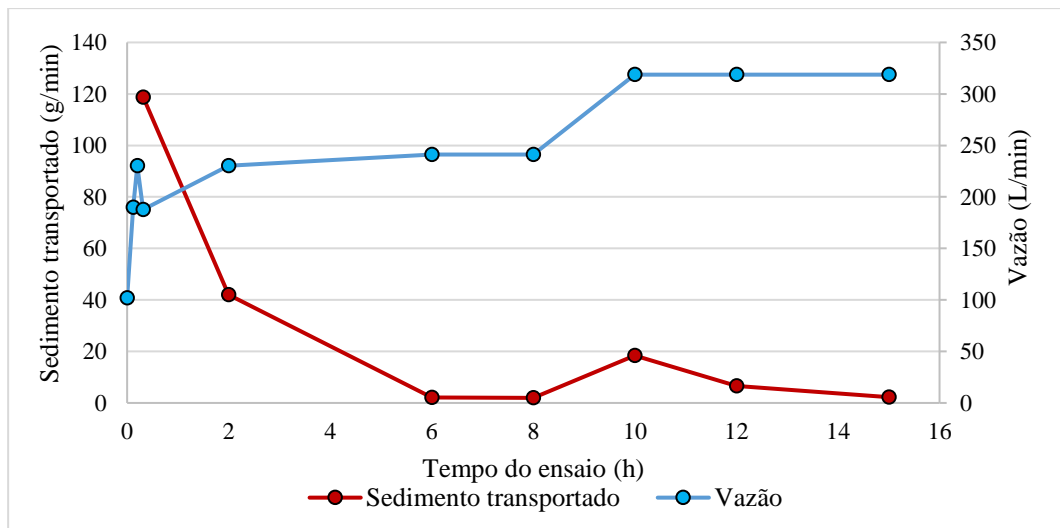
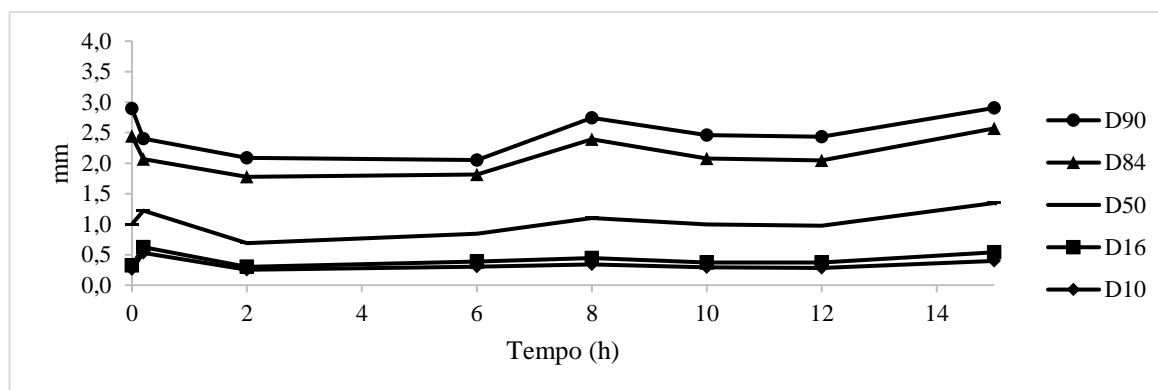


Figura 5 - Comportamento dos diâmetros característicos transportados ao longo da fase de conformação morfológica



Avaliação das modificações de fundo

No software Surfer, as superfícies foram geradas e avaliadas quanto ao volume anterior e posterior a cada ensaio. Os volumes foram multiplicados pela densidade do quartzo (2,65) e transformados em massa (gramas), sendo essa diferença chamada de sedimentos retrabalhados calculado. Nos tempos 8h e 10h, o balanço de material sedimentos retrabalhados foi negativo (Tabela 2). Como não havia incremento de Q nesse momento, supõe-se que pode ter ocorrido uma conformação do material do leito, na busca de uma estabilização do transporte de sedimentos, visto que foi um dos menores valores observado. No entanto, para o tempo 10h houve incremento de Q . Assim, supõe-se que ocorreu uma mobilização dos sedimentos e deposição dentro dos 2m do *FM*, com definição de caminhos preferencias do fluxo de água, bem como acomodação dos sedimentos menores entre os vazios do *FM* que, por fim, influenciou no aumento da deposição dos sedimentos no canal.

Os valores dos sedimentos transportados coletados diferiram bastante dos sedimentos retrabalhados calculados. Essa diferença pode estar relacionada com o fato do material ficar retido ou aprisionado no próprio *FM* (retrabalhado pelo escoamento nos 2m de *FM*). Essa diferença foi maior no início do ensaio quando a textura superficial era mais fina, o que pode representar a retirada dos

finos e uma acomodação do leito sob a ação da coluna de água. Ainda, os finos talvez não tenham sido capturados pela caixa coletora e tenham turvado a água no tanque. Na Figura 5, observa-se que após 2h de ensaio, foram registrados os menores valores para os diâmetros característicos da curva granulométrica do material transportado.

Assim, supõe-se que o material do leito pode estar se acomodando, compactando e formando uma calha em equilíbrio, no entanto, esse comportamento é limitado ao tempo de execução, visto que experimentos anteriores com calhas observaram que compactação mensurável exigiu vários dias de execução (CHARRU *et al.*, 2004). Para obter uma maior compreensão de como a subsuperfície se comporta, Cooper e Tait (2009) sugerem que seja quantificado a condutividade hidráulica e a porosidade do leito estudado.

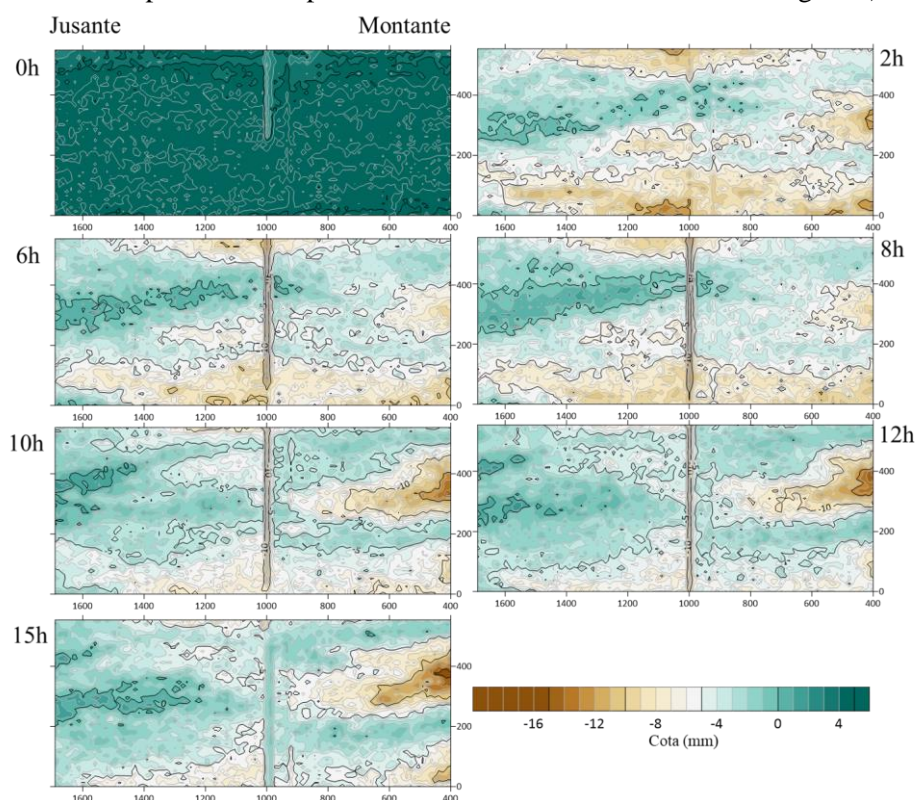
Tabela 2 - Balanço de erosão x deposição por meio da análise das superfícies no Surfer

Tempo (h)	Volume Erodido (cm ³)	Volume Depositado (cm ³)	Volume Líquido (cm ³)	Sedimento retrabalhado calculado (g)	Sedimento transportado coletado (g)	Diferença
2	14780.72	0.00	14780.72	39,17	6,50	32,67
6	891.01	452.98	438.04	1,16	0,50	0,66
8	128.38	992.04	-863.66*	-2,29*	0,24	-
10	142.15	2696.97	-2554.82*	-6,77*	2,21	-
12	1073.82	420.65	653.18	1,73	0,79	0,94
15	1211.27	449.27	762.01	2,02	0,41	1,61

*Os valores negativos indicam que essa quantidade permaneceu depositada sobre o FM.

Na Figura 6 é mostrado a dinâmica do fundo ao longo dos ensaios. Observa-se que ocorreu a formação de uma fossa no início do FM (parte do FM em cor branca) em virtude do contato entre FF e início do FM. No entanto, se observamos um rio natural, esse é um comportamento padrão desses tipos de rios (também conhecidos por *step-pools*, conforme Montgomery e Buffington, 1997). Observa-se também a ocorrência de caminhos preferenciais, mesmo que a água ocupe toda a largura do canal.

Figura 6 – Alterações do fundo do canal (entre os 40 e 170 cm do FM) ao longo dos ensaios (cor mais verde representa cota positiva e cor mais marrom indica cota negativa)



Na sequência, foram selecionados dois perfis longitudinais localizados a 20 e 40 cm da margem direita do canal. Na Figura 7 observa-se o comportamento ao longo dos ensaios destas duas seções longitudinais. A diferença entre os perfis permite perceber a grande remoção de material tão logo inicia o escoamento e, após esta acomodação inicial, a mudança da elevação média do plano sedimentar onde as deformações de fundo irão ocorrer. Também se percebe que a fossa de erosão localizada gerada pela transição entre rugosidades, permanece praticamente estável ao longo dos ensaios, deixando de ser uma fonte de sedimentos para o canal

A variação dos valores dos diâmetros de fundo apresentou pouca variação após 12h de ensaio (Figura 8). O D_{10} e o D_{16} diminuíram variando de 0,259 a 0,255 mm e de 0,322 a 0,316 mm, respectivamente, indicando o transporte dessa classe ou talvez o preenchimento dos vazios (compactação do *FM*). O D_{50} permaneceu praticamente o mesmo, variando de 1,0 a 1,18 mm. Por outro lado, o D_{84} e o D_{90} aumentaram de 2,445 a 2,522 e de 2,894 a 3,0 mm, respectivamente. Isso indica um aumento de rugosidade com o passar do tempo.

Figura 7 - Perfil longitudinal nas posições 20 e 40cm

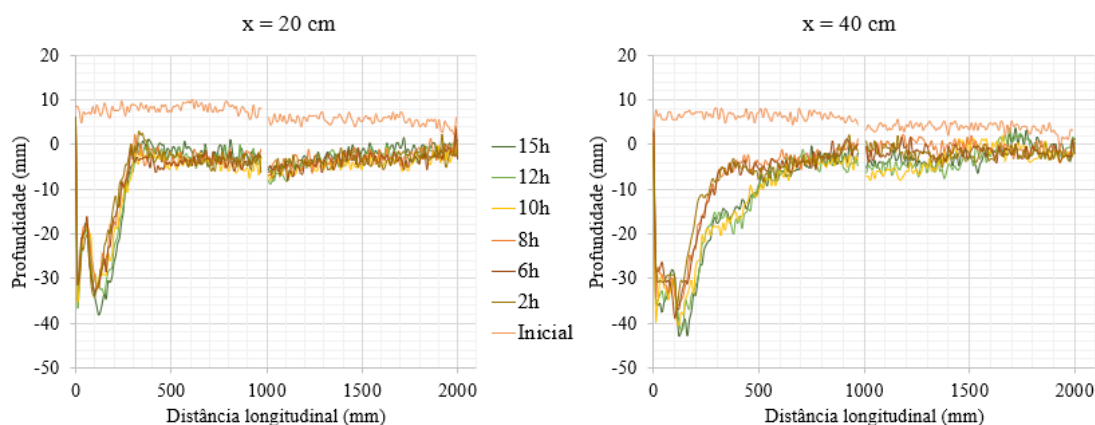
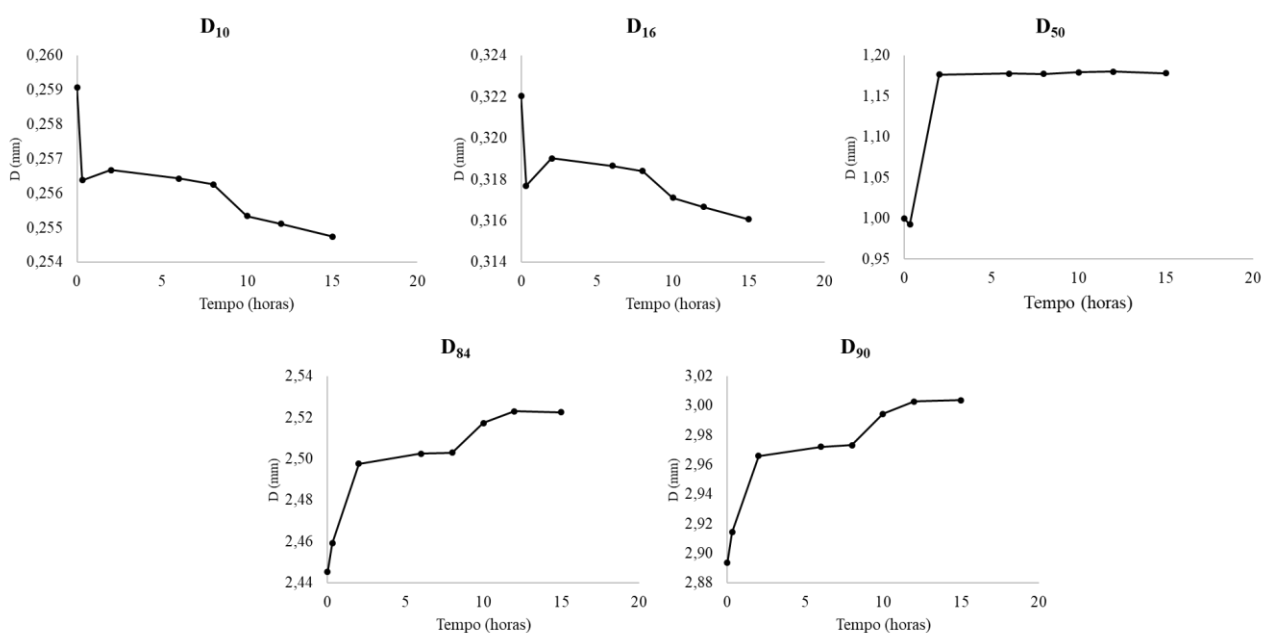


Figura 8 – Variação dos diâmetros de fundo ao longo dos ensaios



É interessante notar que esse padrão também foi observado para os sedimentos transportados (Figura 5). Em outras palavras, a mesma classe de sedimento que aumenta ou diminui no leito do canal é aquela que é transportada pelo próprio canal. Esse comportamento ocorre devido à variação

na disponibilidade das classes de sedimentos durante os ensaios. Esses resultados sugerem uma ligação direta entre o número de grãos protuberantes disponíveis e o número de grãos transportados (MASTELLER e FINNEGAN, 2017). Esses grãos se projetam mais longe da elevação média do leito, em média, possuindo ângulos de atrito menores, facilitando o transporte (KIRCHNER *et al.*, 1990). Além disso, eles estão expostos a um maior arrasto de fluido, resultando também em maior mobilidade (FENTON e ABBOTT, 1977).

Os rios naturais exploram materiais de granulometria extensa para criar condições estáveis no leito, mas a condição não é simplesmente mantida devido aos fluxos variáveis que experimentam condições de baixas, médias e altas vazões. Na maioria das vezes, as condições são subcríticas, no sentido de que o fluxo é insuficiente para perturbar significativamente o leito, ou as tensões aplicadas pelo fluxo criam uma situação transitória na qual o leito está se ajustando a um novo estado, na medida em que o fluxo de sedimentos que é fornecido a montante o permite (CHURCH e HASSAN, 1998). Desse modo, espera-se que esse estudo, ao incluir uma fase de pré-formação de calha morfológicamente análoga à calha natural, forneça subsídios mais robustos para o entendimento dos fenômenos associados ao escoamento de água e sedimentos em rios com leitos de cascalho.

CONCLUSÕES

Foi constatado que o método de construção do fundo móvel, que envolve o preenchimento do canal com o material sedimentar selecionado, constituindo um plano inclinado com declividade única e textura superficial mais fina, não reproduz fisicamente de maneira precisa a realidade observada. Devido à falta de interação com o fluxo, o fundo ainda não adquiriu as conformações geométricas e não reproduz padrões de escoamento semelhantes aos ambientes naturais caracterizados por escoamentos rasos e de granulometria extensa.

A manutenção de uma vazão característica do ambiente a ser modelado fisicamente, permitiu a geração de uma calha de canal que incorpore elementos morfológicos, distribuição dos sedimentos e caminhos de escoamento mais fiéis às condições naturais, propiciando que os estudos de simulação física em rios com granulometria variada sejam mais precisos e realistas. Além disso, esse estudo preliminar apresenta revelações sobre os processos físicos envolvidos no transporte de água e sedimentos que devemos observar em estudos de simulação física. A sua compreensão é essencial para diversas áreas, como a hidrologia, a geomorfologia fluvial e a engenharia de rios. Isso permite, por meio da simulação física, prever e avaliar os impactos de atividades humanas, como a construção de barragens e obras de engenharia fluvial, além de fornecer insights para a conservação e gestão de ecossistemas fluviais.

REFERÊNCIAS

- BUFFIN-BÉLANGER, T., REID, I., RICE, S., CHANDLER, J. H., & LANCASTER, J. (2003). A casting procedure for reproducing coarse-grained sedimentary surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 28(7), 787-796.
- CHARRU, F., MOUILLERON, H., & EIFF, O. (2004). Erosion and deposition of particles on a bed sheared by a viscous flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 519, 55-80.
- CHURCH, M., HASSAN, M. A., & WOLCOTT, J. F. (1998). Stabilizing self-organized structures in gravel-bed stream channels: Field and experimental observations. *Water Resources Research*, 34(11), 3169-3179.
- COOPER, J. R., & TAIT, S. J. (2009). Water-worked gravel beds in laboratory flumes—a natural analogue?. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(3), 384-397.
- DIETRICH, W. E., KIRCHNER, J. W., IKEDA, H., & ISEYA, F. (1989). Sediment supply and the development of the coarse surface layer in gravel-bedded rivers. *Nature*, 340(6230), 215-217.
- FENTON, J. D., & ABBOTT, J. E. (1977). Initial movement of grains on a stream bed: The effect of relative protrusion. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 352(1671), 523-537.
- FERGUSON, R. (2007). 2 Gravel-bed rivers at the reach scale. *Developments in Earth Surface Processes*, 11, 33-53.

- FERRARO, D., COSCARELLA, F., & GAUDIO, R. (2019). Scales of turbulence in open-channel flows with low relative submergence. *Physics of Fluids*, 31(12), 125114.
- FERRO, V. (2018). Assessing flow resistance in gravel bed channels by dimensional analysis and self-similarity. *Catena*, 169, 119-127.
- HARDY, R. J., BEST, J. L., LANE, S. N., & CARBONNEAU, P. E. (2010). Coherent flow structures in a depth-limited flow over a gravel surface: The influence of surface roughness. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F3).
- HAYNES, H., & PENDER, G. (2007). Stress history effects on graded bed stability. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(4), 343-349.
- KIRCHNER, J. W., DIETRICH, W. E., ISEYA, F., & IKEDA, H. (1990). The variability of critical shear stress, friction angle, and grain protrusion in water-worked sediments. *Sedimentology*, 37(4), 647-672.
- LÓPEZ, R., VILLE, F., GARCIA, C., BATALLA, R. J., & VERICAT, D. (2023). Bed-material entrainment in a mountain river affected by hydropeaking. *Science of The Total Environment*, 856, 159065.
- MANICA, R. (2009). Geração de correntes de turbidez de alta densidade: condicionantes hidráulicos e deposicionais. Tese de Doutorado. PPG Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. UFRGS.
- MASTELLER, C. C., & FINNEGAN, N. J. (2017). Interplay between grain protrusion and sediment entrainment in an experimental flume. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122(1), 274-289.
- MENEZES, D. (2021). Caracterização hidrossedimentológica de trecho do rio Forqueta, Maquiné, RS. Dissertação de Mestrado. PPG Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. UFRGS.
- MENEZES, D. D., Kobiyama, M., Oliveira, H. U., & Lucca, M. G. D. (2021). Avaliação do transporte de sedimentos de fundo por meio da pintura de sedimentos grosseiros em rio pedregoso. *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (24.: 2021: Belo Horizonte). Anais [recurso eletrônico]. Porto Alegre: ABRHidro, 2021.*
- MENEZES, D., & KOBIYAMA, M. (2021). Sediment size and shape observation in a mountain river, southern Brazil. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU21-9884).
- MENEZES, D., & KOBIYAMA, M. (2023). Hydrosedimentological characterization of a reach in the Forqueta River catchment, south Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 104430.
- MENEZES, D., KOBIYAMA, M., & MICHEL, G. P. (2022). Análise da composição da vazão na bacia hidrográfica do rio Forqueta (Maquiné/RS). *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 19(2022).
- MONTGOMERY, D. R., & BUFFINGTON, J. M. (1997). Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 109(5), 596-611.
- NELSON, A., & DUBÉ, K. (2016). Channel response to an extreme flood and sediment pulse in a mixed bedrock and gravel-bed river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(2), 178-195.
- PAPHITIS, D., & COLLINS, M. B. (2005). Sand grain threshold, in relation to bed 'stress history': an experimental study. *Sedimentology*, 52(4), 827-838.
- POLVI, L. E. (2021). Morphodynamics of boulder-bed semi-alluvial streams in northern Fennoscandia: a flume experiment to determine sediment self-organization. *Water Resources Research*, 57(3), e2020WR028859.
- RACHELLE, C., VETSCH, D. F., BOES, R. M., & WEITBRECHT, V. (2022). Sediment supply control on morphodynamic processes in gravel-bed river widenings. *Earth Surface Processes and Landforms*.
- RICKENMANN, D., & RECKING, A. (2011). Evaluation of flow resistance in gravel-bed rivers through a large field data set. *Water Resources Research*, 47(7).
- SCHMEECKLE, M. W., NELSON, J. M., & SHREVE, R. L. (2007). Forces on stationary particles in near-bed turbulent flows. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(F2).
- SMITH, H. E., MONSALVE, A. D., TUROWSKI, J. M., RICKENMANN, D., & YAGER, E. M. (2023). Controls of local grain size distribution, bed structure, and flow conditions on sediment mobility. *Earth Surface Processes and Landforms*.
- WANG, X., YANG, Q., LU, W., & WANG, X. (2011). Effects of bed load movement on mean flow characteristics in mobile gravel beds. *Water Resources Management*, 25, 2781-2795.

AGRADECIMENTOS - O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).