



Simulação física do transporte de água e sedimentos em rios de leito de cascalho: uma perspectiva em escala de canal

Danrlei de Menezes¹ & Ana Luiza de Oliveira Borges²

Resumo: Este trabalho visa destacar a importância dos estudos de simulação física na compreensão dos processos naturais, como a dinâmica da água e o transporte de sedimentos em rios com leitos granulares. Para isso, apresentamos um estudo de caso focado em um rio natural, localizado no estado do Rio Grande do Sul, acompanhado de um modelo físico reduzido correspondente para demonstrar a relevância dessa abordagem. O estudo enfatiza a metodologia empregada na construção do canal de laboratório, as técnicas de medição e análise de dados, e propõe um delineamento que busca replicar as características naturais do rio em escala reduzida. Os resultados preliminares indicam que essa abordagem permitiu uma quantificação e uma observação detalhada dos processos de transporte de sedimentos e das mudanças morfológicas do leito. Os achados desta pesquisa têm o potencial de serem aplicados em uma variedade de projetos de engenharia hidráulica, desde o manejo de áreas inundadas até iniciativas de renaturalização de rios. Isso será possível através da definição de parâmetros de resistência ao fluxo e de uma compreensão mais profunda da dinâmica específica de rios com leitos granulares.

Palavras-Chave: simulação física; rios de leito de cascalho; transporte de sedimentos

Abstract: This work aims to highlight the importance of physical simulation studies in understanding natural processes such as water dynamics and sediment transport in gravel-bed rivers. To achieve this, we present a case study focused on a natural river, located in the state of Rio Grande do Sul, along with a corresponding reduced physical model to demonstrate the relevance of this approach. The study emphasizes the methodology used in constructing the laboratory channel, measurement techniques, and data analysis, proposing a framework that aims to replicate the natural characteristics of the river on a reduced scale. Preliminary results indicate that this approach allowed for quantification and detailed observation of sediment transport processes and bed morphology changes. The findings of this research have the potential to be applied in a variety of hydraulic engineering projects, from managing flooded areas to river renaturalization initiatives. This will be possible through the definition of flow resistance parameters and a deeper understanding of the specific dynamics of gravel-bed rivers.

Keywords: physical simulation; gravel-bed rivers; sediment transport.

INTRODUÇÃO

Experimentos de laboratório fornecem um meio de testar hipóteses que são difíceis de testar em rios naturais, pois no laboratório, mecanismos específicos e relações funcionais entre variáveis podem ser facilmente isolados. Os canais de laboratório têm sido usados desde muito tempo para entender melhor o transporte de sedimentos de leito em rios de leito de cascalho (SHIELDS, 1936) e têm incluído uma variedade de experimentos desde a escala do trecho até a escala do grão.

Tais experimentos são necessários pelos seguintes fatores:

- (i) medições de campo incluem muitos parâmetros espacial e temporalmente variáveis que influenciam o transporte de sedimentos de leito, enquanto os experimentos em canais permitem o isolamento dos efeitos de cada parâmetro;
- (ii) o transporte de sedimentos de leito no campo é notoriamente difícil de quantificar e apresenta grandes incertezas;

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



- (iii) mudanças nas superfícies do leito (por exemplo, tamanhos de grãos, elevação, rugosidade) durante eventos de fluxo também são difíceis de medir; e
- (iv) a mecânica em escala de grãos do movimento e transporte de sedimentos é muito mais fácil de quantificar em um ambiente de laboratório do que no campo.

Tais motivações deram origem a uma porcentagem crescente de estudos publicados sobre transporte de sedimentos de leito que incluem medições de laboratório, conforme apresentado por Yager *et al.* (2015). De acordo com Yager *et al.* (2015), a variedade de processos de transporte de sedimentos de leito investigados aumentou com a melhoria da tecnologia para medir fluxos de leito, topografia do leito, turbulência do fluxo, tamanhos de grãos do leito e a dinâmica de grãos individuais.

Experimentos em canais de laboratório têm sido utilizados para investigar uma ampla gama de processos de transporte de sedimentos de leito em rios de leito de cascalho. A maioria dos primeiros experimentos concentrou-se em quantificar o transporte de sedimentos de leito em geral e o esforço de cisalhamento crítico adimensional (como o esforço necessário para iniciar o movimento) para uso em equações de transporte de sedimentos de leito (por exemplo, Shields, 1936; Meyer-Peter e Müller, 1948).

Experimentos subsequentes concentraram-se em distribuições de tamanhos de grãos mais amplas para entender os efeitos de cavidades e espaços ocupados por outros grãos (*hiding*), transporte preferencial de diferentes tamanhos de grãos, efeitos de rugosidade do leito e classificação vertical de sedimentos (WILCOCK e SOUTHARD, 1988; WILCOCK e MCARDELL, 1997; YAGER *et al.*, 2007).

Muitas das equações de transporte de sedimentos de leito, incluindo valores de tensões de cisalhamento crítico de Shields, por exemplo, foram desenvolvidas usando dados de canais de laboratório devido à dificuldade de medir o transporte de sedimentos de leito no campo (GOMEZ e CHURCH, 1989). Experimentos de laboratório não apenas foram fundamentais no desenvolvimento de equações empíricas de transporte de sedimentos de leito, mas também foram usados para elucidar alguns dos processos do transporte de sedimentos. Com base nisso, alguns trabalhos destacam uma etapa preliminar para conformação do fundo do canal em que será simulado a dinâmica da água e do transporte de sedimentos (COOPER e TAIT, 2009; MENEZES e BORGES, 2023).

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é destacar a importância de estudos de simulação física para representar processos naturais como a dinâmica da água e o transporte de sedimentos em rios de leito de cascalho no Brasil. Para isso, será mostrado um estudo de caso, considerando um protótipo e o modelo físico reduzido para demonstrar a aplicabilidade deste estudo. Destaca-se, ainda, que estudos como este podem fornecer importantes contribuições para o entendimento físico dessas variáveis envolvidas e que este estudo é pioneiro no que se refere a simulação física de ambientes de rios de montanha no Brasil. Essas regiões, embora menos frequente espacialmente, são objetos de grandes desastres naturais, geralmente associados a fluxos de detritos e *flash floods*.

ESTUDO DE CASO

Análises de semelhança: modelo x protótipo

Para a escolha da composição granulométrica do sedimento a ser ensaiado, foi utilizado como inspiração o rio Forqueta (localizado em Maquiné/RS) (Figura 1). 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 Menezes *et al.*, (2021); Menezes; Kobiyama; Michel, (2022) e Menezes; Kobiyama (2023).

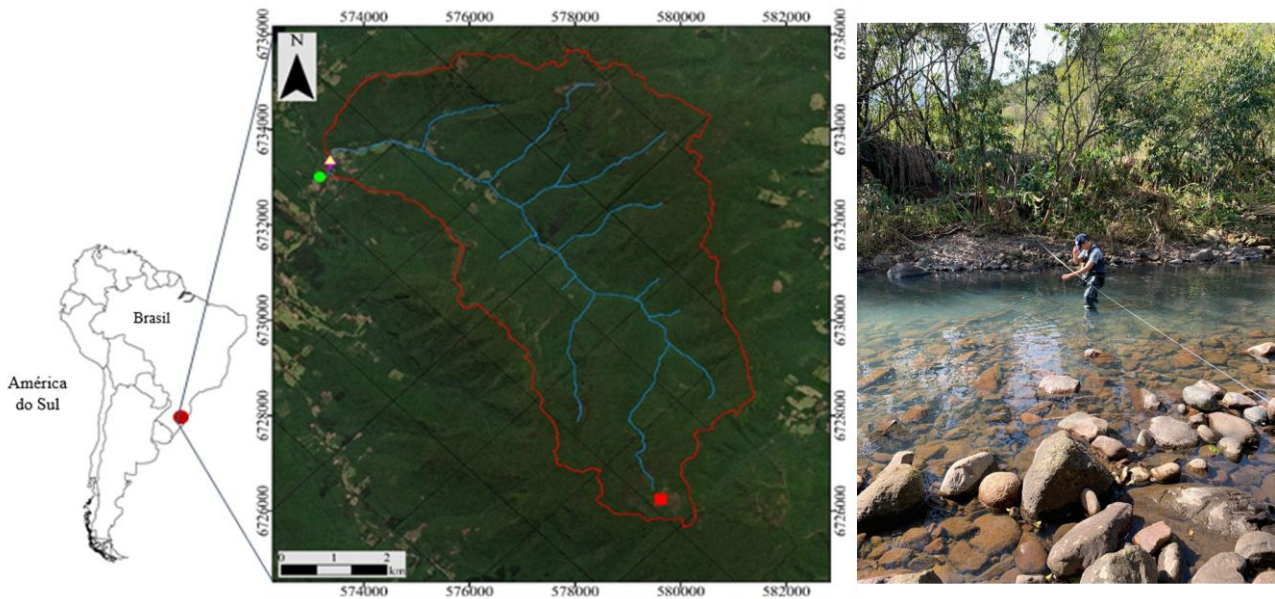


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Forqueta (esquerda) e detalhe do trecho do rio levantado (direita)

Para análise dimensional 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 0,56 m de largura. Além disso, essa escala permite que ambas escalas vertical e horizontal sejam as mesmas. Salienta-se que foram utilizados nessa análise preliminar um material com D_{50} de 1,0mm, que corresponde a um D_{50} do protótipo de 20mm afim de realizar a configuração do experimento e observação do comportamento do material envolvido. Em ensaios futuros será utilizado o material com D_{50} em escala reduzida do protótipo, ou seja, 3,19mm.

		S	L	D_{50}	Q_{med}
Material utilizado preliminarmente	Modelo 1:20	0,00937m/m	0,56m	1,0mm	234 L/min
	Protótipo	0,00937m/m	11,2m	20,0mm	7 m ³ /s
Material utilizado em ensaios futuros	Modelo 1:20	0,00937m/m	0,56m	3,19mm	234 L/min
	Protótipo	0,00937m/m	11,2m	63,8mm	7 m ³ /s

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

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 2). 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).

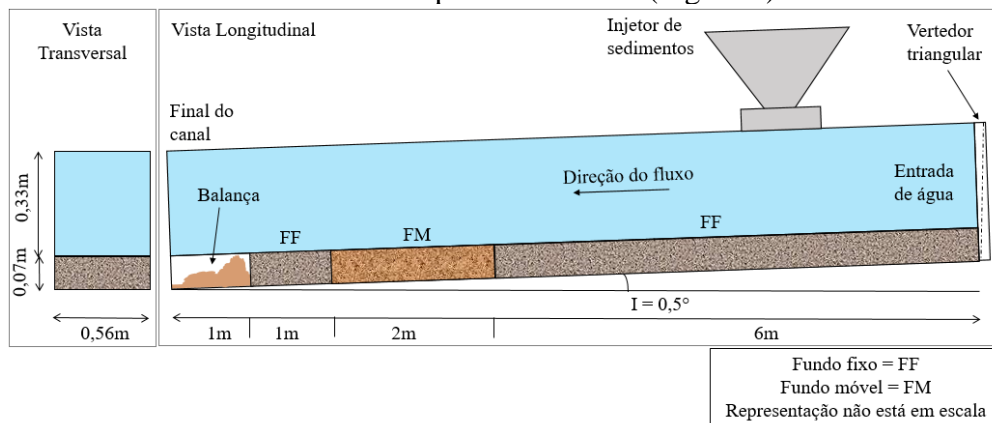


Figura 2 - Representação esquemática do canal experimental

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.

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

Como material de fundo foi utilizado areia ($D_{50} = 1,0 \text{ mm}$), inspirado pela redução de escala (1:20) do protótipo, conforme é observado na Figura 3. Essa etapa foi necessária para entender como o material de comportaria no canal de estudo proposto e, assim, seguir com os ensaios posteriores utilizando a curva granulométrica reduzida do protótipo em uma escala de 1:20.

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}).

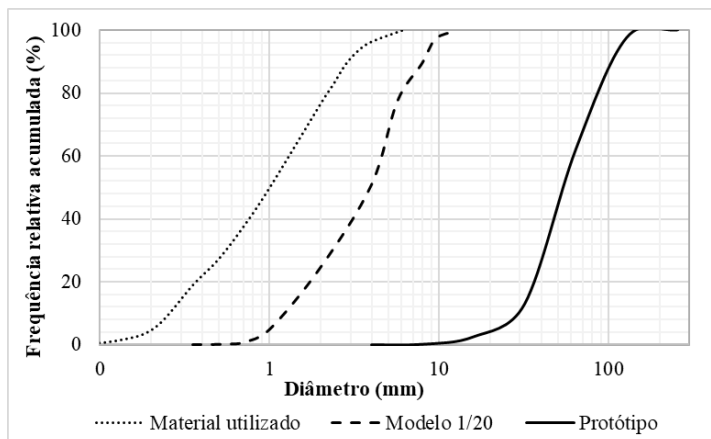


Figura 3 - Curva granulométrica do material do fundo móvel do canal

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.

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 4 é mostrado o canal nas condições iniciais e no final do ensaio. No meio do canal há uma barra metálica da estrutura do canal.

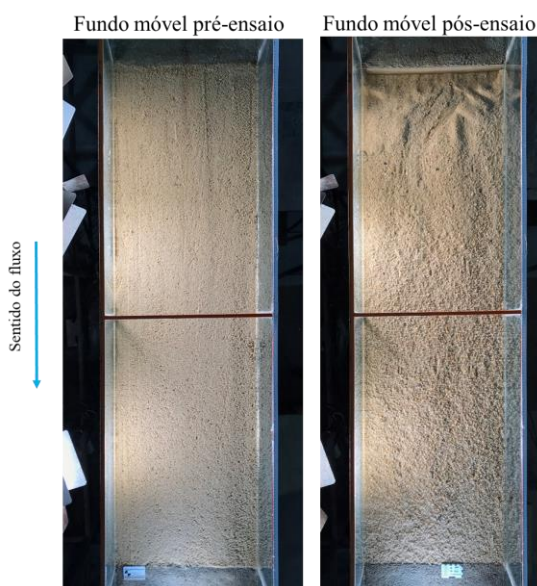


Figura 4 - Canal de fundo móvel: pré (plano inclinado e reguado) e pós ensaios (mudança na textura e caminhos preferenciais)



Delineamento experimental

O fundo móvel é construído através do preenchimento do canal com o material sedimentar escolhido, devidamente nivelado (reguado) para manter a declividade imposta ao fundo do canal, constituindo um plano inclinado sem heterogeneidade na distribuição dos sedimentos. Ou seja, por não ter sido submetido à ação do escoamento, ele ainda não apresenta conformações de fundo, de geometria e de escoamento que sejam compatíveis com o ambiente sedimentar gerado por escoamentos rasos na presença de granulometria extensa. Assim, conforme apresentado por Menezes e Borges (2023), a compreensão da interação água e sedimentos exige uma fase preliminar de ensaios que permitam 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, representada por deformações iniciais na morfologia do leito.

Para isso os ensaios foram divididos em três fases, sendo as duas primeiras já executadas:

- Fase 1: Pré conformação do fundo do canal: Nesta fase procurou-se gerar uma deformação de leito mais semelhante a natural (leito com rugosidade elevada, criação de caminhos preferenciais e baixa submergência (h/D)). Para tanto observou-se, através da quantificação do sedimento transportado, o efeito do retrabalhamento do leito por ação de uma dada vazão líquida injetada no canal. Maiores detalhes foram apresentados por Menezes e Borges (2023);

- Fase 2: Análise do escoamento: Nessa fase foi avaliada a dinâmica da água e do sedimento frente a uma determinada rugosidade de fundo do canal, gerada após o retrabalhamento do leito do canal (Fase 1) em uma condição sem aporte de sedimentos à montante do trecho, focando na capacidade do escoamento moldar (esculpir) sua calha;

- Fase 3: Análise do transporte de sedimentos: Utilizando o leito do canal formado na Fase 1, será avaliado a dinâmica da água associado com a injeção de sedimentos no canal. Assim, poderão ser observados os resultados para posterior comparação com os obtidos na Fase 2.

RESULTADOS PRELIMINARES

A seguir são apresentados os resultados da Fase 1 e 2. Observa-se após o período de conformação morfológica (Fase 1) – já apresentada por Menezes e Borges (2023), que a taxa de transporte de sedimentos ao longo dos ensaios permaneceu muito baixa, conforme é mostrado na Tabela 2. Esse comportamento é uma resposta a diminuição da vazão que passou de 317, 85L/min do Ensaio 1 para 53,88L/min no Ensaio 6.

Ensaio	Tempo (h)	Q (L/min)	Sedimento Transportado (g)	Sedimento transportado acumulado (g)	Sedimento transportado (g/min)
1	17	317.85	145.40	145.40	1.21
2	19	249.94	17.50	162.90	0.15
3	21	201.50	7.20	170.10	0.06
4	23	146.38	34.70	204.80	0.29
5	25	98.16	61.67	266.47	0.51
6	27	53.88	52.79	319.25	0.44

Tabela 2 – Caracterização quanto a vazão e sedimentos dos ensaios realizados pós conformação do leito do canal

Na Figura 5 observa-se o comportamento ao longo do tempo, considerando o tempo de conformação do leito (Fase 1), onde a Q foi aumentada até 317,85L/min, e o tempo após essa conformação do leito do canal, em que ocorreu uma diminuição de vazões. É possível observar que o transporte de sedimentos foi baixo considerando a mobilização gerada nas primeiras 15 horas.

Os resultados preliminares mostram a dinâmica da água e do sedimento ao longo dos ensaios e as respectivas mudanças no fundo do canal. Na Figura 6 é mostrado o estado, em planta, pós ensaios do fundo móvel. Destacamos aqui que do E1 para o E6 ocorreu uma sequência de diminuição de vazões, com velocidades e profundidades menores, o que pode ter contribuído para uma estabilização



do fundo do canal. Nessa figura é mostrado apenas o trecho que compreende entre os 40 e 190 cm, onde estão localizadas as seções ST-120 e ST-160. A faixa branca central é referente a uma estrutura metálica do canal.

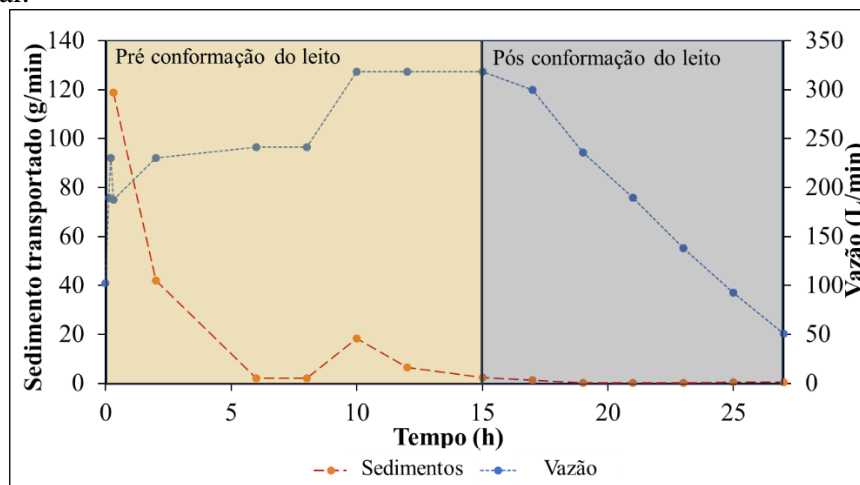


Figura 5 - Vazão e sedimentos transportados pré e pós conformação do leito

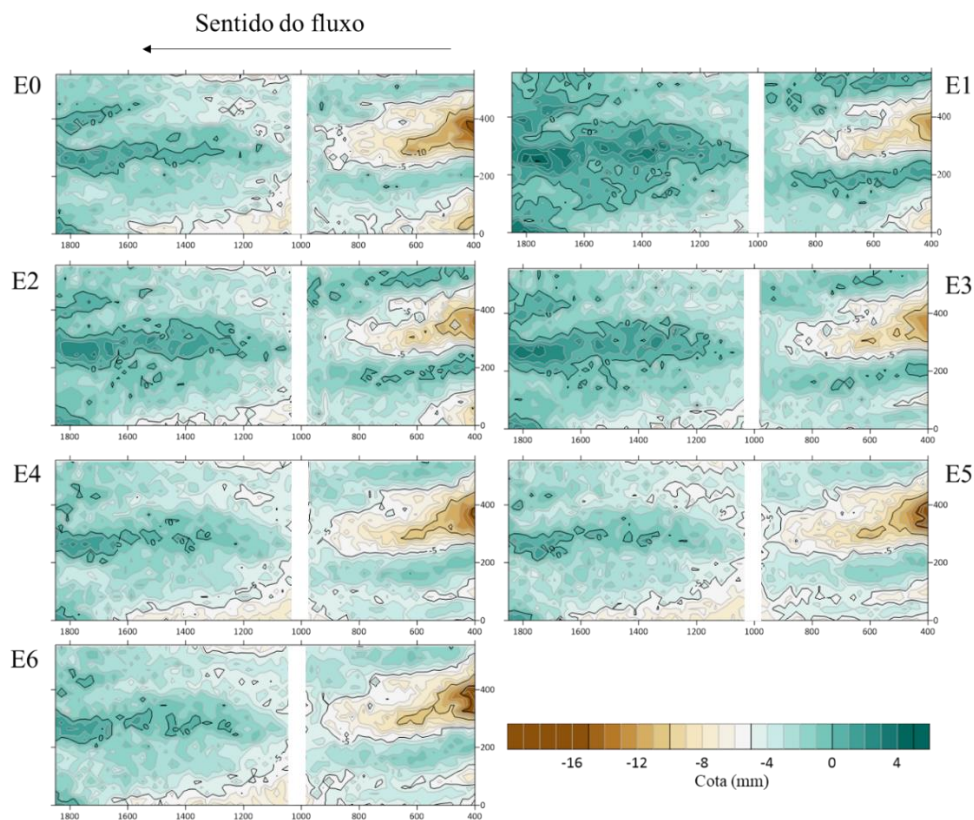


Figura 6 - Fundo do canal longo dos ensaios (cor mais verde representa cota positiva e cor mais marrom indica cota negativa)

Cabe destacar aqui que esses são resultados preliminares utilizando, como protótipo, um rio natural com leito de cascalho. Esses rios 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). Ainda, é preciso considerar que a disposição das partículas de sedimento pelos processos de



transporte que orientam, imbricam, classificam e estratificam os depósitos de sedimento através da deposição e reestruturação resultante dos ciclos de enchentes (COOPER e TAIT (2009). Portanto, qualquer estudo em um canal de laboratório sobre os processos próximos ao leito que ocorrem em um rio com leito de cascalho deve ser capaz de replicar essas características do leito.

RESULTADOS ESPERADOS

Ao utilizar dados de campo para criar condições de laboratório e, conseqüentemente, simular um rio natural, é possível controlar e quantificar variáveis que, em campo, demandam tempo e recursos humanos. Assim, com esse trabalho, espera-se fornecer o entendimento do processo de escoamento e transporte de sedimentos frente a um leito de rio de granulometria extensa. Isso tudo, usando um modelo físico que foi construído inspirado por um rio natural do Brasil, que até então, pouco se sabe sobre sua dinâmica.

Os resultados obtidos nessa pesquisa terão o potencial de ter aplicações práticas em diversos projetos de engenharia hidráulica, desde o manejo de áreas inundadas até estudos de renaturalização de rios. Isso se dará por meio da definição de parâmetros de resistência ao fluxo e pela compreensão mais aprofundada da dinâmica de um rio com leito de cascalho.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- 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.
- GOMEZ, B., & CHURCH, M. (1989). An assessment of bed load sediment transport formulae for gravel bed rivers. *Water Resources Research*, 25(6), 1161-1186.
- 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.
- MENEZES, D., & BORGES, A. L. O. (2023). Conformação morfológica de equilíbrio em simulação física de rios com leito de granulometria extensa. *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (Aracaju)*. Anais [recurso eletrônico]. Porto Alegre: ABRHidro, 2023.
- MENEZES, D. (2021). Caracterização hidrossedimentológica de trecho do rio Forqueta, Maquiné, RS. Dissertação de Mestrado. PPG Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. UFRGS.
- MENEZES, D., & KOBİYAMA, M. (2023). Hydrosedimentological characterization of a reach in the Forqueta River catchment, south Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 104430.
- MENEZES, D., KOBİYAMA, 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).
- MEYER-PETER, E., & MÜLLER, R. (1948). Formulas for bed-load transport. In *IAHSR 2nd meeting, Stockholm, appendix 2*. IAHR.
- SHIELDS, A. (1936). Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. *Soil Conservation Service*.
- WILCOCK, P. R., & SOUTHARD, J. B. (1988). Experimental study of incipient motion in mixed-size sediment. *Water Resources Research*, 24(7), 1137-1151.
- WILCOCK, P. R., & MCADELL, B. W. (1997). Partial transport of a sand/gravel sediment. *Water Resources Research*, 33(1), 235-245.
- YAGER, E. M., KIRCHNER, J. W., & DIETRICH, W. E. (2007). Calculating bed load transport in steep boulder bed channels. *Water Resources Research*, 43(7).
- YAGER, E. M., KENWORTHY, M., & MONSALVE, A. (2015). Taking the river inside: Fundamental advances from laboratory experiments in measuring and understanding bedload transport processes. *Geomorphology*, 244, 21-32.