

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### **CLASSIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE REGIMES DE ESCOAMENTO EM CANAL DE SUPERFÍCIE LIVRE COM SENSORES ULTRASSÔNICOS**

*Francisco Paim de Freitas Neto<sup>1</sup>; Rutineia Tassi<sup>2</sup>; Leandro Conceição Pinto<sup>2</sup>; Fabiana Campos  
Pimentel<sup>3</sup>; Rodrigo Girardon Della Pace<sup>3</sup>; Eliane Fischborn<sup>3</sup>; Gabriel Sulzbach Pereira<sup>3</sup>; Luíze  
Baldoni de Oliveira<sup>4</sup>*

**Abstract:** This paper proposes a low-cost experimental procedure for surface-velocity measurements using floats, to classify flow regimes in a rectangular open channel. The setup combines two HC-SR04 ultrasonic sensors and an ESP32 microcontroller to capture the transit time of a polystyrene float over a fixed 2 m reach. The measured surface velocity is adjusted with a dimensionless correction factor ( $\alpha = 0.85$ ) and, together with flow depth, used to compute the Froude number ( $Fr$ ). Two duplicated tests revealed distinct regimes: subcritical ( $Fr \approx 0.81$ ) and supercritical ( $Fr \approx 4.80$ ). Critical flow ( $Fr \approx 1$ ) was not attained due to limitations in fine discharge control, ruler resolution ( $\pm 1$  mm), and available channel length. Nevertheless, the method proved pedagogically robust, reducing reliance on sophisticated instruments. The results highlight the prototype's suitability for undergraduate laboratories and exploratory hydraulic studies.

**Resumo:** Este estudo apresenta um procedimento experimental de baixo custo para medições de velocidade superficial com flutuadores, destinado à classificação de regimes de escoamento em um canal retangular de superfície livre. O arranjo emprega dois sensores ultrassônicos HC-SR04 conectados a um microcontrolador ESP32 para registrar o tempo de trânsito de um flutuador de poliestireno entre dois pontos fixos ( $\Delta S = 2$  m). A velocidade superficial média é corrigida por um coeficiente adimensional ( $\alpha = 0,85$ ) e, juntamente com a profundidade da lâmina d'água, utilizada para calcular o número de *Froude* ( $Fr$ ). Dois ensaios, executados em duplicata, identificaram regimes hidrodinâmicos bem definidos: subcrítico ( $Fr \approx 0,81$ ) e supercrítico ( $Fr \approx 4,80$ ). O regime crítico ( $Fr \approx 1$ ) não foi alcançado devido a limitações no controle fino da vazão, na resolução da régua graduada ( $\pm 1$  mm) e no comprimento útil do canal. Apesar dessas restrições, o método demonstrou confiabilidade pedagógica, reduzindo a dependência de instrumentação sofisticada. Os resultados evidenciam o potencial de aplicação do protótipo em laboratórios de graduação e em investigações exploratórias de hidrodinâmica.

**Palavras-Chave** – Froude; Escoamento; Sensores.

<sup>1</sup>) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), francisco.freitas@acad.ufsm.br

<sup>2</sup>) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), rutineia@gmail.com; leandro.pinto@ufsm.br

<sup>3</sup>) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), fabiana.pimentel@acad.ufsm.br; rodrigo.della@acad.ufsm.br; eliane.fischborn@acad.ufsm.br; gabriel.sulzbach@acad.ufsm.br

<sup>4</sup>) Graduação em Engenharia da Computação, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), oliveira.luize@acad.ufsm.br

## INTRODUÇÃO

A intensificação de eventos hidrológicos extremos altera significativamente os padrões de escoamento em canais naturais e construídos (Kay *et al.* 2021). Nesse cenário, compreender o comportamento do escoamento nesses meios torna-se essencial (Li, 2025), contribuindo para o planejamento de medidas estruturais e não estruturais (Joubier *et al.* 2025). Para isso, a utilização de aparatos experimentais de baixo custo para a análise do escoamento em canais de superfície livre tem se mostrado uma abordagem eficaz e acessível, permitindo a realização de estudos hidrodinâmicos mesmo com recursos limitados (Galli *et al.*, 2024; Acquah; Takyi; Beem, 2024; Kumar *et al.*, 2025; Wotzka; Zmarzły, 2024; Lewis *et al.*, 2024; Shah *et al.*, 2023; Meier *et al.*, 2022).

Para análises do escoamento em canais com superfície livre, parâmetros adimensionais são amplamente utilizados (Hao *et al.* 2025; Koo *et al.* 2014; Lin *et al.* 2023), sendo mais comum o número de *Froude* (Hatzigiannakis *et al.* 2016), por possibilitar, de forma simples, a caracterização dos diferentes regimes de escoamento (Hu e Yu, 2023; Wei *et al.* 2016). Isso é possível pois é necessário apenas a profundidade hidráulica e a velocidade média do escoamento (Akan e Iyer, 2021). o que reduz a quantidade de medições em laboratório, mas aumenta as limitações relacionadas às incertezas das medições. Estudos recentes mostram abordagens diversas de instrumentação *low-cost* para classificar regimes em canais de superfície livre utilizando o número de *Froude*. Pereira *et al.* (2024) integraram sensores ultrassônicos a um Arduino para monitorar a lâmina d'água e calcular o *Froude* continuamente, identificando transições entre regimes subcrítico, crítico e supercrítico. Já Galli *et al.*, 2024 desenvolveram um módulo hidrodinâmico, que também utiliza um transdutor ultrassônico acoplado a microcontrolador para registrar a altura da lâmina de água e, a bordo, computar o *Froude*, sinalizando em tempo real a passagem pelo regime crítico durante diferentes condições hidráulicas.

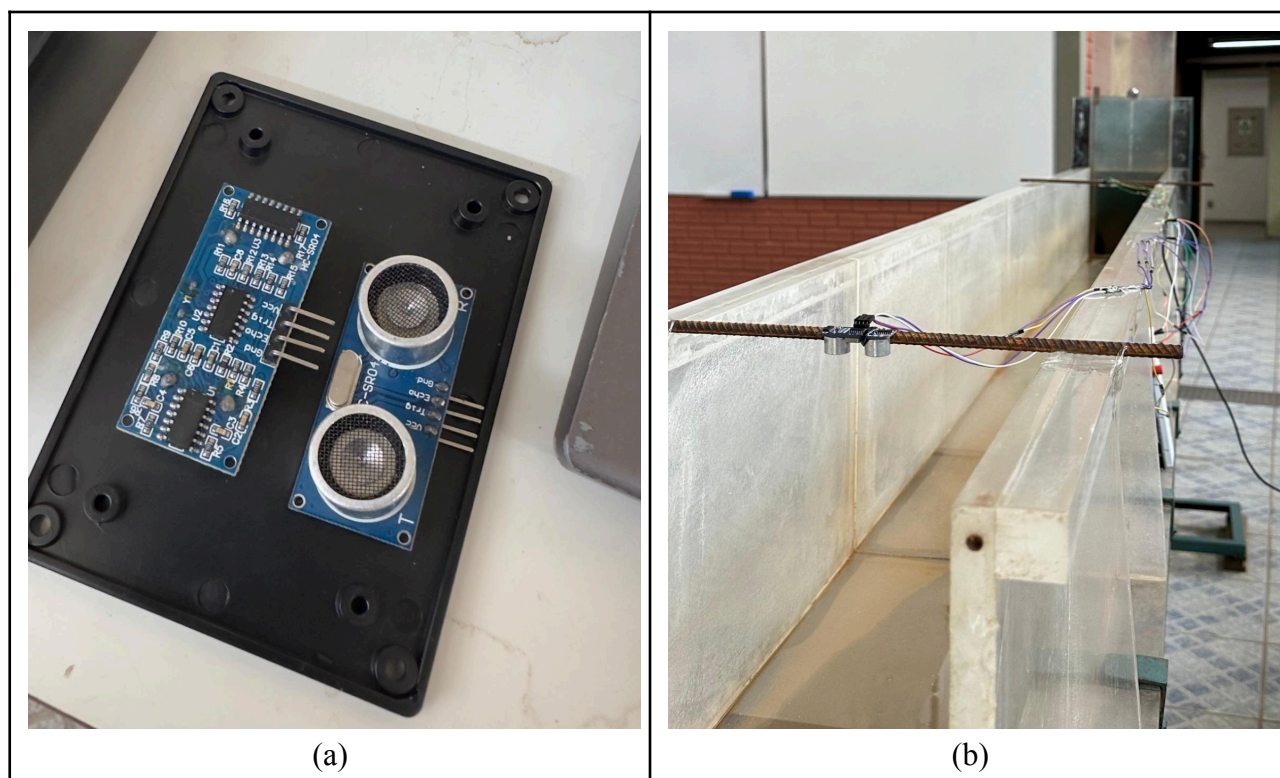
Ainda, métodos indiretos, como a utilização de flutuadores superficiais tornam-se alternativas viáveis para análises de escoamento em canais de superfície livre, embora estejam associados a maiores incertezas na estimativa da velocidade (ISO 748, 2021). Ainda assim, tais métodos permitem a experimentação prática sem a necessidade de instrumentação sofisticada (Hundt e Blasch, 2019; Little *et al.* 2024; Stepenuck *et al.* 2024). Diante disso, o presente estudo tem como objetivo desenvolver e avaliar um procedimento experimental de baixo custo para a caracterização do escoamento em canal de superfície livre. Por meio de uma abordagem indireta, a velocidade média do escoamento foi estimada utilizando sensores de nível posicionados em dois pontos conhecidos ao longo do comprimento do canal, registrando-se o tempo de trânsito de um objeto flutuante entre eles. A metodologia foi testada em três cenários distintos de lâmina d'água, com o intuito de classificar o regime de escoamento com base no número de *Froude*. Ao conjugar precisão instrumental (fornecida pelos sensores) e simplicidade operacional (uso de flutuador descartável), o estudo busca suprir a lacuna entre técnicas de alto custo e demandas de experimentação acadêmica, oferecendo uma alternativa acessível e replicável para ensino e pesquisa em hidrodinâmica de pequena escala. Por fim, os resultados obtidos são discutidos, apontando limitações e potencial de aplicação do método em laboratórios didáticos e em investigações conceituais de modelagem física.

## MATERIAL E MÉTODOS

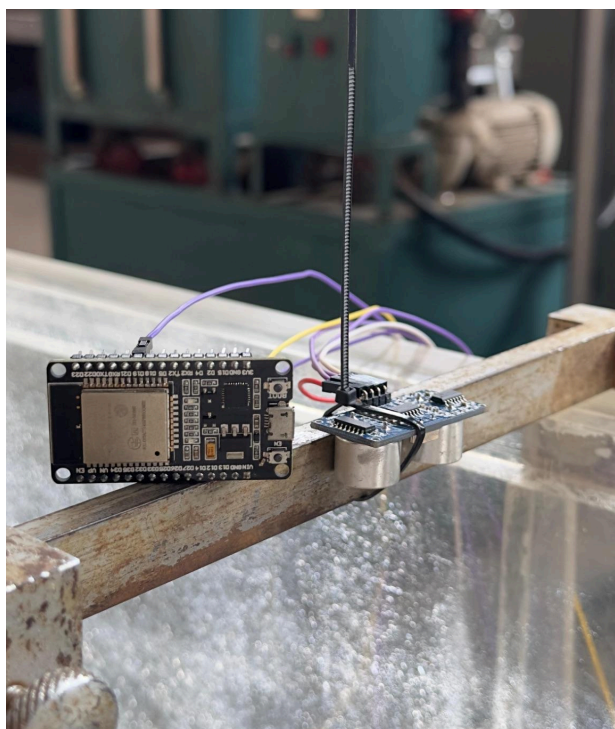
O experimento foi conduzido em um canal artificial com seção retangular, declividade constante e regime permanente. Este, compõe o módulo de circulação de fluídos do Laboratório de Mecânica dos Fluídos e Hidráulica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). O sistema consiste em um circuito fechado de recirculação: a bomba radial retira água do reservatório, impulsiona-a por um conduto e a descarrega em um conduto vertical, onde o fluxo de água é regulado por uma comporta guilhotina instalada a montante do canal de acrílico em questão. O canal possui dimensões de 3,15 m de comprimento total (L), 0,25 m de largura interna (b) e 0,30 m de altura lateral (H). Ao término, o fluxo proveniente do canal retorna ao reservatório.

O aparato experimental foi construído da seguinte forma, utilizando os seguintes materiais: dois sensores ultrassônicos (HC-SR04) posicionados a uma distância conhecida de 2 metros entre eles, um microcontrolador ESP32 e um circuito montado em protoboard. Esse conjunto foi instalado no canal experimental, permitindo a detecção da passagem do objeto flutuante, o qual consiste em um objeto quadrado de Poliestireno (isopor). O sistema foi desenvolvido com a plataforma *Visual Studio Code*, através da extensão *PlatformIO*, utilizando a linguagem C++ para microcontroladores. Na Figura 1, abaixo, é possível observar os HC-SR04 (a), a fixação dos sensores no trecho de medição do canal retangular (b), o microcontrolador conectado aos sensores (c) e o flutuador de Poliestireno sendo lançado a montante do primeiro sensor (d).

Figura 1 - Aparato experimental utilizados para a execução do experimento







(c)



(d)

Os testes foram realizados em triplicata para cada regime de escoamento para garantir a consistência dos dados observados. Inicialmente a altura da lâmina d'água foi obtida por meio de leitura manual. Para a classificação do regime de escoamento, o canal foi operado em regime permanente, sendo o objeto flutuante lançado manualmente. Os sensores registraram os instantes de passagem do flutuador entre os dois pontos de medição. A partir desses dados, foi calculada a velocidade média do escoamento (Equação 1) e, subsequentemente, determinado o número de Froude (Equação 2), utilizado para classificar o regime de escoamento observado.

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (1)$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot y}} \quad (2)$$

Sendo:  $Fr$  o número de Froude (adm),  $v$  a velocidade média do escoamento (m/s),  $g$  a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ) e  $y$  a profundidade da lâmina d'água (m). Valores de  $Fr < 1$  indicam escoamento subcrítico, caracterizado pelo predomínio das forças gravitacionais;  $Fr = 1$  define o escoamento crítico, uma condição de equilíbrio instável;  $Fr > 1$  representa o escoamento supercrítico, no qual predominam as forças inerciais. Essa classificação é essencial para o entendimento do comportamento hidráulico e para o dimensionamento de estruturas hidráulicas associadas ao controle de fluxo em canais.

É importante destacar que o método utilizado para a medição de velocidade, utilizado no presente estudo, quantifica apenas a velocidade superficial e, dessa forma, para estimar a velocidade média real ( $\alpha v$ ) do escoamento, multiplica-se a velocidade superficial média ( $v$ ) por um coeficiente de correção adimensional ( $\alpha$ ), comumente adotado em 0,85 (California, 2001). Esse valor é

amplamente aceito como uma estimativa adequada na ausência de dados específicos do local, sendo geralmente válido para diferentes condições de escoamento (Biggs *et al.* 2023). Ressalta-se que, sem a aplicação desse fator de correção, obtêm-se valores superestimados para  $Fr$ , representando um limite superior das forças inerciais. Em estudos quantitativos, portanto, a utilização do coeficiente  $\alpha$  é indispensável para garantir a representatividade dos resultados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dois ensaios executados com o arranjo (flutuador e sensores de nível) resultaram nos dados apresentados na Tabela 1. O distância cronometrada ( $\Delta S$ ) corresponde à distância horizontal fixa entre os sensores (2 m). O tempo de trânsito ( $\Delta t$ ) foi obtido automaticamente a partir da diferença entre os instantes em que cada sensor detectou a elevação do nível, provocada pela passagem do flutuador. Com base nesses valores, foram calculados a velocidade média ( $v$ ) e o número de *Froude* ( $Fr$ ), adotando  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  e a altura da lâmina de água ( $y$ ) registrada no momento de cada ensaio.

Tabela 1- Parâmetros medidos, velocidade corrigida e classificação do regime de escoamento nos ensaios em canal retangular

Ensaio	$\Delta S$ (m)	$\Delta t$ (s)	$v$ (m.s <sup>-1</sup> )	$\alpha v$ (m.s <sup>-1</sup> )	$y$ (m)	$Fr$	Regime
1	2	3	0,67	0,57	0,05	0,81	Subcrítico
2	2	0,8	2,5	2,13	0,02	4,80	Supercrítico

Os valores da Tabela 1 apresentam que o experimento foi capaz de caracterizar dois regimes de escoamento, com base no número de *Froude*, bem distintos: subcrítico (Ensaio 1,  $Fr \approx 0,81$ ) e supercrítico (Ensaio 2,  $Fr \approx 4,80$ ). No entanto, observa-se que o intervalo associado ao escoamento crítico ( $Fr \approx 1$ ), caracterizado pelo equilíbrio entre as forças inerciais e gravitacionais, não foi alcançado. Isso se deve, principalmente, às limitações experimentais que restringiram o controle preciso das condições hidráulicas necessárias para configurar um escoamento próximo a este regime.

Dentre as limitações observadas no experimento, destacam-se os seguintes aspectos: (i) a comporta de entrada de água no canal não permitiu um ajuste suficientemente preciso da vazão, dificultando a manutenção da lâmina d'água ( $y$ ) em regime estável; (ii) a régua graduada com divisões de 1 mm introduziu uma incerteza relativa para lâminas inferiores a 0,05 m, o que ocasionou variações abruptas em  $Fr$  em torno do valor teórico esperado de 1,0; (iii) a presença de apenas dois sensores e do comprimento útil do canal restringiu o comprimento de cronometragem a 2 m, limitando a precisão na estimativa da velocidade; (iv) em razão do tempo de trânsito do flutuador, a leitura pode ter sido afetada por jitter temporal - ou seja, atrasos aleatórios na entrega dos dados pelos sensores, relacionados à sua precisão e ao tempo de resposta do módulo de leitura, impactando diretamente no cálculo de  $v$ ; e (v) embora os lançamentos tenham seguido a diretriz do guia de entrada estabelecido pela ISO 748 (2021), a operação manual ocasionou, em alguns momentos, o desvio lateral do flutuador, resultando em atrito com as paredes do canal de acrílico e consequente atraso na trajetória.

O presente estudo desenvolveu e testou um aparato experimental de baixo custo, composto por dois sensores HC-SR04, um ESP32 e um flutuador de poliestireno, destinado à classificação de regimes de escoamento em canais retangulares de superfície livre. Os ensaios confirmaram dois regimes hidrodinâmicos bem definidos - subcrítico ( $Fr \approx 0,81$ ) e supercrítico ( $Fr \approx 4,80$ ). Embora o intervalo crítico ( $Fr \approx 1$ ) não tenha sido alcançado devido a limitações de controle fino da vazão, da resolução da régua graduada ( $\pm 1$  mm) e do comprimento da seção destinada à cronometria, tais restrições não comprometeram o objetivo pedagógico central.

O foco do estudo reside na utilização dos sensores de nível como *gate timers*, substituindo cronômetros manuais e minimizando o erro de reação humana, para classificação dos regimes de escoamento subcrítico e supercrítico. A integração entre sensores de nível e o método do objeto flutuante, amparado pela ISO 748. (2021), proporcionou resultados consistentes com a teoria clássica do escoamento. Portanto, a metodologia desenvolvida neste estudo representa uma solução didática, de baixo custo e com alta aplicabilidade para a classificação do regime de escoamento em canais abertos. Dessa forma, o protótipo se torna acessível a laboratórios de graduação, ampliando o repertório experimental em disciplinas de hidráulica sem a necessidade de instrumentos de alta complexidade para medição de velocidade. Com base nas limitações identificadas, servem de guia para aprimoramentos futuros: (i) a ampliação do comprimento da sessão utilizada para a cronometria com a adição de um terceiro sensor; (ii) substituir a régua graduada por transdutor de nível ou régua eletrônica, reduzindo a incerteza em  $y$ ; (iii) realizar calibração cruzada com velocímetros digitais para (iv) integrar sensores ou câmeras de alta velocidade para validação óptica da trajetória; e (v) desenvolver modelagem numérica complementar (1D ou CFD) para comparação com os dados experimentais; (vi) realizar a comparação direta com métodos consagrados de medição de velocidade (Tubo de *Pitot* ou ADV).

Sendo assim, conclui-se, portanto, que o arranjo proposto constitui uma ferramenta eficaz para ensino e pesquisa exploratória em hidráulica de pequena escala. Ele permite demonstrar, de forma objetiva e replicável, a transição entre regimes subcrítico e supercrítico, servindo de base para investigações sobre propagação de ondas, dissipação de energia e análise de estabilidade de estruturas hidráulicas. Os avanços sugeridos têm potencial para estender o escopo do sistema, contemplando medições críticas e garantindo maior precisão metrológica, o que reforçará sua utilidade tanto em ambientes acadêmicos quanto em estudos aplicados de engenharia.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), código de financiamento 001, Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) e a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

## REFERÊNCIAS

- ACQUAH, F. K. C.; PAUL KONADU TAKYI, J.; BEEM, H. R. “*Design and characterization of a low-cost particle image velocimetry system*”. HardwareX, v. 19, 2024.
- AKAN, A. O.; IYER, S. S. Open channel hydraulics. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2021. 540 p.
- BIGGS, H.; SMART, G.; DOYLE, M.; EICKELBERG, N.; ABERLE, J.; RANDALL, M.; DETERT, M. (2023). “*Surface Velocity to Depth-Averaged Velocity - A Review of Methods to Estimate Alpha and Remaining Challenges*”. Water, v. 15, n. 21, 2023.
- BORELLA, D. R.; PAULISTA, R. S. D.; ALVES, M. A. B.; MARTIM, C. C.; DA SILVA, C. J.; DE ALMEIDA, F. T.; DE SOUZA, A. P. (2023). “*Flow Measurement Methods in Small Tributaries of the Teles Pires River, Southern of the Amazon Hydrological Region*”. Water, v. 15, n. 21.
- CALIFORNIA. State Water Resources Control Board. Surface Water Ambient Monitoring Program (SWAMP). (2001). “*Guidelines for Citizen Monitors: Technical Advisory Council on Citizen Monitoring*”. State Water Resources Control Board, 2001. Disponível em: [https://www.waterboards.ca.gov/water\\_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/11.pdf](https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/11.pdf). Acesso em: 6 jun. 2025.
- CHAN, H. C.; LIN, Y. Z.; LIN, P. W. (2025). “*The effect of channel slope on steep channel flow instability*”. Flow Measurement and Instrumentation, v. 104.
- GALLI, A; PERUZZI, C.; GANGI, F.; MASSERONI, D. “*ArduHydro: a low-cost device for water level measurement and monitoring*”. Journal of Agricultural Engineering, v. 55, n.1, 2024.
- HAO, R.; LU, T.; LU, Q.; DENG, J. (2025). “*Numerical investigation on flow and heat transfer characteristics of various special-shaped narrow channels at high Reynolds number*”. Applied Thermal Engineering, v. 269.
- HATZIGIANNAKIS, E.; FILINTAS, A.; ILIAS, A.; PANAGOPOULOS, A.; ARAMPATZIS G.; HATZISPIROGLOU, I. (2016). “*Hydrological and rating curve modelling of Pinios River water flows in Central Greece, for environmental and agricultural water resources management*”. Desalination and Water Treatment, v. 57, n. 25, pp. 11639–11659.
- HU, P.; YU, M. (2023). “*Experimental Study of Secondary Flow in Narrow and Sharp Open-Channel Bends*”. Journal of Applied Fluid Mechanics, v. 16, n. 9, pp. 1767–1777.
- HUNDT, S.; BLASCH, K. (2019). “*Laboratory assessment of alternative stream velocity measurement methods*”. Plos One, v. 14, n. 9.
- IKANI, N.; PU, J. H.; SOORI, S. (2025). “*Flow Pattern and Turbulent Kinetic Energy Analysis Around Tandem Piers: Insights from  $k-\epsilon$  Modelling and Acoustic Doppler Velocimetry Measurements*”. Water, v. 17, n. 7.



INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 748. (2021). *Hydrometry - Measurement of liquid flow in open channels - Velocity-area methods using point velocity measurements*. Geneva: ISO, 52 p.

JOUBIER, V.; EBTEHAJ, I.; AMIRI, A.; GUMIERE, S. J.; BONAKDARI, H. (2025). “Multitemporal river flow discharge prediction: A new framework for integrated environmental management and flood control”. *Journal of Environmental Management*, v. 383.

KAY, A. L.; RUDD, A. C.; FRY, M.; NASH, G.; ALLEN, S. (2021). “Climate change impacts on peak river flows: Combining national-scale hydrological modelling and probabilistic projections”. *Climate Risk Management*, v. 31.

KOO, B.; YANG, J.; YEON, S. M.; STERN, F. (2014). “Reynolds and froude number effect on the flow past an interface-piercing circular cylinder”. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, v. 6, n. 3, pp. 529–561.

KUMAR, A.; SARANGI, A.; SINGH, D. K.; MANI, I. “Development of a digital open channel flow measuring device for surface irrigation”. *Water Supply*, v. 25, n. 4, 2025.

LEWIS, M. SILVER, E.; HUNT, R.; HARRIS, D. M.. “OpenFlume: An accessible and reproducible benchtop flume for research and education”. *HardwareX*, v. 20, 2024.

LI, Z. (2025). “Nonstaggered central scheme with steady-state discretization for solving the open channel flows via the flux globalization”. *Applied Numerical Mathematics*, v. 207, pp. 58–85.

LIN, W.; CAI, F. LIN; HAN, C. HAI; YU, K. WEN; GU, J. TONG. (2023). “Experimental study on energy dissipation and tailwater wave in two-stage stilling basin with supercritical inflow of low Froude number”. *Journal of Hydro-environment Research*, v. 51, pp. 25–31.

LITTLE, J.; PAN, S.; FOLLETT, E. (2024). “Determining Surface Velocity Coefficients in Headwater Streams for Natural Flood Management”, In: *Proceedings of the Cardiff University Engineering Research Conference 2023*. Cardiff: Cardiff University Press, pp. 70–73.

MEIER, R.; TSCHIEKNER-GRATL, F.; STEFFELBAUER, D. B.; MARKROPOULOS, C. “Flow Measurements Derived from Camera Footage Using an Open-Source Ecosystem”. *Water* 2022, v. 14, n. 3, p. 424, 2022.

PEREIRA, T. S. R.; DE CARVALHO, T. P.; MENDES, T. A.; DOS REIS, G. C.; FORMIGA, K. T. M. “Hydrodynamic Modeling for Flow and Velocity Estimation from an Arduino Ultrasonic Sensor”. *Hydrology*, v. 11, n. 2, p. 12, 2024.

SHAH, S P.; MUMANA, N.; BARAD, P.; RUCHA, D. “PIV analysis of opaque flow without using high-tech equipment”. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 93, 2023.

STEPENUCK, K. F.; DIEBEL, M.; SMITH, H.; ANDERSON, I.; WISEMAN, D. (2024). “Surface velocity coefficients for discharge monitoring with a surface float method in shallow streams”. *Journal of Hydrology*, v. 632.



WEI, M.; BLANCKAERT, K.; HEYMAN, J.; LI, D.; SCHLEISS, A. J. (2016). “*A parametrical study on secondary flow in sharp open-channel bends: experiments and theoretical modelling*”. Journal of Hydro-environment Research, v. 13, pp. 1–13.

WOTZKA, D.; ZMARZŁY, D. “*Low-Cost Device for Measuring Wastewater Flow Rate in Open Channels*”. Sensors, 24, n. 20, p. 6607, 2024.