

## **XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**

### **VISUALIZAÇÃO DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO EM LABORATÓRIO UTILIZANDO O MÉTODO LSPIV**

*Leonardo Romero Monteiro<sup>1</sup> & Hiro Augusto Lima Sakuno<sup>2</sup>*

**RESUMO** – Com relação a desastres naturais e qualquer o uso da água, cada cidadão precisa saber pela prática e/ou pela teoria as grandezas hidráulicas em canais e também nas ruas, para assim saber as decisões que devem ser tomadas, como por exemplo em um evento drástico de inundação. Isto mostra a necessidade de popularizar características hidráulicas recorrentes no cotidiano de cada pessoa e isto pode ser feito utilizando as ferramentas computacionais. O presente trabalho avalia o método *Large Scale Particle Image Velocimetry* pelo programa RIVER por meio de teste de laboratório em pequena escala, para identificar diferentes situações em que seu uso pode ou não fornecer resultados satisfatórios. Oito configurações de experimento foram testadas, com água limpa, com água com coloração, com duas posições diferentes da câmera e com duas resoluções de vídeo, 480x640 linhas e 1080x1920 linhas. Para todas as configurações testadas os resultados não foram adequados se comparados com os resultados de validação obtidos pelos métodos do objeto flutuante e pelo método volumétrico. Mais testes com diferentes características podem ser realizados para obter resultados melhores utilizando o método LSPIV para pequenas escalas.

**ABSTRACT** – In relation with natural hazards and any use of water, each citizen should know in practice or/and theory hydraulics variables and parameters of water flow on river and street to take decisions as in a drastic flood event. It shows the necessity to popularize hydraulics characteristics of water currents to sensitize people about it and it can be done by the use of computational tools. The present work evaluates Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) method by RIVER software with a small scale channel on a laboratory to identify different cases where LSPIV method can be used. Eight different experimental cases were tested: with clean water, with colored water, with two different camera positions, and with two camera resolutions, 480x640 and 1080x1920 lines. To all configurations, results were not good in comparison with validation results from a floatable object method and volumetric method. Other characteristics must be tested to identify when LSPIV can be used to small scales.

**Palavras-Chave** – LSPIV, vazão, canal.

---

1) Universidade do Estado de Santa Catarina, Rua Paulo Malschitzki, 200, Joinville/SC, leonardo.monteiro@udesc.br

2) Universidade do Estado de Santa Catarina, Rua Paulo Malschitzki, 200, Joinville/SC

## INTRODUÇÃO

O rio sempre esteve presente no cotidiano de cidades em todo o mundo e auxilia o ser humano, como no caso da fertilização de terras ribeirinhas, do transporte por embarcações, além de facilitar em questões de saneamento, fornecimento de água, entre diversas outras atividades. Ainda que existam muitos pontos positivos nesta interação rio-homem, ocorrem muitas dificuldades com relação ao desastre natural provocado pela presença do homem em regiões propícias a inundação. Ainda, alguns casos de inundação são provocados pelo próprio homem, ao reduzir a taxa de infiltração das precipitações e aumentar a velocidade de escoamento, podendo ter consequências fatais (Tucci e Bertoni, 2003).

Com relação a desastres naturais, mas podendo ser ampliado o conceito analogamente para o uso da água de uma forma geral, Kobiyama *et al.* (2018) mencionam que cada cidadão precisa saber pela prática e/ou pela teoria a grandeza da pressão hidrostática e a velocidade do fluxo da água em canais e também nas ruas, para assim saber as decisões que devem ser tomadas em um evento drástico de inundação. Isto mostra a necessidade de popularizar do conhecimento em hidráulica e ferramentas computacionais podem ajudar em popularizar este conhecimento através da medição da velocidade e vazão de um curso hídrico.

Em grandes cidades, as velocidades dos rios em inundações podem ultrapassar a velocidade de 3 m/s criando uma região propensas ao risco de morte e perdas econômicas. O perigo de inundação pode ser considerado como uma função da altura e da velocidade de escoamento (Stephenson, 2002). Entretanto muitos mapeamentos apenas apresentam a mancha de inundação não evidenciando o perigo integralmente, como em Koks *et al.* (2015), Sampson *et al.* (2015), Bates *et al.* (2018), muitas vezes pela falta de informação. Dificilmente se obtém a velocidade de inundações com medições em campo, pois as inundações são muito perigosas para que medições sejam realizadas, além de que a situação de emergência criada faz com que o socorro às pessoas seja a prioridade nestes eventos (CORATO et al., 2014). De acordo com Vanelli (2019), observa-se a escassez e/ou baixa qualidade dos dados hidrológicos associados a eventos extremos de máxima.

A medição de velocidade do escoamento por imagem de vídeos vem se desenvolvendo nos últimos anos, em que a técnica mais utilizada em laboratórios, o *Particle Image Velocimetry* (PIV) (Adrian 1984, 2005), fornece dados confiáveis, tanto de planos pré-definidos quando de volumes inteiros. O método PIV gera resultados completos e precisos, entretanto, necessita-se de alto investimento e é utilizado preponderantemente em medição de escoamentos em laboratórios.

Em virtude destas dificuldades, foi criado o *Large Scale Particle Image Velocimetry* (LSPIV) que se baseia em imagens de vídeos, feito por câmeras usuais, para realizar as medições de velocidade. O LSPIV, além de ter um custo bastante reduzido, ele pode ser utilizado para a medição de velocidade em rios e canais sem nenhuma intervenção humana. A popularização desta

ferramenta de baixo custo pode auxiliar tanto no gerenciamento do risco de inundação quanto no ensinamento da hidráulica ao fornecer uma relação qualiquantitativa dos parâmetros hidráulicos de eventos extremos.

Um dos programas que disponibilizam esta metodologia é o RIVeR desenvolvido por Patalano *et al.* (2017). Certamente os resultados do LSPIV devem ser avaliados para identificar a qualidade de medições e identificar a abrangência de uso possível. Sendo um método desenvolvido para larga escala, não são encontrados experimentos para os testes dessa metodologia para pequena escala, em ambiente de laboratório.

O presente trabalho avalia o método LSPIV pelo programa RIVeR, por meio de teste de laboratório em pequena escala, para identificar diferentes situações em que seu uso pode ou não fornecer resultados satisfatórios.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O canal utilizado para os experimentos se encontra no Laboratório de Hidráulica da Universidade do Estado de Santa Catarina em Joinville/SC. O canal é feito de acrílico e possui 2,5 m de comprimento, 31,50 cm de altura, 10,10 cm de largura e a declividade foi fixada em 0,0175 m/m. A profundidade do escoamento obtida é de 3,204 cm. O fornecimento de água é feito por um sistema de recirculação com um taque de 300 L, em que foi garantido que o escoamento ocorresse em regime permanente.

Para realizar a medição da velocidade e da vazão para validar os resultados a obtidos pelo LSPIV, utilizou-se um medidor de velocidade flutuante e o método volumétrico de medição. O objeto flutuante utilizado foi uma esfera oca com 40 mm de diâmetro com peso de 2,8 g. O recipiente utilizado para a aplicação do método volumétrico possuía uma gradação de litro em litro com a capacidade máxima de 18 litros.

Para a medição da velocidade pelo objeto flutuante, utilizou-se 2 m de comprimento do canal em que o objeto foi liberado em um ponto a montante e recolhido em um ponto a jusante. Ao mesmo tempo, mediu-se o tempo em que o objeto demorou para realizar o percurso. O experimento foi repetido 10 vezes obtendo uma velocidade média ( $\bar{V}$ ) de 0,86 m/s com desvio padrão de ( $S_V$ ) 0,03 m/s. Considerando uma simplificação de que a velocidade superficial medida é igual a velocidade média na seção, tem-se que a vazão ( $\bar{Q}$ ) no canal é de 2,68 L/s.

O método volumétrico foi aplicado coletando água da saída do canal, que retornaria ao tanque que o alimenta. Foram realizadas cinco medições e o valor médio de vazão foi de 3,15 L/s com desvio padrão  $S_Q$  de 0,04 L/s. Assim a velocidade média do escoamento foi de 0,972 m/s. A Tabela 1 é apresentada para facilitar a compreensão dos resultados obtidos para a validação o LSPIV.

Tabela 1 – Resultados obtidos para a validação.

|                 | Método Obj. Flut. | Método Volumétrico |
|-----------------|-------------------|--------------------|
| $\bar{V}$ (m/s) | 0,86              | 0,97               |
| $S_V$ (m/s)     | 0,03              | -                  |
| $\bar{Q}$ (L/s) | 2,68              | 3,15               |
| $S_Q$ (L/s)     | -                 | 0,04               |

Duas colorações da água foram testadas. Primeiramente, água potável translúcida proveniente da rede de abastecimento da cidade de Joinville, responsabilidade da empresa Águas de Joinville (nomeado de H). Em seguida adicionou-se coloração e turbidez à água, utilizando 70 gramas de café moído, com granulometria máxima de 1,7 mm no tanque de 300 L, obtendo-se uma concentração de 0,233 kg/m<sup>3</sup> (nomeado de C).

O número de Froude,  $Fr = \frac{\bar{V}}{\sqrt{gh}}$ , e o número de Reynolds,  $Re = \frac{\rho \bar{V} R_h}{\mu}$  foram obtidos, considerando que  $g$  é a aceleração da gravidade com 9,81 m/s<sup>2</sup>,  $\rho$  é a massa específica da água com 997 kg/m<sup>3</sup> e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica com 0,000891 Pa.s,  $h$  é a profundidade do escoamento em metros e  $R_h$  é o raio hidráulico em metros. Obtiveram-se os valores de  $Fr = 1,7$  e  $Re = 1,83 \times 10^5$ , caracterizando o escoamento como supercrítico e turbulento.

### Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV)

O RIVeR é um programa criado por Patalano *et al.* (2017) que utiliza a técnica LSPIV para estimar vazão em rios naturais. A versão utilizada pelo presente trabalho foi a RIVeR v.2.4.1. O RIVeR se baseia no programa PIVlab (Thielicke e Stamhuis, 2014) para fazer o processamento das imagens do vídeo e encontrar as velocidades do escoamento em pixel/frame. Com esta informação, o RIVeR transforma estas velocidades de pixel/frame para m/s, utilizando valores de proporção fornecidos pelo usuário. O programa foi configurado para calcular a vazão utilizando o Método da Vazão Média considerando que a velocidade superficial é a própria velocidade média da área de integração. Assim, o perfil de velocidade é simplificado, possuindo um valor constante, o que pode limitar o uso para perfis de velocidades mais complexos. O programa possui diversas ferramentas, uma delas permite o tratamento dos resultados como, por exemplo, ao selecionar as velocidades máximas e mínimas permitidas para o escoamento.

Para a aplicação do LSPIV utilizou-se uma câmera de celular para realizar as gravações em duas qualidades: resolução de 1920x1080 (nomeado de 1080) e resolução de 640x480 (nomeado de 480). A câmera foi posicionada em duas posições diferentes, como mostra na Figura 1. A posição **A** possui um ângulo de 90 graus com a horizontal, e origem no centro do fundo do canal, e a posição **B** um ângulo de 51,62 graus.

Para o processamento dos vídeos filmados a frequência de aquisição de imagens foi de 30 fps. Quatro pontos foram demarcados no canal, próximos da superfície livre, para que a transformação de grids em metros fosse realizada, além de viabilizar o procedimento de retificação do canal realizada pelo próprio programa. A retificação do canal é realizada para que a conversão de grids em metros não seja inviabilizada pela posição e angulação da câmera.

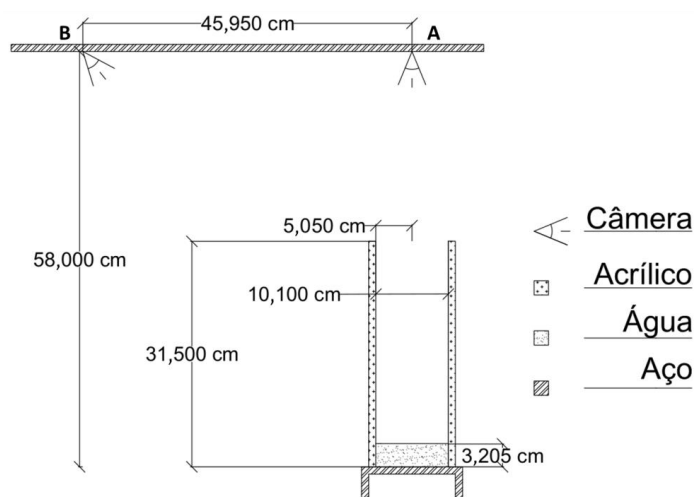


Figura 1 – Representação das posições da câmera e das dimensões transversais.

## RESULTADOS

No processamento dos dados a posição referência do plano cartesiano foi considerada automaticamente pelo programa como invertida ao escoamento. Assim, as velocidades longitudinais ( $u$ ) negativas são a favor do escoamento, enquanto que as positivas são contra o escoamento.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos considerando 8 variações de configurações que forneceram 8 vídeos diferentes: com relação a qualidade de filmagem - 480x640 (**480**) e 1080x1980 linhas (**1080**); coloração da água - sem coloração (**H**) e com coloração (**C**), e; posição da câmera com relação ao escoamento - a 90 graus (**A**) e a 51,62 graus (**B**).

Tabela 2 – Resultados de velocidade média longitudinal ( $u$ ) e transversal ( $v$ ) e desvio padrão para os diversos experimentos.

| Qualidade | Coloração | Posição | $\bar{u}$ (m/s) | $S_u$ (m/s) | $\bar{v}$ (m/s) | $S_v$ (m/s) |
|-----------|-----------|---------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| 480       | C         | B       | -0,0014         | 0,0077      | -0,0004         | 0,0044      |
| 480       | C         | A       | 0,0185          | 0,0386      | -0,0005         | 0,0195      |
| 480       | H         | B       | 0,0036          | 0,0272      | 0,0199          | 0,0351      |
| 480       | H         | A       | 0,0078          | 0,0583      | 0,0001          | 0,0208      |
| 1080      | C         | B       | -0,0001         | 0,0037      | -0,0004         | 0,0038      |
| 1080      | C         | A       | 0,0029          | 0,0197      | 0,0000          | 0,0084      |
| 1080      | H         | B       | 0,0158          | 0,0443      | 0,0008          | 0,0108      |
| 1080      | H         | A       | 0,0062          | 0,0276      | -0,0010         | 0,0073      |

Apenas 2 dos 8 processamentos de vídeos obtiveram corretamente a direção do escoamento médio, que foram aqueles que analisaram o escoamento com coloração da água e a posição de filmagem a 51,62 graus do escoamento (*i. e.* 480CB, 1080CB). Este fato demonstra uma grande dificuldade em utilizar o LSPIV para pequenas escalas, já que ele não foi criado para isso. Além de encontrar adequadamente a direção do escoamento, os resultados 480CB e 1080CB obtiveram o menor desvio padrão do escoamento longitudinal e contemplam valores baixos de escoamento médio e desvio padrão transversal, como deveria ser, pois não existe vazão entrando e nem saindo lateralmente do canal.

Estes resultados estão de acordo com as recomendações de utilização da técnica que expõem claramente a necessidade da água possuir sedimentos e a filmagem ser realizada com angulação ao rio (Patalano *et al.*, 2017).

Para compreender melhor a distribuição das velocidades são apresentados os histogramas dos resultados referentes aos escoamentos com angulação de 51,62 graus da câmera (Figuras 2 e 3). Pode-se observar que a distribuição das velocidades, quando não se possui coloração na água, tende a representar valores maiores no sentido contrário ao escoamento. Ou seja, o algoritmo não consegue encontrar a relação adequada entre os pixels, pois eles são muito semelhantes entre si.

Os histogramas dos resultados com alta resolução para ambas as colorações, resultaram valores elevados contra o fluxo. Esse resultado demonstra que o problema encontrado não necessariamente é provocado pela baixa resolução da câmera, e que câmeras com menor qualidade de filmagem, neste caso, fornecem resultados mais coerentes com a realidade.

Ao comparar os resultados de velocidades encontrados pela aplicação do LSPIV (Tabela 2) e pelo método do objeto flutuante (Tabela 3), pode-se perceber que os valores de velocidades estão muito abaixo do valor de validação. Dessa forma, é mostrado que mesmo quando a direção do escoamento é encontrada pelo algoritmo, a velocidade de validação não é encontrada.

Mediante essas análises, viu-se necessidade em realizar um processamento nos dados para que os resultados fossem mais compatíveis com a realidade. Tendo em vista que se trata de um escoamento supercrítico e sem obstáculos ou vórtices relevantes, as perturbações provocadas pela parede tendem a seguir o fluxo do escoamento não apresentando velocidades contra-fluxo. Dessa forma, o processamento consistiu em selecionar apenas os resultados que estivessem no fluxo correto do escoamento.

Os experimentos 480CB e 1080CB foram escolhidos para esse processamento. Uma seção transversal foi obtida em que  $x$  é o comprimento da esquerda para a direita na seção transversal e os resultados de velocidade, velocidade média na seção e vazão são apresentados Tabela 3 e Figura 4.

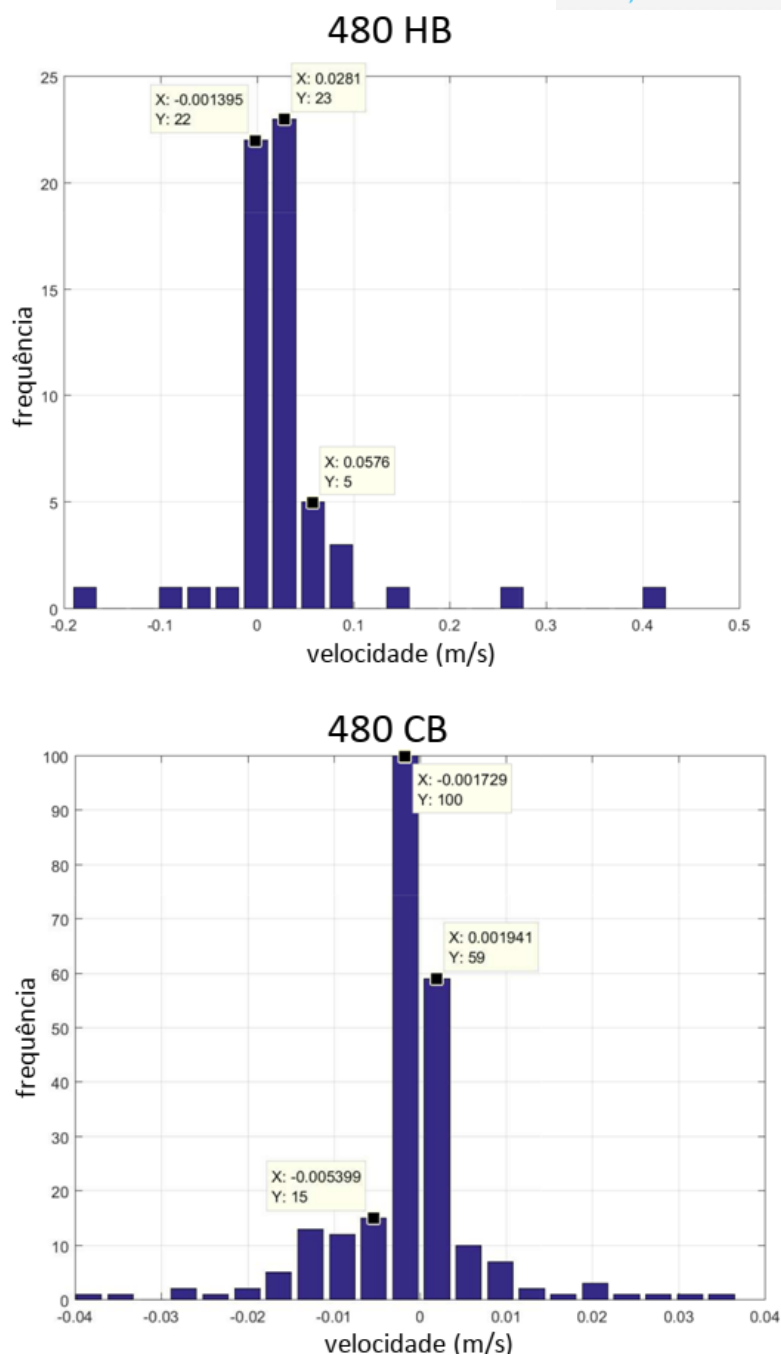
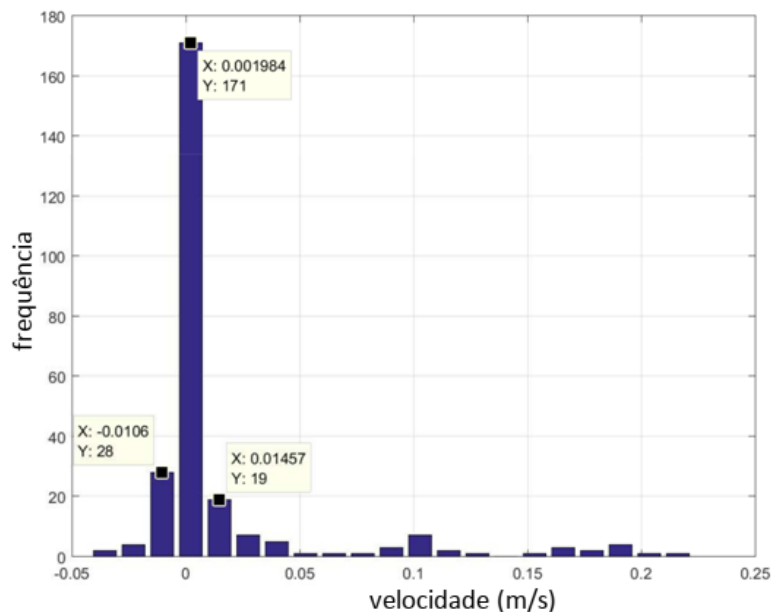


Figura 2 – Histograma dos resultados na posição B e resolução de 480 sem (a cima) e com (a baixo) coloração.

O processamento das informações se mostrou muito eficiente no ajuste dos resultados. No caso de 480CB a vazão passou de 0,03 L/s para 0,14 L/s, um aumento de aproximadamente 5 vezes. Entretanto, ainda está muito distante do valor de vazão obtido pelo método volumétrico de 3,15 L/s. A velocidade média passou de 0,009 m/s para 0,040 m/s, um aumento também expressivo, mas não o suficiente para alcançar a velocidade média do método do objeto flutuante de 0,86 m/s.

### 1080 HB



### 1080 CB

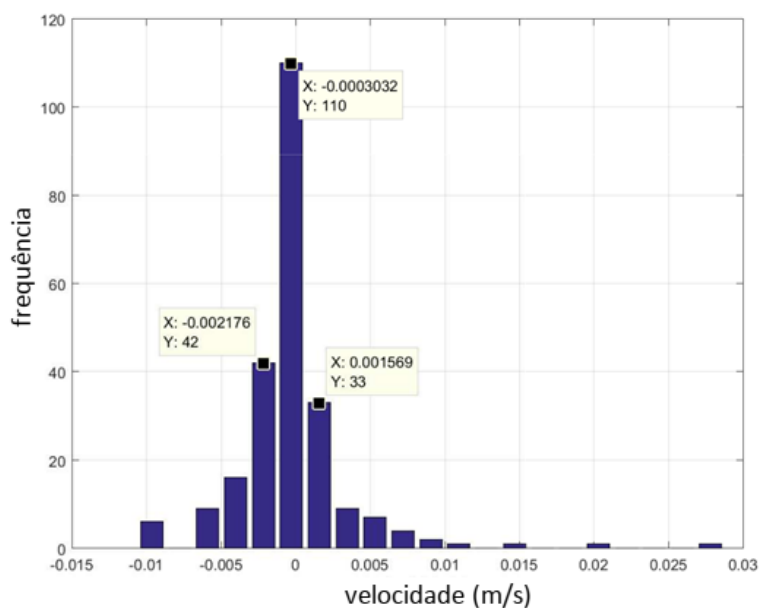


Figura 3 – Histograma dos resultados na posição B e resolução de 1080 sem (a cima) e com (a baixo) coloração.

Tabela 3 – Resultados de velocidade média longitudinal e vazão sem e com as modificações nas velocidades.

| 480CB (s/ alterações)  | 480CB (c/ alterações)  | 1080CB (s/ alterações) | 1080CB (c/ alterações) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| $\bar{u}$ (m/s) -0,009 | $\bar{u}$ (m/s) -0,040 | $\bar{u}$ (m/s) 0,000  | $\bar{u}$ (m/s) -0,014 |
| Q (L/s) -0,030         | Q (L/s) -0,140         | Q (L/s) 0,000          | Q (L/s) -0,050         |

Algo semelhante é encontrado nos dados de 1080CB. A vazão passou de 0,00 L/s para 0,05 L/s, e a velocidade média passou de 0,000 m/s para 0,014 m/s. Ambos os valores são inferiores aos resultados de validação e também são inferiores aos seus pares do experimento 480CB.



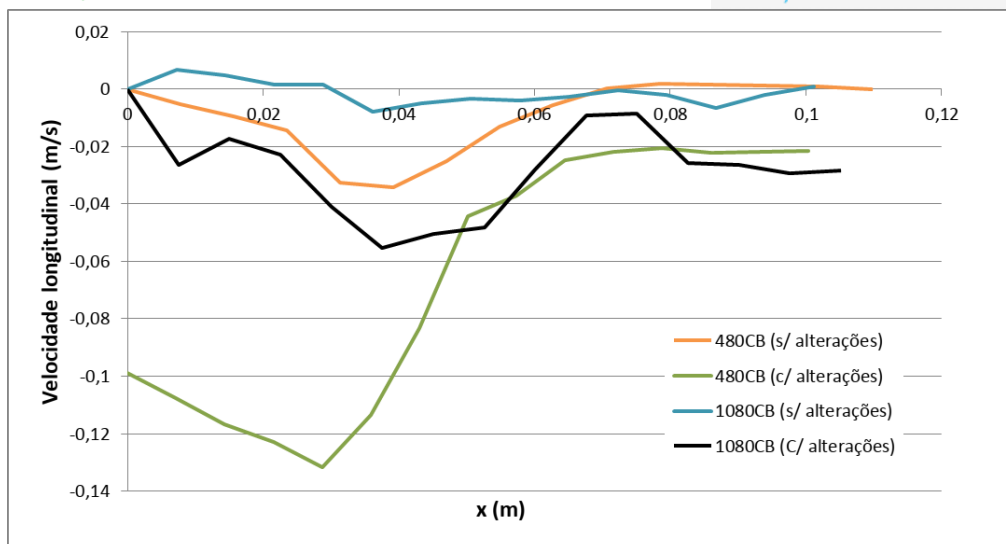


Figura 4 – Resultados de velocidade longitudinal para os diferentes experimentos

## CONCLUSÃO

No presente artigo, o método LSPIV foi testado em um canal de pequeno porte, com escoamento com profundidade de 0,03205 m e largura de 0,101 m. O LSPIV, como seu próprio nome diz, *Large Scale Particle Image Velocimetry*, foi criado para encontrar dados de escoamentos de grande escala, sendo mais adequado para rios naturais. O presente trabalho avaliou a utilização deste método para escoamento de pequena escala, para identificar se é viável, ou ao menos de fácil aplicação, em laboratórios que não possuam recursos financeiros e nem estrutura para adquirir e utilizar um equipamento tão caro quanto o PIV.

Oito configurações de experimento foram testadas, com água limpa, com água com coloração, com a posição da câmera a 90 graus do centro do fundo, com relação à seção transversal do canal, com a posição da câmera com a posição de 51,62 graus, e com duas resoluções de vídeo, 480x640 linhas e 1080x1920 linhas. Para todas as configurações testadas os resultados não foram adequados se comparados com os resultados de validação obtidos pelos métodos do objeto flutuante e pelo método volumétrico. Os resultados que mais se aproximaram dos valores de validação foram os que possuíam coloração e turbidez e cujo vídeo foi gravado com a câmera posicionada a 51,62 graus do centro do canal. Entretanto, esses resultados ainda não são satisfatórios devido à grande discrepância nos valores obtidos em relação aos medidos para validação.

Portanto, apesar da exclusão dos valores contra-fluxo pelo processamento nos dados, não se obteve resultados coerentes com os dados de validação. Dois dos principais motivos para os resultados não adequados do experimento podem ser atribuídos: a pequena escala utilizada, e o material do canal ser de acrílico, se diferenciando muito do material dos rios naturais. Esse tipo de material (acrílico) pode gerar problemas como reflexão da imagem do escoamento atrapalhando o processamento dos dados do vídeo.

Mesmo com os resultados inadequados mais experimentos podem ser realizados para identificar a viabilidade desta técnica para pequena escala. Assim, indica-se para futuras pesquisas: (i) testar uma coloração mais intensa na água, com uma concentração maior do que  $0,233 \text{ kg/m}^3$  e granulometria das partículas maiores do que  $1,7 \text{ mm}$ ; (ii) acrescentar a variável iluminação pode ser indicado; (iii) testar diferentes velocidades do escoamento, dentre outros testes pertinentes.

## REFERÊNCIAS

ADRIAN, R. J. (1984). “*Scattering particle characteristics and their effect on pulsed laser measurements of fluid flow: speckle velocimetry vs particle image velocimetry*”. Appl. Opt. 10–11.

ADRIAN, R. J. (2005). “*Twenty years of particle image velocimetry*”. Exp. Fluids 39, 159–169.

BATES, P.D., NEAL, J., SAMPSON, C., SMITH, A., TRIGG, M. (2018). “*Progress toward hyperresolution models of global flood hazard.*” In: Risk Modeling for Hazards and Disasters, pp. 211–232.

CORATO, G.; AMMARI, A.; MORAMARCO, T. (2014). “*Conventional point-velocity records and surface velocity observations for estimating high flow discharge*”. Entropy. 16 (10), pp. 5546 – 5559.

KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F.; MONTEIRO, L. R. (2018). “*Integração das Ciências e das Tecnologias para Redução de Desastres Naturais: Sócio-Hidrologia e Sócio-Tecnologia*”. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental. 7 (esp.), pp. 206 – 231.

KOKS, E.E., JONGMAN, B., HUSBY, T.G., BOTZEN, W.J. (2015). “*Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management*”. Environmental Science & Policy 47, 42–52 (2015)

PATALANO, A.; GARCÍA, C. M.; RODRÍGUEZ, A. (2017). “*Rectification of Image Velocity Results (RIVeR): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV)*”. Computers and Geosciences. 109, pp. 323 – 330.

SAMPSON, C.C., SMITH, A.M., BATES, P.D., NEAL, J.C., ALFIERI, L., FREER, J.E. (2015) “*A high-resolution global flood hazard model*”. Water resources research 51(9), pp. 7358–738.

STEPHENSON, D. (2002). “*Integrated flood plain management strategy for the Vaal*”. Urban Water 4 (4), pp. 423–428.

THIELICKE, W., STAMHUIS, E.J. (2014). “*PIVlab – towards user-friendly, affordable and accurate digital Particle Image Velocimetry in MATLAB*”. Journal of Open Research Software. 2(1), pp. 30.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J C (Org.),(2003) *Inundações Urbanas na América do Sul*. Porto Alegre: ABRH, 156 p.

VANELLI, F. M. (2019). *Reconstrução Hidrológica e Hidrodinâmica do Evento de 1974 em Tubarão/SC*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 153p.