

XXX CLH

CONGRESO LATINOAMERICANO
DE HIDRAULICA | BRASIL | 2022

ANALES

- VOLÚMEN 1 -

MECÁNICA DE LOS FLUIDOS E HIDRÁULICA
FUNDAMENTAL



International Association
for Hydro-Environment
Engineering and Research

Hosted by
Spain Water and IWHR, China

Organizadores

Dr. Cristiano Poletto - UFRGS (Presidente)
Dr. José Gilberto Dalfré Filho - UNICAMP
Dr. André Luís Sotero Salustiano Martim - UNICAMP

**ANALES DEL
XXX CONGRESO LATINOAMERICANO DE
HIDRÁULICA 2022**

**- VOLÚMEN 1 -
MECÁNICA DE LOS FLUIDOS E HIDRÁULICA
FUNDAMENTAL**



Madrid – España
2023

Copyright © 2023, by IAHR Publishing.

Derechos Reservados en 2023 por **IAHR Publishing.**

Montaje: Cristiano Poletto

Organización General de la Obra: Cristiano Poletto; José Gilberto Dalfré Filho;
André Luís Sotero Salustiano Martim

Maquetación: Juliane Fagotti; Cícero Manz Fagotti

Relectura General: Elissandro Voigt Beier

Portada: Juliane Fagotti

Cristiano Poletto; José Gilberto Dalfré Filho; André Luís Sotero Salustiano Martim
(Organizadores)

ANALES del XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica – VOLÚMEN 1 –
MECÁNICA DE LOS FLUIDOS E HIDRÁULICA FUNDAMENTAL / Organizadores:
Cristiano Poletto; José Gilberto Dalfré Filho; André Luís Sotero Salustiano Martim –
MADRI, España: IAHR Publishing, 2023.

380p.: il.;

ISBN • 978-90-832612-2-5

*ES AUTORIZADA la libre reproducción, total o parcial, por cualquier medio, sin
autorización escrita del Editor o de los Organizadores.*

MEDIÇÃO DE PERFIL DE VELOCIDADE DE FLUIDO VISCOPLÁSTICO: APLICAÇÃO DA FUNÇÃO CWT 2D NA ANÁLISE DE VELOCIMETRIA STIV

João Batista Pereira¹, Lucas Brendow da Silva¹, Yuri Taglieri São¹, Fabrício Ely Gossler²,
Guilherme Henrique Fiorot³ e Geraldo de Freitas Maciel¹

¹ Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira UNESP - Universidade Estadual Paulista, Brasil, ² UEMS - Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul, Brasil, ³ UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
joao.pereira@unesp.br, lucas.brendow@unesp.br, fabricio.ely@uems.br, guilherme.fiorot@ufrgs.br, geraldo.f.maciel@unesp.br, yuri.sao@unesp.br

RESUMO:

O conteúdo desta pesquisa está atrelado à caracterização experimental do perfil de velocidade ao longo da profundidade de um escoamento de natureza viscoplástica a partir de uma técnica de velocimetria por imagem - STIV (*Space-Time Image Velocimetry*) e no desenvolvimento próprio da metodologia de ensaio e processamento de dados. Os experimentos foram conduzidos em canal inclinado com superfície livre e diferentes mecanismos de análise e medição das propriedades da imagem STI (*Space-Time Image*) foram empregados, com destaque para a Transformada *Wavelet* Contínua Bidimensional (CWT 2D) como ferramenta de velocimetria. Os resultados demonstraram a capacidade do método desenvolvido em fornecer o perfil de velocidade e o emprego da CWT 2D aumentou o rigor do método.

ABSTRACT:

The content of this research is linked to the experimental characterization of the velocity profile along the depth of a viscoplastic flow from a technique of image velocimetry - STIV (*Space-Time Image Velocimetry*) and in the development of the methodology and data processing. The experiments were carried out in an inclined channel with a free surface and different mechanisms for analyzing and measuring the properties of the STI (*Space-Time Image*) image were used, with focus on the Two-Dimensional Continuous Wavelet Transform (CWT 2D) as a velocimetry tool. The results demonstrated the ability of the developed method to provide the velocity profile and the use of 2D CWT increased the rigor of the method.

PALAVRAS-CHAVES: velocimetria; imagem espaço-temporal; fluido não-Newtoniano; perfil de velocidade.

INTRODUÇÃO

A problemática acerca de escoamentos naturais com superfície livre, em particular as corridas de lamas, tem ganhado maior destaque, principalmente em virtude das frequentes rupturas de barragem (Owen et al., 2020). Nesse contexto, há de se evidenciar a natureza predominantemente não-newtoniana do fluido escoante e, por conseguinte, sua reologia de comportamento distinto da água (Ancey, 2007).

O completo conhecimento desse tipo de escoamento requer informações acerca de vazões, profundidades, campo de velocidade, tensões de arrasto no fundo, bem como alcance das frentes produzidas. O uso de modelos de reologia não-Newtoniana, basicamente o de Bingham e de Herschel-Bulkely, tem-se mostrado capaz de bem descrever, de forma completa, o comportamento desse tipo de material (Balmforth et al., 2014).

Ainda que escoamentos viscoplásticos de natureza não-Newtoniana estejam presentes em diferentes aplicações, lacunas acerca de seu completo entendimento continuam abertas e disponíveis para novos estudos. Nesse sentido, estudos de diferentes naturezas têm sido conduzidos a fim de buscar maior entendimento sobre a dinâmica de escoamento e seus impactos sobre leis de alcance e mancha de inundação de escoamentos naturais (Balmforth et al., 2006; Cochard; Ancey, 2009; Saramito et al., 2013; Azimi, 2016; Bates; Ancey, 2017).

Mais recentemente, alguns trabalhos têm perseguido a obtenção do perfil de velocidade ao longo da profundidade (Ancey et al., 2012; Freydier et al., 2017), uma vez que tal informação mostra-se crucial para o desenvolvimento/validação de modelos teóricos e numéricos, os quais necessitam de informações precisas com relação à velocidade média e vazão.

Ao longo dos últimos anos diferentes mecanismos de velocimetria têm sido desenvolvidos e aprimorados a fim de caracterizar de campos de velocidade, seja em laboratório ou em campo. Dentre elas pode-se citar instrumentos acústicos de retroespalhamento (ABIs), tomografia acústica de espaço-tempo, velocimetria laser-Doppler, velocimetria por imagens, radar de alta frequência, boias de deriva e o método de diluição (Aberle et al., 2017), além dos métodos tradicionais como o flutuador e molinete.

Uma abordagem experimental clássica e já consolidada, quando da medição de perfis de velocidade, é o uso da técnica PIV (*Particle Image Velocimetry*) a qual tem sido empregada em experimentos de laboratórios de hidráulica há mais de 30 anos (PATALANO et al., 2017) e cuja boa exatidão, faixa de 0,2 a 2%, a torna ainda mais vantajosa para avaliações quantitativas (True; Crimaldi, 2019; De Paula; Azevedo, 2012). Essa técnica, de caráter não intrusivo e adequada a fluidos translúcidos, necessita de um conjunto de equipamentos e exige o uso de pequenos traçadores dispersos no escoamento. A análise por PIV exige, além de uma câmera (esta com sensores CCD ou CMOS), um sistema gerador de laser e uma unidade sincronizadora laser/câmera, os quais trabalham de forma integrada e sincronizada, o que eleva o custo.

Nesse contexto, este trabalho visa aprofundar-se no entendimento do comportamento da dinâmica de escoamentos laminares, por meio da caracterização do perfil de velocidade de fluido viscoplástico ao longo de sua profundidade. Para isso, foi desenvolvida uma metodologia experimental para uso em canais de laboratório, a qual é baseada na técnica de velocimetria STIV (*Space-Time Image Velocimetry*) - utilizada na medição de velocidade superficial de rios (Fujita et al., 2007). Tal metodologia foi implementada a partir do desenvolvimento de um algoritmo capaz de gerar uma imagem espaço-temporal do escoamento e possibilitar automaticamente, segundo aplicação da CWT 2D (*Transforma Wavelet Contínua*), a definição da velocidade. Ademais, para efeito comparativo, um modelo teórico baseado na teoria da lubrificação e considerando fluido viscoplástico do tipo Herschel-Bulkley foi utilizado.

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da técnica de velocimetria inspirada no método STIV (*Space-Time Image Velocimetry*) foi utilizado um canal retangular de 3 m de comprimento e um sistema de bombeamento e circulação (elementos já existentes e operacionais no laboratório), além de sistemas de medição de escoamento (velocidades e profundidades) e caracterização reológica, conforme apresentados neste tópico.

Fluido teste e caracterização reológica

Os experimentos foram realizados com gel de Carbopol, um fluido viscoplástico, produzido a partir do polímero Carbopol 996, de características reológicas semelhantes aos materiais encontrados em escoamentos naturais (Piau, 2007). O gel de carbopol foi produzido em diferentes concentrações mássica (0.13% e 0.17%) e na quantidade de 180 L segundo metodologia definida por Minussi e Maciel (2012). Basicamente, o pó de carbopol foi adicionado em água deionizada e a mistura foi

agitada por meio de um misturador a fim de promover sua dispersão, e, para finalizar, a mistura foi neutralizada com hidróxido de sódio.

A curva de fluxo do fluido teste foi obtida a partir de um reômetro (Brookfield R/S, de controle de taxa de deformação e tensão de cisalhamento) com o sistema coaxial e spindle CC-45. O procedimento consistiu na imposição de dois estágios de taxa de deformação e a respectiva medição da tensão de cisalhamento (Figura 1).

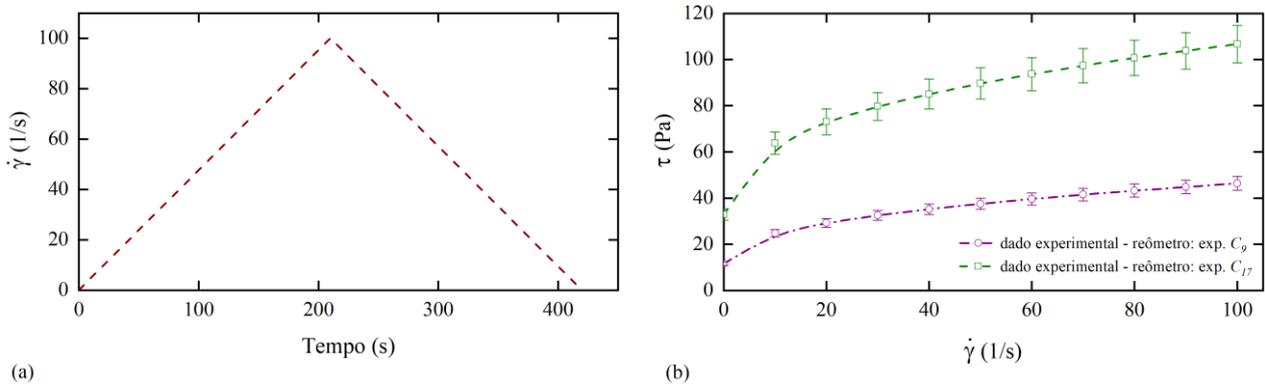


Figura 1. - Caracterização reológica: (a) protocolo de caracterização e (b) curva de fluxo obtida para os ensaios C_9 e C_{17} com, respectivamente, incertezas de 6,5% e 7,6 %.

A análise da curva de fluxo e obtenção da tensão limite de escoamento (τ_0), bem como dos parâmetros índice de consistência (K_n) e de escoamento (n), foi feita segundo o uso do modelo Herschel-Bulkley, conforme Equação 1, considerando o ramo ascendente da curva de fluxo e taxa de deformação na faixa de $1 < \dot{\gamma} < 100 \text{ s}^{-1}$.

$$\tau = \tau_0 + K_n \dot{\gamma}^n \quad [1]$$

Os resultados da caracterização reológica do fluido teste de cada experimento em termos dos parâmetros reológicos τ_0 , K_n e n , além das medidas de massa específica, estas realizadas a partir de volume calibrado, são apresentados na Tabela 3 segundo valores médios.

Aparato experimental e medição do escoamento

Sistema de circulação e bombeamento de fluido

O escoamento ocorreu em um canal inclinado (de inclinação variável) de 3 metros de comprimento e 30 centímetros de largura a partir do uso de um sistema de sucção e recalque, executado por uma bomba hidráulica de cavidade progressiva (rotativa de deslocamento positivo), indicada para fluidos viscosos, já implantado e operacional no laboratório de realização deste trabalho (Maciel et al., 2017). O sistema de bombeamento e circulação mostrou-se adequado, sobretudo por gerar baixa agitação do fluido e também pelos baixos níveis de ruídos transferido ao escoamento. Uma consideração importante nos testes de velocimetria é a necessidade de extinção de bolhas de ar geradas, no interior do gel de carbopol, no momento em que o fluido sai do canal e chega ao reservatório inferior (tanque de armazenamento). Para atenuar a geração de bolha foi construído um dispositivo em PVC, tal dispositivo, de comprimento de aproximadamente 1 m e superfície semi-esférica, foi acoplado no final do canal e conectado ao reservatório, eliminando a queda do material diretamente para o reservatório inferior. O dispositivo implementado foi capaz de reduzir as bolhas e contribuiu para a obtenção de imagens do escoamento sem os ruídos advindos do brilho das bolhas.

Com relação ao fluido teste empregado (gel de carbopol) e seu armazenamento, foi utilizado um reservatório inferior de 250 litros de capacidade. É importante destacar que foram produzidos 180 litros de gel de carbopol para a realização dos experimentos e que tal fluido manteve suas propriedades reológicas controladas por semanas (presença de tampa no reservatório inferior e sua vedação possibilitaram a maior conservação do fluido).

Gerador de plano laser

O gerador de plano laser se caracteriza como um sistema de geração (uso de lentes específicas para gerar plano de espessura na faixa de 1 a 2 mm) e controle da intensidade do plano luminoso. Esse sistema é de extrema importância para técnica de velocimetria desenvolvida, é a partir de tal plano luminoso que o movimento do escoamento, a partir de microtraçadores de esfera de vidro, é registrado e analisado.

Em função da elevada largura do canal (30 cm) e necessidade de captar região luminosa após espessa camada de fluido, optou-se por gerador de plano de laser de alta potência, especificamente laser de estado sólido de cor verde (532 nm) e potência de de 2,5W. Testes iniciais com gerador de laser de potência de 450 mW demonstraram necessidade de elevada luminosidade para bons resultados. Para acoplar o gerador de plano laser ao canal foi desenvolvido um suporte específico, o qual permite o acoplamento do plano laser em diferentes posições ao longo do comprimento do canal e ainda possibilita sua movimentação ao longo da seção transversal do canal.

Técnicas de medição empregada

Medição de profundidade e velocidade superficial

Para a medição da profundidade do escoamento foi empregado transdutor ultrassônico baseado na técnica pulso-eco. Especificamente, foi utilizado transdutor de modelo RPS-401A, o qual foi incorporado à cadeia de medição após o levantamento de sua curva de calibração. É importante relatar a obtenção da curva de calibração dos transdutores ultrassônicos a partir de correlação com medidas feitas com micrômetro, possibilitando medições rigorosas.

Já a medição das velocidades superficiais foi realizada utilizando sensores de barreira a laser (modelo M8 de saída NPN). Tal dispositivo é composto de um transmissor e um receptor laser e o uso de dois desses dispositivos permitiu registrar o tempo de um dado deslocamento de um traçador colocado na superfície do escoamento (isopor), de forma a obter a velocidade superficial do escoamento.

Para o registro dos dados de profundidade e velocidade superficial, advindos dos transdutores ultrassônicos e sensores de barreira a laser, foi utilizada uma placa de aquisição (modelo USB-6009 da *National Instruments*), configurada a partir do *software LabView*, através do supervisor de aquisição de dados, possibilitando tanto a visualização como a aquisição e armazenamento (gravação) no momento dos ensaios, de todos os dados aferidos.

Velocimetria: técnica STIV

Uma abordagem corriqueira e já estabelecida quando da medição de perfis de velocidade, é o uso da técnica PIV (*Particle Image Velocimetry*), cujo uso em laboratórios de hidráulica é uma realidade há anos (Patalano et al., 2017). Essa técnica, de caráter não intrusivo e adequada a fluidos translúcidos, necessita de um conjunto de equipamentos e exige o uso de pequenos traçadores dispersos no escoamento. Basicamente, a técnica PIV funciona a partir da iluminação de uma região longitudinal do escoamento por meio de um feixe laser; simultaneamente a isso, uma câmera capta imagens frontais do plano iluminado pelo feixe, sendo a análise do perfil de velocidade obtida por meio da interpretação dos deslocamentos das partículas dispersas no escoamento.

A análise por PIV exige, além de uma câmera (esta com sensores CCD - *Charged Coupled Device*), um sistema gerador de laser e uma unidade sincronizadora laser/câmera, os quais trabalham de forma integrada e sincronizada, o que torna tal técnica de elevado custo para aplicação neste projeto.

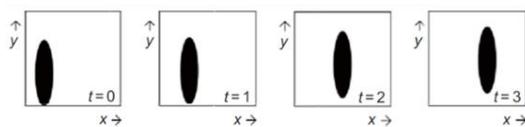
A fim de contornar os elevados custos relacionados ao uso da técnica PIV, foi utilizada uma técnica alternativa para obtenção de perfis de velocidade, a técnica *STIV*, adaptando-a em para uso em canais de laboratório. A técnica *STIV* é baseada na análise espaço-temporal de séries de imagens, e seu desenvolvimento foi realizado por Fujita et al. (2007) para medição de velocidades superficiais de rios. A aplicação dessa técnica pode ser realizada tanto em problemas ditos 2D (uma dimensão espacial + tempo), quanto em 3D (duas dimensões espaciais + tempo). Analisando um problema 2D, a técnica *STIV* pode ser explicada da seguinte forma: ao considerar uma região de velocidade unidirecional, é possível, a partir de captura de imagens de tal região, construir, para cada linha ao longo de um comprimento x das imagens do escoamento, um diagrama espaço-temporal, também chamada de imagem STI (*Space Time Image*). A imagem STI é obtida a partir do empilhamento dos níveis de brilho registrados ao longo de tal comprimento nos diferentes tempos de captura.

Em função da velocidade ao longo daquele comprimento ser constante, será observado, no diagrama espaço-temporal, estrias paralelas inclinadas. Tais estrias inclinadas indicam a advecção da intensidade do brilho da imagem ao longo do segmento de linha analisado. A partir do ângulo observado no diagrama espaço-temporal (inclinação das estrias paralelas) e utilizando-se de informações da resolução da imagem e taxa de frame, torna-se possível definir a velocidade ao longo do comprimento x definido. Ao realizar esse procedimento, ilustrado na Figura 2, ao longo da profundidade do fluido, é possível obter o perfil de velocidade do fluido ao longo da profundidade.

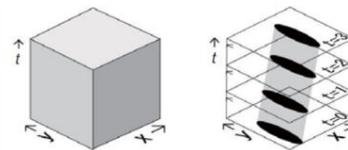
De forma geral, a obtenção da velocidade do escoamento ocorre a partir da definição da inclinação das estrias a partir da Equação 1:

$$u = \frac{F}{R} (\tan \alpha)^{-1} \quad [2]$$

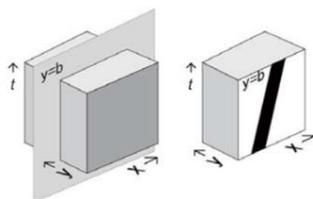
em que $\alpha \neq 0$ é a inclinação da estria, F (pixel/s) é a taxa de amostragem da captura e R (pixel/mm) é a resolução da imagem.



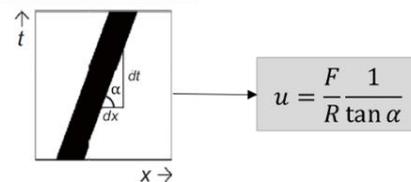
(a) Série temporal de imagem 2D



(b) Empilhamento da imagem no tempo (3D)



(c) diagrama espaço-temporal (2D) obtido pelo fatiamento da imagem 3D definida em (b)



(d) estria inclinada (ângulo α) no diagrama espaço-temporal e definição da velocidade

Figura 2. - Ilustração do princípio de funcionamento da técnica *STIV* (adaptado de Tsubaki, 2017).

O método *STIV* tem-se mostrado capaz de avaliar perfis de velocidade superficiais de rios com elevado rigor, com resultados semelhantes àqueles medidos com técnicas clássicas como o ADCP, ondas de rádio e até mesmo a técnica de imagem LSPIV (Aberle et al., 2017). Recentemente, foi criado o sistema *KU-STIV* (Fujita et al., 2017), o qual constitui-se em um *software* que aplica os

conceitos da técnica *STIV* em imagens, a fim de fornecer características de escoamento em rios (velocidade superficial e vazão).

O *software* *KU-STIV* tem sido adotado por muitos consultores de recursos hídricos e escritórios de recursos hídricos do Ministério da Terra, Infraestrutura, Transporte e Turismo do Japão, isso em função de sua análise possibilitar de forma mais rápida e segura, quando comparado aos métodos já estabelecidos, a obtenção de velocidades e vazões de rios. Mais recentemente (Fujita et al., 2017), a técnica *STIV* foi utilizada para medição de vazão de três estações de rios na bacia do rio Densu, em Gana, demonstrando resultados compatíveis com os métodos tradicionais e facilidade em ser aplicada em campo.

Quando do uso da técnica *STIV* na medição de perfis de velocidade ao longo da profundidade do escoamento, resultados semelhantes ou até melhores que aqueles medidos a partir da técnica *PIV* foram obtidos por Freydier et al. (2017), o qual analisou o comportamento de fluidos viscoplásticos escoando sobre uma correia transportadora de velocidade constante e contrária ao sentido de escoamento (mecanismo empregado para obtenção de “escoamento parado”). Freydier et al. (2017) destaca um confronto de medidas de perfis de velocidade ao longo da profundidade de um canal realizado segundo as técnicas *PIV* e *STIV*; segundo os autores, a técnica *PIV* apresenta limitações nas regiões de máximos gradientes de velocidade (fundo do canal) e na interface de fluido/ar (topo do escoamento), entretanto tais regiões não apresentam grande interferência na obtenção de dados quando se usa a técnica *STIV*.

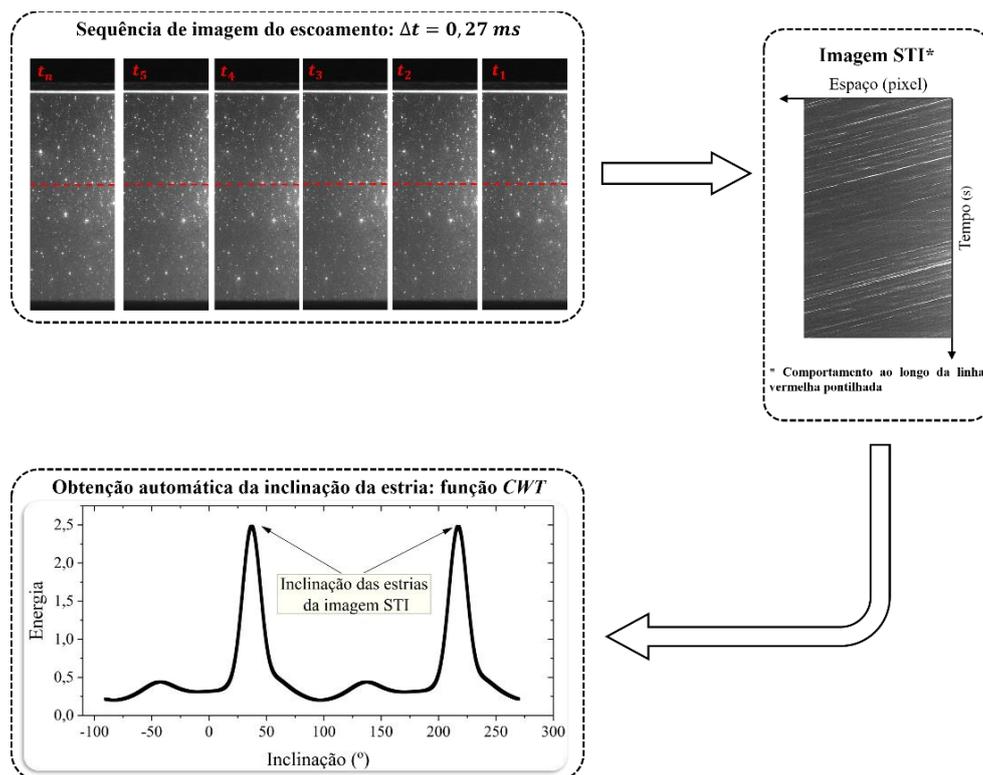


Figura 3. - Procedimento para definição da velocidade do escoamento a partir da geração de imagem STI e obtenção automática das estrias por meio da Transformada Wavelet Contínua 2D (CWT). Código desenvolvido em Matlab e uso do software Image J na definição da resolução das imagens.

Para este trabalho, a técnica *STIV* foi adaptada para a obtenção de perfil de velocidade ao longo da profundidade de escoamento e uma nova ferramenta de análise da imagem STI foi desenvolvida. O escoamento foi monitorado a partir de uma câmera ultrarrápida a uma taxa de aproximadamente 270 *fps*. Os vídeos capturados nos experimentos foram avaliados a partir de sua

análise quadro a quadro, sendo que 500 imagens foram utilizadas para as análises (representando aproximadamente 1,85 s de escoamento).

Para aumentar o rigor da obtenção da velocidade do escoamento foi proposto o emprego da Transformada de *Wavelet* Contínua 2D (CWT) (Antoine et al., 2008). Para o uso da CWT, cujo código foi implementado no Matlab, foi desenvolvido uma análise de energia associada ao emprego da função *wavelet*, de forma que a construção de uma curva associando energia e inclinação da imagem STI (Figura 3) permitiu a definição da inclinação das estrias a partir do ponto de maior energia (brilho do traçador).

Câmara de medição de escoamento

A técnica de velocimetria desenvolvida, além de necessitar de um gerador de plano laser, necessita de uma câmera que permita a regulagem manual de seu foco e possibilite obtenção de imagens segundo uma elevada taxa de amostragem (*fps* – *frames per second*) Ainda que avaliações segundo baixo *fps* sejam possíveis ($fps < 100$), em casos de escoamentos de elevada velocidade, as imagens resultantes da técnica de velocimetria desenvolvida podem apresentar deficiências e aumentar os erros durante as análises.

Tendo em vista as necessidades para uma boa amostragem visual do escoamento, o sistema de medição por câmera empregou duas câmeras ao longo do desenvolvimento do projeto: inicialmente foi utilizada a câmera ultrarrápida *Olympus i-speed 2*, porém em função da deficiência em termos de iluminação do plano laser (inicialmente de 450 mW) e perda de luz das gravações com o aumento da amostragem da câmera os resultados de perfil de velocidade no centro do canal apresentavam maior dificuldade de análise; em um segundo momento da pesquisa empregou-se a câmera GS3 FLIR de *fps* variável de acordo com o quadro amostrado e lente de 30 mm, além de uso de gerador de plano laser e maior potência (2,5 W).

A dimensão dos quadros de filmagem foi definida de forma a captar toda a espessura do escoamento e garantir $fps \cong 270$. Para a definição da escala das imagens na fase de processamento de dados foi utilizada uma malha de quadrados de 10 x 10 mm. A câmera empregada gerou imagens de elevada qualidade (resolução espacial de 83 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ e *fps*) e contribuiu significativamente para a qualidade dos resultados dos perfis de velocidade, entretanto sua elevada performance exigiu o uso de um computador robusto.

Visão geral dos experimentos

Para a realização do experimento foram utilizados gel de carbopol (modelo reológico Herschel-Bulkley e diferentes concentrações mássicas); um canal inclinável com 30 cm de largura e suficientemente longo para garantir regime uniforme; um sistema de bombeamento (bomba helicoidal controlada por inversor de frequência e tubulação); uma câmera ultrarrápida (Grasshopper3 GS3 FLIR), com lente de 35 mm, colocada a uma distância da parede do canal tal qual que possibilitasse vídeos com imagens focadas e de boa qualidade; um gerador de plano laser (potência de 2,5 W e comprimento de onda de 532nm) para iluminar a região de interesse e destacar os traçadores (micro esferas de vidro de granulometria na faixa de 10 a 50 μm na proporção de $1,5 \times 10^{-5}$ g/g de gel de Carbopol) na filmagem; um sensor ultrassônico para a medição da profundidade do escoamento com maior precisão; um sensor de barreira para obtenção da velocidade superficial; um plano com marcações para referência e calibração das imagens; e um reômetro (Brookfield R/S, de controle de taxa de deformação e tensão de cisalhamento) para a medição dos parâmetros reológicos. A Figura 4 ilustra os equipamentos empregados.

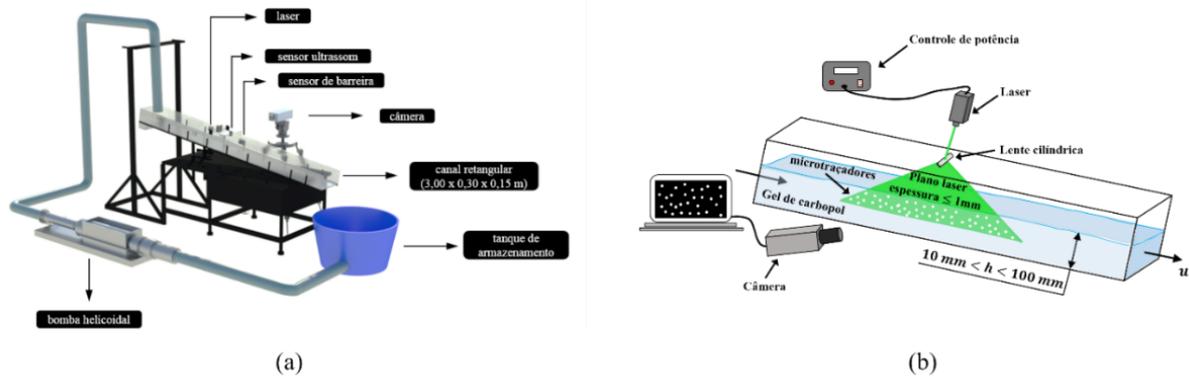


Figura 4. - Esquemática: (a) do aparato experimental para geração de escoamento e (b) da técnica de velocimetria.

Os ensaios foram realizados para diferentes configurações de inclinação, a saber 4° , 6° , 8° e 10° , segundo diferentes rotações da bomba (200 rpm, 400 rpm, 600 rpm e 800 rpm). O início do experimento ocorreu após o escoamento atingir o regime uniforme, nessa condição as seguintes informações foram obtidas: vazão do escoamento (Q) a partir do método gravimétrico e determinação do fluxo de massa - total de 10 repetições; profundidade do escoamento uniforme (h) por meio dos transdutores ultrassônicos; velocidade média do escoamento (\bar{u}) segundo relação entre a vazão (uso do método gravimétrico) e seção escoante; velocidade superficial (u_s) usando sensores de barreira instalados em duas seções do canal - total de 10. A Figura 5 ilustra o fluxograma da realização do experimento.

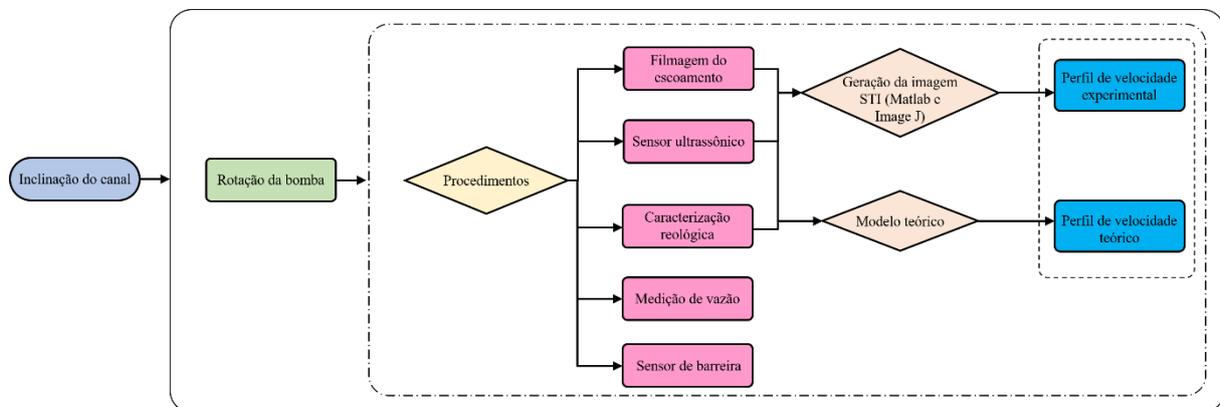


Figura 5. - Fluxograma de execução do experimento de caracterização de perfil de velocidade

Obtidas as informações de vazão, profundidade e velocidade superficial, foi iniciado o processo de captura de imagens do escoamento. Para isso o gerador de laser foi colocado na posição central do canal (posicionamento longitudinal) a 15 cm da parede lateral do canal (centro da seção transversal), formando um plano laser, de aproximadamente 1 mm de espessura, longitudinalmente ao escoamento. A Figura 6 ilustra a disposição dos equipamentos empregados.

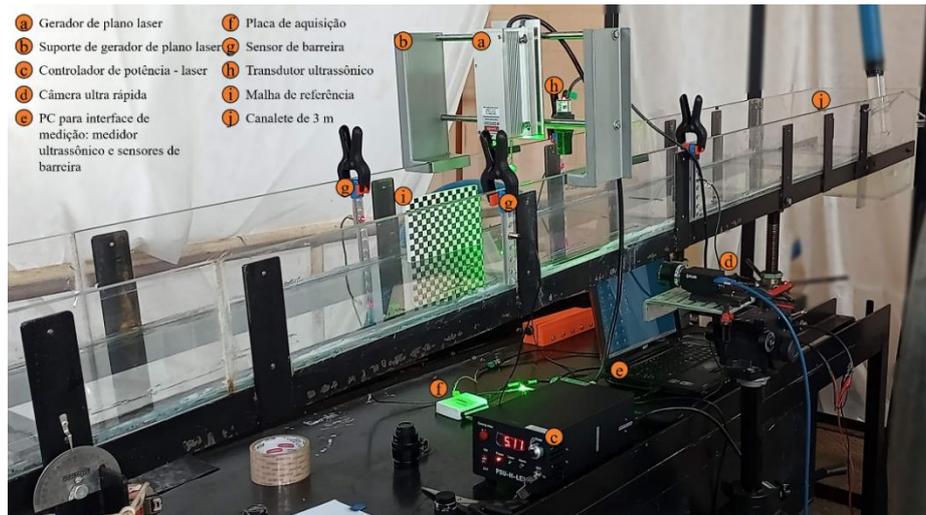


Figura 6. - Aparato experimental empregado.

Em alguns dos experimentos o plano laser foi transladado ao longo da seção transversal do escoamento, realizando capturas a 2, 5, 10 e 15 cm da parede; esse procedimento foi realizado para verificar o comportamento tridimensional do escoamento e possíveis efeitos de borda. A câmera foi fixada a uma distância de cerca de 30 cm da parede do canal e as gravações do escoamento ao longo do plano laser ocorreram por aproximadamente 3 s, embora apenas 500 frames tenham sido de fato utilizados para compor a imagem STI.

A proporção de traçadores empregada possibilitou boa densidade de esferas de vidro no escoamento e evitou problemas de opacidade das imagens, além de ter contribuído para a obtenção de imagens STI de boa qualidade visual nas diferentes profundidades avaliadas, conforme Figura 7. A obtenção do perfil de velocidade ao longo da profundidade do escoamento está condicionada à definição das alturas de interesse (do topo ao fundo) e geração de imagens STI em cada altura de interesse.

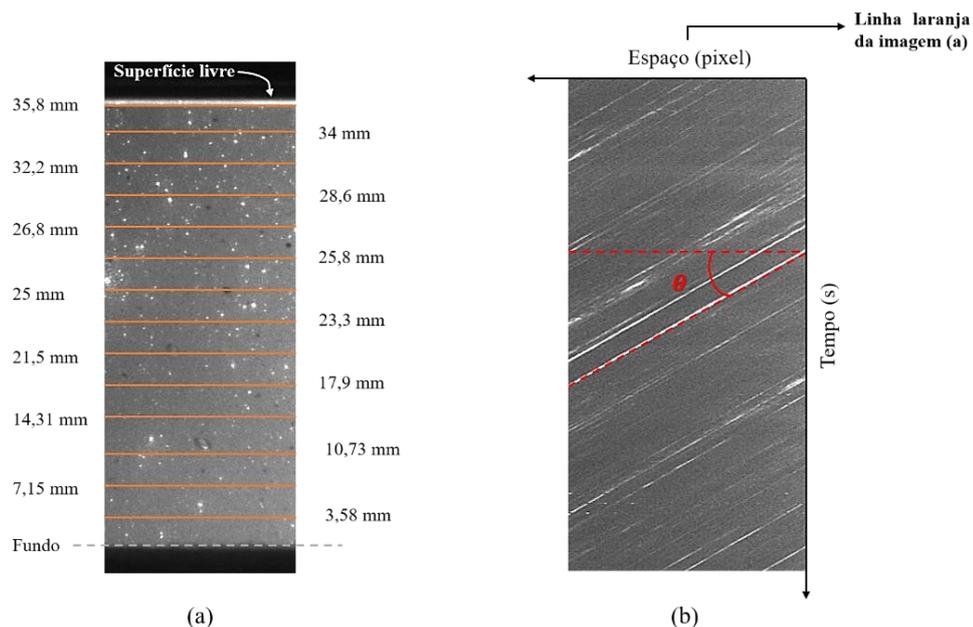


Figura 7. - Análise do escoamento a partir da técnica de velocimetria desenvolvida: (a) alturas de interesse para definição da velocidade e (b) imagem STI gerada para a altura 34 mm.

As incertezas das medidas obtidas foram calculadas a partir da incerteza padrão combinada, a qual utilizada a incerteza padrão do equipamento empregado (Tabela 1) e o desvio padrão, conforme Equação 3.

$$U = k \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad [3]$$

sendo U a incerteza total, k o coeficiente de *Student*, U_A a incerteza relacionada à precisão do equipamento e U_B a incerteza advinda do desvio padrão.

Tabela 1. - Precisão dos equipamentos empregados.

Equipamento	Medida	Precisão (%)
Reômetro	Pa, Pa.s ⁿ , s ⁻¹	± 3,00
Cronômetro digital	s	± 0,20
Balança	G	± 0,1
Transdutor ultrassônico	mm	± 0,29
Temporizador (câmera)	s	± 0,20

Para as análises realizadas neste trabalho, foi utilizado um intervalo de confiança de 95.5% e coeficiente de *Student* de acordo com a quantidade de amostra empregada para cada experimento. Considerando a precisão do equipamento e o desvio padrão dos experimentos, os erros associados aos parâmetros medidos foram estimados conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. - Incerteza dos parâmetros medidos.

Parâmetro	Medida	Incerteza (%)
Profundidade (h)	mm	± 0.75
Vazão (Q)	m ³ /s	± 3,50
Massa específica (ρ)	kg/m ³	± 0,45
Velocidade média (\bar{u})	m/s	± 3,70
Velocidade superficial (u_s)	m/s	± 1,10
Tensão limite de escoamento (τ_0)	Pa	± 6,30 – 8,0
Índice de consistência (K)	Pa.s ⁿ	± 4,50 – 6.10
Índice de escoamento (n)	---	± 1,5 – 3,3

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Perfis de velocidade experimental

A partir da realização dos experimentos físicos para todas as condições de escoamento definidas, foram obtidas as imagens STI e também as propriedades reológicas, profundidade do escoamento (h) e velocidade superficial para cada experimento (u_s). Também foram calculados os números de Reynolds (Re_{HB}), considerando fluido não-newtoniano do tipo Herschel-Bulkley com base em Haldenwang et al. (2002); e o número de Froude (F_r).

No total, 18 experimentos foram realizados com diferentes inclinações de canal (θ variando 4° e 10°), diferentes amostras de Carbopol (τ_0 variando entre 10 e 30 Pa) e diferentes vazões (Q variando de 0,20 a 0,90 L/s). A Tabela 3 apresenta os parâmetros médios obtidos nos escoamentos avaliados.

Tabela 3. - Valores médios das propriedades medidas e calculadas nos experimentos conduzidos.

Exp.	Q (L/s)	θ (°)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	ρ (kg/m ³)	u_s (mm/s)	\bar{u} (mm/s)	H (mm)	Re_{HB}	F_r
C_1	0,20	4	11,13	4,26	0,43	1000,00	25,38	22,22	30,00	0,24	0,04
C_2	0,61	4	11,04	4,74	0,42	1000,67	45,90	40,20	34,00	1,45	0,10
C_3	0,41	4	11,26	5,05	0,42	999,33	71,12	55,56	36,60	0,60	0,06
C_4	0,87	4	10,75	5,32	0,41	1000,67	95,41	74,74	38,80	2,14	0,12
C_5	0,23	6	10,87	4,47	0,44	1000,67	38,00	33,48	22,90	0,49	0,07
C_6	0,41	6	10,61	4,24	0,49	998,67	69,10	53,39	25,60	1,15	0,11
C_7	0,63	6	10,71	4,72	0,43	998,67	99,52	76,78	27,35	2,20	0,15
C_8	0,83	6	10,83	5,09	0,42	1001,33	122,40	96,06	28,80	3,22	0,18
C_9	0,21	8	11,54	5,03	0,42	1000,67	41,21	30,57	22,90	0,38	0,06
C_{10}	0,42	8	11,62	5,08	0,42	999,33	81,65	54,69	25,60	1,11	0,11
C_{11}	0,60	8	11,17	5,64	0,41	996,67	113,09	73,13	27,35	1,84	0,14
C_{12}	0,76	8	11,05	5,93	0,40	1000,00	133,14	87,96	28,80	2,56	0,17
C_{13}	0,21	10	11,09	4,81	0,43	999,33	52,43	42,68	16,40	0,68	0,11
C_{14}	0,41	10	11,72	4,76	0,43	1000,67	95,50	73,48	18,60	1,81	0,17
C_{15}	0,60	10	11,56	5,10	0,42	1000,67	131,15	100,00	20,00	3,12	0,23
C_{16}	0,75	10	11,78	5,21	0,42	999,33	161,00	119,05	21,00	4,19	0,26
C_{17}	0,39	8	32,49	12,94	0,37	10001,93	35,91	36,34	35,77	2,08	0,06
C_{18}	0,75	8	32,88	19,93	0,36	10001,93	64,55	55,73	44,86	3,93	0,08

Os experimentos de C_1 a C_{16} são caracterizados por propriedades reológicas semelhantes, obtidos de gel de carbopol de concentração mássica de 0,13%. Já os experimentos C_{17} a C_{18} são experimentos complementares realizados com carbopol de concentração mássica de 0,17% e implementados para análise da tridimensionalidade do escoamento. Observa-se a partir da Tabela 3 a redução da profundidade de escoamento com o aumento da inclinação e que o aumento da vazão conduziu ao aumento das profundidades; também se verifica a característica laminar do escoamento - baixos valores de Reynolds.

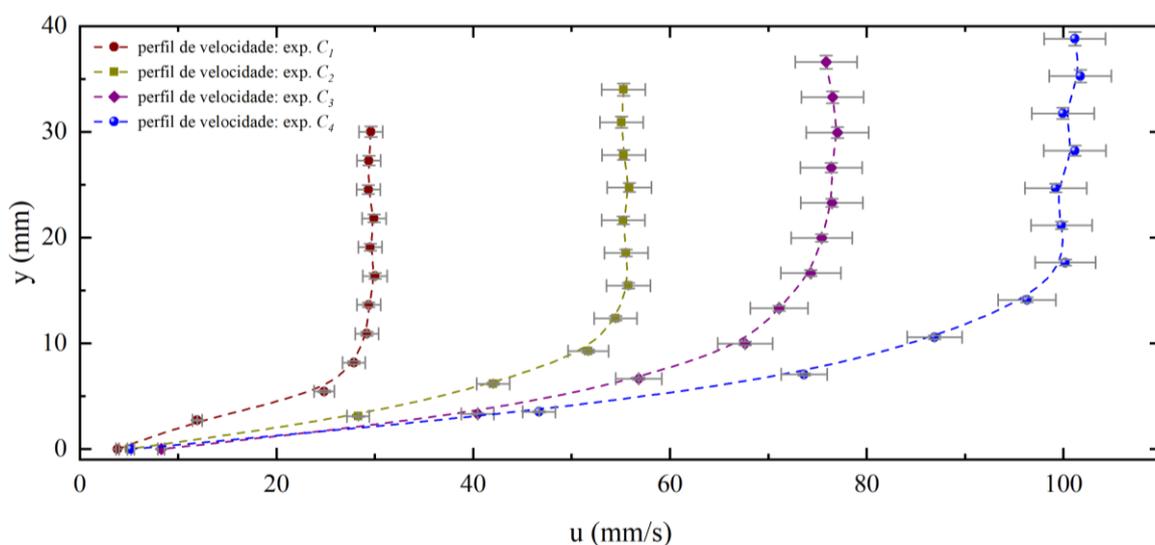


Figura 8. - de velocidade obtidos a partir da metodologia implantada (STI) para os experimentos C_1 , C_2 , C_3 e C_4 e $\theta = 4^\circ$. Barras de erro em cinza indicam as incertezas das medidas (na faixa de 1,70% para as profundidades e 4,10 % para as velocidades).

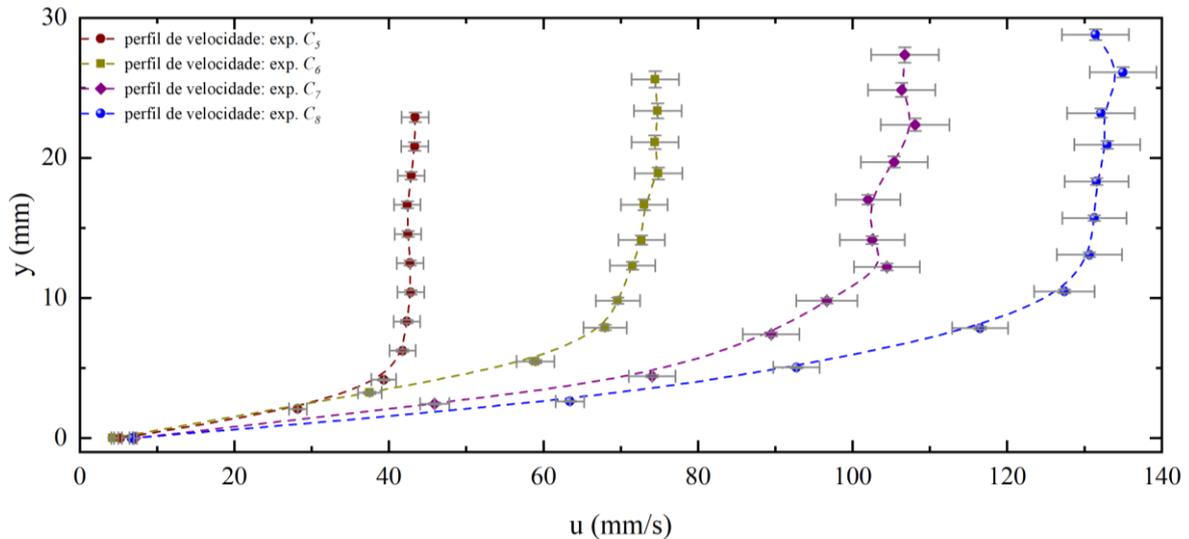


Figura 9. - Perfis de velocidade obtidos a partir da metodologia implantada (STI) para os experimentos C_5 , C_6 , C_7 e C_8 e $\theta = 6^\circ$. Barras de erro em cinza indicam as incertezas das medidas (na faixa de 1,4 a 2,3% para as profundidades e de 4,05 a 4,10% para as velocidades).

Em todos os resultados de perfis de velocidade obtidos é notável a presença de região não cisalhada (*plug*) na região próxima à superfície livre e forte gradiente de velocidade à medida que se aproxima do fundo; as Figuras de 8 a 12 ilustram o comportamento característico obtido do campo de velocidade no interior de um escoamento viscoplástico. Verifica-se também a unidirecionalidade do escoamento ao longo do canal, com componentes de velocidade na direção y sendo desprezadas, e presença ao longo de toda a espessura do escoamento velocidade longitudinal na direção x estruturada segundo camadas sobrepostas.

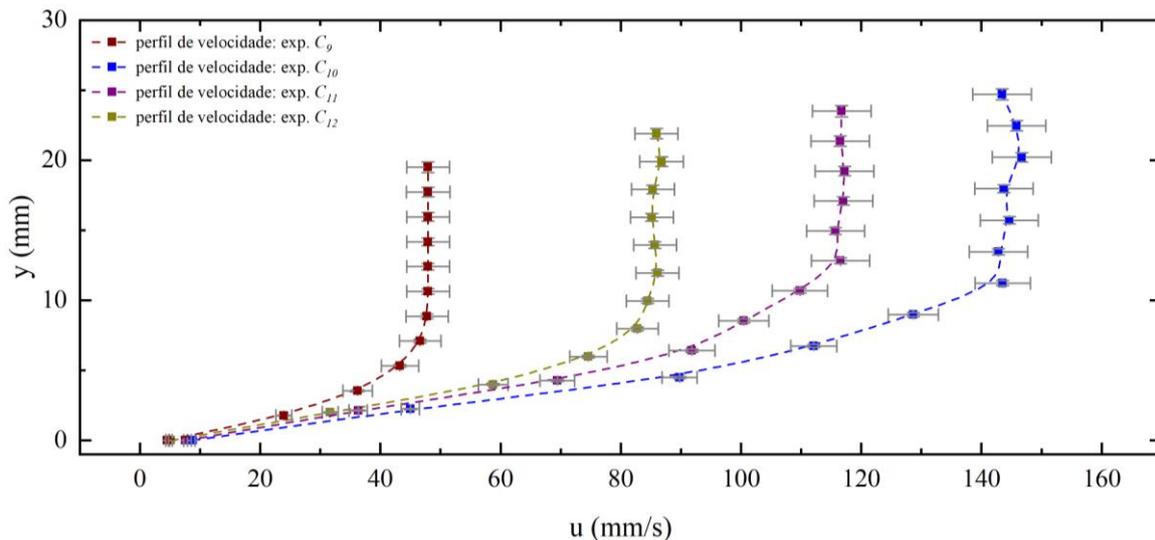


Figura 10. - Perfis de velocidade obtidos a partir da metodologia implantada (STI) para os experimentos C_9 , C_{10} , C_{11} e C_{12} e $\theta = 8^\circ$. Barras de erro em cinza indicam as incertezas das medidas (na faixa de 1,70% para as profundidades e de 4,17% para as velocidades).

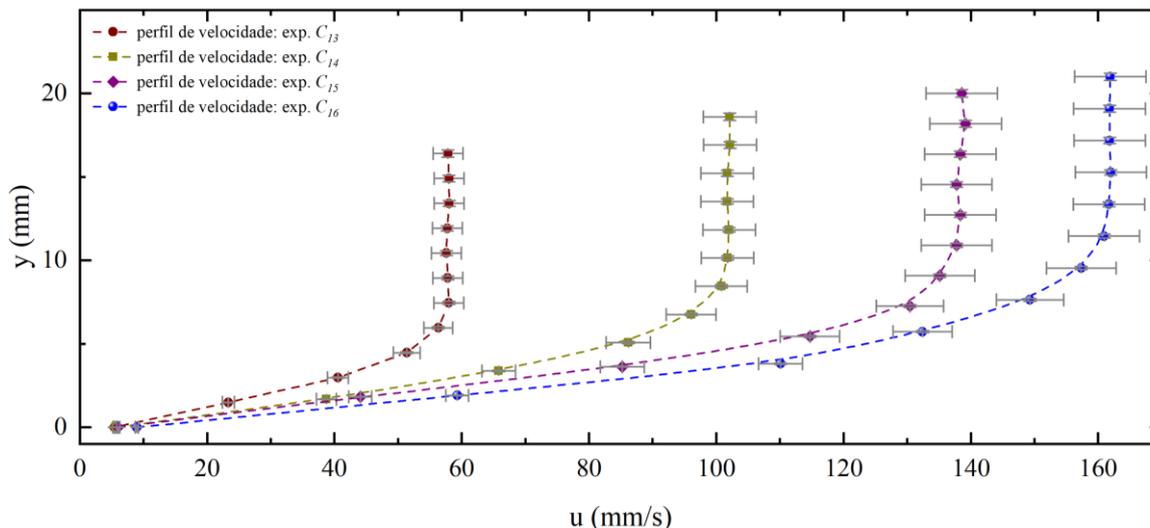


Figura 11. - Perfis de velocidade obtidos a partir da metodologia implantada (STI) para os experimentos C_{13} , C_{14} , C_{15} e C_{16} e $\theta = 10^\circ$. Barras de erro em cinza indicam as incertezas das medidas (na faixa de 1,70% para as profundidades e de 4,17% para as velocidades).

A análise das Figuras de 8 a 12 também demonstram a presença de deslizamento de parede no escoamento. Em todos os experimentos a velocidade medida no fundo (ou muito próximo a ele) foi diferente de zero. O efeito de deslizamento se caracteriza, basicamente, como uma falta de adesão entre o material e a superfície de cisalhamento (Bingham, 1922) e sua presença pode implicar em erros importantes na determinação da tensão limite de escoamento e outras propriedades do escoamento.

As incertezas obtidas para os valores de velocidade da técnica de velocimetria se mostraram controlada ao longo das configurações experimentais, oscilando entre 4 e 5%. Nota-se, quando compara os resultados de C_1 a C_{16} como os de C_{17} a C_{18} , comportamento mais bem definido do plug nos últimos dois experimentos, isso ocorre porque houve melhoria dos equipamentos ao longo da pesquisa, sendo que os resultados C_{17} e C_{18} foram obtidos a partir de uso de laser de maior potência e câmera mais adequada à situação experimental.

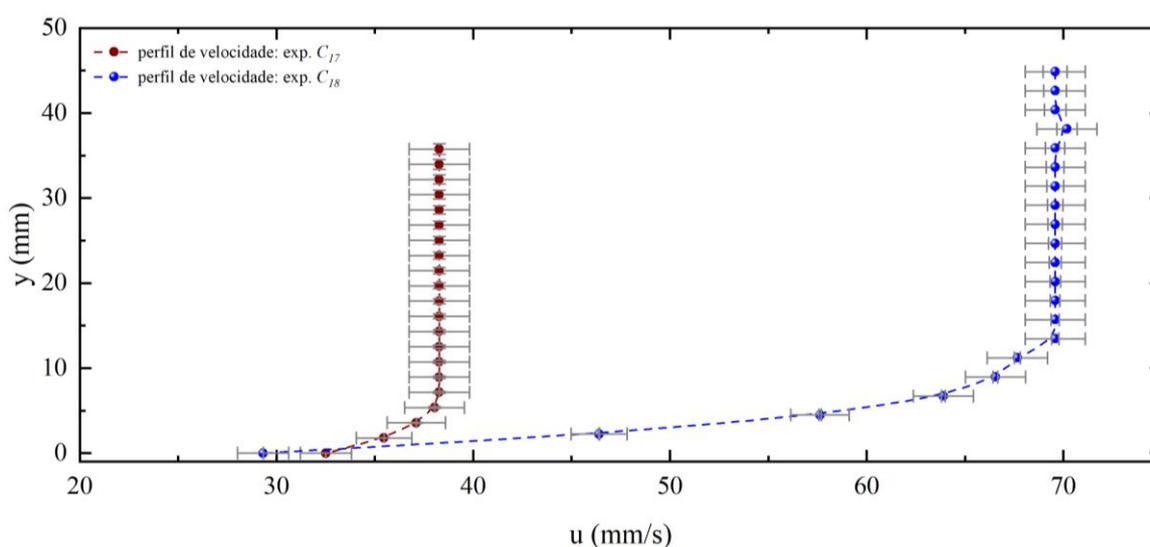


Figura 12. - Perfis de velocidade obtidos a partir da metodologia implantada (STI) para os experimentos C_{17} e C_{18} e $\theta = 8^\circ$. Barras de erro em cinza indicam as incertezas das medidas (na faixa de 1,70% para as profundidades e de 4,17% para as velocidades).

Confrontação experimental-teórica

A fim de realizar a confrontação dos resultados experimentais obtidos e verificar sua representatividade do escoamento em termos da técnica de medição empregada foi utilizado um modelo teórico baseado na teoria da lubrificação (Freydier et al., 2017) para realizar uma comparação dos dados experimentais. O modelo teórico empregado apresenta reologia não-Newtoniana de comportamento Herschel-Bulkley e condições de não-deslizamento de parede e canal largo.

Sabendo da condição de não-deslizamento do modelo teórico, optou-se por alterar a condição de contorno no fundo do canal do modelo teórico (procedimento ainda em estudo e feito de forma precaucionaria), visto que todos os resultados experimentais indicaram a presença de efeito de deslizamento (escorregamento) no fundo do canal. Assim, a velocidade de fundo do modelo teórico foi alterada de $u(y = 0) = 0$ para $u(y = 0) = u_{exp}$. (velocidade de deslizamento medida), essa alteração conduziu a um resultado teórico com a condição de deslizamento de parede, aferida experimentalmente. A Figura 13 ilustra a comparação entre os resultados experimentais e teóricos para a avaliação realizada na seção transversal central do canal.

Uma discrepância de alguns mm/s é visível ao comparar os perfis de velocidade e teórico em todos os experimentos realizados (principalmente nos experimentos com maior tensão limite de escoamento e índice de consistência) demonstrando que o efeito de deslizamento no fundo conduziu à alteração de níveis de taxa de deformação e de velocidade.

Ainda que a definição de estar medindo em $y = 0$ possa gerar questionamentos, pode-se afirmar que tal ponto foi definido considerando as incertezas do processo de calibração de imagem e do pixel do fundo do canal. Dessa forma, ao apresentar medidas de velocidade nesse ponto pode-se considerar que tal ponto está de fato próximo ao fundo, ainda mais considerando a alta resolução das imagens - $83 \mu\text{m}/\text{px}$.

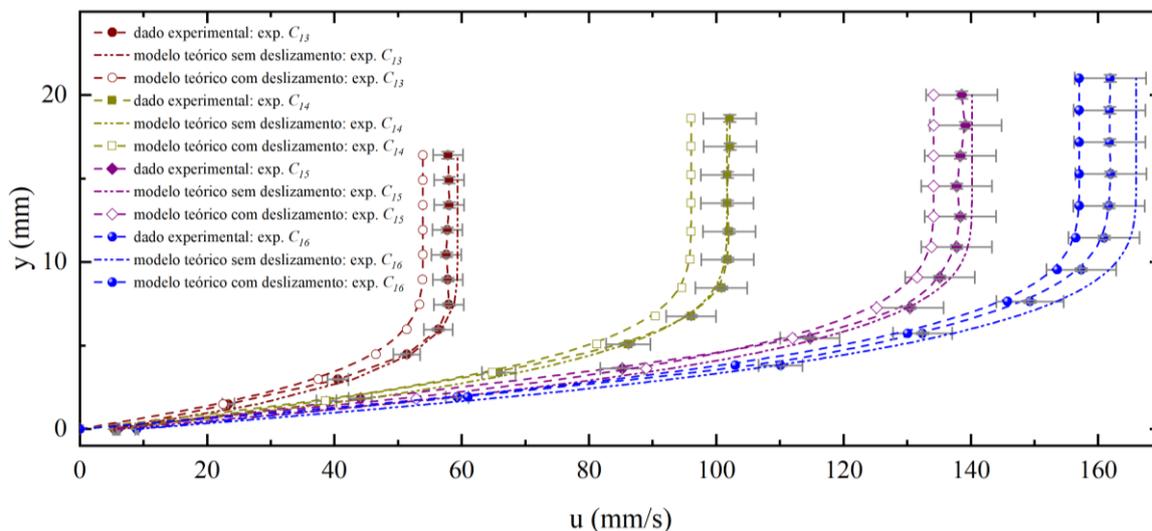


Figura 13. - Confrontação experimental-teórica: experimentos C_{13} , C_{14} , C_{15} e C_{16} e $\theta = 10^\circ$. Linha pontilhada apresenta modelo teórico com $u(y = 0) = u_{exp}$.

Materiais com tensão limite de escoamento tem maior tendência a sofrer a exibir diferentes tipos de heterogeneidades de fluxo (Cloitre; Bonnecaze, 2017). Um desses fenômenos é o deslizamento, o qual pode ser visto segundo uma região de elevada deformação, sendo que a maior parte dela se concentra nas paredes de confinamento, enquanto a maior parte do material se comporta como um corpo sólido ou apresenta deformação desprezível. Segundo Barnes (1999) deslizamentos presentes em dispersões de alto teor de sólidos, caso do gel de carbopol, podem ser classificados como deslizamento aparente e tem sido relatado em diferentes áreas de pesquisa (Xu et al. 2017; Philippou et al., 2016; Chambon et al., 2014).

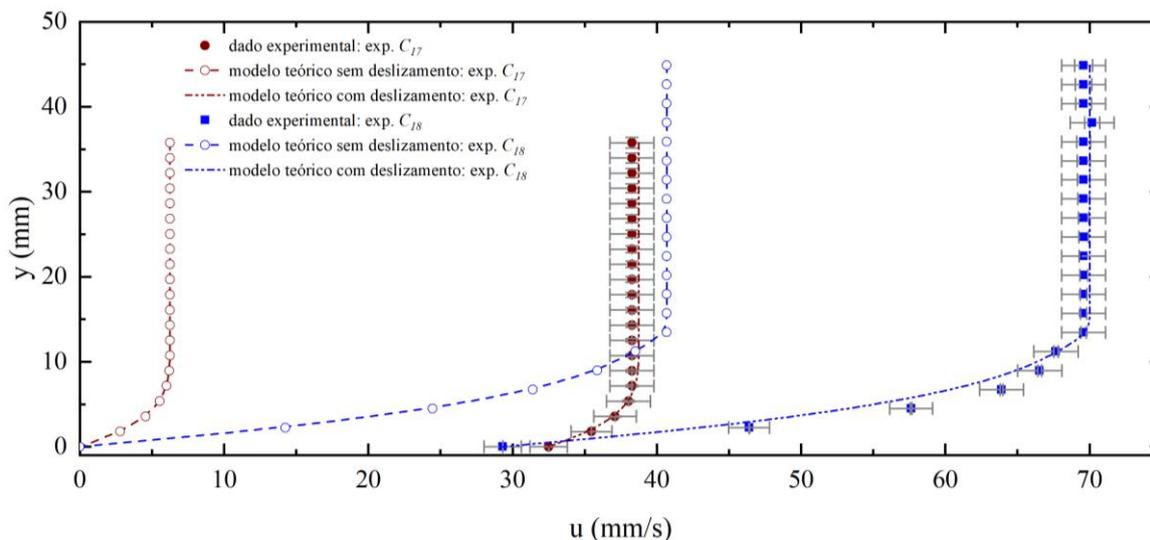


Figura 14. - Confrontação experimental-teórica: experimentos C_{17} e C_{18} e $\theta = 8^\circ$. Linha pontilhada apresenta modelo teórico com $u(y = 0) = u_{exp}$.

Ao se comparar os resultados das Figuras 13 e 14 é visível o maior efeito de deslizamento de parede nos experimentos C_{17} e C_{18} , ainda que todos os experimentos tenham experimentado vazões semelhantes, corroborando a suposição de que a espessura da camada de deslizamento, e conseqüentemente o próprio efeito de deslizamento, não é afetada pela vazão do escoamento (Reiner, 1960); o fato da superfície do canal ser de vidro deve ser considerado como elemento de potencialização do efeito de deslizamento constatado. Os experimentos C_{17} e C_{18} são caracterizados pelo maior nível de tensão limite de escoamento (cerca de 3 vezes superior aos dos resultados restantes) e de índice de consistência (de 3 a 4 vezes superior), de forma que uma possível reposta para o aumento do efeito de deslizamento nesses testes seja a mudança das características reológicas do fluido, pois as características decorrentes do deslizamento são decorrentes das propriedades da suspensão concentrada (Kalyon, 2005). O aumento da espessura do *plug* (espessura do plug na faixa de 50 a 66% camada de fluido), condição dos experimentos C_{17} e C_{18} , gerou o deslocamento acentuado da região mais viscosa do escoamento e conseqüente aumento de efeito de deslizamento.

Conforme resultados apresentados nas Figuras 13 e 14, a imposição do efeito de deslizamento ao modelo teórico conduziu a um resultado próximo ao medido experimentalmente via técnica de velocimetria empregada. Os resultados da Figura 14 indicam desvios máximos de 1,2% para escoamento o escoamento C_{17} e 7,2% para o C_{18} . Em todos os experimentos a técnica desenvolvida foi capaz de definir, com certa proximidade, quando comparada ao modelo teórico, a altura do *plug*, sendo os desvios encontrados na faixa de 7% a 14%.

É importante destacar que, embora a imposição da velocidade de deslizamento no perfil teórico tenha possibilitado correção das discrepâncias observadas na região de *plug* e na cisalhada, nota-se uma diferença entre resultados teóricos (com e sem deslizamento) e experimentais com relação à transição da região cisalhada para o *plug*. Nos perfis teóricos essa transição é brusca e rápida quando comparada ao experimental.

Ainda que diferenças entre os perfis de velocidade sejam visíveis, mesmo com uso do efeito de deslizamento no modelo teórico, a técnica *STIV* foi capaz de avaliar o interior de escoamentos viscoplásticos e fornecer campos de velocidade condizentes aos fluidos com presença de tensão limite de escoamento, especificamente do tipo Herschel-Bulkley. Particularmente, o método de velocidade desenvolvido foi capaz de demonstrar com elevada precisão a presença do *plug*, demonstrando boa capacidade da técnica *STIV* em avaliar regiões mais próximas à superfície livre. O método também se mostrou eficiente na análise na região próxima ao fundo do escoamento, sendo capaz de mostrar a presença de deslizamento de parede, fenômeno esse corroborado pela análise do modelo teórico com $u(y = 0) = u_{exp}$.

CONCLUSÃO

A partir de conjuntos experimentais capazes de simular escoamento de natureza viscoplástica, análises sobre campo de velocidade de avanço de frentes foram realizadas. Os experimentos de velocimetria foram conduzidos em canal inclinado e com fluido teste (gel de carbopol) de modelo reológico do tipo Herschel-Bulkley. Tendo como objetivo a obtenção do campo de velocidade ao longo da profundidade do canal e comparação com modelo teórico, diferentes configurações experimentais, com alteração de vazão, inclinação e propriedades reológicas do fluido, foram testadas.

As medidas de velocimetria foram possibilitadas a partir do desenvolvimento próprio de uma metodologia de geração e análise de imagens espaço-temporal. Com o uso de câmera ultrarrápida e plano laser, a captura do deslocamento de traçadores contida do interior do fluido tornou-se possível, fornecendo imagens de elevada resolução espacial (cerca de $83 \mu\text{m}/\text{px}$). A implementação de código baseada na Transformada *Wavelet* Contínua 2D para análise das imagens espaço-temporal se mostrou um caminho assertivo na determinação das velocidades do escoamento, bem como mais rigoroso e de fácil implementação, além de abrir possibilidade de expansão do uso de tal modelo matemático em avaliações que envolvam velocimetria.

Os perfis de velocidade obtidos via técnica de velocimetria implantada retrataram o comportamento característico de escoamento viscoplástico do tipo Herschel-Bulkley, tanto a região do *plug* quanto da zona cisalhada. Entretanto, efeito de deslizamento de parede foi observado e a partir do modelo teórico baseado na teoria da lubrificação ficou evidente o quanto a presença de tal efeito pode ser prejudicial ao uso do próprio modelo teórico sem a adequada avaliação do escoamento. O uso de velocidade de fundo experimental no modelo teórico foi capaz de corrigir as discrepâncias inicialmente observadas.

REFERENCIAS

- Aberle, J. et al.** (2017). *Experimental Hydraulics: Methods, Instrumentation, Data Processing and Management - Volume II: Instrumentation and Measurement Techniques*. CRC Press, London.
- Ancey, C.** (2007). "Plasticity and geophysical flows: a review". *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 142, n. 1-3, p. 4-35.
- Ancey, C., Andreini, N., Epely-Chauvin, G.** (2012). "Viscoplastic dambreak waves: Review of simple computational approaches and comparison with experiments". *Advances in Water Resources*, v. 48, p. 79-91.
- Antoine, J. P. et al.** (2008). "Two-dimensional wavelets and their relatives". Cambridge University Press.
- Azimi, A. H.** (2016). "Free surface flow characteristics of multi-phase viscoplastic fluids on inclined flumes and planes". *International Journal of Multiphase Flow*, v. 78, p. 59-69.
- Balmforth, N. J. et al.** (2006). "Viscoplastic flow over an inclined surface". *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 139, n. 1-2, p. 103-127.
- Balmforth, N. J.; Frigaard, I. A.; Ovarlez, G.** (2014). "Yielding to stress: recent developments in viscoplastic fluid mechanics". *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 46, n. 1, p. 121-146.
- Barnes, H. A.** (1999). "The yield stress-a review or 'παντα ρει'-everything flows?". *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 81, n. 1-2, p. 133-178.
- Bates, B. M.; Ancey, C.** (2017). "The dam-break problem for eroding viscoplastic fluids". *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 243, p. 64-78.
- Bingham, E. C.** (1922). *Fluidity and Plasticity*. McGraw Hill, London, p. 231.
- Chambon, G.; Ghemmour, A.; Naaim, M.** (2014). "Experimental investigation of viscoplastic free-surface flows in a steady uniform regime". *Journal of Fluid Mechanics*, v. 754, p. 332-364.
- Cloitre, M.; Bonnecaze, R. T.** (2017). "A review on wall slip in high solid dispersions". *Rheologica Acta*, v. 56, n. 3, p. 283-305.
- Cochard, S.; Ancey, C.** (2009). "Experimental investigation of the spreading of viscoplastic fluids on inclined planes". *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 158, n. 1-3, p. 73-84.

- De Paula, I. B.; Azevedo, L. F. A.** (2012). “Medição de escoamentos turbulentos utilizando Velocimetria por Imagem de Partículas”. 1ed. São Paulo: ABCM USP, v. 8, pp. 133-209.
- Freydier, P.; Chambon, G.; Naaim, M.** (2017). “Experimental characterization of velocity fields within the front of viscoplastic surges down an incline”. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 240, p. 56-69.
- FUJITA, I. et al.** (2017). “Accuracy of Ku-Stiv for Discharge Measurement in Ghana, Africa”. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, v. 73, n. 4, p. I_499-I_504.
- Fujita, I.; Watanabe, H.; Tsubaki, R.** (2007). “Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space-time image velocimetry (STIV)”. *International Journal of River Basin Management*, v. 5, n. 2, p. 105-114.
- Haldenwang, R. et al.** (2002). “Laminar and transitionnal flow in open channel for nonnewtonian fluids”. *Hydrotransport*, v. 15, pp. 755-768.
- Kalyon, D. M.** (2005). “Apparent slip and viscoplasticity of concentrated suspensions”. *Journal of Rheology*, v. 49, n. 3, p. 621-640.
- MACIEL, G. F. et al.** (2017). “Experimental apparatus for roll-wave measurements and comparison with a 1d mathematical model”. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 143, n. 11, p. 04017046.
- Minussi, R. B.; Maciel, G. F.** (2012). “Numerical experimental comparison of dam break flows with non-Newtonian fluids”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 34, n. 2, p. 167-178.
- Owen, J. R. et al.** (2020). “Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure”. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 42, p. 101361.
- 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 & Geosciences*, v. 109, p. 323-330.
- Philippou, M. et al.** (2016). “Viscoplastic flow development in tubes and channels with wall slip”. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 234, p. 69-81.
- Piau, J. M.** (2007). “Carbopol gels: Elastoviscoplastic and slippery glasses made of individual swollen sponges: Meso-and macroscopic properties, constitutive equations and scaling laws”. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, v. 144, n. 1, p. 1-29.
- Reiner, M.** (1960). *Deformation, Strain and Flow*. H. K. Lewis, London.
- Saramito, P.; Smutek, C.; Cordonnier, B.** (2013). “Numerical modeling of shallow non-Newtonian flows: Part I. The 1D horizontal dam break problem revisited”. *International Journal of Numerical Analysis & Modeling*, v. 4, n. 3, p. 283-298.
- True, A. C.; Crimaldi, J. P.** (2019). “High dynamic range particle image velocimetry analysis of viscous inhalant flows”. *Physics of Fluids*, v. 31, n. 10, p. 103605.
- Tsubaki, R.** (2017). “On the Texture Angle Detection Used in Space-Time Image Velocimetry (STIV)”. *Water Resources Research*, v. 53, n. 12, p. 10908-10914.
- Xu, C.; Fieß, M.; Willenbacher, N.** (2016). “Impact of wall slip on screen printing of front-side silver pastes for silicon solar cells”. *IEEE Journal of Photovoltaics*, v. 7, n. 1, p. 129-135.