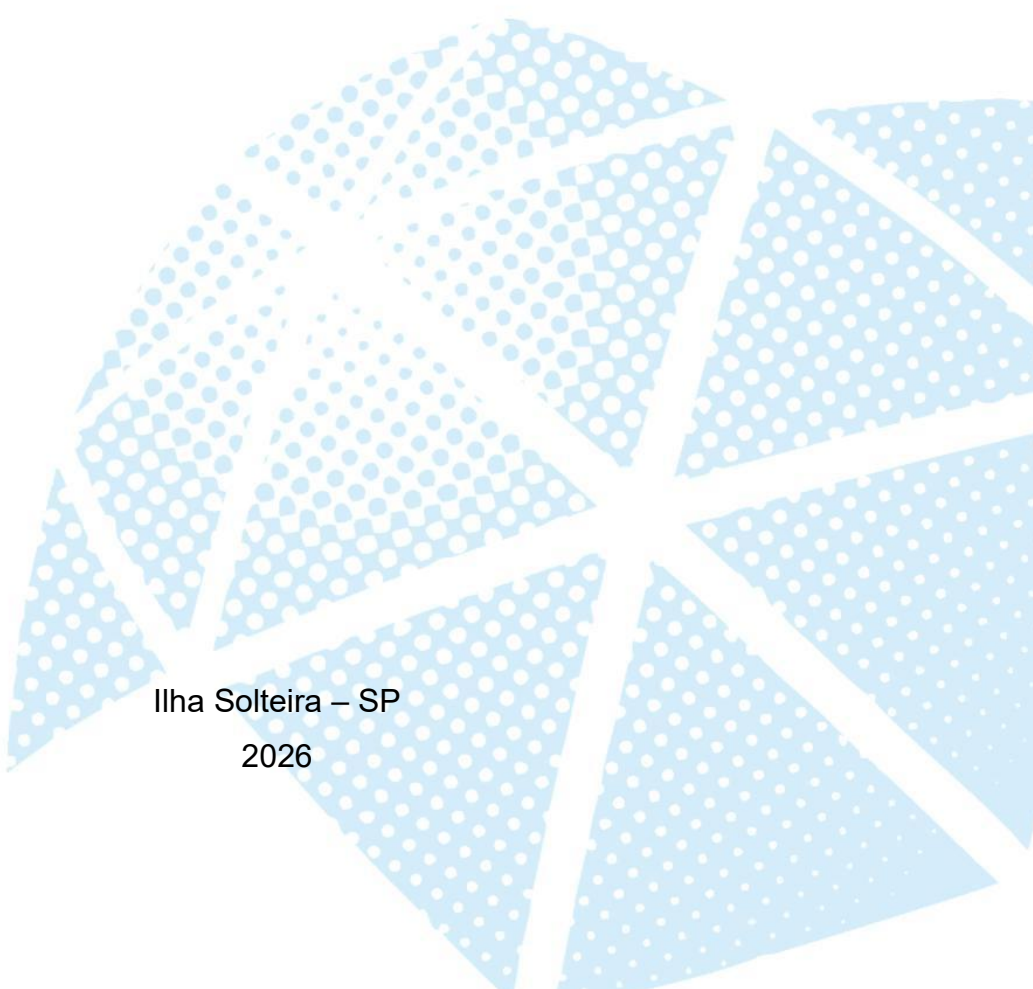


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

MIGUEL DE JESUS VELASQUEZ TERUEL

**VELOCIMETRIA POR IMAGEM APLICADA À ANÁLISE DE ESCOAMENTOS NÃO
NEWTONIANOS**



Ilha Solteira – SP
2026

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA (PPGEM)

MIGUEL DE JESUS VELASQUEZ TERUEL

**VELOCIMETRIA POR IMAGEM APLICADA À ANÁLISE DE ESCOAMENTOS NÃO
NEWTONIANOS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Energia e Fluidos.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

T332v Teruel , Miguel de Jesus Velasquez.
Velocimetria por imagem aplicada à análise de escoamentos não newtonianos / Miguel De Jesus Velasquez Teruel . -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
170 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira. Área de conhecimento: Engenharia E Fluidos , 2026

Orientador: Geraldo de Freitas Maciel

Inclui bibliografia

1. Escoamentos não newtonianos. 2. Velocimetria por imagem. 3. STIV. 4. Fluidos viscoplásticos. 5. Regimes permanente e transiente.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A presente pesquisa contribui no campo experimental de escoamentos não newtonianos, com ênfase na aplicação de técnicas de velocimetria por imagem na obtenção de campos de velocidade em fluidos viscoplásticos. O estudo aborda a complexidade dos escoamentos viscoplásticos em canal inclinado, que são fundamentais para a modelagem física de processos industriais e naturais.

Do ponto de vista científico, a contribuição reside na adaptação e aplicação da técnica STIV (*Space-Time Image Velocimetry*) a fluidos complexos. Ao introduzir processos de correção geométrica (ortorretificação) e de processamento digital de imagens, os resultados auxiliam na compreensão da dinâmica de escoamentos viscoplásticos, permitindo a caracterização da distribuição de velocidades em regimes laminares e com a presença de instabilidades superficiais. Isso reforça o potencial das ferramentas de velocimetria como alternativas não intrusivas às metodologias tradicionais de medição hidráulica.

Sob a perspectiva prática e social, a pesquisa contribui para a engenharia de riscos ao fornecer resultados experimentais sobre velocidades de fluidos que simulam escoamentos de lamas e detritos. Esses dados, obtidos com metodologia controlada e consistente, podem ser empregados para o aprimoramento de modelos preditivos utilizados em estudos voltados à análise de riscos como a elaboração de planos de contingência e delimitação de manchas de inundação afetadas em eventos de deslizamento de encostas e rupturas de barragens.

No âmbito acadêmico, o trabalho fortalece a linha de pesquisa em experimentação hidráulica e processamento de imagens do Laboratório de Hidrologia e Hidrometria (LH2) da FEIS/UNESP. A pesquisa não apenas qualifica recursos humanos em uma área interdisciplinar, mas também estabelece um protocolo metodológico, desde o tratamento geométrico da imagem até a análise de orientação de estrias, que pode ser replicado em futuros estudos de recursos hídricos e geotecnia.

Por fim, a temática está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente no que tange à resiliência frente a desastres naturais e eventos climáticos extremos, reafirmando o compromisso da pesquisa com a inovação tecnológica e a segurança social.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research contributes to the experimental field of non-Newtonian flows, with emphasis on the application of image velocimetry techniques for obtaining velocity fields in viscoplastic fluids. The study addresses the complexity of viscoplastic flows in inclined channels, which are fundamental for the physical modeling of both industrial and natural processes.

From a scientific perspective, the contribution lies in the adaptation and application of the STIV (Space-Time Image Velocimetry) technique to complex fluids. By introducing geometric correction processes, such as orthorectification, and digital image processing, the results contribute to the understanding of the dynamics of viscoplastic flows, enabling the characterization of velocity distribution in laminar regimes and in the presence of surface instabilities. This reinforces the potential of velocimetry tools as non-intrusive alternatives to traditional hydraulic measurement methodologies.

From a practical and social perspective, the research contributes to risk engineering by providing experimental results on the velocities of fluids that simulate mud and debris flows. These data, obtained through a controlled and consistent methodology, can be used to improve predictive models applied in studies focused on risk analysis, such as the development of contingency plans and the delineation of flood-affected areas in events involving slope failures and dam breaches.

In the academic context, this work strengthens the research line in hydraulic experimentation and image processing at the Laboratory of Hydrology and Hydrometry (LH2) of FEIS/UNESP. The research not only contributes to the training of human resources in an interdisciplinary field, but also establishes a methodological protocol, from the geometric treatment of images to the analysis of streak orientation, which can be replicated in future studies in water resources and geotechnics.

Finally, the topic is aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs), especially regarding resilience to natural disasters and extreme climate events, reaffirming the commitment of this research to technological innovation and social safety.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: VELOCIMETRIA POR IMAGEM APLICADA À ANÁLISE DE ESCOAMENTOS NÃO NEWTONIANOS

AUTOR: MIGUEL DE JESUS VELASQUEZ TERUEL

ORIENTADOR: GERALDO DE FREITAS MACIEL

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, área: Ciências Mecânicas pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. GERALDO DE FREITAS MACIEL (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS



Prof. Dr. CLAUDIO KITANO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS



Documento assinado digitalmente

GUILHERME HENRIQUE FIOROT

Data: 01/07/2026 19:06:52-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. GUILHERME HENRIQUE FIOROT (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Ilha Solteira, 23 de junho de 2026.

Dedico este trabalho à minha família, por todo o apoio, amor e compreensão, e a Deus por sempre estar presente.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Yessica Maricela Teruel Fernández, agradeço profundamente por todo o amor, dedicação, esforço e apoio incondicional durante todas as etapas da minha vida. Sem o seu exemplo de força e coragem, nada disso seria possível.

À minha tia Karla Yarely Teruel Fernández, agradeço pelo carinho, suporte constante e por sempre acreditar em mim mesmo à distância.

Às minhas primas, ao meu padrinho e a toda minha família, deixo minha sincera gratidão pelo incentivo, pelas palavras de apoio e pelo amor que me acompanharam mesmo nos momentos mais desafiadores desta jornada acadêmica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel, agradeço pela orientação precisa, pela confiança e pelas valiosas contribuições científicas e humanas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. João Batista Pereira, sou grato pela atenção, sugestões e apoio técnico fundamentais para a condução da pesquisa.

Aos colegas e amigos que fiz ao longo deste período no Brasil, muito obrigado por me acolherem, compartilharem experiências e tornarem esta etapa mais leve e enriquecedora. Aos meus amigos de Honduras, obrigado por estarem sempre presentes, mesmo à distância, com palavras de incentivo e amizade sincera.

Aos professores e técnicos da FEIS/UNESP, agradeço pelos ensinamentos, suporte e estrutura disponibilizada, que foram essenciais para o andamento deste trabalho.

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

A caracterização experimental de escoamentos não newtonianos é importante para a compreensão de processos naturais associados à movimentação de massas, como corridas de lama e detritos, os quais apresentam elevado potencial de impactos associados a perdas humanas e materiais. Esses escoamentos envolvem materiais com comportamento reológico complexo, impondo desafios significativos à medição não intrusiva de seus campos de velocidade.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo investigar e avaliar a aplicação da técnica de Velocimetria por Imagem Espaço-Temporal (STIV) na obtenção de perfis de velocidade ao longo da profundidade de escoamentos viscoplásticos em canal inclinado. A pesquisa baseia-se em experimentação física laboratorial, utilizando um gel à base de Carbopol 996, representativo de materiais lamosos observados em escoamentos naturais.

A metodologia adotada envolve a ortorretificação de registros obtidos com câmera rápida e a geração de imagens espaço-temporais (STI). Para a análise da orientação das estrias, são empregados métodos automáticos, incluindo a Transformada Wavelet Contínua Bidimensional (CWT-2D) e o Gradiente Tensorial (GT), validados por medição manual. Em regime permanente uniforme, os resultados demonstraram concordância com modelo teórico baseado na aproximação de lubrificação para fluidos viscoplásticos. Nas regiões próximas às paredes laterais e fundo, a técnica evidenciou efeitos de borda e ocorrência de deslizamento (*wall slip*), indicando limitações de abordagens baseadas em modelos unidimensionais clássicos.

A aplicação da técnica em escoamento transiente evidenciou a complementaridade dos métodos: a CWT-2D apresentou maior precisão e estabilidade global, enquanto o GT forneceu maior adequação para o rastreamento local sob as condições de elevada aceleração nas cristas. Conclui-se que a STIV apresenta potencial como ferramenta experimental na caracterização de escoamentos não newtonianos, contribuindo para obtenção de dados que podem subsidiar modelos preditivos em engenharia hidráulica e análise de riscos associados a desastres naturais.

Palavras-chave: escoamentos não newtonianos; velocimetria por imagem; STIV; fluidos viscoplásticos; regimes permanente e transiente.

ABSTRACT

The experimental characterization of non-Newtonian flows is important for understanding natural processes associated with mass movements, such as mudflows and debris flows, which present a high potential for impacts associated with human and material losses. These flows involve materials with complex rheological behavior, imposing significant challenges to the non-intrusive measurement of their velocity fields.

In this context, the present work aims to investigate and evaluate the application of the Space-Time Image Velocimetry (STIV) technique in obtaining velocity profiles along the depth of viscoplastic flows in an inclined channel. The research is based on physical laboratory experimentation, using a Carbopol 996-based gel representative of muddy materials observed in natural flows.

The adopted methodology involves the orthorectification of records obtained with a high-speed camera and the generation of space-time images (STI). For the analysis of streak orientation, automatic methods are employed, including the Two-Dimensional Continuous Wavelet Transform (CWT-2D) and the Gradient Tensor (GT), validated by manual measurement. Under steady uniform flow conditions, the results demonstrated agreement with a theoretical model based on the lubrication approximation for viscoplastic fluids. In regions close to the side walls and bottom, the technique evidenced edge effects and the occurrence of wall slip, indicating limitations of approaches based on classical one-dimensional models.

The application of the technique to transient flow evidenced the complementarity of the methods: CWT-2D showed higher accuracy and global stability, while GT provided greater suitability for local tracking under high-acceleration conditions at the crests. It is concluded that STIV has potential as an experimental tool for the characterization of non-Newtonian flows, contributing to the acquisition of data that can support predictive models in hydraulic engineering and risk analysis associated with natural disasters.

Keywords: non-newtonian flows; image velocimetry; STIV; viscoplastic fluids; steady and transient regimes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do escoamento entre placas paralelas	29
Figura 2 – Curvas de fluxo de modelos reológicos não newtonianos.....	33
Figura 3 – Esquema do problema das <i>roll waves</i>	44
Figura 4 – (a) Produção de gel de Carbopol 996 com concentração mássica de 0,12%. (b) Gel de Carbopol 996 sobre canal inclinado	52
Figura 5 – Sistema de medição reologia: (A) Sistema CC 45; (B) Reômetro Brookfield R/S, (C) Computador de aquisição de dados	53
Figura 6 – Caracterização reológica: (a) protocolo de ensaio; (b) curvas de fluxo correspondentes aos experimentos C1–C3; (c) curvas de fluxo correspondentes aos experimentos C4–C5.....	54
Figura 7 – Configuração do aparato experimental empregado	55
Figura 8 – Sistema de bombeamento utilizado no aparato experimental: (a) bomba helicoidal de cavidade progressiva e (b) inversor de frequência empregado no controle da rotação da bomba	56
Figura 9 – (a) Situação anterior à esta pesquisa e (b) Situação atual.....	58
Figura 10 – Processo de calibração dos sensores transdutores ultrassônicos empregados	59
Figura 11 – Curvas de calibração e análise de incerteza instrumental para os transdutores ultrassônicos: (a) Sensor 1; (b) Sensor 2	60
Figura 12 – Placa de aquisição de dados USB-6009 utilizada no sistema experimental	61
Figura 13 – Evolução temporal da lâmina de escoamento na presença de regime quase estabilizado.....	61
Figura 14 – Nova configuração do gerador de plano laser com suporte ajustável...	62
Figura 15 – Ilustração do princípio de funcionamento da técnica STIV.....	66
Figura 16 – Outro tipo de formação da imagem espaço-temporal	67
Figura 17 – Fluxograma do procedimento metodológico para análise de imagens espaço-temporais (STI) utilizando a técnica STIV.....	68
Figura 18 – Malha de calibração utilizada para a definição da escala espacial das imagens.....	73

Figura 19 – (a) imagem da malha de calibração submersa no fluido para ensaios em regime permanente uniforme; (b) imagem da malha de calibração posicionada previamente ao escoamento para o ensaio com ondas	75
Figura 20 – Exemplo do processo de ortorretificação da imagem de referência	76
Figura 21 – Fluxo de trabalho da técnica STIV aplicado à análise da crista da onda	91
Figura 22 – Esquema da definição das janelas locais de análise na crista e no vale da onda, sob a hipótese de quase-estacionariedade local.....	92
Figura 23 – Fluxograma de execução dos experimentos e obtenção dos perfis de velocidade	96
Figura 24 – Comparação da estimativa de ângulo de orientação usando diferentes métodos aplicados a uma imagem espaço-temporal (STI): (a) STI com orientação estimada manualmente ($\alpha_{manual} \cong 35.53^\circ$), (b) Estimativa de ângulo pelo método do Tensor Gradiente (GT), mostrando ângulos dominantes em 0° e 33.79° e (c) Resultado da Transformada Wavelet Contínua 2D (CWT 2D) proposta, com pico em 31.46° ...	99
Figura 25 – Comparação da estimativa de ângulo de orientação usando diferentes métodos aplicados a uma imagem espaço-temporal (STI): (a) STI com orientação estimada manualmente ($\alpha_{manual} \cong 40.60^\circ$), (b) Estimativa de ângulo pelo método do Tensor Gradiente (GT), mostrando ângulos dominantes em 0° e 38.90° e (c) Resultado da Transformada Wavelet Contínua 2D (CWT 2D) proposta, com pico em 36.39° .	100
Figura 26 – Comparação dos perfis de velocidade obtidos por diferentes métodos (medições manuais, 2D CWT e método GT) em relação ao modelo teórico com deslizamento, para duas configurações experimentais: (a) $P1$ e (b) $P2$. As imagens inseridas mostram exemplos representativos das imagens espaço-temporais utilizadas na análise	101
Figura 27 – Comparação dos perfis de velocidade obtidos por diferentes métodos (medições manuais, 2D CWT e método GT) em relação ao modelo teórico com deslizamento, para duas configurações experimentais: (a) $P3$ e (b) $P4$. As imagens inseridas mostram exemplos representativos das imagens espaço-temporais utilizadas na análise	101
Figura 28 – Processo de calibração geométrica: (a) Imagem original da malha de referência evidenciando a distorção de perspectiva e a seleção dos pontos de controle; (b) Imagem de referência ortorretificada, demonstrando o restabelecimento do paralelismo e ortogonalidade da grelha	109

Figura 29 – Aplicação da correção geométrica ao escoamento (Ensaio C_1): (a) Imagem original do escoamento de Carbopol com distorção perspectiva; (b) Imagem ortorretificada do escoamento, onde a orientação das estrias corresponde à velocidade real do fluido.....	110
Figura 30 – Efeito do pré-processamento digital (ImageJ): (a) Imagem ortorretificada original com baixo contraste; (b) Imagem final após subtração de fundo e realce de contraste, evidenciando as estrias superficiais para a análise STIV	111
Figura 31 – Efeito do pré-processamento digital nas imagens frontais utilizando lentes laser de 10° e 30°	112
Figura 32 – Detalhamento óptico da zona de escoamento (Ensaio C_4 MPU, 500 rpm, 5 cm da parede): distinção entre a altura real da lâmina de fluido e a zona de reflexão na interface ar-fluido.....	113
Figura 33 – Comparação dos métodos de determinação da orientação das estrias para o Ensaio C_1 (200 rpm, 3° , $y \approx 136 \text{ px}$): (a) Imagem Espaço-Temporal (STI) bruta; (b) Validação manual com linha de referência ($\alpha_{\text{manual}} = 6,36^\circ$); (c) Estimativa de ângulo pelo método do GT com pico em $\alpha = 5,03^\circ$; (d) Espectro de energia da Transformada Wavelet (CWT-2D), com pico em $\alpha = 6,33^\circ$	116
Figura 34 – Comparação dos métodos de determinação da orientação das estrias para o Ensaio C_2 (300 rpm, 5° , $y \approx 214 \text{ px}$): (a) Imagem Espaço-Temporal (STI) bruta; (b) Validação manual com linha de referência ($\alpha_{\text{manual}} = 8,36^\circ$), (c) Estimativa de ângulo pelo método do GT com pico em $\alpha = 7,92^\circ$ e (d) Espectro de energia da Transformada Wavelet (CWT-2D), com pico em $\alpha = 8,44^\circ$	118
Figura 35 – Painel representativo da análise de orientação (Ensaio C_4 MPU - 500 rpm, 5 cm da parede, 5° , $y \approx 311 \text{ px}$): (a) Imagem Espaço-Temporal (STI) bruta; (b) Validação manual com linha de referência ($\alpha_{\text{manual}} \approx 7,89^\circ$); (c) Estimativa de ângulo pelo método do GT com pico em $\alpha = 7,97^\circ$; (d) espectro de energia angular da CWT-2D, com pico dominante em $\alpha \approx 7,91^\circ$	120
Figura 36 – Painel representativo da análise de orientação (Ensaio C_5 MPU - 600 rpm, 5 cm da parede, 5° , $y \approx 264 \text{ px}$): (a) Imagem Espaço-Temporal (STI) bruta; (b) Validação manual com linha de referência ($\alpha_{\text{manual}} \approx 6,50^\circ$); (c) Estimativa de ângulo pelo método do GT com pico em $\alpha = 6,18^\circ$; (d) espectro de energia angular da CWT-2D, com pico dominante em $\alpha \approx 6,33^\circ$	121

Figura 37 – Painel representativo da análise de orientação (Ensaio C6 MPU - 600 rpm, 10 cm da parede, 5°, $y \approx 170 px$): (a) Imagem Espaço-Temporal (STI) bruta; (b) Validação manual com linha de referência ($\alpha_{manual} \approx 5,91^\circ$); (c) Estimativa de ângulo pelo método do GT com pico em $\alpha = 5,28^\circ$; (d) espectro de energia angular da CWT-2D, com pico dominante em $\alpha \approx 5,45^\circ$	122
Figura 38 – Definição visual das referências geométricas e delimitação da região de interesse para as fases de crista e vale (Ensaio C4): (a) Referência da malha de calibração; (b) Imagem da fase de crista com as alturas analisadas; (c) Imagem da fase de vale	124
Figura 39 – Definição visual e isolamento da zona de reflexão para as fases de crista e vale (Ensaio C5): (a) Malha de calibração; (b) Fase de crista; (c) Fase de vale...	125
Figura 40. Painel representativo da análise de orientação (Ensaio C4 - 500 rpm, crista da onda, 5°, $y \approx 128 px$): (a) Imagem Espaço-Temporal (STI) bruta; (b) Validação manual com linha de referência ($\alpha_{manual} \approx 4,67^\circ$); (c) Estimativa de ângulo pelo método do GT com pico em $\alpha = 4,49^\circ$; (d) espectro de energia angular da CWT-2D, com pico dominante em $\alpha \approx 2,64^\circ$	126
Figura 41 – Painel representativo da análise de orientação (Ensaio C4 - 500 rpm, vale da onda, 5°, $y \approx 210 px$): (a) Imagem Espaço-Temporal (STI) bruta; (b) Validação manual com linha de referência ($\alpha_{manual} \approx 7,72^\circ$); (c) Estimativa de ângulo pelo método do GT com pico em $\alpha = 7,94^\circ$; (d) espectro de energia angular da CWT-2D, com pico dominante em $\alpha \approx 7,91^\circ$	129
Figura 42 – Painel representativo da análise de orientação (Ensaio C5 - 600 rpm, crista da onda, 5°, $y \approx 218 px$): (a) Imagem Espaço-Temporal (STI) bruta; (b) Validação manual com linha de referência ($\alpha_{manual} \approx 5,65^\circ$); (c) Estimativa de ângulo pelo método do GT com pico em $\alpha = 5,31^\circ$; (d) espectro de energia angular da CWT-2D, com pico dominante em $\alpha \approx 5,45^\circ$	131
Figura 43 – Painel representativo da análise de orientação (Ensaio C5 - 600 rpm, vale da onda, 5°, $y \approx 244 px$): (a) Imagem Espaço-Temporal (STI) bruta; (b) Validação manual com linha de referência ($\alpha_{manual} \approx 7,52^\circ$); (c) Estimativa de ângulo pelo método do GT com pico em $\alpha = 7,04^\circ$; (d) espectro de energia angular da CWT-2D, com pico dominante em $\alpha \approx 7,56^\circ$	132
Figura 44 – Confrontação experimental-teórica: perfis de velocidade ao longo da profundidade para o Ensaio C ₁ (200 rpm, 3°).....	135

Figura 45 – Confrontação experimental-teórica: perfis de velocidade ao longo da profundidade para o Ensaio C_2 (300 rpm, 5°).....	135
Figura 46 – Confrontação experimental-teórica: perfis de velocidade ao longo da profundidade para o Ensaio C_3 (400 rpm, 3°)	136
Figura 47 – Detalhamento do perfil de velocidades na região próxima ao fundo do canal, evidenciando o fenômeno de deslizamento (<i>wall slip</i>)	139
Figura 48 – Perfis de velocidade ao longo da profundidade em regime não perturbado (MPU) para o Ensaio C_4 (500 rpm, 5°, a 5 cm da parede)	140
Figura 49 – Perfis de velocidade ao longo da profundidade em regime não perturbado (MPU) para o Ensaio C_5 (600 rpm, 5°, a 5 cm da parede)	141
Figura 50 – Perfis de velocidade ao longo da profundidade em regime não perturbado (MPU) para o Ensaio C_6 (600 rpm, 5°, a 10 cm da parede)	141
Figura 51 – Confrontação cinemática transiente: perfil de velocidades ao longo da profundidade para a fase de crista do Ensaio C_4	143
Figura 52 – Confrontação cinemática transiente: perfil de velocidades ao longo da profundidade para a fase de vale do Ensaio C_4	144
Figura 53 – Confrontação cinemática transiente: perfil de velocidades ao longo da profundidade para a fase de crista do Ensaio C_5	145
Figura 54 – Confrontação cinemática transiente: perfil de velocidades ao longo da profundidade para a fase de vale do Ensaio C_5	146
Figura 55 – Confrontação cinemática transiente: perfil de velocidades ao longo da profundidade para a fase de crista do Ensaio C_6	147
Figura 56 – Confrontação cinemática transiente: perfil de velocidades ao longo da profundidade para a fase de vale do Ensaio C_6	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Precisão dos equipamentos empregados	94
Tabela – Incertezas estimadas dos parâmetros experimentais.....	94
Tabela 3 – Valores médios das propriedades medidas e calculadas nos experimentos preliminares.....	98
Tabela 4 – Erro quadrático médio (RMSE) para cada método nos experimentos preliminares, considerando como referência os ângulos manuais	103
Tabela 5 – Organização estrutural dos ensaios da campanha experimental	104
Tabela 6 – Valores médios das propriedades medidas e calculadas nos ensaios centrais.....	105
Tabela 7 – Condições experimentais dos ensaios laterais, contemplando as fases MPU e Perturbado (Onda)	106
Tabela 8 – Parâmetros hidráulicos e adimensionais dos ensaios laterais.....	106

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características geométricas das fases de crista e vale para os ensaios laterais e a respectiva intensidade relativa da instabilidade	126
Quadro 2 – Erro quadrático médio (RMSE) dos métodos CWT-2D e Gradiente Tensorial em relação à validação manual para os diferentes ensaios experimentais	150

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CWT	Continuous Wavelet Transform (Transformada Wavelet Contínua)
CWT-2D	Transformada Wavelet Contínua Bidimensional
FEIS	Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
GT	Gradiente Tensorial
LH2	Laboratório de Hidrologia e Hidrometria
PIVlab	Particle Image Velocimetry Laboratory
PPGEM	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
RMSE	Root Mean Square Error (Raiz do Erro Quadrático Médio)
STI	Space-Time Image (Imagem Espaço-Temporal)
STIV	Space-Time Image Velocimetry (Velocimetria por Imagem Espaço-Temporal)
UNESP	Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

LISTA DE SÍMBOLOS

τ	Tensão de cisalhamento
$\dot{\gamma}$	Taxa de cisalhamento (gradiente de velocidade)
η, μ	Viscosidade dinâmica do fluido
F	Força tangencial aplicada
A	Área sobre a qual a força é aplicada
C_m	Concentração mássica de Carbopol
m_{carb}	Massa de Carbopol
m_{H_2O}	Massa de água utilizada na mistura
$m_{H_2O_{neut}}$	Massa de água usada na solução de NaOH
m_{NaOH}	Massa de hidróxido de sódio
m	Massa de fluido coletada no método gravimétrico
$u(y)$	Velocidade em uma profundidade y do escoamento
$\bar{u}, \bar{u}_0$	Velocidade média experimental do escoamento / velocidade média teórica do estado base
u_s	Velocidade superficial do escoamento
u_p	Velocidade da região plug
u_{desl}	Velocidade de deslizamento na base do canal
Q_{global}	Vazão volumétrica total do escoamento
q_{local}	Vazão local por unidade de largura
$Q_{eq,STIV}$	Vazão global equivalente estimada a partir do perfil local obtido por STIV
W	Largura total do canal
L	Comprimento característico do escoamento ou distância percorrida pelo flutuador
α	Inclinação das estrias na imagem STI / Coeficiente de distribuição de velocidade
f_{ps}	Taxa de quadros por segundo da filmagem
Res	Resolução espacial da imagem
h	Profundidade da lâmina de fluido; quando utilizada na caracterização hidráulica dos ensaios, representa a profundidade

	média medida experimentalmente; quando indicada no modelo adimensional, representa a profundidade adimensionalizada.
h_0	Profundidade média ou característica da lâmina de escoamento em regime uniforme, associada ao estado base
$h(x, t)$	Profundidade instantânea da lâmina de fluido em escoamentos com <i>roll waves</i>
$h_{max,crista}$	Limite superior da janela vertical de análise (altura máxima local na crista)
$h_{min,crista}$	Limite inferior da janela vertical de análise (altura mínima local na crista)
h_{max}	Limite superior da janela vertical de análise (altura da onda)
h_{min}	Limite inferior da janela vertical de análise (altura da onda)
$h_{max,vale}$	Limite superior da janela vertical de análise (altura máxima local no vale)
$h_{min,vale}$	Limite inferior da janela vertical de análise (altura mínima local no vale)
Δx	Largura espacial da janela de análise
Δt	Intervalo temporal da janela local de análise
y	Coordenada vertical medida a partir do fundo do canal
y_0	Espessura da região cisalhada
h_p	Altura ou espessura da região plug
ρ	Massa específica do fluido
g	Aceleração da gravidade
θ	Ângulo de inclinação do canal
n	Índice de comportamento reológico (Herschel-Bulkley)
k, K_n	Coeficiente de consistência do fluido
τ_0, τ_c	Tensão de escoamento (limite de escoamento)
z_0	Profundidade da região cisalhada no modelo teórico
R_h	Raio hidráulico do escoamento
Re_{HB}	Número de Reynolds generalizado para fluido Herschel–Bulkley
x, z, t	Coordenadas espaciais e tempo
x', x''	Coordenadas em sistemas móveis (referencial da onda)
w	Velocidade na direção vertical

P	Pressão no escoamento
Fr, Fr_{min}	Número de Froude e valor mínimo crítico
C^*	Tensão crítica adimensional do fluido (ou fração da zona plug em regime uniforme)
$\varphi(n, C^*)$	Parâmetro reológico auxiliar 1
$\vartheta(n, C^*)$	Parâmetro reológico auxiliar 2
f	Frequência da perturbação
f_c	Frequência crítica de instabilidade
ω_c	Frequência angular crítica
U	Celeridade da onda (<i>roll wave</i>)
τ_{xz}	Componente de tensão de cisalhamento no plano xz
U_A, U_B	Componentes da incerteza tipo A e tipo B
U_c	Incerteza expandida da medição
k (<i>incerteza</i>)	Coefficiente de abrangência (Student)
I_r	Intensidade relativa da onda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	JUSTIFICATIVA E CONTEXTUALIZAÇÃO	23
1.2	OBJETIVOS	26
1.2.1	Objetivo Geral	26
1.2.2	Objetivos Específicos	26
2	ESTADO DA ARTE.....	28
2.1	REOLOGIA DOS MATERIAIS	28
2.1.1	Conceitos Fundamentais	29
2.1.2	Modelos Reológicos	31
2.1.2.1	Fluidos Newtonianos	31
2.1.2.2	Fluidos não newtonianos	32
2.2	ESCOAMENTOS COM SUPERFÍCIE LIVRE E O FENÔMENO DAS <i>ROLL WAVES</i>	33
2.3	MEDIÇÕES DE VELOCIDADE EM ESCOAMENTOS NÃO NEWTONIANOS	34
2.4	MODELOS TEÓRICOS DE REFERÊNCIA E CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE	36
2.4.1	Modelo de lubrificação para fluido Herschel–Bulkley	36
2.4.2	Parâmetros hidráulicos e adimensionais utilizados.....	39
2.4.3	Modelo matemático de <i>Roll Waves</i> e Critérios de Geração	42
2.4.3.1	Formulação governante do escoamento viscoplástico	43
2.4.3.2	Cálculo da média em profundidade e forma adimensional	44
2.4.3.3	Equação da <i>roll wave</i> em regime permanente	45
2.4.3.4	Primeiro critério de geração.....	46
2.4.3.5	Segundo critério de geração.....	48
2.5	LACUNAS NA LITERATURA E INSERÇÃO DO PRESENTE TRABALHO.....	49
9		
3	MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1	FLUIDO VISCOPLÁSTICO E CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA	50
3.1.1	Produção do gel de Carbopol.....	51
3.1.2	Adição de microtraçadores	52

3.1.3	Caracterização reológica	53
3.2	APARATO EXPERIMENTAL	55
3.2.1	Sistema de Circulação e bombeamento de fluido	55
3.2.2	Sistema de Perturbação	56
3.2.3	Sistema de instrumentação óptica e medição da lâmina.....	58
3.2.3.1	Sensores ultrassônicos.....	59
3.2.3.2	Gerador de plano laser	62
3.2.3.3	Câmera de Medição de Escoamento.....	64
3.3	TÉCNICA DE VELOCIMETRIA: SPACE-TIME IMAGE VELOCIMETRY	65
3.4	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	69
3.4.1	Determinação da vazão (método gravimétrico)	69
3.4.2	Medição da velocidade superficial.....	70
3.4.3	Medição da espessura da lâmina de escoamento	71
3.5	AQUISIÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTO DE IMAGENS.....	72
3.5.1	Imagem de Referência e Calibração Espacial	73
3.5.2	Transformação de projeção e ortorretificação das imagens	75
3.5.3	Pré-processamento das imagens e definição da região de interesse (ROI).....	77
3.6	METODOLOGIA DE ANÁLISE STIV	79
3.6.1	Construção das imagens espaço-temporais (STI).....	79
3.6.2	Discretização da profundidade do escoamento	80
3.6.3	Métodos de obtenção do ângulo das estrias em imagens STI.....	81
3.6.3.1	Método do Gradiente Gaussiano Bidimensional (STI Gaussiano).....	81
3.6.3.2	Transformada Contínua de Wavelet Bidimensional (CWT-2D)	85
3.6.3.3	Medição Manual da Orientação das Estrias	87
3.6.4	Determinação da altura característica da lâmina em escoamentos pulsados	88
3.7	CRITÉRIOS DE COMPARAÇÃO E ANÁLISE DE ERRO.....	93
3.7.1	Análise de incertezas experimentais (GUM)	93
3.7.2	Métrica de erro para comparação entre métodos (RMSE)	95
3.7.3	Critérios de consistência e comparação metodológica	95
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	97
4.1	ESTUDOS PRELIMINARES E VALIDAÇÃO ALGORÍTMICA	98
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS ESCOAMENTOS ENSAIADOS	103

4.3	EFEITO DA ORTORRETIFICAÇÃO E QUALIDADE DAS IMAGENS	108
4.3.1	Efeitos ópticos de reflexão na interface ar-fluido nos ensaios laterais	113
4.4	ANÁLISE DAS IMAGENS STI E DETERMINAÇÃO DA ORIENTAÇÃO DAS ESTRIAS	114
4.4.1	Análise comparativa dos métodos (Ensaio C1, C2 e C3)	115
4.4.2	Análise comparativa dos métodos aplicados aos ensaios laterais em regime MPU (C4, C5 e C6)	119
4.4.3	Critério geométrico e delimitação das fases de crista e vale	123
4.4.4	Análise comparativa dos métodos nas fases de crista e vale	125
4.5	PERFIS DE VELOCIDADE AO LONGO DA PROFUNDIDADE	134
4.5.1	Análise transiente: fases de crista e vale	143
4.6	ANÁLISE QUANTITATIVA DO ERRO (RMSE)	150
5	CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	153
5.1	CONCLUSÕES.....	153
5.2	LIMITAÇÕES DO ESTUDO.....	154
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS	155
	REFERÊNCIAS	157
	APÊNDICE A - PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA	166
	APÊNDICE B - SÉRIES TEMPORAIS DE ALTURA DAS ROLL WAVES	167

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA E CONTEXTUALIZAÇÃO

A ocorrência de desastres naturais associados a processos hidrológicos e geotécnicos tem se consolidado como um dos principais desafios contemporâneos para a engenharia e o planejamento territorial no Brasil. Tais eventos, que resultam em impactos sociais, econômicos e ambientais expressivos, refletem a combinação entre fatores climáticos e intervenções antrópicas, incluindo a expansão urbana desordenada, o desmatamento de áreas de encosta e a ocupação de regiões suscetíveis a instabilidades (IPCC, 2023; Maciel *et al.*, 2021). Nesse cenário, fenômenos relacionados à movimentação de massas — como corridas de lama (*mudflows*), corridas de detritos (*debris flows*) e deslizamentos de terra (*landslides*) — figuram entre os processos naturais mais frequentes e potencialmente danosos no território nacional.

Nessas ocorrências, os escoamentos produzidos apresentam, em sua maioria, comportamento reológico não newtoniano, o que os diferencia substancialmente da água. Diversos estudos indicam que modelos reológicos como o de Bingham e, sobretudo, o de Herschel–Bulkley são capazes de representar adequadamente esse tipo de fluido, sendo amplamente empregados na descrição de escoamentos hiperconcentrados naturais e laboratoriais (Coussot e Piau, 1994; Bates e Ancey, 2017; Balmforth *et al.*, 2014). A correta caracterização hidrodinâmica desses escoamentos é fundamental para a compreensão de sua dinâmica e para o desenvolvimento de modelos preditivos mais realistas, capazes de estimar, por exemplo, a extensão da mancha de inundação e o potencial destrutivo associado a esses eventos (Balmforth *et al.*, 2006; Azimi, 2016).

Do ponto de vista físico, muitos desses escoamentos apresentam regime predominantemente laminar, elevada viscosidade aparente e, em determinadas condições, instabilidades na superfície livre. Essas instabilidades podem se manifestar na forma de ondulações ou ondas de grande amplitude, como as chamadas *roll waves*, cuja formação está associada ao desequilíbrio entre forças gravitacionais, inerciais e resistivas, além de depender de condições geométricas, reológicas e de perturbação adequadas (Fiorot, 2012; Di Cristo *et al.*, 2013). Embora a ocorrência de *roll waves* seja amplamente documentada em fluidos newtonianos,

sua caracterização experimental em fluidos viscoplásticos ainda é relativamente limitada, especialmente em condições controladas de laboratório (Lu *et al.*, 2023). Nesse contexto, Fiorot *et al.* (2024) realizaram uma avaliação experimental da evolução de *roll waves* em escoamentos laminares de fluidos não newtonianos do tipo Herschel-Bulkley, utilizando gel de Carbopol em canal inclinado e medições da superfície livre por sensores ultrassônicos, contribuindo para a compreensão das condições de geração, propagação e estabilização dessas instabilidades em fluidos com comportamento semelhante a materiais lamosos.

A investigação experimental de escoamentos não newtonianos impõe desafios significativos, sobretudo no que se refere à medição de campos de velocidade. Em aplicações de campo, métodos tradicionais de medição, geralmente intrusivos ou semi-intrusivos, como medidores de corrente, Velocímetros Acústicos Doppler (ADV) e Perfiladores Acústicos Doppler de Corrente (ADCP), ainda são amplamente utilizados em água (Aberle e Smart, 2003; Fujita *et al.*, 1998; Dobson *et al.*, 2014). Em ambiente laboratorial, técnicas ópticas como a Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV) têm sido empregadas com sucesso na obtenção de campos de velocidade (Patalano *et al.*, 2017). Entretanto, tais métodos podem apresentar limitações quando aplicados a fluidos opacos, viscoplásticos ou com presença de partículas em suspensão.

Como alternativa a métodos intrusivos e técnicas ópticas convencionais, surgiram técnicas de análise de imagem aplicadas à superfície do escoamento, destacando-se a Velocimetria por Imagem Espaço-Temporal (STIV – *Space-Time Image Velocimetry*), proposta por Fujita *et al.* (2007). A STIV permite estimar a velocidade do escoamento a partir da análise da inclinação de estrias formadas em imagens espaço-temporais (STI). Com o objetivo de aumentar a robustez e a objetividade da técnica, têm sido desenvolvidos métodos automáticos de detecção da orientação dessas estrias, apresentando bons resultados mesmo em condições adversas de imagem (Freydier *et al.*, 2017; Fujita *et al.*, 2007; Hu *et al.*, 2023).

Apesar de seu potencial, a aplicação da STIV a escoamentos não newtonianos ainda enfrenta limitações metodológicas, particularmente no que diz respeito à qualidade das imagens utilizadas. Distorções de perspectiva, variações de iluminação, ruídos visuais e efeitos associados à inclinação do canal podem comprometer a correta estimativa do ângulo das estrias e, conseqüentemente, da velocidade calculada. Nesse contexto, a incorporação de procedimentos de pré-processamento

geométrico, como a ortorretificação das imagens, surge como uma etapa importante para aumentar a confiabilidade da técnica, garantindo a correspondência entre o espaço físico e o plano da imagem.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar experimentalmente os perfis de velocidade ao longo da profundidade de escoamentos viscoplásticos em canal inclinado. A pesquisa foca na aplicação e comparação de diferentes métodos de determinação da orientação de estrias em imagens espaço-temporais, utilizando uma cadeia metodológica que integra a ortorretificação para correção de perspectiva, o processamento digital de imagens e a determinação da inclinação das estrias na imagem STI via Transformada Wavelet Contínua Bidimensional (CWT-2D), Gradiente Tensorial (GT) e medição manual.

Os perfis cinemáticos obtidos são comparados entre si e confrontados com o modelo teórico baseado na aproximação de lubrificação para fluidos viscoplásticos na região central do canal, onde efeitos de borda são reduzidos. Adicionalmente, a investigação expande-se para as regiões próximas às paredes, com o intuito de avaliar a validade da hipótese unidimensional, evidenciando efeitos de bordas, bem como o fenômeno de deslizamento de parede (*wall slip*), associado à natureza do material do fundo do canal e ao comportamento reológico do fluido.

Por fim, a metodologia é avaliada em condições de maior dificuldade de medição, sendo aplicada a escoamentos perturbados. A análise em regime transiente é conduzida de forma segmentada nas regiões de crista e vale de pulsações geradas no canal, com o objetivo de investigar a aplicação dos métodos de análise (CWT-2D, GT e manual), na determinação do campo de velocidade. Espera-se que os resultados não apenas reforcem o potencial da técnica STIV como uma ferramenta não intrusiva para estimativa de velocidades ao longo da profundidade do escoamento, mas também contribuam para a compreensão fenomenológica e subsidiem estudos de modelos preditivos aplicáveis à análise de escoamentos naturais associados a eventos de deslizamento, corridas de lama e detritos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral investigar e avaliar a aplicação da técnica de Velocimetria por Imagem Espaço-Temporal (STIV) na caracterização da velocidade de escoamentos de fluidos não newtonianos viscoplásticos. A pesquisa concentra-se na estruturação de um procedimento metodológico para a obtenção de perfis de velocidade, considerando mecanismos de correção geométrica das imagens e análise da orientação de estrias por métodos automáticos e procedimentos de referências manuais, em condições predominantemente laminares e com presença de instabilidades de superfície.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Implementar e avaliar o processo de ortorretificação de imagens como etapa de pré-processamento, visando a correção de distorções de perspectiva e assegurar a consistência geométrica e precisão métrica nos cálculos de velocidade.
- Comparar o desempenho de métodos de determinação da orientação de estrias em imagens espaço-temporais (STI), especificamente a Transformada Wavelet Contínua Bidimensional (CWT-2D), o Gradiente Tensorial (GT) e a medição manual, na caracterização de escoamentos viscoplásticos.
- Caracterizar os perfis de velocidade em regime permanente uniforme para escoamentos viscoplásticos a partir de dados obtidos por STIV, utilizando, quando pertinente, e para fins de comparação, perfis teóricos obtidos a partir da aproximação de lubrificação para fluidos de reologia de Herschel–Bulkley.
- Avaliar a robustez dos métodos de análise da orientação de estrias sob condições de escoamento transiente, por meio da análise segmentada em regiões de crista e vale da oscilação.
- Investigar as limitações e a sensibilidade dos métodos empregados na técnica STIV sob condições experimentais adversas, incluindo ruído óptico, variações

de iluminação e efeitos associados às regiões próximas às paredes e ao fundo do canal.

2 ESTADO DA ARTE

O presente estado da arte tem como objetivo contextualizar os fundamentos teóricos e os principais avanços científicos relacionados ao estudo de escoamentos de fluidos não newtonianos com superfície livre, com ênfase em materiais viscoplásticos. Inicialmente, são apresentados os conceitos reológicos essenciais e os modelos constitutivos empregados na descrição desses materiais. Em seguida, discutem-se aspectos relacionados à dinâmica de escoamentos em canais inclinados, incluindo a ocorrência de instabilidades hidrodinâmicas, como por exemplo, as *roll waves*.

Posteriormente, são abordadas as técnicas experimentais de medição de velocidade aplicadas a escoamentos não newtonianos, com destaque para métodos ópticos não intrusivos, em especial a técnica de Velocimetria por Imagem Espaço-Temporal (STIV). São também discutidos métodos de determinação da orientação de estrias em imagens espaço-temporais, incluindo abordagens automáticas e manuais, evidenciando suas potencialidades e limitações.

Por fim, são discutidas as lacunas existentes na literatura, especialmente no que se refere à aplicação e comparação sistemática desses métodos em escoamentos viscoplásticos, bem como à influência de condições experimentais na qualidade das medições. Nesse contexto, apresenta-se a inserção do presente trabalho, que busca contribuir para o aprimoramento metodológico da técnica STIV e para a avaliação da confiabilidade dos métodos empregados no contexto de escoamentos viscoplásticos em canal inclinado.

2.1 REOLOGIA DOS MATERIAIS

A reologia é a ciência fundamental que descreve o fluxo e a deformação da matéria sob a ação de uma tensão aplicada (Barnes *et al.*, 1989). Conforme aprofundado por Boger e Walters (1993), seu estudo abrange todos os estados da matéria (sólido, líquido e gasoso), o que justifica sua vasta aplicabilidade em campos tão diversos como a indústria farmacêutica, petroquímica e as geociências. No âmbito da engenharia civil, a reologia desempenha papel essencial no desenvolvimento e controle de materiais cimentícios, como os concretos autoadensáveis, cuja performance no estado fresco está diretamente associada às suas propriedades

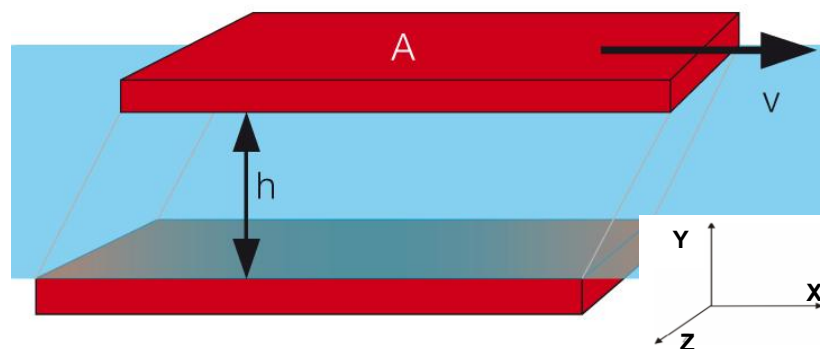
reológicas (Banfill, 2006). De forma análoga, sua relevância estende-se à geotecnia ambiental e de mineração, especialmente na análise de materiais lamosos e rejeitos, visando à compreensão de seu comportamento mecânico e à mitigação de impactos ambientais (Long *et al.*, 2017; Boger, 2013).

A quantificação do comportamento reológico de um material é realizada por meio de equações constitutivas, que estabelecem a relação entre a tensão aplicada, a deformação resultante e suas taxas temporais, permitindo a caracterização precisa do material sob diferentes condições de escoamento e regimes de deformação (Macosko, 1994).

2.1.1 Conceitos Fundamentais

A reometria, ciência da medição das propriedades reológicas, baseia-se na relação fundamental entre a tensão de cisalhamento (τ) e a taxa de deformação ($\dot{\gamma}$). O experimento conceitual canônico para ilustrar essa relação é o escoamento de arraste entre placas paralelas, conforme esquematizado na Figura 1. Neste modelo, um fluido está contido entre uma placa inferior estacionária e uma placa superior móvel de área A , à qual se aplica uma força F (Barnes *et al.*, 1989), fazendo-a se mover a uma velocidade V , o que induz a deformação do fluido devido à transferência de quantidade de movimento ao longo da camada fluida. Esse tipo de configuração corresponde a um escoamento viscométrico simples, no qual o campo de escoamento é bem definido e a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação pode ser utilizada para caracterizar o comportamento reológico do material.

Figura 1 – Representação esquemática do escoamento entre placas paralelas



Fonte: Adaptado de Anton Paar (2024).

A tensão de cisalhamento (τ) é definida como a magnitude dessa força por unidade de área:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Esta tensão induz uma taxa de deformação contínua no fluido. A taxa de deformação ou taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) quantifica essa mudança, representando o gradiente da componente de velocidade longitudinal u_x na direção perpendicular ao escoamento (y). Conceitualmente, ela descreve a rapidez com que as camadas de fluido deslizam umas sobre as outras, sendo expressa pela Equação (2):

$$\dot{\gamma} = \frac{du_x}{dy} \quad (2)$$

A propriedade do material que governa essa resposta é a viscosidade (η ou μ), uma medida do atrito interno do fluido. A forma específica como a tensão de cisalhamento varia com a taxa de deformação é o que define o comportamento reológico de cada material. Assim, a viscosidade pode ser compreendida como a propriedade que quantifica essa relação, sendo expressa como a razão entre a tensão e a taxa de deformação resultante (Macosko, 1994):

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3)$$

De acordo com Bretas e D'Ávila (2000), essa abordagem permite quantificar o comportamento fluido em aplicações como engenharia, farmacêutica e processos manufatureiros. Estudos clássicos sobre fluido de cisalhamento com tensão limite mostram que a medição precisa desse parâmetro pode ser obtida através de ensaios com geometrias do tipo *vanes*, placas paralelas ou capilares (Nguyen e Boger, 1992). Além disso, Barnes *et al.* (1989) incluem explicações detalhadas sobre métodos de caracterização reológica e fundamentos dos modelos constitutivos.

2.1.2 Modelos Reológicos

Os fluidos podem ser classificados de acordo com a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação (Fox e McDonald, 1995). De maneira geral, essa classificação é dividida em dois grupos: fluidos newtonianos e não newtonianos.

2.1.2.1 Fluidos Newtonianos

Os fluidos classificados como newtonianos são aqueles em que a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação por cisalhamento é linear, apresentando viscosidade por cisalhamento constante sob condições de temperatura e pressão constantes. Assim, a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação, conforme descrito pela lei de Newton da viscosidade.

De acordo com Barnes *et al.* (1989), o comportamento de um fluido newtoniano pode ser caracterizado pelas seguintes propriedades:

- A viscosidade por cisalhamento não varia com a taxa de deformação por cisalhamento;
- A viscosidade permanece constante em relação ao tempo de cisalhamento, e a tensão no fluido cai para zero imediatamente após a interrupção do cisalhamento;
- As viscosidades medidas em diferentes tipos de deformação mantêm proporções simples entre si. Por exemplo, a viscosidade extensional uniaxial é três vezes o valor da viscosidade medida em cisalhamento simples.

Em outras palavras, esses fluidos exibem um comportamento reológico linear (Malkin e Isayev, 2006). Para esses fluidos, a viscosidade permanece invariável, o que pode ser expresso como indicado na Equação (4):

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (4)$$

Essa característica é observada em substâncias como água, óleo, entre outras.

2.1.2.2 Fluidos não newtonianos

Fluidos não newtonianos apresentam uma relação não-linear entre tensão de cisalhamento (τ) e taxa de deformação ($\dot{\gamma}$), diferindo dos fluidos newtonianos por possuírem viscosidade variável com as condições de escoamento (Nguyen e Boger, 1992). Exemplos comuns incluem lama, argila bentonita e fluidos industriais como óleos pesados e suspensões poliméricas.

Nesse contexto, uma classe importante é a dos fluidos newtonianos generalizados (GNF, do inglês *Generalized Newtonian Fluids*), nos quais a tensão de cisalhamento depende da taxa de deformação de forma instantânea, por meio de uma viscosidade aparente variável. Diferentemente dos fluidos newtonianos, essa viscosidade não é constante, podendo aumentar ou diminuir com a taxa de cisalhamento, caracterizando comportamentos como espessamento ou afinamento por cisalhamento. Modelos como a Lei de Potência, Bingham e Herschel–Bulkley podem ser empregados, em diferentes condições, para representar esse tipo de comportamento reológico

Um conceito central nesse contexto é a tensão limite de escoamento (τ_0): um valor crítico abaixo do qual o material se comporta como sólido elástico, e acima do qual passa a escoar como material fluido (Hutton, 1975; Silva, 2018).

Diversos modelos reológicos têm sido propostos para descrever fluidos não newtonianos por meio de relações constitutivas entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação. Esses modelos também podem ser interpretados em termos da viscosidade aparente, definida como, $\eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$. Entre os modelos mais amplamente empregados, destacam-se:

- Modelo de Bingham

$$\tau = \tau_0 + \mu_B \dot{\gamma} \quad (5)$$

- Modelo de Herschel-Bulkley

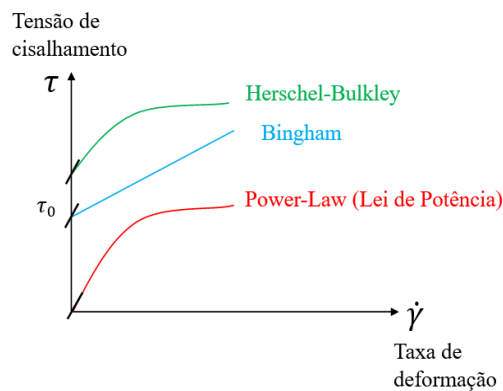
$$\tau = \tau_0 + K_n \dot{\gamma}^n \quad (6)$$

- Modelo *power-law* (Lei de Potência)

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (7)$$

em que τ_0 representa a tensão limite de escoamento, μ_B é a viscosidade plástica de Bingham, K e K_n são os índices de consistência dos modelos da Lei de Potência e de Herschel-Bulkley, respectivamente, n é o índice de comportamento reológico. A Figura 2 apresenta o comportamento dos modelos reológicos a partir de uma curva de fluxo ou reograma, a qual relaciona a taxa de deformação e tensão de cisalhamento.

Figura 2 – Curvas de fluxo de modelos reológicos não newtonianos



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os fluidos viscoplásticos, especialmente aqueles com natureza lamosa ou que simulam tal comportamento, são de particular interesse neste estudo. A partir de determinadas concentrações, eles exibem uma tensão limite de escoamento e são adequadamente descritos pelo modelo de Herschel-Bulkley (Piau e Debiene, 2005; Minussi e Maciel, 2012; Chambon *et al.*, 2014). O comportamento reológico desses materiais pode ser descrito por modelos não newtonianos, mesmo em situações de baixa concentração, conforme relatado por Maciel *et al.* (2009).

2.2 ESCOAMENTOS COM SUPERFÍCIE LIVRE E O FENÔMENO DAS *ROLL WAVES*

Escoamentos de fluidos não newtonianos com superfície livre são frequentemente observados em processos naturais e industriais, como corridas de detritos, fluxos de lama e transporte de suspensões concentradas em canais

inclinados (Iverson, 1997; Cousst, 1997; Coussot *et al.*, 1998). Uma característica marcante desses escoamentos é a possibilidade de desenvolvimento de instabilidades hidrodinâmicas que se estabilizam sob a forma de ondas periódicas de grande amplitude, conhecidas como *roll waves*.

O fenômeno das *roll waves* resulta do crescimento de perturbações no escoamento e está associado a condições específicas de regime, inclinação do canal e propriedades reológicas do fluido (Whitham, 1974). Embora inicialmente estudadas em escoamentos newtonianos turbulentos (Dressler, 1949), essas instabilidades também são observadas em escoamentos laminares de fluidos viscoplásticos, nos quais a dissipação viscosa e a tensão limite de escoamento exercem papel dominante na dinâmica das ondas (Chanson, 2004; Di Cristo *et al.*, 2013)

Modelos matemáticos mais recentes incorporam reologias do tipo Bingham, Power-Law e Herschel-Bulkley para descrever a formação, propagação e estabilidade das *roll waves* em escoamentos não newtonianos, permitindo uma representação mais realista de fluxos naturais e experimentais (Ng e Mei, 1994; Maciel *et al.*, 2013; Ferreira *et al.*, 2014)

2.3 MEDIÇÕES DE VELOCIDADE EM ESCOAMENTOS NEWTONIANOS

A caracterização experimental de perfis de velocidade em escoamentos não newtonianos impõe desafios adicionais quando comparada à de fluidos newtonianos, principalmente em função da elevada viscosidade aparente, do comportamento dependente da taxa de deformação, da possível presença de tensão limite de escoamento e, em muitos casos, da opacidade do fluido. Essas características tornam a aplicação de métodos intrusivos particularmente problemática, uma vez que sondas mecânicas, tubos de Pitot ou sensores de contato podem alterar significativamente o campo de velocidades, especialmente em escoamentos rasos e sensíveis a perturbações (Cochard e Ancey, 2009).

Diante das limitações dos métodos intrusivos, técnicas ópticas têm sido fundamentais na investigação experimental de escoamentos não newtonianos. Enquanto trabalhos seminais como os de Balmforth *et al.* (2006) e Ancey e Cochard (2009) validaram modelos teóricos através da medição de perfis de superfície livre e da evolução da frente de onda em canais inclinados, a caracterização detalhada do

campo interno de velocidades exigiu a aplicação de técnicas de velocimetria por imagem.

Avançando nessa direção, Andreini *et al.* (2012) empregaram a Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV) para mapear a dinâmica interna de avalanches de fluidos viscoplásticos, revelando a estrutura complexa dos perfis de velocidade que ocorrem durante o escoamento. Embora o PIV forneça dados vetoriais ricos, sua implementação exige equipamentos de alto custo e elevado processamento computacional. Outras abordagens ópticas, como a Velocimetria por Laser Doppler (LDV) e técnicas baseadas em fluorescência induzida por laser (LIF), também foram exploradas em escoamentos não newtonianos, especialmente para medições pontuais ou para a caracterização de perfis médios de velocidade e concentração (Albrecht *et al.*, 2003). No entanto, essas técnicas frequentemente requerem arranjos ópticos complexos, alto controle das propriedades ópticas do fluido, como o rigoroso casamento de índice de refração, e apresentam dificuldades adicionais quando aplicadas a escoamentos com forte atenuação óptica ou superfícies livres irregulares (Wiederseiner *et al.*, 2011).

No Brasil, o Grupo de Pesquisa RMVP (UNESP) tem se destacado no desenvolvimento de experimentos voltados à análise de escoamentos em canais abertos, incluindo fluidos newtonianos e não newtonianos viscoplásticos. Fiorot *et al.* (2015) realizaram análises comparativas entre medições fotométricas e modelagem numérica para fluidos newtonianos. Cunha (2013) e Cunha (2018) testaram sistemas ultrassônicos e fotométricos em escoamentos do tipo Herschel-Bulkley.

Como alternativa eficiente para a caracterização específica da velocidade superficial em canais abertos, técnicas ópticas não intrusivas têm sido amplamente exploradas, destacando-se a Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV) e a Velocimetria por Imagem Espaço-Temporal (STIV). A técnica STIV baseia-se na análise da orientação de estrias formadas em imagens espaço-temporais, permitindo a estimativa de campos de velocidade sem interferir diretamente no escoamento (Fujita *et al.*, 2007).

Estudos recentes demonstram a aplicabilidade da STIV em escoamentos viscoplásticos sob regime permanente, bem como em condições de escoamento instável, evidenciando seu potencial para a análise de fluxos complexos em laboratório e em ambientes naturais (Freydier *et al.*, 2017; Pereira *et al.*, 2022; Pereira e Maciel, 2023). Esses trabalhos indicam que a integração entre pré-processamento

digital de imagens, como técnicas de realce de contraste e ortorretificação espacial, e métodos automáticos de análise de orientação constitui uma abordagem promissora para a obtenção de informações cinemáticas confiáveis em escoamentos não newtonianos.

De forma geral, a literatura indica que a combinação entre técnicas ópticas não intrusivas, arranjos experimentais em canais inclinados e métodos avançados de processamento de imagens constitui uma abordagem promissora para a caracterização cinemática de escoamentos não newtonianos. Contudo, ainda se observa uma lacuna na obtenção de perfis de velocidade ao longo da profundidade a partir de imagens, especialmente em escoamentos viscoplásticos rasos. Isso motiva o desenvolvimento e a avaliação de metodologias experimentais otimizadas, que integrem configurações específicas de captura visual e iluminação a laser, com aplicação da técnica STIV em diferentes planos do escoamento, conforme proposto no presente trabalho.

2.4 MODELOS TEÓRICOS DE REFERÊNCIA E CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE

Nesta seção são apresentados os modelos teóricos utilizados como referência para a análise dos resultados experimentais. Inicialmente, descreve-se o modelo de lubrificação para fluidos viscoplásticos do tipo Herschel–Bulkley, empregado para a obtenção do perfil de velocidade em regime uniforme. Em seguida, são discutidos os critérios teóricos associados à geração de ondas do tipo *roll wave* em escoamentos inclinados, os quais fornecem limites de estabilidade para comparação com os dados experimentais obtidos por STIV.

2.4.1 Modelo de lubrificação para fluido Herschel–Bulkley

A análise teórica do escoamento viscoplástico ao longo de um plano inclinado pode ser conduzida com base na teoria da lubrificação, aplicável a situações em que a lâmina de fluido apresenta espessura reduzida em relação ao comprimento do escoamento. Esta abordagem assume a hipótese de plano infinito na direção transversal do canal, sendo governada pela relação $h/W \ll 1$, em que h representa a altura da lâmina de fluido, medida na direção normal ao fundo do canal, e W a largura do canal. Tal formulação é particularmente adequada para fluidos com

comportamento reológico do tipo Herschel-Bulkley, caracterizados por apresentarem uma tensão de escoamento finita antes do início da deformação (Pereira e Maciel, 2026; Chambon *et al.*, 2014; Ferreira, 2013) .

Nesta subseção, a coordenada y é utilizada para representar a direção normal ao fundo do canal, medida a partir da base do escoamento até a superfície livre. Essa escolha de notação é adotada apenas para a descrição do perfil vertical de velocidades.

Considerando um escoamento laminar, permanente e uniforme sobre um plano inclinado com ângulo θ em relação à horizontal, admite-se que o escoamento ocorra predominantemente na direção longitudinal (eixo x), com variação de propriedades apenas na direção normal ao fundo do canal, representada nesta subseção pela coordenada y . Sob essas hipóteses, a distribuição da tensão de cisalhamento ao longo da profundidade do escoamento é dada pelo equilíbrio entre a força gravitacional e a resistência viscosa, expressa por:

$$\tau(y) = \rho g \sin \theta (h - y) \quad (8)$$

sendo: $\tau(y)$ é a tensão de cisalhamento no ponto y , ρ a massa específica do fluido, g a aceleração da gravidade, θ é o ângulo de inclinação do canal, h a profundidade da lâmina de escoamento considerada no modelo e y é a coordenada vertical medida a partir do fundo do canal.

Nos fluidos viscoplásticos do tipo Herschel-Bulkley, existe uma região próxima à superfície livre onde a tensão de cisalhamento é inferior à tensão limite de escoamento (τ_0). Nesta zona, denominada região *plug*, o fluido desloca-se como um bloco sólido sem deformação interna, onde $\tau < \tau_0$.

A altura correspondente à fronteira entre a região *plug* e a zona cisalhada, h_p , é determinada por:

$$h_p = \frac{\tau_0}{\rho g \sin \theta} \quad (9)$$

A partir das equações de balanço da quantidade de movimento e do modelo reológico de Herschel-Bulkley, a distribuição de velocidade ao longo da profundidade

pode ser obtida. Embora modelos clássicos assumam a condição de não-deslizamento na parede ($u_{(y=0)} = 0$), a evidência experimental de deslizamento de fundo do canal em fluidos como o Carbopol exige a modificação da condição de contorno para $u(y = 0) = u_{desl.}$, sendo $u_{desl.}$ a velocidade de deslizamento obtida experimentalmente (Pereira e Maciel, 2026; Chambon *et al.*, 2014). Assim, o perfil de velocidade é descrito por:

$$u(y) = u_p \left[1 - \left(1 - \frac{y}{y_0} \right)^{\frac{(n+1)}{n}} \right] + u_{desl.} \quad \text{se } y < y_0$$

$$u(y) = u_p + u_{desl.} \quad \text{se } y \geq y_0 \quad (10)$$

sendo: $y_0 = h - h_p$ representa a profundidade da região cisalhada, n o índice de comportamento reológico, u_p é a velocidade constante da região *plug*, calculada por:

$$u_p = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\rho g \sin \theta}{K_n} \right)^{\frac{1}{n}} y_0^{\frac{(n+1)}{n}} \quad (11)$$

nesta última equação, K_n representa o índice de consistência do modelo de Herschel–Bulkley.

A representação analítica do perfil de velocidade obtida por este modelo constitui uma referência fundamental para a validação dos resultados experimentais obtidos via técnica STIV. A identificação da extensão da região *plug* fornece informações relevantes sobre a influência da tensão de escoamento na dinâmica do fluido, sendo particularmente útil na caracterização do gel de Carbopol (Ferreira, 2013).

Ressalta-se que, devido à hipótese de plano infinito $h/W \ll 1$, a aplicação deste modelo teórico restringe-se aos ensaios realizados na região central do canal, onde os efeitos de atrito lateral podem ser desprezados. Para as medições realizadas próximas às paredes laterais do canal (a 5 cm e 10 cm), o modelo analítico não é aplicado como comparativo, uma vez que a proximidade da fronteira física introduz

efeitos tridimensionais que reduzem localmente a velocidade, afastando o comportamento real do fluido das previsões teóricas (PEREIRA e MACIEL, 2026).

2.4.2 Parâmetros hidráulicos e dimensionais utilizados

Com o objetivo de caracterizar hidraulicamente os escoamentos ensaiados e permitir a comparação entre diferentes condições experimentais, foram determinados parâmetros hidráulicos médios e números adimensionais clássicos, amplamente utilizados na análise de escoamentos em canais inclinados. Esses parâmetros são empregados tanto para a interpretação física dos regimes observados quanto para a comparação com estudos da literatura envolvendo fluidos viscoplásticos. Nesta seção, h representa a profundidade média da lâmina de escoamento medida experimentalmente em cada ensaio, utilizada para a caracterização hidráulica global.

Velocidade média do escoamento

A determinação da velocidade média e da vazão do escoamento exigiu duas abordagens metodológicas distintas, dependendo da região transversal de análise (centro ou proximidade da parede), devido aos efeitos tridimensionais induzidos pelas paredes laterais do canal.

Para a caracterização hidráulica global dos ensaios, incluindo os experimentos conduzidos na região central do canal (Experimentos C_1, C_2 e C_3), e os ensaios realizados próximos à parede lateral (Experimentos C_4, C_5 e C_6), a velocidade média do escoamento, $\bar{u}$, foi estimada a partir da vazão volumétrica global medida experimentalmente (método gravimétrico) explicado na seção 3.4.1, sendo definida por:

$$\bar{u} = \frac{Q_{global}}{Wh} \quad (12)$$

em que Q_{global} é a vazão volumétrica do escoamento (m^3/s), W é a largura do canal (m) e h é a profundidade média da lâmina de fluido (m). No presente estudo, a largura do canal é de 0,30 m. Essa velocidade média foi utilizada como parâmetro hidráulico

global dos ensaios e no cálculo dos números adimensionais apresentados na caracterização experimental.

Para os ensaios conduzidos próximos à parede lateral, a vazão global Q_{global} , medida pelo método gravimétrico, representa a vazão total transportada pelo canal. Entretanto, devido aos efeitos tridimensionais induzidos pela proximidade da parede, o perfil de velocidade medido localmente pode não representar a distribuição transversal completa do escoamento. Por esse motivo, além da vazão global gravimétrica, foi realizada a integração dos perfis verticais de velocidade $u(y)$, obtidos pelas técnicas ópticas na posição transversal analisada.

Matematicamente, a integração vertical do perfil de velocidades permite obter a vazão por unidade de largura q_{local} , definida pela integral do perfil desde o fundo do canal ($y = 0$) até a superfície livre ($y = h$):

$$q_{local} = \int_0^h u(y) dy \quad (13)$$

Esse parâmetro representa a contribuição hidráulica associada ao perfil vertical medido na posição transversal analisada, sendo expresso em unidades de área por tempo (m^2/s).

Numericamente, essa grandeza foi determinada por meio da integração discreta do perfil de velocidades, utilizando a regra dos trapézios:

$$q_{local} \approx \sum_i \left(\frac{u_i + u_{i+1}}{2} \right) \Delta y \quad (14)$$

em que u_i representa a velocidade na cota vertical y_i , e Δy é o incremento espacial entre os pontos de medição.

Além disso, para fins de comparação com a vazão global medida experimentalmente pelo método gravimétrico, foi calculada uma vazão global equivalente estimada a partir do perfil local. Essa estimativa foi obtida multiplicando-se a vazão por unidade de largura pela largura total do canal: $Q_{eq,STIV} = q_{local}W$. Esse valor não representa uma medição direta da vazão total do canal, mas sim uma estimativa equivalente obtida a partir do perfil local de velocidades, utilizada apenas como referência comparativa em relação à vazão gravimétrica global.

Dessa forma, nos ensaios laterais, distinguem-se três grandezas hidráulicas: a vazão global experimental Q_{global} , obtida pelo método gravimétrico; a vazão por unidade de largura q_{local} , obtida pela integração vertical do perfil de velocidades; e a vazão global equivalente $Q_{eq,STIV}$, estimada a partir do perfil local para comparação com Q_{global} .

Essa abordagem permite caracterizar a região próxima à parede lateral sem assumir que a vazão global se distribui uniformemente ao longo de toda a largura do canal. Assim, a comparação entre $Q_{eq,STIV}$ e Q_{global} deve ser interpretada como uma comparação indicativa, uma vez que o perfil local medido próximo à parede não representa necessariamente toda a distribuição transversal de velocidades no canal.

Número de Froude

O número de Froude foi utilizado para avaliar a relação entre os efeitos inerciais e gravitacionais do escoamento, sendo particularmente relevante na análise da estabilidade da superfície livre. O número de Froude é definido por:

$$Fr = \frac{\bar{u}}{\sqrt{gh\cos\theta}} \quad (15)$$

em que g é a aceleração da gravidade (m/s^2) e h é a profundidade média do escoamento(m), θ é a inclinação do canal e $\bar{u}$ é a velocidade média do escoamento (m/s), obtida a partir da vazão global gravimétrica. Neste trabalho, os valores de (Fr) apresentados na caracterização experimental dos ensaios foram calculados com base nessa velocidade média gravimétrica. A comparação com o valor crítico (Fr_{min}), definido pelo critério teórico de geração de *roll waves*, foi utilizada apenas como referência complementar para avaliar a condição de instabilidade da superfície livre. Valores de (Fr) próximos ou superiores à unidade indicam condições favoráveis ao desenvolvimento de instabilidades superficiais, enquanto valores menores caracterizam escoamentos subcríticos.

Número de Reynolds para fluido Herschel–Bulkley

Para a caracterização do regime de escoamento em fluidos viscoplásticos, foi empregado o número de Reynolds generalizado para fluidos do tipo Herschel–Bulkley, conforme proposto por Haldenwang *et al.* (2002). Esse número adimensional considera explicitamente os efeitos da tensão limite de escoamento e do comportamento reológico não newtoniano do fluido, sendo expresso por:

$$Re_{HB} = \frac{8\rho\bar{u}^2}{\tau_0 + K_n \left(\frac{2\bar{u}}{R_h}\right)^n} \quad (16)$$

em que ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3), τ_0 é a tensão limite de escoamento (Pa), K_n é o coeficiente de consistência reológica ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$), n é o índice de comportamento reológico e R_h é o raio hidráulico do escoamento (m).

O raio hidráulico foi calculado a partir da geometria do canal retangular, de acordo com:

$$R_h = \frac{Wh}{2h + W} \quad (17)$$

sendo W a largura do canal (m) e h a profundidade média da lâmina de escoamento medida experimentalmente para cada ensaio (m).

O número de Reynolds Re_{HB} permite avaliar a predominância relativa entre efeitos inerciais e resistivos em escoamentos viscoplásticos, sendo utilizado neste trabalho para caracterizar o regime predominantemente laminar dos ensaios realizados e para fins comparativos entre diferentes condições experimentais.

2.4.3 Modelo matemático de *Roll Waves* e Critérios de Geração

O fenômeno das ondas de rolamento em escoamentos inclinados de fluidos viscoplásticos pode ser modelado a partir da formulação clássica das equações de conservação da massa e da quantidade de movimento. Para esse fim, assume-se que o fluido é incompressível e homogêneo, que o regime de escoamento é laminar e que há aderência na base do canal (condição de não deslizamento). A modelagem

também parte do princípio de que o canal é suficientemente largo para desprezar os efeitos laterais, permitindo uma abordagem bidimensional (x, z) .

Nesta seção, adota-se a notação clássica da formulação bidimensional de *roll waves*, em que x representa a direção longitudinal do escoamento e z a direção normal ao fundo do canal. Assim, a coordenada z desempenha, nesta formulação, o mesmo papel físico da coordenada y utilizada anteriormente na seção 2.4.1, na descrição do perfil vertical de velocidades.

A formulação emprega as mesmas premissas utilizadas em estudos clássicos como os de Liu e Mei (1994), Ng e Mei (1994) e Balmforth e Liu (2004), com adaptações para o comportamento Herschel-Bulkley conforme os trabalhos de Ferreira (2013) e Maciel *et al.* (2013).

2.4.3.1 Formulação governante do escoamento viscoplástico

A seguir, apresenta-se o sistema de equações de conservação (equações de Cauchy) em coordenadas cartesianas, que descreve o comportamento dinâmico do escoamento antes da etapa de calcular a média e adimensionalização. Assume-se, nesta formulação, um escoamento bidimensional no plano (x, z) , incompressível, homogêneo e laminar, em que u representa a componente de velocidade na direção longitudinal x , e w representa a componente de velocidade na direção normal ao fundo do canal z .

- Equação da conservação da massa:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (18)$$

- Equação da quantidade de movimento na direção longitudinal (x):

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g \sin \theta + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{xz}) \quad (19)$$

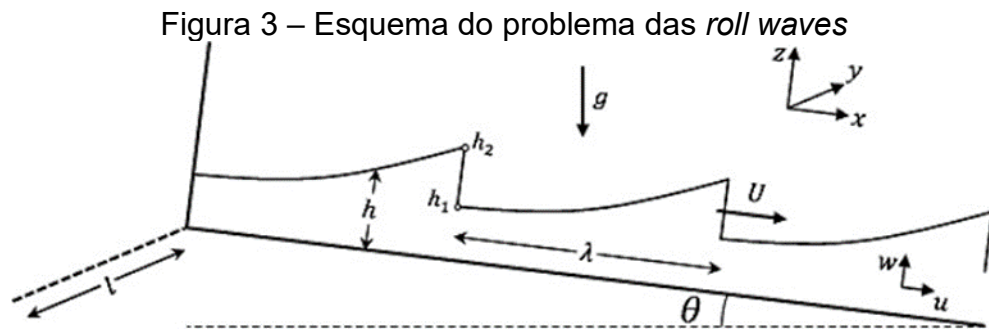
em que P representa a pressão no interior do escoamento, ρ é a massa específica do fluido, g é a aceleração da gravidade, θ é o ângulo de inclinação do canal e τ_{xz}

corresponde à componente do tensor de tensões associada ao cisalhamento na direção longitudinal x , com gradiente na direção vertical z .

- Equação da quantidade de movimento na direção vertical (z):

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \cos \theta \quad (20)$$

A Figura 3 apresenta uma representação esquemática do problema físico adotado para o desenvolvimento do modelo, com base nas hipóteses assumidas. Essa construção segue os princípios metodológicos introduzidos por Dressler (1949) para ondas gravitacionais em canais inclinados, os quais foram adaptados para fluidos não newtonianos por Ferreira (2013) e Maciel *et al.* (2013).



Fonte: Adaptado de Fiorot, (2012).

2.4.3.2 Cálculo da média em profundidade e forma adimensional

Após a definição do sistema físico e das equações diferenciais parciais, procede-se ao cálculo da média das equações ao longo da profundidade e sua posterior adimensionalização, resultando nas expressões abaixo:

- Equação de conservação da massa (forma adimensional):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}h)}{\partial x} = 0 \quad (21)$$

- Equação da quantidade de movimento (forma adimensional):

$$h \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \alpha \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{h}{Fr^2} \frac{\partial h}{\partial x} + (1 - \alpha) \bar{u} \frac{\partial h}{\partial t} = h - C^* - (1 - C^*) \left[\bar{u} h \frac{(1 - C^*)(n + 1 + nC^*)}{(h - C^*)((n + 1)h + nC^*)} \right]^n \quad (22)$$

Neste sistema, h representa a profundidade adimensional, $\bar{u}$ a velocidade média, Fr o número de Froude, C^* a fração da zona plug, n o índice de comportamento reológico e α o coeficiente de correção de velocidade.

2.4.3.3 Equação da *roll wave* em regime permanente

Resolvendo o sistema de Equações (21) e (22), obtém-se a equação da *roll wave* (Equação (23)), que é reescrita em um sistema móvel de coordenadas, que se desloca com a velocidade de propagação da *roll wave* ou celeridade (onda permanente):

$$\frac{\partial h}{\partial x'} = \frac{h - C^* - (1 - C^*) \left\{ \left[\frac{(1 + U(h - 1))(1 - C^*)}{h - C^*} \right] \left[\frac{(n + 1) + nC^*}{(n + 1)h + nC^*} \right] \right\}^n}{\left((\alpha - 1)U^2 - \frac{\alpha(1 - U)^2}{h^2} + \frac{h}{Fr^2} \right)} \quad (23)$$

A equação da onda de rolamento em regime permanente é então formulada no referencial móvel, com velocidade de propagação U , tal que $x' = x - Ut$ representa a abscissa em um sistema de coordenadas móvel, o qual se desloca com a mesma velocidade da onda (celeridade U). Esse sistema de referência é útil porque permite observar o perfil da onda como se estivesse "parado" em relação ao observador, facilitando a análise matemática do fenômeno, então U é a celeridade da *roll wave*, calculada através da Equação (24):

$$U = \alpha + [\alpha(\alpha - 1) + \frac{1}{Fr^2}]^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

A equação acima determina a velocidade com que a perturbação se propaga ao longo do canal. Ressalta-se que o sistema de equações apresenta caráter hiperbólico, sendo admissível soluções do tipo descontinuidade (choques hidráulicos), cuja análise requer a aplicação das condições de Rankine–Hugoniot (da dinâmica dos gases).

2.4.3.4 Primeiro critério de geração

A formação de ondas do tipo *roll wave* em escoamentos sobre superfícies inclinadas está associada a mecanismos de instabilidade que podem ser avaliados a partir de uma análise de estabilidade linear temporal. No caso de escoamentos de fluidos não newtonianos viscoplásticos descritos pelo modelo de Herschel-Bulkley, essa análise foi desenvolvida por Maciel *et al.* (2013), considerando o sistema de equações de águas rasas adaptado para esse tipo de fluido.

A primeira condição necessária para que essas instabilidades se desenvolvam na superfície livre do escoamento é estabelecida com base no valor crítico do número de Froude. Essa condição está expressa na forma:

$$Fr > Fr_{min} = \frac{\vartheta}{\sqrt{\varphi^2 - 2\alpha\varphi\vartheta + \alpha\vartheta^2}} \quad (25)$$

Em que os parâmetros φ e ϑ dependem do comportamento reológico do fluido e são dados por:

$$\varphi(n, C^*) = \frac{(n+1)(2n+1)}{(n+1+nC^*)} \quad (26)$$

$$\vartheta(n, C^*) = n(1 - C^*) \quad (27)$$

O número de Froude é calculado a partir da velocidade média do escoamento $\bar{u}_0$ e está relacionado à profundidade média h_0 e à inclinação do canal θ , conforme:

$$Fr = \frac{\bar{u}_0}{\sqrt{gh_0 \cos \theta}} \quad (28)$$

Já o parâmetro C^* representa a razão adimensional da tensão de escoamento sobre a força gravitacional atuante e é definido como:

$$C^* = \frac{\tau_0}{h_0 \rho g \sin(\theta)} \quad (29)$$

A velocidade média do escoamento $\bar{u}_0$ pode ser determinada a partir da expressão teórica baseada no perfil de velocidade de Herschel-Bulkley:

$$\bar{u}_0 = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\rho g \sin(\theta) z_0^{(n+1)}}{K_n} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{n+1+nC^*}{2n+1} \right) \quad (30)$$

O coeficiente de distribuição de velocidade α , que surge da integração vertical do perfil de velocidade, é dado por:

$$\alpha = \frac{(2n+1)}{(3n+2)} \frac{[2(n+1)^2 + C^*(4n+3)n]}{[(n+1)^2 + 2(n+1)nC^* + n^2(C^*)^2]} \quad (31)$$

Para aplicações práticas, é comum que a velocidade superficial do escoamento (u_s) seja medida diretamente a partir de imagens. Nesses casos, a velocidade média pode ser estimada por meio da seguinte relação empírica, também derivada do modelo reológico:

$$\bar{u}_0 = \left(\frac{2n+1}{n+1+nC^*} \right) u_s \quad (32)$$

É importante ressaltar que a condição $Fr > Fr_{min}$ constitui um critério necessário para o desenvolvimento de *roll waves*. No entanto, por si só, essa condição não garante a sua ocorrência, sendo necessária a análise de um segundo critério complementar, como discutido posteriormente (Ferreira, 2013).

2.4.3.5 Segundo critério de geração

Além da análise de estabilidade temporal discutida anteriormente, a formação de *roll waves* em escoamentos não newtonianos também pode ser avaliada por meio de uma análise de estabilidade linear espacial. Este segundo critério, conforme proposto por Ferreira (2013), considera as perturbações introduzidas no sistema ao longo da direção do escoamento, permitindo determinar as faixas de frequência nas quais as instabilidades podem crescer e se propagar.

O critério estabelece uma frequência crítica de excitação, acima da qual o sistema torna-se estável e a formação de *roll waves* é suprimida. A condição para que as ondas possam se desenvolver é expressa pela seguinte desigualdade:

$$f < f_c = \frac{|\omega_c|}{2\pi} \frac{\bar{u}}{h_0} \quad (33)$$

em que f representa a frequência da perturbação imposta, $\bar{u}$ é a velocidade média do escoamento e h_0 é a profundidade média da lâmina de fluido em regime uniforme.

O valor de ω_c , associado à frequência crítica angular, é definido como:

$$\omega_c = \frac{1}{2\alpha} \sqrt{\left(\alpha - \frac{1}{Fr^2}\right) \vartheta^2 - 2\alpha\vartheta\varphi} \quad (34)$$

sendo α o coeficiente de distribuição de velocidade (quantidade de movimento), Fr é o número de Froude do escoamento, φ e ϑ são parâmetros que dependem do índice de escoamento n e do parâmetro adimensional de tensão limite C^* , como definidos anteriormente.

Esse critério fornece um intervalo de frequências no qual a propagação de ondas instáveis é possível. Assim, ele serve como complemento ao primeiro critério, permitindo identificar não apenas se o escoamento está em uma condição propícia à formação de *roll waves*, mas também a faixa de frequências de perturbação favorável ao crescimento e à propagação desse comportamento ondulatório. A profundidade da região cisalhada do escoamento pode ser determinada pela seguinte equação:

$$z_0 = h_0 - \frac{\tau_c}{h_0 \rho g \sin(\theta)} \quad (35)$$

A utilização combinada dos dois critérios é essencial para prever, em tese, a ocorrência e o comportamento das *roll waves* em escoamentos inclinados de fluidos viscoplásticos.

2.5 LACUNAS NA LITERATURA E INSERÇÃO DO PRESENTE TRABALHO

Apesar dos avanços observados na modelagem reológica e no desenvolvimento de técnicas ópticas de medição, a literatura ainda carece de estudos experimentais integrados que abordem a caracterização cinemática de escoamentos viscoplásticos em canais inclinados, utilizando métodos não intrusivos aplicáveis a diferentes regimes de escoamento. Em particular, a obtenção confiável de perfis de velocidade ao longo da profundidade, bem como a análise comparativa entre condições de escoamento uniforme e com instabilidades superficiais, permanece como desafios relevantes.

Nesse contexto, o presente trabalho insere-se no campo da experimentação hidráulica aplicada a escoamentos não newtonianos, ao explorar a aplicação da técnica STIV para a obtenção de perfis de velocidade ao longo da profundidade em escoamentos viscoplásticos em canal inclinado. Dessa forma, busca-se contribuir para a consolidação de abordagens experimentais não intrusivas voltadas à análise cinemática de escoamentos complexos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais, o aparato experimental e a metodologia adotados para a investigação experimental dos perfis de velocidade em escoamentos viscoplásticos com superfície livre. O estudo foi conduzido por meio de experimentos em canal inclinado utilizando gel de Carbopol como fluido modelo, associado à aplicação da técnica de Velocimetria por Imagem de Espaço-Tempo (*STIV*) para a obtenção dos campos de velocidade ao longo da profundidade do escoamento.

Inicialmente, são descritos os procedimentos de preparação e caracterização reológica do fluido, fundamentais para a definição dos parâmetros do modelo constitutivo adotado. Em seguida, apresenta-se o aparato experimental, incluindo o canal, os sistemas de alimentação e medição, bem como o sistema óptico utilizado para a aquisição das imagens.

Posteriormente, detalham-se os procedimentos experimentais, a metodologia de aquisição e pré-processamento das imagens e as técnicas empregadas para a análise das imagens espaço-temporais, bem como os critérios adotados para a análise dos erros e validação dos resultados.

3.1 FLUIDO VISCOPLÁSTICO E CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA

O fluido utilizado nos experimentos foi selecionado de modo a garantir representatividade dos escoamentos viscoplásticos observados em processos industriais e em fenômenos naturais, como fluxos de lama e corridas de detritos. Para esse fim, foi empregado o gel de Carbopol 996, amplamente utilizado como fluido modelo na literatura devido ao seu comportamento viscoplástico bem definido, com presença de tensão limite de escoamento, conforme relatado por Piau (2007), Minussi e Maciel (2012), e Freydier *et al.* (2017).

O Carbopol 996 apresenta comportamento reológico descrito adequadamente pelo modelo de Herschel–Bulkley, o que o torna particularmente adequado para estudos envolvendo instabilidades superficiais e em particular *roll waves* em escoamentos com superfície livre.

3.1.1 Produção do gel de Carbopol

A produção do gel de Carbopol foi realizada a partir do polímero Carbopol 996, seguindo um protocolo cuidadosamente controlado para garantir a reprodutibilidade e estabilidade do material. A concentração mássica do gel adotada nos ensaios foi de 0,12%, valor previamente testado em estudos exploratórios e considerado adequado para a geração das instabilidades investigadas. A concentração mássica do Carbopol foi determinada conforme a Equação (36):

$$C_M = \frac{m_{carb}}{m_{H_2O} + m_{H_2O,neut} + m_{carb} + m_{NaOH}} \quad (36)$$

C_M – Concentração em massa de Carbopol;

m_{carb} – Massa de Carbopol;

m_{H_2O} – Massa de água utilizada na mistura com o Carbopol;

$m_{H_2O,neut}$ – Massa de água utilizada na solução de hidróxido de sódio;

m_{NaOH} – Massa de hidróxido de sódio.

Além disso, deve-se garantir a neutralização adequada do polímero. Para que isso ocorra é necessário que a massa de Hidróxido de Sódio seja 3,2 vezes menor que a massa do Carbopol 996, como apresentado na Equação (37):

$$taxa\ de\ neutralização = \frac{m_{carb}}{m_{NaOH}} \leq 3,2 \quad (37)$$

Essa condição assegura a ativação completa do polímero, promovendo a formação do gel com propriedades viscoplásticas estáveis.

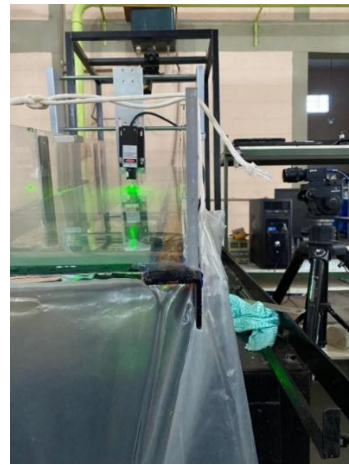
O processo de fabricação do gel foi dividido em duas etapas principais. Inicialmente, a água foi aquecida até aproximadamente 70 °C, de modo a facilitar a dispersão do polímero. O Carbopol 996 foi então adicionado lentamente sob agitação contínua, sendo a mistura mantida sob controle térmico por aproximadamente 12 horas, garantindo completa hidratação do polímero conforme ilustrado na Figura 4.

Na segunda etapa, foi adicionada gradualmente a solução de hidróxido de sódio (NaOH), previamente preparada, promovendo a neutralização do meio e a formação do gel final. Após essa etapa, a mistura foi cuidadosamente homogeneizada até a obtenção de um fluido visualmente uniforme e estável.

Figura 4 – (a) Produção de gel de Carbopol 996 com concentração mássica de 0,12%. (b) Gel de Carbopol 996 sobre canal inclinado



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Durante o desenvolvimento da pesquisa, foram realizadas duas produções independentes de fluido, cada uma com volume aproximado de 150 L, seguindo o mesmo protocolo de concentração (0,12%). Essa divisão foi necessária para garantir a integridade e a transparência do material, evitando o acúmulo de impurezas e a degradação mecânica associada ao cisalhamento contínuo imposto pelo sistema de bombeamento contínuo ao longo dos testes. O primeiro lote de 150 L foi utilizado exclusivamente para a primeira bateria de ensaios (ensaios de ortorretificação C_1 , C_2 e C_3). Após o uso prolongado deste volume nos ensaios, o material foi descartado e o segundo lote foi preparado para viabilizar a nova bateria de ensaios (ensaios C_4 , C_5 e C_6), focada na captura com câmera frontal para medições próximas às paredes do canal.

3.1.2 Adição de microtraçadores

Para possibilitar a aplicação da técnica STIV, foram adicionados microtraçadores (esferas de vidro com $10\ \mu\text{m}$ de diâmetro) ao gel, com o objetivo de proporcionar contraste adequado à iluminação do plano laser. A quantidade de partículas foi ajustada empiricamente durante os ensaios preliminares, até que a densidade visual registrada pela câmera fosse considerada adequada para o processamento das imagens, sem tornar a mistura opaca. A concentração final utilizada foi de aproximadamente $1,5 \times 10^{-5}\text{ g/g}$, equivalente a 0,0015% em massa. Observou-se

que as microesferas permaneceram em suspensão ao longo dos ensaios, acompanhando o movimento do escoamento sem tendência à flutuação ou sedimentação. Devido à baixa fração mássica empregada, considera-se que os microtraçadores não alteraram significativamente o comportamento reológico do Carbopol, atuando apenas como elementos de contraste óptico para a formação das estrias espaço-temporais utilizadas na técnica STIV.

3.1.3 Caracterização reológica

A caracterização reológica do gel de Carbopol 996 foi realizada com o objetivo de determinar os parâmetros fundamentais do modelo de Herschel–Bulkley: a tensão limite de escoamento (τ_0), o índice de consistência (K_n) e o índice de escoamento (n). Esses parâmetros são essenciais para a modelagem teórica do escoamento e para a comparação entre os perfis de velocidade experimentais e teóricos.

Os ensaios reológicos foram conduzidos utilizando o reômetro Brookfield R/S (Figura 5 (B)), operando em modo de taxa de cisalhamento controlada, com geometria coaxial (*spindle* CC-45) (Figura 5 (A)). A aquisição dos dados foi realizada por meio do software RHEO2000.

Figura 5 – Sistema de medição reologia: (A) Sistema CC 45; (B) Reômetro Brookfield R/S, (C) Computador de aquisição de dados



Fonte: Elaborado pelo Autor.

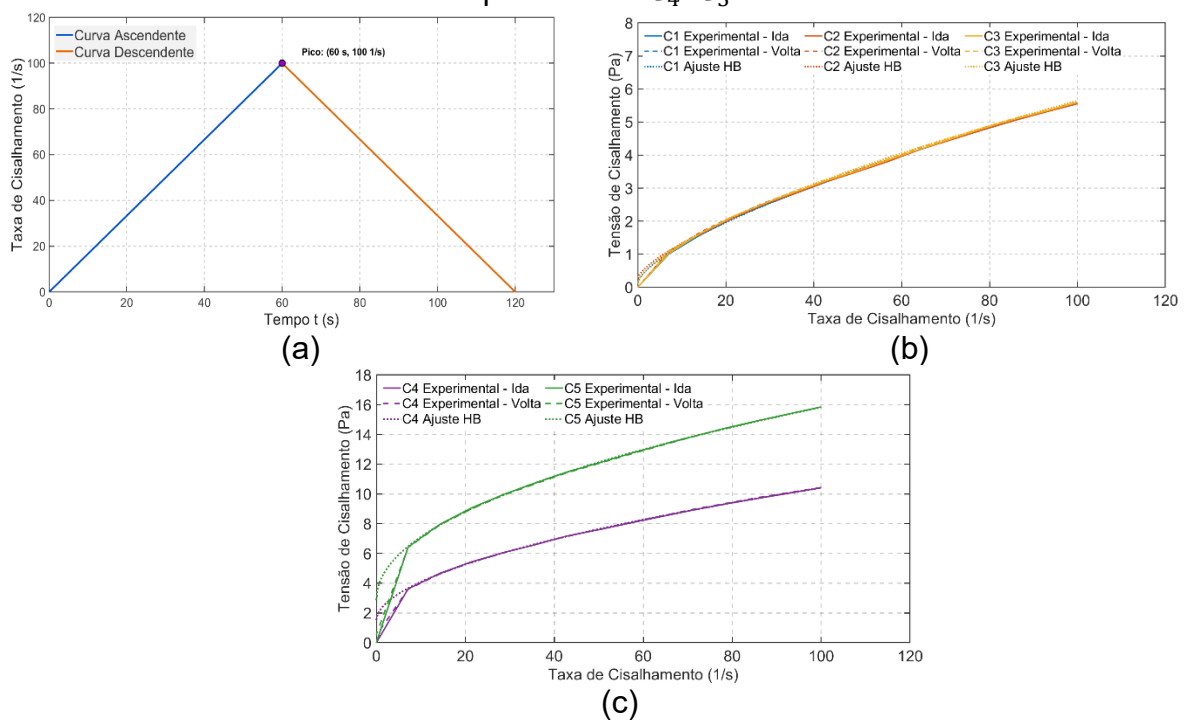
Conforme detalhado na seção anterior, para garantir a precisão da modelagem física frente à possível degradação mecânica do gel, a amostragem para

caracterização reológica foi realizada de forma simultaneamente aos ensaios no canal. As amostras foram coletadas e analisadas no mesmo dia em que os respectivos testes ópticos (C_1 a C_6) foram executados.

O procedimento consistiu em aplicar uma varredura de taxa de deformação de $1 < \dot{\gamma} < 100 \text{ s}^{-1}$, em dois estágios: rampa ascendente (com dados usados para o ajuste) e rampa descendente (para avaliar possíveis efeitos tixotrópicos). Devido às limitações de sensibilidade do equipamento em baixas taxas de deformação, os dados experimentais foram submetidos a um processo de filtragem antes da análise final.

A partir das curvas de fluxo obtidas, os parâmetros reológicos τ_0 , K_n e n foram determinados por meio do ajuste ao modelo de Herschel–Bulkley (Figura 6) em conformidade com a Equação (6), apresentada na Seção 2.1.2.2.

Figura 6 – Caracterização reológica: (a) protocolo de ensaio; (b) curvas de fluxo correspondentes aos experimentos C_1 – C_3 ; (c) curvas de fluxo correspondentes aos experimentos C_4 – C_5



Fonte: Elaborado pelo Autor

Nota: (Dados de reômetro Brookfield R/S e gráficos via MATLAB).

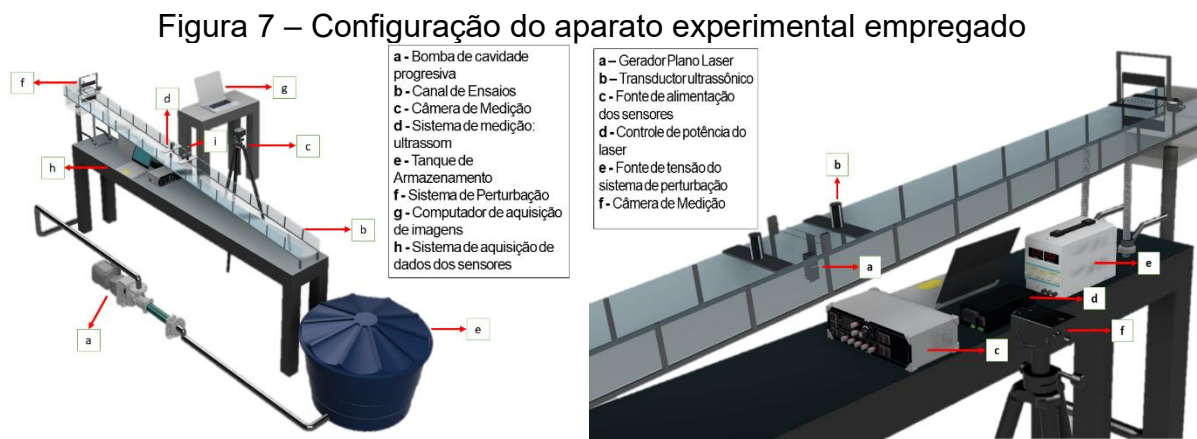
Os valores médios desses parâmetros, obtidos a partir de três repetições independentes dos ensaios reológicos, foram utilizados como dados de entrada na modelagem teórica do escoamento, bem como na análise comparativa com os perfis de velocidade determinados experimentalmente por meio da técnica STIV.

3.2 APARATO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados em um aparato experimental desenvolvido para a geração, estabilização e análise de escoamentos de fluidos não newtonianos viscoplásticos com superfície livre, permitindo a investigação de regimes uniformes e regimes com presença de instabilidades. O sistema experimental é composto por um canal retangular em acrílico transparente, inclinado a um ângulo ajustável., o que permite simular diferentes condições de declividade.

O canal é sustentado por uma estrutura metálica com ajuste de inclinação e integra sistemas de circulação e bombeamento do fluido, geração de perturbações, iluminação com plano laser, aquisição de imagens e controle eletrônico.

A Figura 7 apresenta uma visão geral do aparato experimental montado no Laboratório de Hidráulica da FEIS/UNESP, com destaque para os principais componentes que serão detalhados nas seções seguintes 3.2.1-3.2.3.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.2.1 Sistema de Circulação e bombeamento de fluido

O sistema de circulação foi projetado para garantir um escoamento contínuo, estável e com mínima introdução de perturbações indesejadas, condição essencial para a análise de instabilidades superficiais em fluidos viscoplásticos. O canal experimental é confeccionado em acrílico transparente, com 3,00 m de comprimento, 0,30 m de largura e espessura de parede de 5 mm, sendo montado sobre uma estrutura metálica que permite o ajuste contínuo do ângulo de inclinação.

A recirculação do fluido é realizada por meio de uma bomba de cavidade progressiva, do tipo deslocamento positivo, adequada ao bombeamento de fluidos de elevada viscosidade e comportamento não newtoniano, como o gel de Carbopol. Esse tipo de bomba minimiza a introdução de bolhas de ar e reduz flutuações indesejadas na vazão, contribuindo para a estabilidade do escoamento no interior do canal.

Figura 8 – Sistema de bombeamento utilizado no aparato experimental: (a) bomba helicoidal de cavidade progressiva e (b) inversor de frequência empregado no controle da rotação da bomba



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A bomba (Figura 8 (a)) é acoplada a um inversor de frequência (Figura 8 (b)), possibilitando o ajuste preciso da rotação do motor e, consequentemente, da vazão e da espessura da lâmina de escoamento. Essa configuração assegura condições experimentais reproduzíveis e reduz oscilações operacionais do sistema, fator relevante para a obtenção de imagens ópticas de boa qualidade.

3.2.2 Sistema de Perturbação

A geração controlada de perturbações superficiais é um aspecto fundamental para a formação de *roll waves* estáveis e reproduzíveis, permitindo a análise experimental de escoamentos viscoplásticos sob condições bem definidas. Ao longo do desenvolvimento do aparato experimental, diferentes configurações foram avaliadas, com o objetivo de aprimorar o controle e a repetibilidade das instabilidades geradas.

Inicialmente, foi empregado um sistema de perturbação baseado em pulsos de ar comprimido, no qual uma faca de ar posicionada na entrada do canal aplicava excitações periódicas sobre a superfície do escoamento. Embora esse sistema

permitisse a geração inicial de ondas superficiais, foram observadas limitações relacionadas à sensibilidade à pressão do ar e à baixa repetibilidade na geração das ondas, especialmente em condições de maior viscosidade e espessura da lâmina de fluido.

Com o intuito de superar essas limitações, foi implementado um novo sistema de perturbação mecânica, adotado como configuração principal nos ensaios apresentados neste trabalho. O sistema consiste em um conjunto de quatro hastes metálicas fixadas a um eixo rotativo, posicionadas na região superior do canal inclinado, de modo que entrem em contato periódico com a superfície do fluido. O eixo é acionado por um motor de corrente contínua (DC), cuja velocidade de rotação é controlada por meio de uma fonte de tensão regulável.

A fonte de alimentação permite o ajuste contínuo da tensão elétrica aplicada ao motor, sendo a tensão diretamente proporcional à velocidade de rotação do eixo e, conseqüentemente, à frequência de acionamento do sistema perturbador. Nos ensaios realizados com presença de instabilidades, o sistema foi operado com uma tensão de excitação de 10 V, valor definido experimentalmente por proporcionar a formação de ondas bem desenvolvidas ao longo do comprimento útil do canal e compatíveis com o sistema óptico de medição.

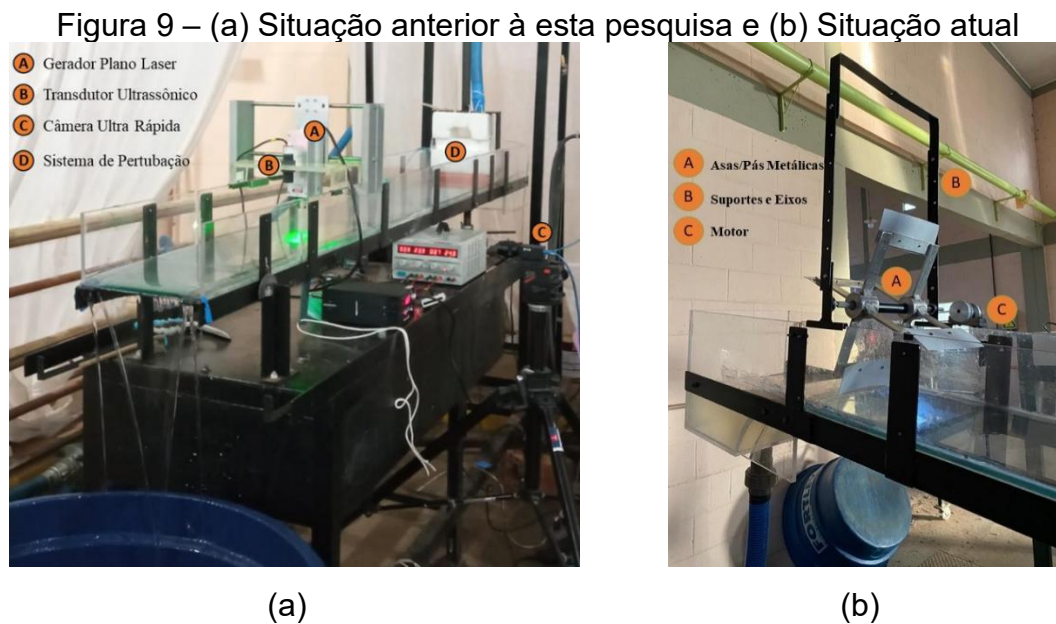
A frequência característica de perturbação adotada nos ensaios com geração de instabilidades na superfície livre deste trabalho foi definida a partir dos registros temporais da altura da lâmina de escoamento, $h(t)$, obtidos pelos sensores ultrassônicos. Como o sistema de hastes rotativas foi operado sempre com a mesma tensão de excitação, igual a 10 V, adotou-se uma frequência única de perturbação para os ensaios realizados, correspondente a aproximadamente 1,30 Hz.

Esse valor foi obtido a partir da análise dos sinais $h(t)$, considerando dois procedimentos complementares. Inicialmente, foi realizada a análise no domínio da frequência, por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT), na qual a frequência dominante foi identificada pelo pico principal do espectro de amplitude. De forma complementar, foi também estimado o período médio de passagem das cristas sucessivas das ondas, a partir dos intervalos de tempo entre cristas consecutivas, sendo a frequência calculada por $f = 1/T$. Os dois procedimentos indicaram valores “próximos”, da ordem de 1,30 Hz, sendo esse valor adotado como frequência característica de perturbação do sistema. Ainda assim, observou-se, no entanto, já

em meio à campanha de medição que a frequência dominante era da ordem de 1,30 Hz.

Entretanto, outras frequências ainda estavam presentes, indicando que, naquele ponto do canal, o trem de ondas não se encontrava completamente estabilizado. Dessa forma, o escoamento não foi caracterizado como um regime periódico plenamente desenvolvido de *roll waves*, mas sim como um regime transiente pulsado, com presença de cristas e vales de declividades acentuadas. Essas pulsações, por apresentarem características cinemáticas associadas às frentes de *roll waves*, foram exploradas ao longo deste trabalho.

A Figura 9 ilustra, respectivamente, o sistema anterior com jato de ar e o novo sistema com hastes rotativas.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.2.3 Sistema de instrumentação óptica e medição da lâmina

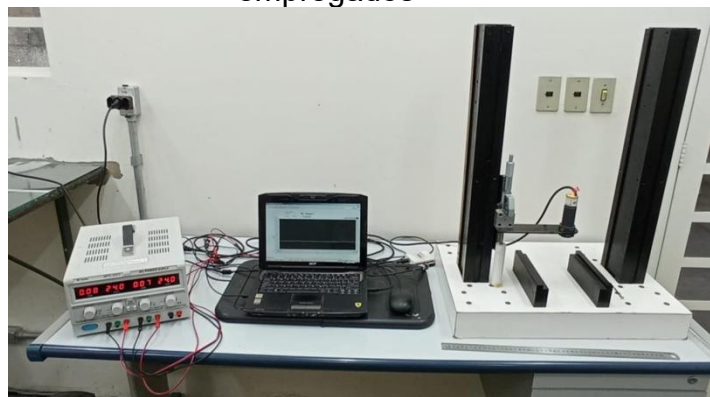
A caracterização da lâmina de escoamento é realizada por meio de um conjunto integrado de sensores ultrassônicos, sistema de iluminação por plano laser e câmera de alta velocidade. Esses elementos permitem a medição não intrusiva da profundidade do escoamento, bem como a aquisição das imagens necessárias para a aplicação da técnica STIV.

3.2.3.1 Sensores ultrassônicos

Para a medição não intrusiva da profundidade do escoamento, são utilizados dois transdutores ultrassônicos do modelo RPS-401A, operando com a técnica pulso-eco. Esses sensores permitem detectar tanto o escoamento em regime permanente quanto a presença e evolução das pulsações na superfície livre, preservando a integridade do escoamento por evitar contato direto com o fluido.

A disposição dos sensores ao longo do canal (um antes e outro após a região de interesse óptico) é planejada de forma a assegurar que a onda (pulsação) gerada evolua de uma chegada de crista, descida abrupta até o vale e assim sucessivamente ao atravessar o plano de medição a laser. A calibração dos transdutores é realizada a partir da correlação entre a tensão elétrica de saída e medições de referência obtidas com micrômetro, garantindo a confiabilidade dos dados adquiridos. A Figura 10 apresenta o processo de calibração obtido para os sensores ultrassônicos empregados.

Figura 10 – Processo de calibração dos sensores transdutores ultrassônicos empregados

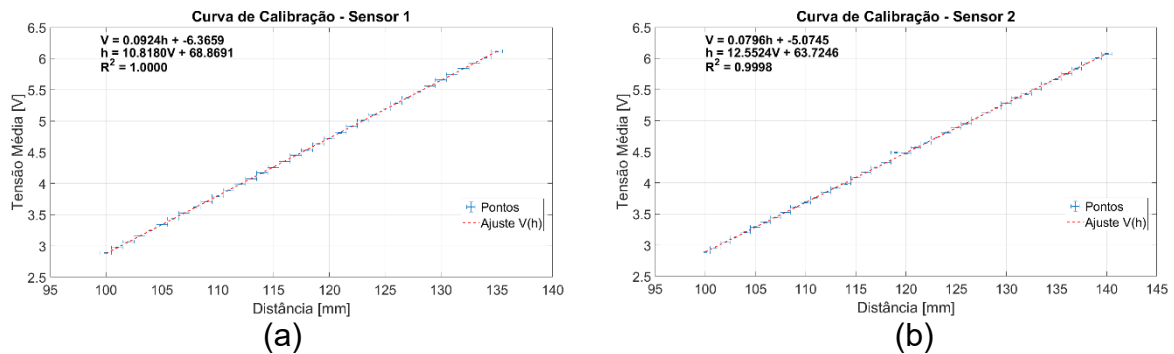


Fonte: Elaborado pelo Autor.

A calibração física ilustrada na Figura 10 foi realizada individualmente para os dois sensores empregados (identificados no laboratório como "Sensor 1" e "Sensor 2"), variando-se a altura em incrementos milimétricos. Os dados de tensão adquiridos foram processados em ambiente MATLAB, onde se calculou a incerteza de medição combinada (Δh), determinada pela combinação quadrática dos erros instrumentais da régua de referência (0,5 mm) e do micrômetro (0,01 mm). A Figura 11 apresenta as curvas de calibração obtidas, correlacionando a Tensão Média [V] com a Distância

[mm], incluindo as equações de ajuste linear utilizadas para a conversão entre tensão e altura e os respectivos coeficientes de determinação (R^2), evidenciando a excelente linearidade dos equipamentos.

Figura 11 – Curvas de calibração e análise de incerteza instrumental para os transdutores ultrassônicos: (a) Sensor 1; (b) Sensor 2



Fonte: Elaborado pelo Autor.

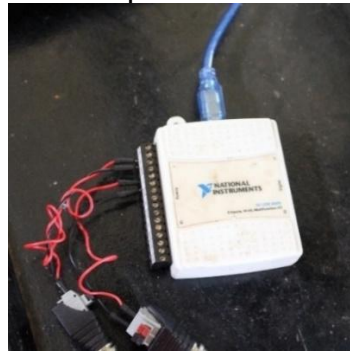
A calibração estática dos transdutores ultrassônicos (Figura 11) indicou boa precisão na medição da distância em condições controladas. Com base nessa calibração, os sensores foram utilizados para acompanhar a evolução temporal da profundidade da lâmina associada às pulsações na superfície livre. Para verificar a consistência das leituras durante a passagem das ondas, as profundidades de crista e vale foram comparadas com medições ópticas extraídas das imagens da câmera. Observou-se boa concordância entre os métodos, com discrepâncias máximas da ordem de 1 mm, correspondentes a aproximadamente 7%–11% das profundidades locais analisadas. Essas diferenças podem estar associadas aos distintos planos de medição, uma vez que os sensores registram a profundidade no centro da seção transversal, enquanto a câmera registra a lâmina junto à parede de acrílico, região sujeita a efeitos ópticos e de tensão superficial.

A interface de aquisição dos sinais dos sensores é implementada por meio do software LabVIEW, em conjunto com uma placa de aquisição de dados USB-6009 da National Instruments. Essa placa realiza a conversão analógico–digital do sinal de tensão proveniente dos transdutores, permitindo o registro contínuo e sincronizado das medições de altura da lâmina ao longo do tempo. A taxa de aquisição utilizada foi fixada em 100 Hz, valor previamente validado em estudos experimentais semelhantes

(Cunha, 2013; Fiorot, 2012) e considerado adequado para a captura das variações temporais associadas à dinâmica da superfície livre.

A Figura 12 apresenta a placa de aquisição USB-6009 utilizada nos experimentos, responsável pela interface entre os sensores ultrassônicos e o sistema computacional de aquisição e armazenamento dos dados.

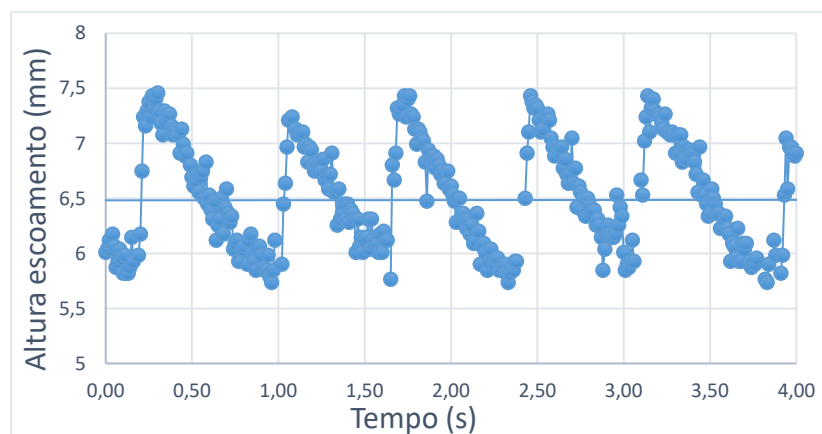
Figura 12 – Placa de aquisição de dados USB-6009 utilizada no sistema experimental



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Através desse sistema, torna-se possível monitorar e registrar a evolução temporal da lâmina de escoamento, tanto em regime permanente quanto na presença de instabilidades superficiais. Um exemplo típico do sinal de altura associado a ondas ao longo do tempo é apresentado na Figura 13, evidenciando a capacidade do sistema em capturar a dinâmica superficial.

Figura 13 – Evolução temporal da lâmina de escoamento na presença de regime quase estabilizado



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.2.3.2 Gerador de plano laser

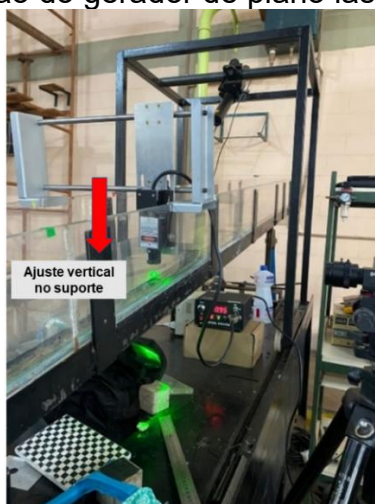
O sistema de geração de plano laser constitui um elemento fundamental para a aplicação da técnica de Velocimetria por Imagem Espaço-Temporal (STIV), sendo responsável por iluminar uma seção longitudinal do escoamento de forma controlada e uniforme, possibilitando o rastreamento óptico dos microtraçadores ao longo do tempo.

Na configuração inicial do aparato experimental, foi empregado um laser de estado sólido de alta potência (2,5 W) e comprimento de onda de 532 nm (verde), capaz de gerar um plano óptico com espessura entre 1 e 2 mm, adequado à largura total do canal experimental (30 cm). Entretanto, esse equipamento foi desativado em razão de falhas técnicas ocorridas durante a fase experimental.

Na etapa atual da pesquisa, passou-se a utilizar um laser alternativo de menor potência (450 mW), o que exigiu adaptações no sistema de iluminação a fim de manter a qualidade das imagens adquiridas. Para esse fim, foi desenvolvido um novo suporte mecânico, projetado para permitir o ajuste fino da posição do laser em altura e inclinação, possibilitando a aproximação do plano luminoso à superfície do escoamento e reduzindo perdas de intensidade associadas à dispersão do feixe e à refração na interface ar-fluido.

A Figura 14 apresenta a configuração atual do gerador de plano laser, evidenciando o novo sistema de suporte com ajuste vertical, desenvolvido com o objetivo de posicionar a iluminação mais próxima da superfície livre do escoamento.

Figura 14 – Nova configuração do gerador de plano laser com suporte ajustável



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Uso de Lentes Permutáveis

Para contornar a limitação de potência do laser e otimizar a iluminação do escoamento, foram utilizadas lentes com diferentes ângulos de abertura, selecionadas de acordo com as condições específicas de cada ensaio:

- No ensaio a 5 cm da parede (C_4 a 500 rpm), utilizou-se uma lente de 10° , que concentra a luz em uma região espacial mais restrita, garantindo maior intensidade luminosa e melhor visualização dos microtraçadores.
- Para as medições com maiores velocidades do escoamento, realizadas a 5 cm e 10 cm da parede (ensaio C_5 e C_6 , a 600rpm), utilizou-se uma lente de 30° , ampliando a área iluminada na direção do escoamento e permitindo o rastreamento de partículas por um intervalo espacial maior antes de deixarem o campo de visão da câmera.

Posicionamento do Plano Laser e Ortorretificação

A combinação entre a menor potência do laser e a opacidade do fluido exigiu estratégias distintas de posicionamento, o que impactou diretamente a forma de captura das imagens pela câmera:

- Ensaio na região central (C_1 a C_3): O plano laser foi posicionado no centro do canal, a aproximadamente 15 cm da parede lateral. Devido à atenuação da luz no interior do fluido, a câmera foi posicionada externamente, com visada lateral e em um ângulo em relação ao plano iluminado, de modo a possibilitar a visualização do plano laser no interior da lâmina de escoamento. Essa configuração de aquisição, não perpendicular ao plano de medição, introduziu distorções geométricas associadas à perspectiva. Dessa forma, as imagens foram obrigatoriamente submetidas a correções geométricas por meio do processo de ortorretificação (descrito na Seção 3.5), a fim de garantir a fidelidade e a consistência espacial das medições ao longo da profundidade.
- Ensaio próximos à parede (C_4 , C_5 e C_6): Para estes ensaios, o plano laser foi posicionado mais próximo à parede (a 5 cm e a 10 cm do bordo). Com o laser recuado para as laterais, a câmera pôde ser montada de forma frontal ao escoamento. Essa escolha visou reduzir a distância óptica entre o plano iluminado e a câmera de aquisição, melhorando a visualização das estrias

superficiais em razão da menor potência do laser e da opacidade do fluido viscoplástico. Como a câmera já se encontrava posicionada de forma frontal e perfeitamente alinhada à direção do fluxo, as imagens não sofreram as distorções de perspectiva angular observadas na visada lateral. Por esse motivo, o processo de ortorretificação não foi necessário nessas condições específicas.

3.2.3.3 Câmera de Medição de Escoamento

A técnica de velocimetria utilizada (STIV) requer, além de um gerador de plano laser, o uso de uma câmera com capacidade de ajuste manual de foco e aquisição de imagens com elevada taxa de amostragem (*fps* – *frames per second*). Embora seja possível realizar aquisições de imagens com baixo *fps* ($fps < 100$), em casos de escoamentos de elevada velocidade as imagens resultantes da técnica de velocimetria STIV 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 emprega um equipamento de medição de escoamento (câmera GS3 FLIR de *fps* variável de acordo com o quadro amostrado e lente de 30 mm). A dimensão dos quadros de filmagem foi tal que seja capaz de captar toda a espessura do escoamento e garantir $fps \cong 300$.

Para a definição da escala espacial das imagens, necessária à conversão das inclinações das estrias em velocidades físicas, foi empregada uma malha de calibração constituída por um papel milimetrado com espaçamento regular de 10×10 mm, fixado a um suporte rígido. A estratégia de posicionamento dessa malha variou de acordo com o tipo de ensaio realizado, conforme descrito na Seção 3.5.

Para a operação da câmera, utilizou-se o software Point Grey FlyCap2, responsável pela configuração da área de captura, da taxa de quadros por segundo, da duração das filmagens e do formato dos arquivos gerados. As sequências de imagens obtidas foram posteriormente submetidas às etapas de pré-processamento e análise por técnicas de processamento digital de imagens, com ênfase na aplicação da técnica STIV, conforme detalhado nas seções seguintes.

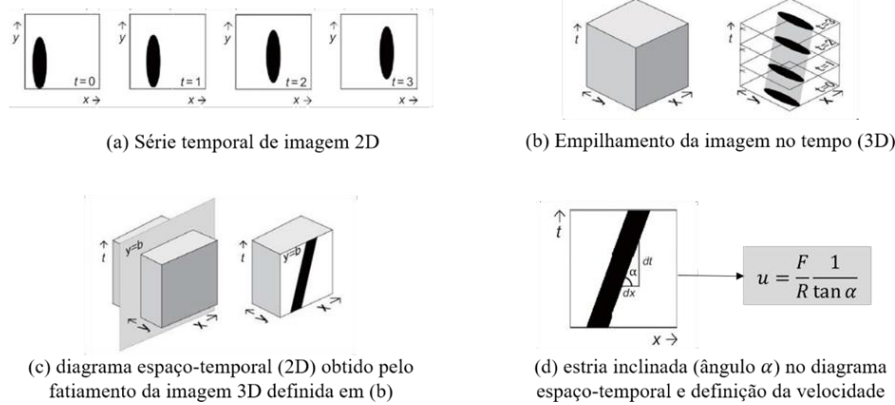
3.3 TÉCNICA DE VELOCIMETRIA: SPACE-TIME IMAGE VELOCIMETRY

A técnica de Velocimetria *Space-Time Image Velocimetry* (STIV) baseia-se na análise de imagens espaço-temporais (*Space-Time Images – STI*), que são representações bidimensionais contendo simultaneamente informações espaciais e temporais do escoamento. Essas imagens são construídas a partir da variação de intensidade de brilho ao longo de uma linha de análise previamente definida, a qual pode estar localizada tanto na superfície quanto no interior da lâmina de escoamento. Embora a técnica STIV tenha sido originalmente desenvolvida para medições de velocidade superficial (FUJITA *et al.*, 2007), neste trabalho ela é estendida para a obtenção de perfis de velocidade ao longo da profundidade do escoamento.

No presente estudo, a técnica STIV é empregada para a determinação do perfil de velocidade em escoamentos viscoplásticos de Carbopol, tanto em regime permanente uniforme quanto na presença de instabilidades superficiais. O escoamento é monitorado por meio de uma câmera de alta velocidade, operando a uma taxa de aquisição da ordem de 300 quadros por segundo (*fps*). Os vídeos obtidos experimentalmente são posteriormente processados quadro a quadro, de modo a permitir a construção das imagens STI por meio de rotinas computacionais desenvolvidas em ambiente MATLAB.

A imagem STI consiste essencialmente em um diagrama espaço-temporal, obtido pelo empilhamento, ao longo do tempo, dos níveis de brilho registrados ao longo de um comprimento espacial fixo do escoamento. A Figura 15 ilustra de forma esquemática o princípio de funcionamento da técnica STIV, evidenciando a formação das estrias inclinadas que representam o deslocamento das estruturas do escoamento ao longo do tempo.

Figura 15 – Ilustração do princípio de funcionamento da técnica STIV



Fonte: Adaptado de Tsubaki, (2017).

A partir da medição do ângulo das estrias (representa a advecção do brilho das partículas de traçadores – uso de microesferas de vidro de granulometria na faixa de 10 a 50 μm) presentes nas imagens STI, é possível quantificar a velocidade em diferentes profundidades do escoamento conforme Equação (38):

$$u(y) = \frac{1}{\tan \alpha} \left(\frac{fps}{Res} \right) \quad (38)$$

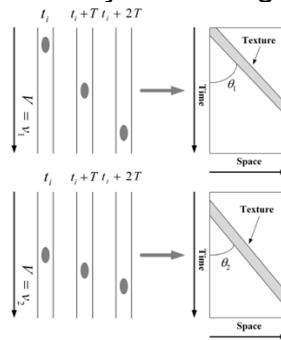
em que $u(y)$ é a velocidade ao longo de uma dada profundidade y do escoamento; α a inclinação das estrias da imagem STI; $Res.$ a resolução da imagem e fps a frequência de captura da imagem durante as filmagens.

A técnica STIV foi desenvolvida por Fujita *et al.* (2007) e vem sendo empregado principalmente para medição de vazão e velocidade superficiais em rios, apresentando resultados comparáveis aos obtidos por técnicas consagradas como o ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*), ondas de rádio e até mesmo a técnica de imagem LSPIV (*Large Scale Particle Image Velocimetry*) (Aberle *et al.*, 2017).

A técnica STIV apresenta vantagens em relação a outros métodos de medição de velocidade, como o PIV (*Particle Image Velocimetry*) e o LDA (*Laser Doppler Anemometry*), destacando-se a simplicidade experimental, possibilidade de aplicação em campo e caráter não intrusivo, além de permitir a análise espaço-temporal do escoamento com equipamentos relativamente simples (Muste *et al.*, 2011; Tauro *et al.*, 2018). Além disso, sua capacidade de capturar informações espaço-temporais torna-a especialmente útil na análise de escoamentos com estruturas instáveis ou padrões periódicos, como ocorre em fluidos não newtonianos (Muste *et al.*, 2008).

Como ilustração adicional, para facilitar o entendimento da imagem STI, é apresentado na Figura 16, na qual Lu, Yang e Wang (2023) ilustram o diagrama esquemático do princípio de geração da imagem espaço-temporal, exibindo as posições de movimento das características do fluxo no rio em três momentos ($t_i, t_i + T, t_i + 2T$) e diferentes velocidades de fluxo (v_1 e v_2). Devido a $v_1 > v_2$, o MOT (ângulo de movimento no espaço-tempo) na imagem espaço-temporal gerada é $\theta_1 > \theta_2$. A velocidade do escoamento e o ângulo da imagem espaço-temporal estão em correspondência mútua. Portanto, o rastreamento e a medição da velocidade do escoamento podem ser alcançados detectando o MOT (*Motion Orientation in Time-Space*) na imagem espaço-temporal. A chave para a medição da velocidade do fluxo é detectar o MOT.

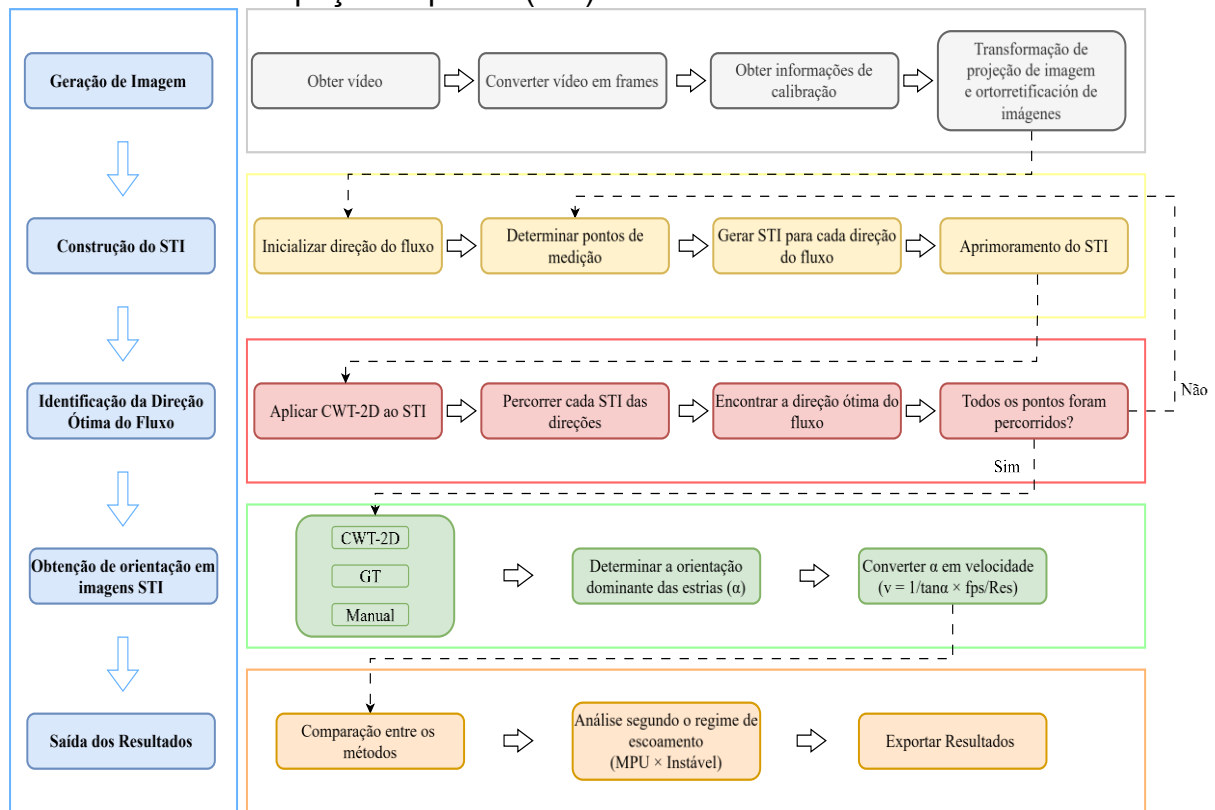
Figura 16 – Outro tipo de formação da imagem espaço-temporal



Fonte: (LU et al., 2023).

A Figura 17 apresenta um fluxograma que resume o processo metodológico empregado para a análise de imagens espaço-temporais (STI) por meio da técnica de *Space-Time Image Velocimetry* (STIV).

Figura 17 – Fluxograma do procedimento metodológico para análise de imagens espaço-temporais (STI) utilizando a técnica STIV.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Inicialmente, os vídeos são adquiridos a partir de experimentos realizados com o auxílio de uma câmera de alta velocidade. Em seguida, são obtidas as informações de calibração, tais como a resolução espacial da imagem e a taxa de aquisição (*fps*), e os vídeos são convertidos em quadros individuais. Para os ensaios em regime permanente uniforme (MPU), é realizada a transformação de projeção e o processo de ortorretificação da imagem, de modo a garantir a correta correspondência espacial entre a imagem adquirida e o plano físico do escoamento. Por outro lado, nos ensaios focados nas ondulações e regiões próximas à parede (C_4 a C_6), a configuração frontal da câmera dispensou a aplicação desse procedimento, conforme descrito nas Seções 3.2.3.2. e 3.5

A construção das imagens STI é realizada a partir da seleção de uma linha de pixels na região de interesse (ROI), empilhando-se as intensidades de brilho correspondentes ao longo do tempo, resultando em um diagrama espaço-temporal representativo do escoamento. Após a geração das imagens STI, podem ser aplicadas rotinas de pré-processamento e realce de contraste, quando necessário,

com o objetivo de melhorar a definição das estrias associadas ao movimento dos microtraçadores.

A identificação da orientação dominante dessas estrias é realizada por diferentes abordagens, incluindo a Transformada Wavelet Contínua Bidimensional (CWT-2D), o método do Gradiente Tensorial e a medição manual, utilizada como referência. A partir da orientação dominante estimada em cada imagem STI, os valores de velocidade são calculados conforme a relação geométrica da técnica STIV, permitindo a construção dos perfis de velocidade ao longo da profundidade do escoamento.

Por fim, os resultados obtidos são comparados entre os diferentes métodos de extração de ângulo e analisados em distintos regimes de escoamento, incluindo o regime permanente uniforme e o regime instável ou perturbado, permitindo avaliar o desempenho da técnica e interpretar os fenômenos físicos associados.

3.4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção são descritos os procedimentos adotados para a determinação das principais grandezas hidráulicas do escoamento, incluindo vazão, velocidade superficial e espessura da lâmina de fluido, fundamentais para a análise e interpretação dos resultados experimentais.

3.4.1 Determinação da vazão (método gravimétrico)

A vazão do escoamento foi determinada por meio do método gravimétrico, no qual o fluido escoado é coletado durante um intervalo de tempo conhecido, medido com o auxílio de um cronômetro digital. A massa do fluido coletado foi medida utilizando uma balança digital, sendo posteriormente convertida em volume a partir da massa específica do fluido.

A vazão volumétrica Q_{global} foi calculada pela Equação (39):

$$Q_{global} = \frac{m}{\rho \Delta t} \quad (39)$$

em que m é a massa do fluido coletado (kg), ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3) e Δt é o tempo de coleta (s), medido por cronômetro.

Os valores de vazão foram expressos tanto em metros cúbicos por segundo (m^3/s) quanto em litros por segundo (L/s), por meio da conversão direta de unidades. Para cada condição experimental, o procedimento de medição da vazão foi repetido dez vezes, sendo adotado como valor representativo a média aritmética das medições realizadas, com o objetivo de reduzir a influência de flutuações pontuais e incertezas associadas ao processo de coleta.

3.4.2 Medição da velocidade superficial

A velocidade superficial do escoamento foi estimada por meio do método do flutuador, utilizando pequenos elementos flutuantes leves (isopor), posicionados cuidadosamente sobre a superfície do fluido. O deslocamento do flutuador foi monitorado ao longo de um comprimento previamente definido do canal.

Para esse procedimento, foram marcados dois pontos fixos no canal, separados por uma distância de $L = 1,0\ m$. O tempo de percurso Δt foi medido com o auxílio de um cronômetro, sendo iniciado quando o flutuador cruzava o ponto inicial e interrompido ao cruzar o ponto final.

A velocidade superficial média u_s foi calculada conforme a Equação (40):

$$u_s = \frac{L}{\Delta t} \quad (40)$$

em que L é a distância percorrida pelo flutuador (m) e Δt é o tempo de percurso (s). Os valores de velocidade superficial foram expressos em metros por segundo (m/s) e, adicionalmente, em milímetros por segundo (mm/s).

Em cada condição experimental, a medição da velocidade superficial foi repetida dez vezes, sendo considerado como valor final a média aritmética dos tempos medidos, de forma a obter uma estimativa mais representativa da velocidade superficial do escoamento.

Para garantir coerência entre a velocidade superficial medida e a região analisada pela técnica STIV, a posição transversal de lançamento do flutuador foi

definida de acordo com o plano de iluminação do laser. Nos ensaios C_1 a C_3 , o flutuador foi posicionado na região central do canal, a aproximadamente 15 cm da parede lateral. Já nos ensaios C_4 , C_5 e C_6 , o posicionamento foi ajustado para 5 cm e 10 cm da parede, respectivamente, coincidindo com a coordenada transversal do plano luminoso analisado, garantindo coerência geométrica entre a medição da velocidade superficial e a região analisada pela técnica STIV.

3.4.3 Medição da espessura da lâmina de escoamento

A determinação da espessura da lâmina de fluido h constitui um parâmetro fundamental para a caracterização hidráulica do escoamento e para a modelagem dos perfis de velocidade. O procedimento de medição foi definido em função do regime de escoamento, adotando-se uma abordagem combinada baseada em medições ultrassônicas e análise geométrica por imagens.

O aparato experimental conta com sensores ultrassônicos posicionados a montante e a jusante da região de interesse óptico, onde se encontram o plano laser e a câmera de alta velocidade. Esses sensores permitem monitorar a evolução espacial do escoamento e verificar sua estabilização antes da região de análise.

Para os ensaios em regime permanente uniforme, incluindo as condições iniciais dos ensaios C_4 , C_5 e C_6 antes da produção das instabilidades, a espessura da lâmina foi determinada a partir da média temporal dos sinais fornecidos pelos sensores ultrassônicos, após a estabilização do escoamento. Devido à natureza aproximadamente plana da superfície livre nesse regime, essa abordagem fornece uma estimativa representativa da profundidade média da lâmina.

Nos ensaios em regime transiente, com presença de ondulações íngremes, os sensores ultrassônicos, fixados em determinadas posições, foram utilizados para caracterizar a dinâmica global do escoamento, permitindo acompanhar a variação temporal da lâmina ao longo do tempo. Contudo, devido à dispersão do feixe acústico na superfície curva da onda, que pode subestimar pontualmente a altura real, realizou-se paralelamente uma análise geométrica a partir das imagens adquiridas pela câmera de alta velocidade, com o objetivo de avaliar a altura do escoamento conforme observada diretamente no plano de medição.

Para a análise óptica, foi utilizada uma malha de calibração rígida (1×1 mm), posicionada no plano de medição, permitindo a conversão de pixels em unidades

físicas no software ImageJ. A partir dos quadros de vídeo, foram identificados os instantes correspondentes à passagem da crista e do vale das ondas pelo campo de visão. Em seguida, mediu-se a distância perpendicular entre o fundo do canal e a superfície livre, obtendo-se a espessura local da lâmina.

A comparação entre as medições ultrassônicas e a análise óptica permitiu assegurar consistência entre a resposta global do escoamento e a geometria local observada. Dessa forma, a identificação das alturas características da onda, correspondentes à crista (h_{max}) e o vale (h_{min}), foi baseada na análise direta das imagens calibradas, garantindo coerência entre os parâmetros geométricos adotados e a região efetivamente analisada pela técnica STIV.

Essa abordagem combinada permite integrar a confiabilidade das medições em regime permanente com a representatividade geométrica necessária para a caracterização detalhada dos escoamentos não estacionários.

3.5 AQUISIÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Esta seção descreve os procedimentos adotados para a aquisição das imagens utilizadas na técnica de *Space-Time Image Velocimetry* (STIV), bem como as etapas de calibração espacial e pré-processamento necessárias para garantir a qualidade e a confiabilidade dos dados extraídos. As rotinas aqui apresentadas têm como objetivo assegurar que as imagens espaço-temporais (STI) representem adequadamente o comportamento do escoamento, tanto em regime permanente uniforme quanto em condições transientes.

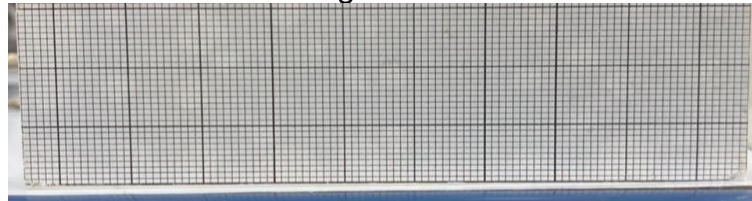
As imagens foram obtidas a partir de sequências adquiridas com câmera de alta velocidade, conforme descrito na Seção 3.2.3.3. A partir dessas sequências, foram selecionadas regiões de interesse (ROI) compatíveis com a posição do plano laser e com a geometria do canal, garantindo que a análise fosse realizada sempre sob condições ópticas consistentes.

Devido às diferenças nas configurações experimentais, especialmente em função da posição do plano laser, da potência de iluminação disponível e da opacidade do fluido, foram adotadas estratégias distintas para a calibração espacial e para o tratamento das imagens nos ensaios em regime permanente uniforme e naqueles com presença de instabilidades. Essas abordagens são detalhadas a seguir.

3.5.1 Imagem de Referência e Calibração Espacial

A calibração espacial das imagens constitui uma etapa fundamental para a aplicação da técnica STIV, uma vez que permite a conversão das inclinações das estrias observadas nas imagens espaço-temporais em velocidades físicas. Para esse fim, foi empregada uma malha de calibração (Figura 18), composta por papel milimetrado com espaçamento regular de 1×1 mm, fixado a um suporte rígido, utilizada para a obtenção das imagens de referência.

Figura 18 – Malha de calibração utilizada para a definição da escala espacial das imagens



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nos ensaios conduzidos em regime permanente uniforme (MPU), a malha de calibração foi submersa diretamente na lâmina de fluido, posicionada na região iluminada pelo plano laser. Esse procedimento foi adotado para que a imagem de calibração representasse as mesmas condições ópticas observadas durante os ensaios, considerando a presença do fluido entre a câmera e o plano de medição. Como a região analisada estava localizada na parte central do canal, aproximadamente a 15 cm da parede lateral, a visualização do plano iluminado envolvia efeitos de refração, reflexão e perspectiva associados à passagem da luz pelas paredes de acrílico e pela lâmina de fluido. Dessa forma, a utilização da malha submersa permitiu calibrar a imagem no próprio plano físico de medição, reduzindo diferenças entre a posição aparente da referência e a posição real do escoamento analisado.

Nos ensaios centrais (C_1 , C_2 e C_3), a câmera foi posicionada lateralmente ao canal, com visada em profundidade, para visualizar o plano luminoso localizado na região central do escoamento. Essa geometria de aquisição introduziu distorções de perspectiva associadas ao ângulo de observação, tornando necessária a aquisição de uma imagem de referência da malha submersa no próprio plano de medição. Essa imagem permitiu a posterior aplicação do processo de ortorretificação, conforme

descrito na Seção 3.5.2, garantindo a correspondência adequada entre o plano físico do escoamento e o plano da imagem.

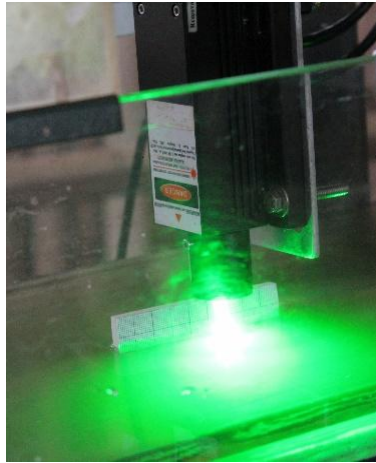
Nos ensaios com instabilidades superficiais (C_4 , C_5 e C_6), adotou-se uma estratégia distinta: o plano laser foi posicionado próximo à parede lateral do canal, a 5 cm e 10 cm, permitindo a aquisição frontal das imagens, com a câmera alinhada ao plano iluminado. Nessa configuração, as distorções de perspectiva foram reduzidas, dispensando a aplicação da ortorretificação.

Além disso, devido à menor potência do laser e à opacidade do fluido viscoplástico, não foi viável realizar ensaios em regime transiente utilizando simultaneamente a malha de calibração submersa e o plano de iluminação central. A presença da malha, associada aos efeitos de reflexão e refração da luz nas interfaces entre o acrílico lateral, o fundo de vidro, o fluido e o ar, bem como à dinâmica da superfície livre instável, dificultavam a visualização das estrias e comprometia a qualidade das imagens. Dessa forma, optou-se por adquirir a imagem de calibração antes do início do escoamento, com a malha posicionada no plano de medição e sem a presença do fluido.

Após a aquisição da imagem de referência, a malha foi removida e o escoamento foi iniciado, mantendo-se inalteradas a posição da câmera e a configuração do sistema óptico. Essa abordagem garantiu a consistência da escala espacial entre a imagem de referência e as imagens do escoamento, sem comprometer a qualidade da visualização das estrias durante os ensaios em regime perturbado.

A Figura 19 apresenta exemplos das imagens de referência utilizadas em cada configuração experimental.

Figura 19 – (a) imagem da malha de calibração submersa no fluido para ensaios em regime permanente uniforme; (b) imagem da malha de calibração posicionada previamente ao escoamento para o ensaio com ondas



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.5.2 Transformação de projeção e ortorretificação das imagens

Devido à configuração geométrica do sistema óptico nos ensaios em regime permanente uniforme (MPU), em que a câmera foi posicionada lateralmente ao canal para possibilitar a visualização do plano laser na região central do escoamento, as imagens adquiridas apresentaram distorções de perspectiva associadas à projeção oblíqua. Nessas condições, o plano de medição não é paralelo ao plano da imagem, comprometendo a correspondência direta entre distâncias em pixels e dimensões físicas reais.

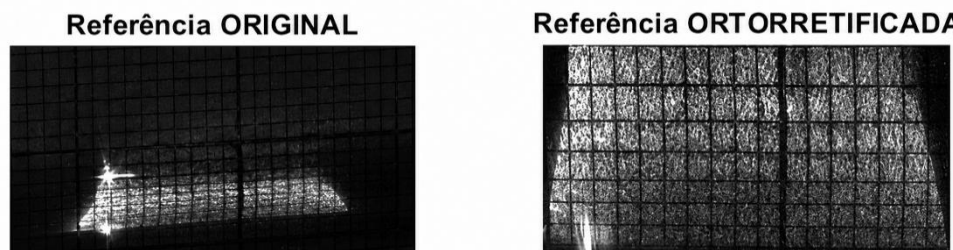
Para corrigir essas distorções, foi desenvolvido um procedimento de ortorretificação em ambiente MATLAB, baseado na aplicação de uma transformação projetiva (homografia). Inicialmente, foram selecionados manualmente quatro pontos de controle na imagem de referência da malha de calibração, correspondentes aos vértices de uma região retangular conhecida. Esses pontos, definidos no plano da imagem, foram associados às suas respectivas coordenadas no plano físico do escoamento.

A partir dessas correspondências, foi calculada a matriz de transformação projetiva por meio da função *fitgeotrans*, permitindo estabelecer o mapeamento entre o sistema de coordenadas da imagem e o sistema físico real. Em seguida, a

transformação foi aplicada às imagens utilizando a função *imwarp*, com definição explícita do sistema de saída (*OutputView*) por meio de um objeto *imref2d*, garantindo a preservação da escala espacial e das dimensões da área analisada.

O procedimento de ortorretificação foi aplicado de forma automatizada a todas as imagens dos ensaios em MPU, assegurando consistência geométrica ao longo de toda a base de dados. Adicionalmente, foram geradas imagens de referência ortorretificadas para validação visual do processo, conforme ilustrado na Figura 20, na qual se observa a correção das distorções de perspectiva e a uniformização do espaçamento da malha de calibração.

Figura 20 – Exemplo do processo de ortorretificação da imagem de referência



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Por outro lado, nos ensaios realizados próximos à parede lateral do canal (C_4 a C_6), incluindo aqueles com presença de instabilidades, a configuração experimental permitiu o posicionamento frontal da câmera, aproximadamente alinhada com o plano de medição iluminado pelo laser. Nessa condição, o plano da imagem é aproximadamente paralelo ao plano físico do escoamento, resultando em distorções de perspectiva desprezíveis para os objetivos do estudo, não sendo necessária a aplicação do processo de ortorretificação.

Adicionalmente, limitações experimentais associadas à menor potência do sistema de iluminação e à opacidade do fluido impediram a realização de ensaios na região central do canal sob condições equivalentes às aquelas adotadas para o MPU. Nessa configuração, a intensidade luminosa não é suficiente para atravessar a lâmina de fluido e garantir contraste adequado das estrias, inviabilizando a aquisição de imagens com qualidade suficiente para a aplicação da técnica STIV.

Embora, nos ensaios em MPU, tenha sido possível utilizar a malha de calibração submersa para obtenção da imagem de referência, essa abordagem não é aplicável

na presença de instabilidades. A inserção da malha no escoamento instável introduz efeitos ópticos adicionais, associados à reflexão e à refração da luz e interfere na dinâmica da superfície livre, comprometendo simultaneamente a qualidade da iluminação e a definição das estrias. Dessa forma, a obtenção de uma referência geométrica confiável nessa condição torna-se impraticável.

Diante dessas limitações, optou-se por reposicionar o plano laser próximo à parede lateral do canal, onde a menor espessura óptica do fluido permite melhor penetração da iluminação e maior nitidez na visualização das estruturas do escoamento. Essa estratégia possibilitou a aquisição de imagens com qualidade adequada para a análise, mantendo a consistência metodológica por meio da calibração espacial previamente realizada e da preservação da geometria do sistema durante os ensaios.

3.5.3 Pré-processamento das imagens e definição da região de interesse (ROI)

Antes da etapa de extração das informações cinemáticas, as imagens adquiridas foram submetidas a procedimentos de pré-processamento e amostragem espacial, com o objetivo de melhorar a qualidade do sinal visual associado ao movimento dos microtraçadores e garantir maior robustez na detecção da orientação dominante das estrias utilizadas na construção das imagens espaço-temporais (STI).

Inicialmente, definiu-se a Região de Interesse (ROI), correspondente à porção das imagens que contém efetivamente as informações relevantes do escoamento. A seleção adequada da ROI permite excluir áreas sem interesse físico, regiões com baixa qualidade óptica ou com elevado nível de ruído, contribuindo para a confiabilidade da análise e para a redução do custo computacional.

A estratégia de definição da ROI variou em função do regime de escoamento analisado:

- Escoamento em regime permanente uniforme (MPU):

A ROI foi definida de modo a abranger toda a profundidade observável da lâmina de escoamento estabilizada, desde o fundo do canal até a superfície livre, que se mantém aproximadamente constante ao longo do tempo.

- Escoamento em regime perturbado:

Devido à natureza não estacionária e à variação significativa da geometria da superfície livre, a definição da ROI exigiu uma abordagem diferenciada. Com base

nas medições geométricas descritas na Seção 3.4.3, foram identificadas as alturas características associadas à crista (h_{max}) e ao vale (h_{min}) das ondas. A partir dessas referências, foram definidas regiões de interesse distintas, correspondentes a diferentes estágios do escoamento, de modo a evitar a sobreposição de informações provenientes de condições dinâmicas distintas. Essa estratégia garante que a construção das imagens STI represente de forma consistente o comportamento local do escoamento.

Uma vez definida a ROI, as imagens STI foram geradas a partir do empilhamento temporal das intensidades de brilho ao longo de linhas de pixels selecionadas na região de interesse. Em seguida, foi realizado o pré-processamento digital dessas imagens no software ImageJ, por meio da aplicação de uma rotina automatizada (macro), garantindo a padronização das etapas de tratamento para todos os casos analisados.

O fluxo de pré-processamento adotado compreendeu as seguintes etapas:

- Conversão e remoção de fundo:

As imagens foram convertidas para escala de cinza de 8 bits e submetidas a um procedimento de remoção de fundo (*background subtraction*), baseado no algoritmo *rolling ball*, com o objetivo de atenuar variações globais de iluminação e reflexos estacionários, realçando as estruturas móveis associadas ao escoamento.

- Realce de contraste:

Foi aplicado um ajuste de contraste com normalização dos níveis de intensidade, visando melhorar a definição das estrias formadas pelo deslocamento dos microtraçadores ao longo do tempo.

- Filtragem:

Por fim, utilizou-se um filtro Gaussiano de baixa intensidade para reduzir ruídos de alta frequência, preservando as características geométricas e a inclinação das estrias relevantes para a análise.

As imagens STI pré-processadas resultantes dessas etapas constituem a base para a determinação da orientação dominante das estrias, realizada por meio da Transformada Wavelet Contínua Bidimensional (CWT-2D), do método do Gradiente Tensorial e da análise manual de referência, conforme descrito na seção seguinte.

3.6 METODOLOGIA DE ANÁLISE STIV

Nesta seção é apresentada a metodologia empregada para a extração quantitativa dos perfis de velocidade a partir das imagens espaço-temporais, utilizando a técnica de *Space-Time Image Velocimetry* (STIV). Diferentemente das seções anteriores, nas quais foram descritos os procedimentos experimentais e de aquisição de imagens, o foco aqui está no processamento, na análise e na interpretação das informações espaço-temporais contidas nas imagens do escoamento.

A metodologia adotada compreende a construção das imagens espaço-temporais (STI), a discretização da lâmina de escoamento ao longo da profundidade, a identificação da orientação dominante das estrias e a conversão dessa informação geométrica em valores físicos de velocidade. Para a determinação do ângulo das estrias, são avaliadas diferentes abordagens, incluindo a medição manual (utilizada como referência), a Transformada Wavelet Contínua Bidimensional (CWT-2D) e o método do Gradiente Tensorial (GT).

A aplicação dessa metodologia permite a obtenção de perfis de velocidade tanto para escoamentos em regime permanente uniforme quanto para condições com presença de instabilidades superficiais, possibilitando a análise comparativa dos resultados e a avaliação da robustez da técnica STIV frente a diferentes regimes de escoamento.

3.6.1 Construção das imagens espaço-temporais (STI)

Após a aquisição, calibração e pré-processamento das imagens do escoamento, conforme descrito na Seção 3.5, procede-se à construção das imagens espaço-temporais (*Space-Time Images – STI*), que constituem a base da técnica STIV.

A imagem STI é obtida a partir da seleção de uma linha de pixels pertencente à região de interesse (ROI), orientada na direção longitudinal do escoamento e iluminada pelo plano laser. Essa linha representa uma posição espacial fixa no canal. Para cada quadro do vídeo, os valores de intensidade luminosa ao longo dessa linha são extraídos e empilhados sequencialmente no tempo, formando uma imagem bidimensional em que um eixo representa a coordenada espacial ao longo da linha selecionada e o outro eixo representa o tempo.

O resultado desse empilhamento é um diagrama espaço-temporal no qual o deslocamento das partículas traçadoras manifesta-se na forma de estrias inclinadas. A inclinação dessas estrias está diretamente relacionada à velocidade local do escoamento, uma vez que expressa a razão entre o deslocamento espacial e o intervalo de tempo correspondente.

Para a obtenção dos perfis de velocidade ao longo da profundidade do escoamento, o procedimento de construção da STI é repetido para diferentes posições verticais previamente definidas, conforme o processo de discretização descrito na seção seguinte. A partir desse conjunto de imagens STI, são aplicados os métodos de detecção da orientação dominante das estrias, possibilitando a conversão sistemática da informação espaço-temporal em valores quantitativos de velocidade.

3.6.2 Discretização da profundidade do escoamento

Para a obtenção dos perfis de velocidade ao longo da espessura da lâmina de escoamento, a profundidade é discretizada em um conjunto finito de posições verticais, nas quais as imagens STI são construídas e analisadas individualmente. Essa abordagem permite capturar a variação da velocidade com a coordenada vertical, característica fundamental de escoamentos laminares e não newtonianos.

A discretização é realizada ao longo da direção normal ao fundo do canal, desde a proximidade da parede até a vizinhança da superfície livre. Neste trabalho, a lâmina de escoamento é dividida em 20 incrementos igualmente espaçados, definidos a partir da espessura característica do escoamento em cada condição experimental.

Para cada incremento de profundidade, é selecionada uma linha horizontal de píxeis na imagem do escoamento, correspondente à posição vertical desejada. Essas linhas são mantidas fixas no espaço e utilizadas na construção das imagens STI, de modo que cada imagem represente a dinâmica espaço-temporal do escoamento em uma profundidade específica.

Essa estratégia assegura uma amostragem sistemática e reproduzível do campo de velocidades, permitindo a reconstrução do perfil vertical de velocidade a partir dos valores obtidos em cada nível discretizado. Além disso, a utilização de múltiplos incrementos verticais possibilita a identificação de características típicas de fluidos viscoplásticos, como regiões de escoamento quase rígido (*plug*) e elevados gradientes de velocidade próximos à parede.

Nos ensaios em regime transiente, a discretização da profundidade foi adaptada à altura local da lâmina em cada condição analisada. Para cada fase da onda, crista ou vale, a profundidade local h foi dividida em 20 incrementos igualmente espaçados, de modo que $\Delta y = h/20$. Em termos de imagem, o tamanho de cada incremento em pixels foi obtido a partir da escala espacial de calibração, isto é, $\Delta y_{px} = \Delta y \cdot S_y$ em que S_y é a escala vertical da imagem em pixel/mm. Assim, o número de pixels de cada fatia variou conforme a profundidade local da lâmina e a calibração espacial de cada ensaio.

3.6.3 Métodos de obtenção do ângulo das estrias em imagens STI

A determinação precisa da orientação das estrias presentes nas imagens espaço-temporais (STI) constitui a etapa central da técnica de *Space-Time Image Velocimetry* (STIV), uma vez que essa orientação está diretamente relacionada à velocidade do escoamento. No presente trabalho, foram avaliados três métodos distintos para a estimativa do ângulo dominante das estrias, a saber: o método baseado no Gradiente Gaussiano Bidimensional (STI Gaussiano), a Transformada Contínua de Wavelet Bidimensional (CWT-2D) e a medição manual, utilizada como referência (*ground truth*).

Essas abordagens foram investigadas no contexto do trabalho desenvolvido na disciplina de Estudo Especial, intitulado “*Comparação de Métodos para Determinação da Velocidade em Escoamentos Viscoplasticos via Imagens STI*”, no qual se buscou otimizar a rotina computacional de extração de velocidade a partir de imagens STI, avaliando desempenho, robustez e confiabilidade dos métodos automáticos, sem estabelecer a priori a superioridade de um método sobre os demais.

3.6.3.1 Método do Gradiente Gaussiano Bidimensional (STI Gaussiano)

O método baseado no Gradiente Gaussiano Bidimensional, também denominado neste trabalho como método do Gradiente Tensorial (GT), é amplamente empregado para a estimativa da orientação dominante de padrões lineares em imagens, como as estrias observadas nas imagens espaço-temporais (BIGÜN, 1987). Esse método é baseado na análise dos gradientes locais da imagem suavizada, por

meio da construção do tensor de estrutura (ou matriz de segundo momento), que representa a distribuição direcional da intensidade dos gradientes em uma região.

A imagem é dividida em pequenas janelas sobre as quais são calculados os gradientes parciais nos eixos espacial x e temporal t representados por g_x e g_t . Esses gradientes são obtidos utilizando operadores diferenciais de quarta ordem, aplicados após um pré-processamento de suavização com um filtro Gaussiano. No código utilizado neste estudo, o filtro foi aplicado por meio da função *imfilter*. Para isso, emprega-se um kernel Gaussiano bidimensional com tamanho 5×5 e desvio padrão $\sigma = 1$, que permite reduzir ruído sem comprometer a definição das estruturas da imagem.

Com os gradientes suavizados, são calculadas as componentes da matriz de estrutura J , definidos pela Equação (41):

$$J_{pq} = \int_{\text{janela}} \frac{\partial g(x, t)}{\partial p} \frac{\partial g(x, t)}{\partial q} dx dt \quad (41)$$

Onde J_{pq} representa os componentes do tensor de estrutura, calculados como a integral sobre cada janela, em que as derivadas parciais da intensidade da imagem $g(x, t)$ são computadas em relação à direção espacial p e à direção temporal q .

A partir dessas componentes, estima-se o ângulo de orientação α (Equação (42)), que representa a direção predominante dos gradientes naquela região da imagem:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan 2 \left(\frac{2J_{xt}}{J_{tt} - J_{xx}} \right) \quad (42)$$

Na sequência, a coerência (ou clareza do padrão/certeza direcional) de cada janela é calculada para avaliar a confiabilidade da orientação local estimada. A coerência C é computada usando os componentes do tensor de estrutura, conforme mostrado na Equação (43):

$$C = \frac{\sqrt{(J_{tt} - J_{xx})^2 + 4J_{xt}^2}}{J_{xx} + J_{tt}} \quad (43)$$

Essa métrica reflete o grau de dominância direcional na distribuição local dos gradientes. Valores de C próximos a 1 indicam alta confiança na orientação estimada, associada à presença de traços bem definidos. Por outro lado, valores próximos de 0 indicam baixa anisotropia, isto é, ausência de uma direção predominante, geralmente associada a ruído, regiões uniformes ou padrões pouco definidos.

Por fim, a orientação dominante da imagem STI é determinada a partir da análise estatística da distribuição dos ângulos locais estimados, sendo adotado como valor representativo o ângulo correspondente ao máximo da distribuição (modo), obtido a partir de um histograma angular ponderado pela coerência. Essa abordagem permite considerar simultaneamente a frequência angular e a confiabilidade direcional das estimativas locais, resultando em maior robustez frente a ruído e regiões pouco estruturadas. O ângulo médio ponderado pela coerência é calculado conforme a Equação (44):

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^N C(i) \cdot \alpha(i)}{\sum_{i=1}^N C(i)} \quad (44)$$

sendo N é o número total de janelas válidas na imagem.

Ressalta-se que, no presente estudo, o valor final do ângulo dominante é obtido a partir da análise do histograma angular ponderado pela coerência, garantindo que as estimativas mais confiáveis contribuam de forma predominante para a determinação da orientação global. O ângulo médio ponderado pela coerência (Equação (44)) é utilizado como medida complementar de verificação. Ao comparar ambas as abordagens (o pico da distribuição angular e a média ponderada), verificou-se que elas conduzem a estimativas altamente consistentes entre si para as imagens analisadas.

Quanto às equações, a formulação do tensor de estrutura (Equação (42)) deriva dos trabalhos pioneiros de Förstner (1986) sobre operadores de interesse baseados em gradientes Bigün (1987) sobre detecção de simetria linear. Esses conceitos foram posteriormente adaptados para análise espaço-temporal por Jähne (1993) e aplicados a medição de fluxo em hidráulica por Fujita *et al.* (1998) que aplicaram análise de orientação local em imagens STI geradas a partir de vídeos em canais. Embora não

tenham usado o termo "Gradiente Tensorial", a técnica é conceitualmente equivalente consolidando a base matemática do método GT.

Complemento teórico: derivada da função Gaussiana

O Gradiente Gaussiano é uma ferramenta matemática usada para analisar variações na intensidade de uma imagem, facilitando a detecção de bordas e estruturas. Matematicamente, ele é obtido através da derivada de uma função gaussiana aplicada à imagem (GAMBARUTO, 2015; MARR E HILDRETH, 1980).

A função gaussiana unidimensional é expressa por a equação (45):

$$G_{\sigma}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (45)$$

onde x representa a posição e σ é o desvio padrão associado ao grau de suavização aplicado. A derivada da função em relação a x resulta no gradiente gaussiano:

$$G'_{\sigma}(x) = -\frac{x}{\sigma^2} G_{\sigma}(x) \quad (46)$$

Em duas dimensões, temos a equação (47):

$$G_{\sigma}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (47)$$

As derivadas parciais em x e y são usadas para calcular o gradiente direcional em imagens bidimensionais (MAUCHER, 2021). Essas expressões fundamentam os filtros utilizados para suavização da imagem e extração de gradientes menos sensíveis ao ruído.

No presente trabalho, a suavização da imagem foi realizada por meio da convolução com um filtro Gaussiano bidimensional implementado com a função *fspecial('gaussian', ...)*, cuja forma matemática corresponde à Equação (47). A função Gaussiana unidimensional da Equação (45) é apresentada para fins ilustrativos e introdução conceitual. Por outro lado, a derivada da função Gaussiana Equação (46) não foi utilizada, pois os gradientes da imagem foram obtidos por meio de operadores

de diferenças finitas de quarta ordem, aplicados após a suavização. Essa abordagem foi escolhida por sua simplicidade e boa performance numérica.

Na técnica STIV, onde se analisam estrias em imagens espaço-temporais, o gradiente gaussiano ajuda a evidenciar a direção dominante das texturas, facilitando a estimativa da velocidade. Além disso, pode ser aplicado antes de transformadas como a FFT. Pesquisas recentes também apontam seu uso junto com redes neurais para melhorar a segmentação de padrões em fluxos não newtonianos (WATANABE *et al.*, 2021). Uma das etapas fundamentais na STIV é a detecção precisa da Orientação Principal da Textura (MOT) nas imagens espaço-temporais, pois essa orientação está diretamente relacionada com a velocidade do escoamento (LU *et al.*, 2023). No contexto da STIV, o Gradiente Gaussiano pode ser aplicado para melhorar a detecção de padrões de textura nas STIs. Ao suavizar a imagem com uma função gaussiana e, em seguida, calcular seu gradiente, é possível destacar estruturas relevantes e minimizar o ruído, facilitando a identificação da MOT (TSUBAKI, 2017).

3.6.3.2 Transformada Contínua de Wavelet Bidimensional (CWT-2D)

A Transformada Contínua de Wavelet Bidimensional (CWT-2D) foi empregada para estimar a orientação dominante das estrias presentes em imagens espaço-temporais, que representam o movimento de traçadores no campo de escoamento. O método baseia-se no cálculo dos coeficientes de wavelet em uma faixa de escalas e orientações, identificando o ângulo que maximiza a resposta da wavelet às características lineares (estrias) na imagem. A teoria completa da CWT é apresentada por (TORRENCE e COMPO 1998) e (ANTOINE *et al.*, 2004), que reforçam sua aplicabilidade na análise de imagens com estruturas orientadas.

Neste método, a orientação dominante é estimada com base na resposta de uma Transformada Contínua de Wavelet Bidimensional (CWT-2D) aplicada à imagem $g(x, t)$, utilizando wavelets complexas anisotrópicas altamente sensíveis a padrões orientados. Seja $\psi_\alpha(x, t)$ uma wavelet 2D orientada no ângulo α . A CWT-2D da imagem é dada pela Equação (48):

$$W_\psi(a, \alpha, b) = \iint g(x, t) \cdot \psi_{a, \alpha}^*(x - b_x, t - b_t) dx dt \quad (48)$$

em que a representa a escala da wavelet, α o ângulo de orientação, $b = (b_x, b_t)$ o vetor de translação, sendo b_x a posição da wavelet na direção espacial x e b_t sua posição na direção temporal t .

Neste estudo, adotou-se a wavelet de Cauchy de valor complexo devido à sua seletividade direcional acentuada e eficácia na detecção de características lineares (como estrias) em dados espaço-temporais. A expressão espacial da wavelet de Cauchy de ordem m é dada pela Equação (49):

$$\psi_m(x, t) = \frac{(x + it)^m}{(x^2 + t^2)^{m+0.5}} \quad (49)$$

sendo i a unidade imaginária e m parâmetro que controla a seletividade angular.

Na implementação utilizada, a ordem da wavelet de Cauchy não foi definida manualmente; assim, considera-se o valor padrão adotado internamente pela função *cwtft2* do Matlab (tipicamente $m = 2$). A CWT-2D foi aplicada utilizando a wavelet de Cauchy complexa com escala fixa de $a = 5$ pixels, selecionada empiricamente para corresponder à espessura média das estrias e equilibrar resolução espacial e sensibilidade à orientação.

Os coeficientes de wavelet foram calculados para orientações amostradas em incrementos de $\pi / 1024$ radianos (aproximadamente 0.18°), abrangendo a faixa angular completa de 0° a 180° . Para cada orientação, a wavelet foi rotacionada e convoluída com a imagem espaço-temporal, gerando um mapa de coeficientes complexos que reflete a correlação local entre as características da imagem e a wavelet orientada. O módulo desses coeficientes indica a intensidade do alinhamento entre as estruturas da imagem e a orientação da wavelet. Ao elevar ao quadrado e somar o módulo dos coeficientes em todo o domínio espacial, a resposta de energia total $E(\alpha)$ para cada ângulo foi calculada conforme a Equação (50):

$$E(\alpha) = \sum_x \sum_t |W_\psi(a, \alpha, b)|^2 \quad (50)$$

A Equação (50) representa a distribuição da energia da imagem em função do ângulo α . O valor máximo de $E(\alpha)$ indica a orientação predominante das estrias na

imagem STI, que é usada para calcular a velocidade do escoamento. Devido à simetria rotacional de 180° da wavelet de Cauchy, a resposta da wavelet para uma determinada orientação α é equivalente à resposta em $\alpha + 180^\circ$. Consequentemente, quando a análise é estendida por toda a faixa angular $[0^\circ, 360^\circ]$, esperam-se dois picos idênticos na distribuição de energia, separados por 180° , correspondentes à mesma orientação física das estrias. Por esse motivo, é geralmente suficiente restringir o domínio angular a $[0^\circ, 180^\circ]$, como realizado neste estudo, para evitar redundância e simplificar a identificação da orientação dominante.

3.6.3.3 Medição Manual da Orientação das Estrias

A medição manual da orientação das estrias em imagens STI consiste em um procedimento visual tradicional, utilizado frequentemente como referência para validação de métodos automáticos, como a Transformada Wavelet Contínua (CWT-2D) método do Gradiente Tensorial (GT).

O processo envolve a seleção de uma região da imagem onde as estrias estejam bem definidas, seguida do traçado manual de uma linha ao longo de uma estria representativa. A inclinação dessa linha é então determinada com auxílio de ferramentas gráficas ou softwares como ImageJ, Matlab ou softwares de CAD, permitindo estimar o ângulo de orientação α . Esse ângulo pode ser inserido diretamente na equação de cálculo da velocidade pela técnica STIV, conforme descrito na Seção 3.3.

No presente trabalho, visando reduzir a subjetividade inerente ao procedimento puramente manual e aumentar a reprodutibilidade da análise, foi adotada uma abordagem de medição manual assistida. Inicialmente, o ângulo estimado pelo método automático (CWT-2D) é utilizado para gerar uma linha de referência pré-alinhada à orientação dominante das estrias. Essa linha inicial é construída automaticamente a partir da rotação da imagem STI e da identificação do eixo de maior intensidade, conforme implementado no código em MATLAB, sendo posteriormente apresentada ao operador, que realiza apenas ajustes finos de posição e inclinação, de modo a coincidir visualmente com a estria mais representativa da imagem STI analisada.

A partir da posição final da linha ajustada manualmente, o ângulo de orientação é calculado geometricamente a partir das coordenadas de seus extremos. No código

desenvolvido, esse cálculo é realizado a partir da função $\arctan2$ aplicada às diferenças espaciais dos pontos selecionados, garantindo consistência na determinação do ângulo no intervalo de -90° a 90° . Apesar de ainda depender da intervenção do operador, essa abordagem reduz significativamente a variabilidade associada ao traçado totalmente manual, mantendo o método como referência (*ground truth*) para a avaliação da acurácia dos métodos automáticos.

Por essas razões, a medição manual é utilizada neste trabalho exclusivamente como critério comparativo, não sendo considerada adequada para aplicações em larga escala ou em análises que demandem processamento automático ou em tempo real. Os métodos descritos nesta seção — Gradiente Gaussiano Bidimensional, Transformada Contínua de Wavelet Bidimensional (CWT-2D) e medição manual — foram aplicados de forma sistemática às imagens espaço-temporais geradas para os diferentes regimes de escoamento analisados. Cada abordagem permite a estimativa da orientação dominante das estrias nas imagens STI, fornecendo o ângulo necessário para o cálculo da velocidade segundo a técnica STIV.

Os resultados obtidos por esses métodos, bem como a comparação entre eles e sua aplicação em regimes de escoamento permanente uniforme e com presença de instabilidades, são apresentados e discutidos no Capítulo de Resultados.

3.6.4 Determinação da altura característica da lâmina em escoamentos pulsados

Nos escoamentos com presença de instabilidades superficiais, a espessura da lâmina de fluido varia significativamente tanto no espaço quanto no tempo, em função da propagação do trem de ondas ao longo do canal. Nessas condições, a velocidade do escoamento não é constante e as estrias geradas nas imagens espaço-temporais apresentam mudanças contínuas de inclinação ao longo do perfil da onda. Portanto, a aplicação da técnica de velocimetria por imagens espaço-temporais (STIV), que originalmente pressupõe um regime permanente, requer a adoção da hipótese de quase-estacionariedade local.

Essa premissa estabelece que, ao restringir a análise a uma região espacial muito estreita (Δx) e a um intervalo de tempo extremamente curto (Δt), o escoamento pode ser considerado momentaneamente uniforme. Dessa forma, realiza-se uma análise quase instantânea, focada estritamente nas regiões da crista e do vale da

onda, onde a curvatura da superfície livre é mínima e a derivada espacial da altura se aproxima de zero ($\frac{\partial h}{\partial x} \approx 0$). Essa definição cuidadosa das regiões locais de análise garante que as velocidades obtidas pelas inclinações das estrias sejam representativas da cinemática real e não sofram distorções causadas pela inconstância macroscópica da onda.

Nos ensaios com presença de ondulações (Experimentos C_4 , C_5 e C_6 , conduzidos a 5 cm e 10 cm da parede lateral do canal), foram observadas pequenas diferenças entre as alturas indicadas pelos sensores ultrassônicos e aquelas obtidas a partir das imagens adquiridas pela câmera de alta velocidade. Essas diferenças, da ordem de poucos milímetros, estão associadas principalmente às distintas posições de medição e a efeitos ópticos na interface fluido–parede, conforme discutido na Seção 3.2.3.

Para garantir a consistência geométrica entre as medições e a análise baseada em imagens, as alturas utilizadas na definição das janelas de interrogação foram ajustadas com base nas medições ópticas. Esse procedimento não representa uma correção de erro instrumental, mas sim uma forma de assegurar a coerência rigorosa entre a geometria observada nas imagens STI e os valores empregados no algoritmo.

A partir dessa análise visual associada à premissa de quase-estacionariedade, foi possível definir janelas verticais locais de análise da lâmina de escoamento. A análise STIV foi conduzida separadamente nas duas regiões características: a região da crista e a região do vale. Em cada uma dessas regiões, as alturas características foram utilizadas para delimitar a fase local da onda analisada, distinguindo-se os limites associados à crista ($h_{max,crista}$) e ($h_{min,crista}$) e ao vale ($h_{max,vale}$) e ($h_{min,vale}$). Esses limites foram empregados para representar geometricamente as regiões locais da onda e orientar a definição das janelas de análise, sem indicar que o perfil de velocidade tenha sido calculado apenas entre esses dois valores. Uma vez definida a fase analisada, os perfis de velocidade foram obtidos ao longo da profundidade local da lâmina, desde o fundo do canal até a superfície livre correspondente.

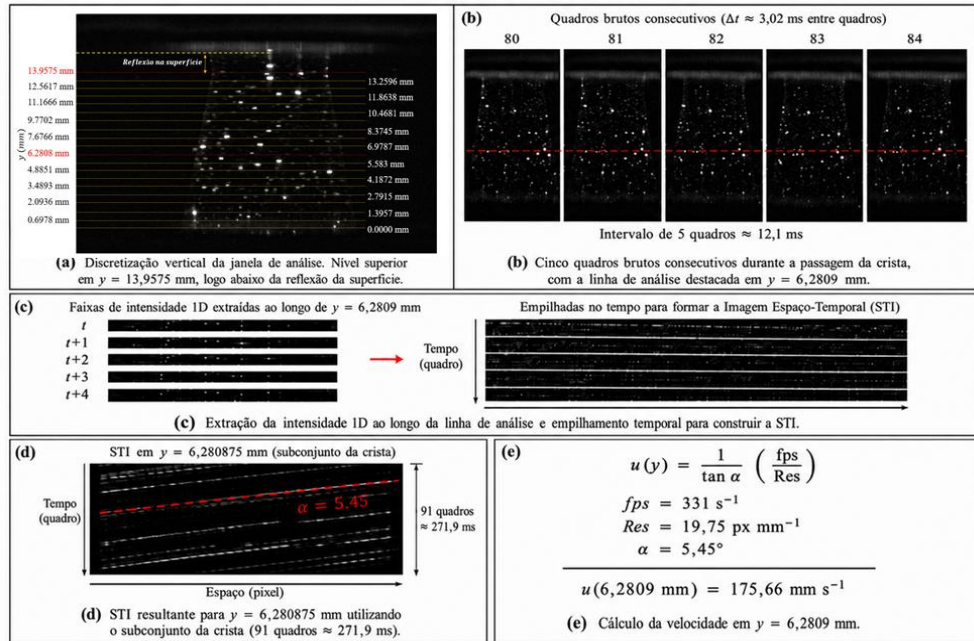
Na região da crista da onda, foi selecionado um pacote reduzido de imagens (garantindo um (Δt) pequeno), correspondente ao instante exato da passagem do pico. Nessa condição, ($h_{max,crista}$) representa a altura máxima local associada ao topo da crista, enquanto ($h_{min,crista}$) representa um limite inferior utilizado para caracterizar a região local de influência da crista na imagem. A partir dessa definição, o perfil de

velocidade foi obtido ao longo da profundidade da lâmina correspondente à fase de crista, desde o fundo do canal até a superfície livre local.

Para exemplificar esse procedimento, a Figura 21 apresenta o fluxo de trabalho da técnica STIV aplicado à região da crista. A partir do conjunto total de imagens adquiridas pela câmera de alta velocidade, foi selecionado um subconjunto temporal correspondente ao instante de passagem da crista da onda. Neste caso, dentre 331 imagens registradas em 1000 ms, foram utilizadas 91 imagens consecutivas, correspondentes a um intervalo temporal de aproximadamente 271,9 ms, considerando o intervalo entre o primeiro e o último quadro selecionado. Para a taxa de aquisição de 331 fps, o intervalo entre quadros consecutivos foi de aproximadamente 3,02 ms.

Essa seleção temporal e espacial constitui uma etapa fundamental para evitar a mistura de informações provenientes de diferentes fases da onda. Assim, a imagem espaço-temporal gerada para cada altura (y) representa apenas o comportamento local da crista durante o intervalo selecionado, permitindo que a inclinação das estrias seja associada à velocidade instantânea naquela posição. O procedimento adotado também garante que a discretização vertical da lâmina seja compatível com a geometria observada nas imagens, preservando a coerência entre a altura analisada, a região física do escoamento e a escala espacial utilizada no cálculo das velocidades.

Figura 21 – Fluxo de trabalho da técnica STIV aplicado à análise da crista da onda
Fluxo de trabalho STIV para o Experimento C5



Fonte: Elaborado pelo autor

A janela vertical de análise foi discretizada ao longo da profundidade da lâmina de escoamento, utilizando uma escala espacial de $19,75 \text{ pixel/mm}$. Para cada posição vertical y , foi extraída uma linha de intensidade em todos os quadros selecionados, formando a imagem espaço-temporal correspondente. A inclinação dominante das estrias nessa imagem foi então determinada pelos métodos de análise adotados neste trabalho, incluindo a Transformada Contínua de Wavelet Bidimensional (CWT-2D), o Gradiente Tensorial e a medição manual.

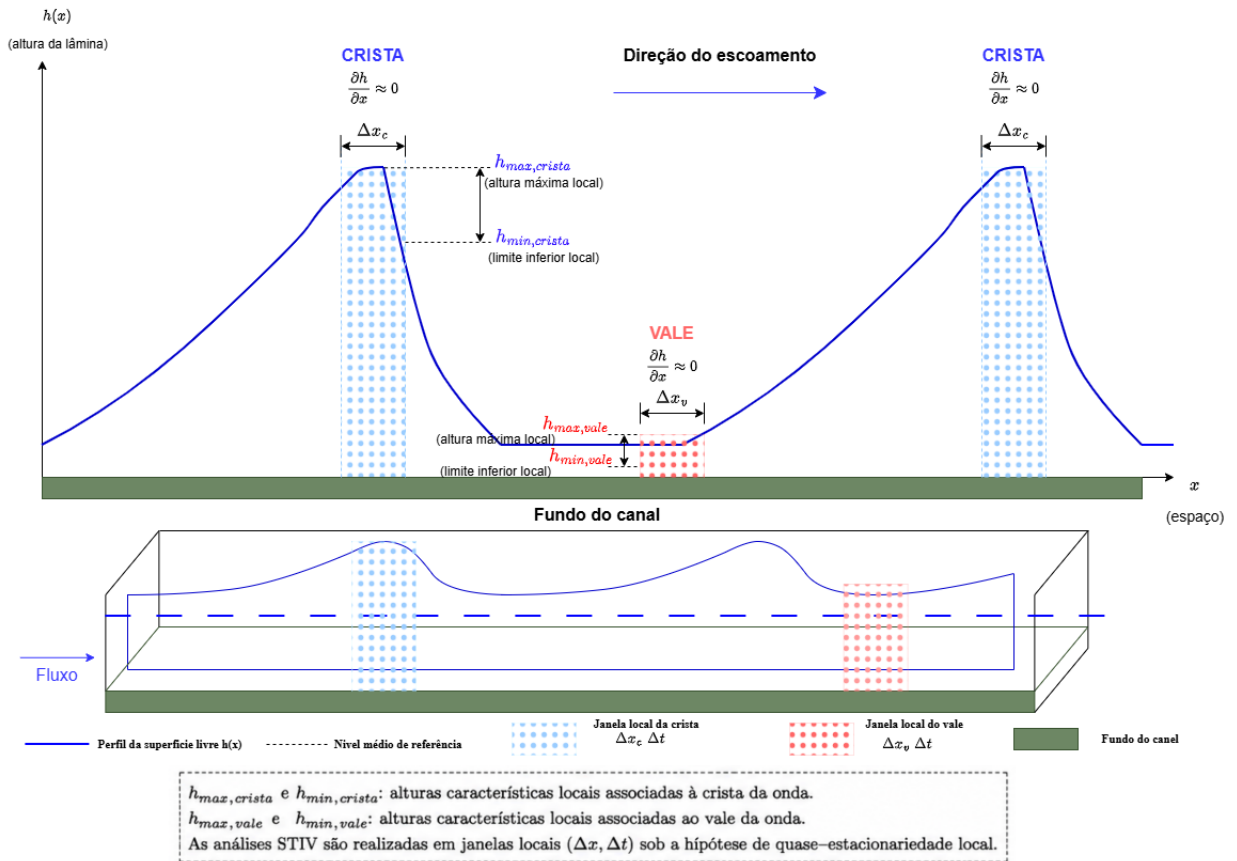
Como exemplo, para a altura $y = 6,2809 \text{ mm}$, o método CWT-2D forneceu um ângulo dominante de $\alpha = 5,45^\circ$. A partir desse ângulo, da taxa de aquisição da câmera e da escala espacial da imagem, foi estimada a velocidade local, obtendo-se $u = 175,66 \text{ mm/s}$ para essa posição vertical. O mesmo procedimento foi repetido para todas as alturas discretizadas da janela de análise, permitindo a obtenção do perfil vertical de velocidades na região da crista.

Dessa forma, a seleção de um subconjunto reduzido de imagens garante que a análise seja realizada em um intervalo temporal suficientemente curto para satisfazer a hipótese de quase-estacionariedade local. Assim, embora o escoamento com presença de ondas seja transiente em escala global, a aplicação da técnica STIV torna-se viável quando restrita a janelas locais associadas às regiões de crista e vale.

De maneira análoga, para a região do vale, foi definida uma segunda janela local de análise, associada à zona de menor espessura da lâmina entre a passagem de duas cristas sucessivas. Nessa região, $(h_{max,vale})$ e $(h_{min,vale})$ foram utilizados para representar os limites característicos locais da fase de vale, permitindo distinguir geometricamente essa porção da onda em relação à crista. O perfil de velocidade, nesse caso, também foi determinado ao longo da profundidade local da lâmina, desde o fundo do canal até a superfície livre correspondente ao vale. Essa abordagem pontual permitiu a determinação das velocidades instantâneas em diferentes posições verticais da lâmina, caracterizando separadamente as regiões de maior e menor energia do escoamento sem a interferência da variação contínua da onda.

A Figura 22 apresenta o esquema representativo deste modelo de janelas locais aplicado ao perfil assimétrico típico de ondulação íngreme. O esquema ilustra a variação espacial da altura da lâmina $h(x)$ e as regiões de amostragem quase instantânea na crista e no vale.

Figura 22 – Esquema da definição das janelas locais de análise na crista e no vale da onda, sob a hipótese de quase-estacionariedade local



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como parâmetro adimensional auxiliar para a caracterização da variação relativa da espessura da lâmina nas diferentes regiões da onda, considera-se a razão entre a diferença dos limites verticais da janela de análise e o limite superior local da lâmina, expressa por $\frac{h_{max}-h_{min}}{h_{max}}$. Nesse caso, (h_{max}) representa a altura característica máxima da onda, associada à crista, enquanto (h_{min}) representa a altura característica mínima, associada ao vale. Esse parâmetro é utilizado posteriormente na análise dos resultados experimentais para comparar a intensidade relativa das variações geométricas associadas às ondas.

3.7 Critérios de comparação e análise de erro

A comparação entre os métodos de obtenção do ângulo de orientação das estrias em imagens espaço-temporais, bem como a avaliação da confiabilidade dos resultados experimentais, requer a definição prévia de métricas objetivas de erro e de critérios formais de análise de incerteza. Nesta seção são apresentados os procedimentos adotados para a quantificação das incertezas experimentais, com base nas recomendações do Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), bem como a métrica utilizada para a comparação entre os métodos de análise das imagens STI.

3.7.1 Análise de incertezas experimentais (GUM)

A avaliação das incertezas associadas às variáveis experimentais é essencial para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos, adotando-se como referência o procedimento baseado na incerteza padrão combinada. A equação geral utilizada é expressa por:

$$U_c = k \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (51)$$

sendo: U_c representa a incerteza expandida da medição, k é o coeficiente de abrangência ou Student (considerado $k = 2$, para um intervalo de confiança de 95,5%), U_A é a incerteza do tipo A, relacionada ao desvio padrão da média das

medições e U_B é a incerteza do tipo B, associada à especificação dos instrumentos utilizados.

A Tabela 1 apresenta as especificações de precisão dos principais equipamentos empregados nos ensaios, os quais foram utilizados na posterior quantificação rigorosa das incertezas dos parâmetros medidos em laboratório.

Tabela 1 – Precisão dos equipamentos empregados

Equipamento	Medida	Precisão (%)
Reômetro	$Pa, Pa \cdot s^n, s^{-1}$	$\pm 3,00^*$
Cronômetro Digital	s	$\pm 0,20$
Balança	kg	$\pm 0,1$
Transdutor ultrassônico	mm	$\pm 0,29$
Temporizador (câmera)	s	$\pm 0,20$

Fonte: Elaborado pelo Autor

Nota: *Valor aproximado com base no manual técnico do equipamento Brookfield R/S.

Com base nas estimativas teóricas iniciais, e assumindo como referência dados da literatura e de trabalhos anteriores realizados com metodologia similar, apresenta-se na Tabela 2 uma previsão das incertezas relativas aos principais parâmetros que são obtidos nos ensaios.

Tabela 2 – Incertezas estimadas dos parâmetros experimentais

Parâmetro	Medida	Precisão (%)
Profundidade (h)	mm	$\pm 0,75$
Vazão (Q)	m^3/s	$\pm 3,50$
Massa específica (ρ)	kg/m^3	$\pm 0,45$
Velocidade média ($\bar{u}$)	m/s	$\pm 3,70$
Velocidade superficial (u_s)	m/s	$\pm 1,10$
Tensão limite de escoamento (τ_0)	Pa	$\pm 7,16 - 12,48$
Índice de consistência (K)	$Pa \cdot s^n$	$\pm 6,00 - 6,26$
Índice de escoamento (n)	--	$\pm 6,12 - 9,64$

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Esses valores foram posteriormente avaliados à luz dos dados experimentais obtidos, permitindo analisar a qualidade dos resultados e validar as interpretações dos regimes de escoamento observados.

3.7.2 Métrica de erro para comparação entre métodos (RMSE)

Para a comparação quantitativa entre os métodos de obtenção do ângulo de orientação das estrias em imagens STI, adotou-se como métrica o Erro Quadrático Médio (*Root Mean Square Error* – RMSE). Essa métrica permite avaliar a discrepância média entre os ângulos estimados por métodos automáticos e aqueles obtidos por medições manuais, utilizados como referência.

O RMSE é definido por:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\alpha_i^{\text{método}} - \alpha_i^{\text{manual}})^2} \quad (52)$$

sendo $\alpha_i^{\text{método}}$ é o ângulo estimado por um dos métodos automatizados (CWT 2D, GT), α_i^{manual} é o ângulo obtido por medição manual e N é o número total de imagens analisadas em cada experimento.

Essa métrica fornece uma medida global do erro associado a cada método, permitindo uma avaliação objetiva de sua precisão em relação ao procedimento manual de referência.

Neste trabalho, as incertezas associadas à técnica STIV não foram propagadas diretamente nos perfis de velocidade apresentados. A comparação quantitativa entre os métodos foi realizada por meio do RMSE, adotando-se a medição manual como referência. Ainda assim, reconhece-se que a incerteza do método STIV está relacionada à resolução espacial da imagem (px/mm), ao intervalo temporal entre quadros ($\Delta t = \frac{1}{fps}$), ao número de imagens utilizadas na construção da STI e ao tamanho da janela espaço-temporal analisada.

3.7.3 Critérios de consistência e comparação metodológica

A comparação entre os métodos de determinação do ângulo das estrias foi conduzida com base em critérios quantitativos e qualitativos. Do ponto de vista quantitativo, utilizou-se o RMSE como principal indicador de desempenho, por sua

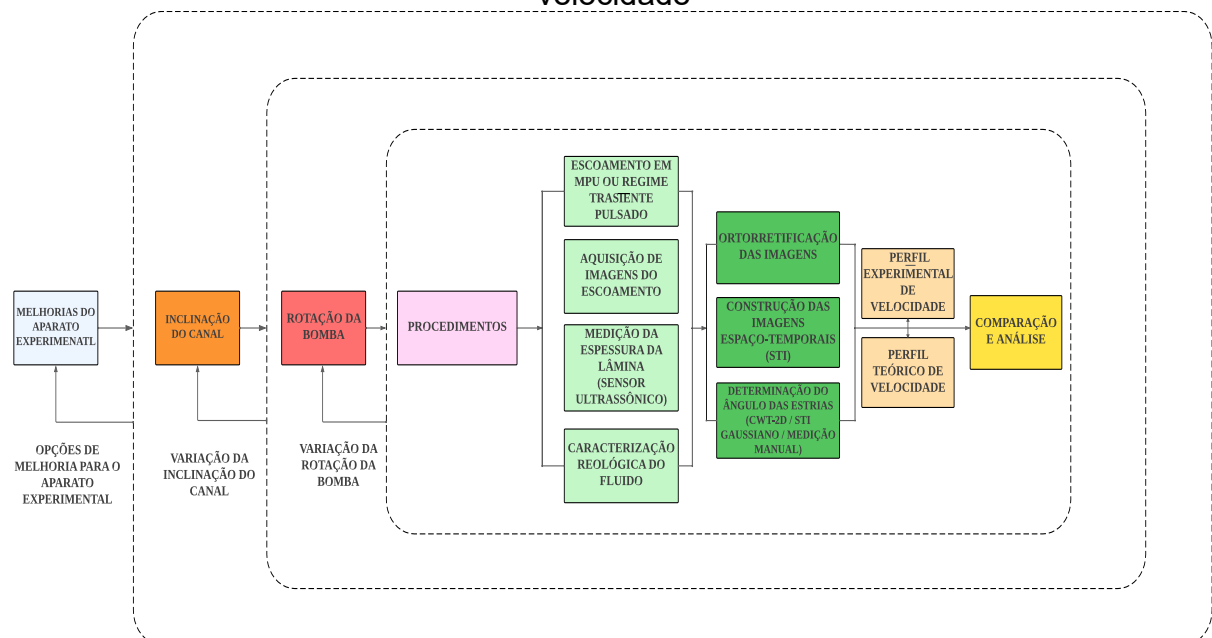
capacidade de penalizar discrepâncias mais elevadas entre os valores estimados e os valores de referência.

Do ponto de vista qualitativo, foram considerados aspectos como estabilidade das estimativas angulares, sensibilidade ao ruído, qualidade óptica das imagens, contraste local e nitidez das estrias. Também foi avaliada a repetibilidade das estimativas, por meio da dispersão observada entre imagens pertencentes à mesma condição experimental.

Além disso, o grau de convergência entre os resultados obtidos pela CWT-2D, pelo Gradiente Tensorial e pela medição manual foi utilizado como indicativo complementar de confiabilidade. Ressalta-se que o objetivo da comparação não é estabelecer a superioridade absoluta de um método, mas avaliar a consistência dos resultados e a adequação de cada abordagem às condições experimentais analisadas. Os valores de RMSE e as análises comparativas correspondentes são apresentados e discutidos no Capítulo 4.

A metodologia geral prevista para a realização dos experimentos e obtenção dos perfis de velocidade foi sintetizada no fluxograma apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Fluxograma de execução dos experimentos e obtenção dos perfis de velocidade



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais realizados em escoamentos viscoplásticos em canal inclinado, bem como das análises conduzidas por meio de técnicas de velocimetria por imagem. A discussão dos resultados é desenvolvida de forma progressiva, de modo a estabelecer uma relação clara entre as condições experimentais, a qualidade dos dados adquiridos e a interpretação física dos resultados obtidos.

Inicialmente, são apresentados resultados preliminares obtidos em estudos anteriores, os quais constituem a base metodológica deste trabalho, permitindo evidenciar as primeiras aplicações da técnica STIV para a determinação da velocidade em escoamentos viscoplásticos, bem como os aspectos identificados nessas análises que motivaram o aperfeiçoamento da metodologia e a implementação de novas abordagens nesta dissertação.

Na sequência, procede-se à caracterização dos escoamentos ensaiados, situando o leitor quanto às condições experimentais adotadas, às propriedades reológicas do fluido e aos diferentes regimes hidráulicos analisados. Em seguida, avalia-se a qualidade das imagens adquiridas e o impacto do processo de ortorretificação e do pré-processamento das imagens na construção das imagens espaço-temporais (STI), etapa fundamental para garantir a confiabilidade da aplicação da técnica STIV.

Posteriormente, são analisados os resultados da detecção da orientação das estrias nas imagens STI, com ênfase na comparação entre os métodos automáticos baseados no Gradiente Tensorial (GT) e na Transformada Contínua de Wavelet Bidimensional (CWT-2D), bem como em relação às medições manuais. Esta etapa engloba tanto a análise de regimes permanentes uniformes quanto a exploração de casos com instabilidade superficial, onde a técnica é aplicada separadamente nas regiões de crista e vale.

Por fim, são apresentados os perfis de velocidade ao longo da profundidade do escoamento obtidos experimentalmente por meio da técnica STIV, incluindo, para os ensaios aplicáveis em regime permanente, a comparação com perfis teóricos fundamentados no modelo reológico de Herschel-Bulkley. Adicionalmente, é realizada uma comparação quantitativa entre os métodos empregados, com base em métricas

estatísticas (RMSE) e critérios de erro, visando avaliar o desempenho e a robustez de cada abordagem sob diferentes condições de escoamento.

4.1 ESTUDOS PRELIMINARES E VALIDAÇÃO ALGORÍTMICA

Antes da consolidação do aparato experimental definitivo descrito no Capítulo 3, realizou-se uma campanha de testes preliminares. A partir da realização desses 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 (u_s) para cada experimento. Ressalta-se que os resultados apresentados nesta etapa preliminar foram obtidos utilizando um sistema de iluminação laser com potência de 2,5 W. No total, 4 experimentos iniciais (aqui denominados P_1 a P_4) foram realizados com diferentes inclinações de canal (θ de 6° e 8°), diferentes amostras de Carbopol (τ_0 variando entre 23 e 33 Pa) e diferentes vazões (Q variando de 0,40 a 0,90 L/s). Os valores de massa específica correspondem às medições realizadas individualmente para cada amostra de fluido utilizada na campanha preliminar. Assim, as diferenças observadas entre os ensaios podem estar associadas a variações inerentes ao preparo, homogeneização e procedimento experimental de cada amostra, sem comprometer a caracterização global das condições analisadas. As condições experimentais e as propriedades médias medidas e calculadas para esses ensaios preliminares são apresentadas na Tabela 3

Tabela 3 – Valores médios das propriedades medidas e calculadas nos experimentos preliminares

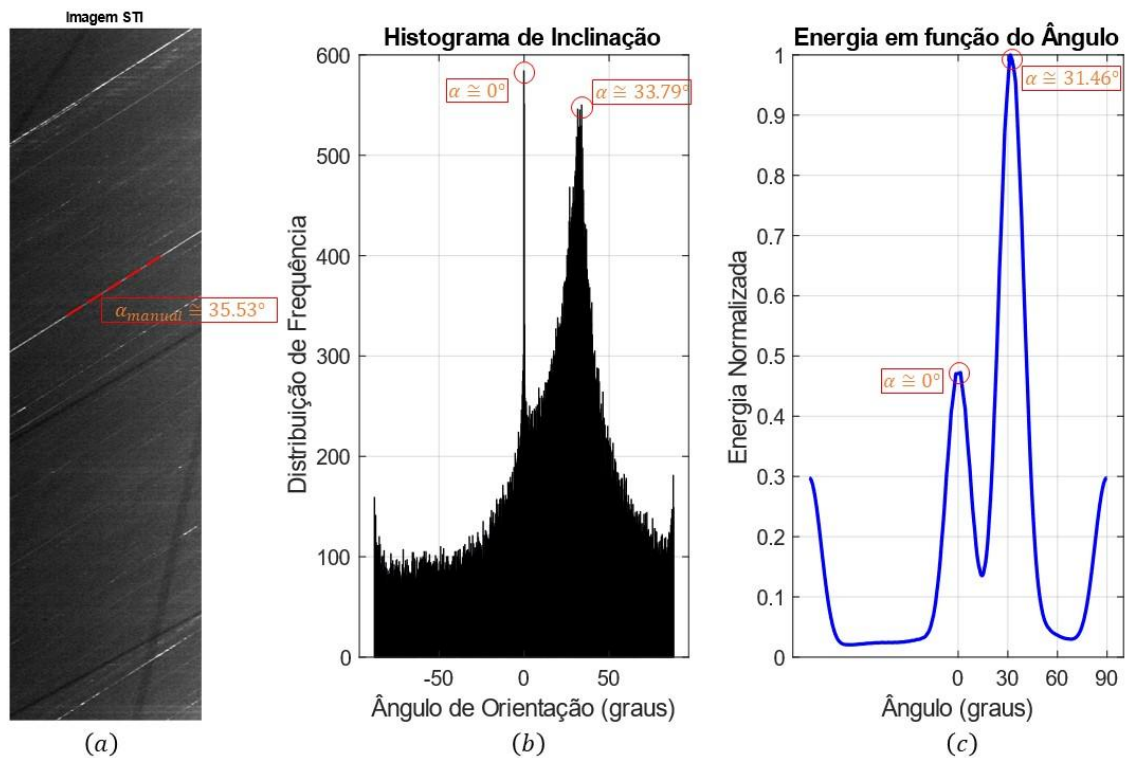
Exp.	Conc. (%)	Q (L/s)	θ (°)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ^{n})	n (-)	ρ (kg/m ³)	u_s (mm/s)	h (mm)
P_1	0.17	0,40	8	32,49	12,94	0,37	1.016,00	38,06	35,77
P_2	0.17	0,92	8	32,88	13,93	0,36	1.001,93	68,87	44,86
P_3	0.14	0,45	6	23,09	4,48	0,48	1.001,13	44,64	33,52
P_4	0.14	0,58	6	24,20	4,64	0,47	993,13	55,11	35,43

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Ao aplicar as metodologias descritas no capítulo 3, foi possível estimar as inclinações dominantes nas imagens STI obtidas em diferentes profundidades de escoamento nos experimentos P_1 , P_2 , P_3 e P_4 , possibilitando a reconstrução dos perfis de velocidade.

Aprofundando a análise da distribuição de energia angular (Figura 24), aplicada ao escoamento operando a 400 RPM, observa-se que o método do GT (Figura 24 (b)) apresenta dois picos principais: um dominante em torno de 0° e um secundário em $33,79^\circ$. Já a análise com a CWT-2D (Figura 24 (c)) resultou em um ângulo dominante de aproximadamente $31,46^\circ$, com o pico secundário em 0° .

Figura 24 – Comparação da estimativa de ângulo de orientação usando diferentes métodos aplicados a uma imagem espaço-temporal (STI): (a) STI com orientação estimada manualmente ($\alpha_{manual} \cong 35,53^\circ$), (b) Estimativa de ângulo pelo método do Tensor Gradiente (GT), mostrando ângulos dominantes em 0° e $33,79^\circ$ e (c) Resultado da Transformada Wavelet Contínua 2D (CWT 2D) proposta, com pico em $31,46^\circ$



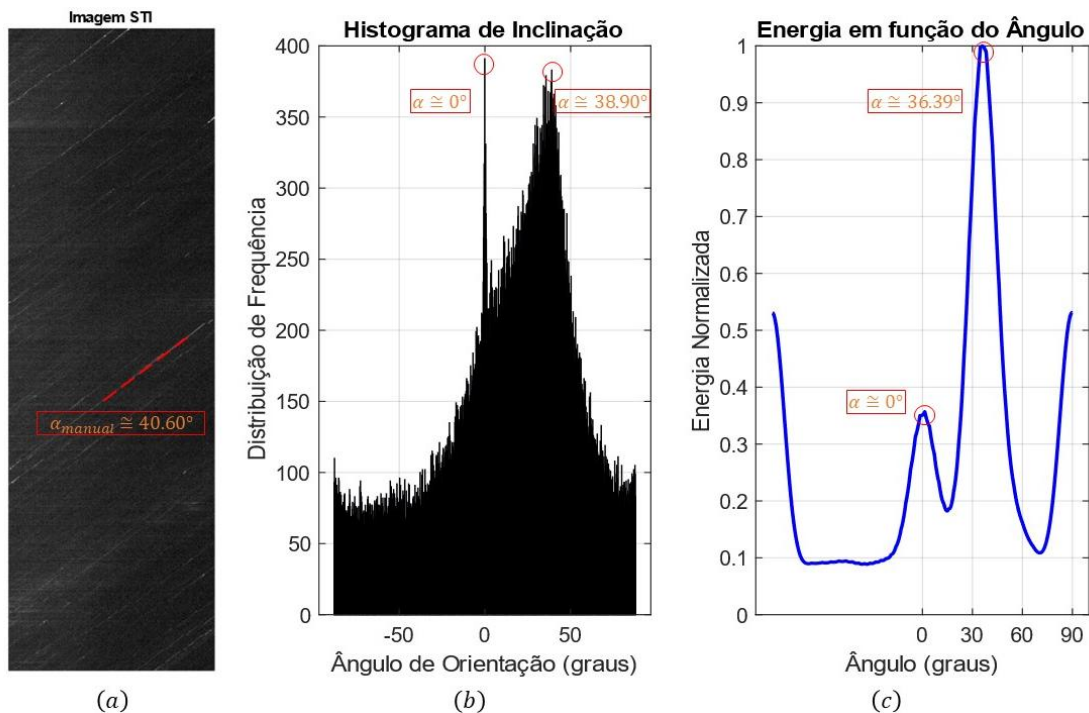
Fonte: Elaborado pelo Autor.

A comparação revela uma maior suscetibilidade do método GT a ruídos, uma vez que a orientação com maior energia detectada foi 0° , associada a padrões horizontais espúrios e reflexos luminosos. Neste caso, essa orientação teve que ser descartada manualmente. Isso evidencia que o método GT é mais sensível a ruídos do que a abordagem baseada na CWT-2D.

A Figura 25 ilustra comportamento análogo para o escoamento operando a 600 RPM. O método GT (Figura 25 (b)) apresenta novamente um pico significativo em 0°

e outro em $38,90^\circ$. A CWT-2D (Figura 25 (c)) identifica como predominante o ângulo de $36,39^\circ$, isolando o ruído horizontal como resposta secundária.

Figura 25 – Comparação da estimativa de ângulo de orientação usando diferentes métodos aplicados a uma imagem espaço-temporal (STI): (a) STI com orientação estimada manualmente ($\alpha_{manual} \cong 40,60^\circ$), (b) Estimativa de ângulo pelo método do Tensor Gradiente (GT), mostrando ângulos dominantes em 0° e $38,90^\circ$ e (c) Resultado da Transformada Wavelet Contínua 2D (CWT 2D) proposta, com pico em $36,39^\circ$

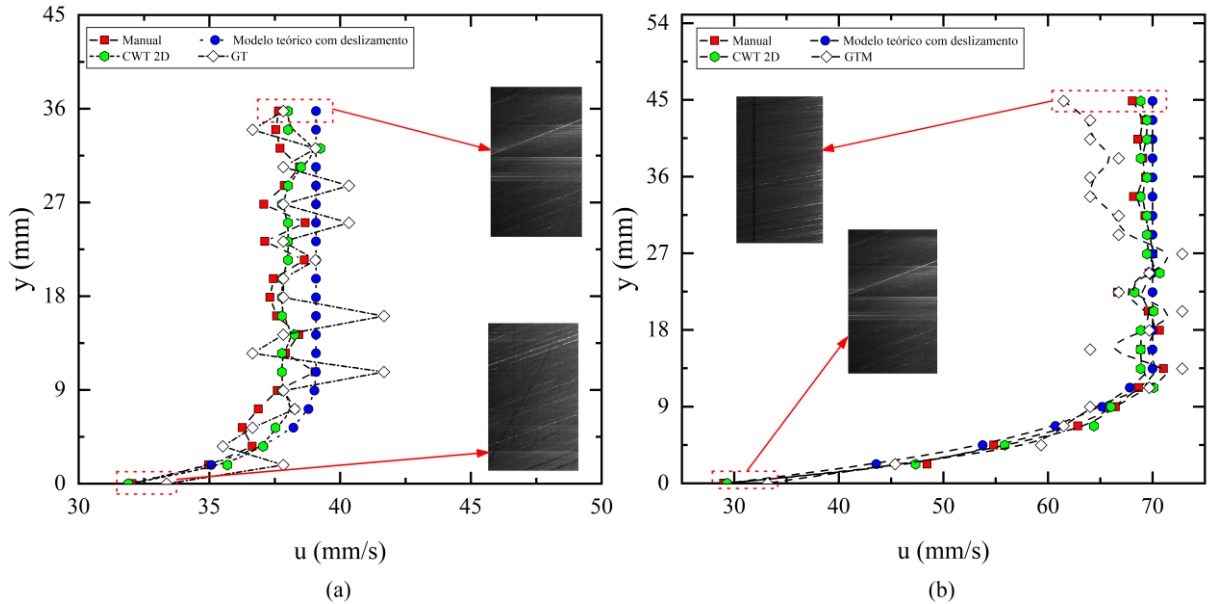


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Constatou-se que a região onde esses erros se agravaram encontra-se próxima ao fundo do canal, onde o contraste visual é reduzido devido à baixa iluminação e a efeitos ópticos associados à reflexão na interface fluido–parede. Tais fatores contribuíram para a dificuldade do método GT em isolar corretamente a direção das estrias.

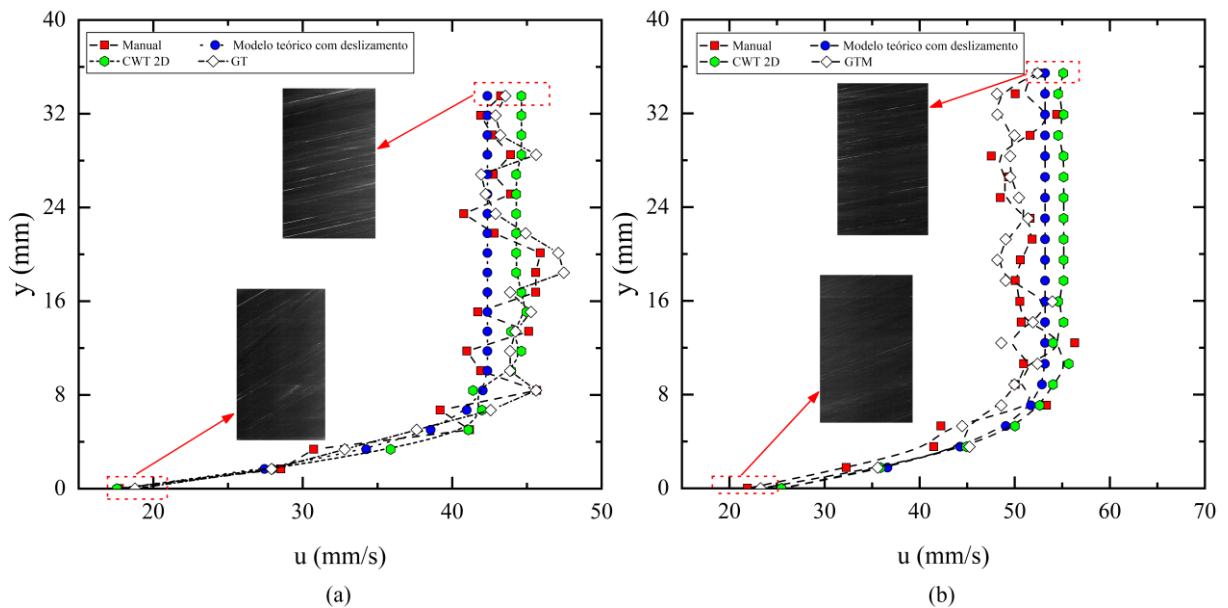
Apesar dessas dificuldades locais de detecção, as Figuras 26 e 27 permitem a comparação dos perfis de velocidade obtidos por meio dos diferentes métodos empregados neste estudo piloto. Destaca-se a boa concordância entre o perfil de velocidade obtido com o método CWT-2D e o perfil teórico de velocidade (baseado no modelo de Herschel-Bulkley sob condição de regime permanente, escoamento uniforme e hipótese de canal largo).

Figura 26 – Comparação dos perfis de velocidade obtidos por diferentes métodos (medições manuais, 2D CWT e método GT) em relação ao modelo teórico com deslizamento, para duas configurações experimentais: (a) P_1 e (b) P_2 . As imagens inseridas mostram exemplos representativos das imagens espaço-temporais utilizadas na análise



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 27 – Comparação dos perfis de velocidade obtidos por diferentes métodos (medições manuais, 2D CWT e método GT) em relação ao modelo teórico com deslizamento, para duas configurações experimentais: (a) P_3 e (b) P_4 . As imagens inseridas mostram exemplos representativos das imagens espaço-temporais utilizadas na análise



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Verifica-se, a partir das Figuras 26 e 27, a presença de deslizamento de parede em todos os escoamentos analisados. Em todos os experimentos a velocidade medida no fundo (ou muito próximo a ele) foi diferente de zero. Materiais com tensão de escoamento apresentam maior tendência a exibir diferentes tipos de heterogeneidades de escoamento (Cloitre e Bonnecaze, 2017). Esse comportamento pode estar associado ao deslizamento de parede, fenômeno no qual a velocidade do fluido junto à superfície sólida não se anula completamente. Em fluidos viscoplásticos, isso pode ocorrer devido à formação de uma fina camada cisalhada próxima à parede, enquanto regiões mais afastadas podem apresentar menor deformação, associada à presença de uma zona de plug.

Em relação ao método do Gradiente Tensorial (GT), observa-se que, embora os valores médios de erro sejam próximos aos obtidos pela CWT-2D, seus perfis apresentam maior dispersão local em alguns trechos da profundidade. Esse comportamento está associado à maior sensibilidade do GT a ruídos, variações de contraste e descontinuidades nas estrias das imagens STI. Como o método se baseia diretamente nos gradientes locais de intensidade, regiões com estrias pouco definidas, baixa relação sinal-ruído ou interferências ópticas podem gerar oscilações na estimativa angular e, conseqüentemente, no perfil de velocidade. Dessa forma, o GT mostrou-se útil para identificar tendências locais, mas menos estável que a CWT-2D na reconstrução global dos perfis analisados.

Os valores do Erro Quadrático Médio (RMSE) para cada caso estão resumidos na Tabela 4. A avaliação do desempenho dos métodos foi realizada utilizando como referência os ângulos de inclinação obtidos por medições manuais, conforme a formulação métrica estabelecida na Seção 3.7.2. Ressalta-se que os valores apresentados correspondem ao RMSE angular global de cada experimento, calculado a partir das diferenças entre os ângulos estimados pelos métodos automáticos e os ângulos obtidos manualmente ao longo das diferentes posições de profundidade. Portanto, os valores estão expressos em graus e não representam diretamente um erro percentual ou um erro individual em cada altura. A conversão para erro percentual dependeria do valor médio dos ângulos manuais de cada experimento. Neste contexto, o RMSE atua como uma medida global da incerteza, indicando a faixa de confiança em torno de cada estimativa e englobando tanto erros sistemáticos quanto a variabilidade das detecções.

A Tabela 4 permite comparar o desempenho das metodologias. Os menores erros foram obtidos com a CWT-2D, com RMSE médio de 1,05°. O método do Gradiente Tensorial (GT) apresentou desempenho semelhante, com RMSE médio de 1,25°. Os resultados demonstram a capacidade do método CWT-2D em produzir estimativas consistentes com desvios pequenos em relação à medição manual.

Tabela 4 – Erro quadrático médio (RMSE) para cada método nos experimentos preliminares, considerando como referência os ângulos manuais

Experimento	CWT 2D	Gradiente Tensorial (GT)
P_1	0,53	1,14
P_2	0,33	1,41
P_3	1,44	1,17
P_4	1,92	1,28
Média	1,05	1,25

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Portanto, os estudos preliminares permitiram validar a aplicação da técnica STIV em escoamentos viscoplásticos, bem como avaliar o desempenho dos métodos automáticos de detecção da orientação das estrias.

Contudo, a necessidade de utilização de um sistema de iluminação a laser de menor potência na campanha experimental definitiva implicou uma reconfiguração da geometria de aquisição das imagens. Em decorrência da limitação do alcance do feixe luminoso, a câmera passou a ser posicionada lateralmente em relação ao canal, introduzindo distorções de perspectiva nas imagens adquiridas.

Diante desse cenário, tornou-se necessária a implementação de procedimentos adicionais de correção e processamento, incluindo a ortorretificação geométrica das imagens, o uso de técnicas de filtragem para redução de ruídos e, posteriormente, a segmentação do domínio de escoamento em regiões de crista e vale nos casos com presença de ondas.

Essas modificações constituem a base metodológica dos experimentos finais desta dissertação, cujos resultados são apresentados nas seções subsequentes.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ESCOAMENTOS ENSAIADOS

Os ensaios experimentais definitivos foram conduzidos no canal inclinado, utilizando o fluido viscoplástico à base de Carbopol (concentração de 0,12%), sob diferentes condições operacionais. O objetivo consistiu em avaliar a aplicação de

técnicas de velocimetria por imagem na obtenção de perfis de velocidade ao longo da profundidade do escoamento. Ressalta-se que, diferentemente da etapa preliminar, os ensaios definitivos foram realizados utilizando um sistema de iluminação laser de menor potência, correspondente a 450 mW.

No total, foram realizados seis ensaios principais (C_1 a C_6) organizados em duas configurações de aquisição: ensaios centrais (C_1 , C_2 e C_3), com aplicação de ortorretificação, e ensaios próximos à parede lateral (C_4 , C_5 e C_6), conduzidos com aquisição frontal. Nos ensaios laterais, foram analisadas duas condições: regime permanente uniforme (MPU) e regime pulsado, com avaliação segmentada das fases de crista e vale. O ensaio C_4 possui caracterização reológica própria, enquanto C_5 e C_6 realizados no mesmo dia e com o mesmo lote de fluido, compartilham as mesmas propriedades reológicas. A organização geral da campanha experimental é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Organização estrutural dos ensaios da campanha experimental

Experimento	Regime / Fase	Posição
C_1	MPU	Centro (15 cm)
C_2	MPU	Centro (15 cm)
C_3	MPU	Centro (15 cm)
C_4	MPU / Onda	Parede (5 cm)
C_5	MPU / Onda	Parede (5 cm)
C_6	MPU / Onda	Parede (10 cm)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

As propriedades físicas, hidráulicas e os números adimensionais calculados exclusivamente para os ensaios realizados na região central do canal (C_1 , C_2 e C_3) estão consolidados na Tabela 6.

Para cada experimento, indicam-se as variáveis de controle (rotação e inclinação), os parâmetros cinemáticos e geométricos (vazão, profundidade e velocidades) e as propriedades reológicas do fluido obtidas previamente por meio do reômetro.

A partir dos valores de τ_0 , h , ρ e θ , foram obtidos os valores de C^* iguais a 0,0399, 0,0558 e 0,0289 para os ensaios C_1 , C_2 e C_3 , respectivamente.

Tabela 6 – Valores médios das propriedades medidas e calculadas nos ensaios centrais

Exp.	Conc. (%)	Rotação (rpm)	Q_{global} (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}	Fr
C_1	0,12	200	0,18	3	0,14	0,24	0,68	1.007,78	125,73	88,37	6,79	26,14	0,34
C_2	0,12	300	0,29	5	0,28	0,21	0,70	1.008,90	216,65	166,09	5,82	56,53	0,70
C_3	0,12	400	0,39	3	0,12	0,26	0,67	1.011,63	218,94	162,70	7,99	64,03	0,58

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A partir dos dados apresentados na Tabela 6, observa-se que os três ensaios centrais foram conduzidos sob diferentes rotações da bomba. O aumento dessa rotação implicou, de forma coerente, um incremento da vazão volumétrica e das velocidades do escoamento (superficial e média), refletindo nas variações da espessura da lâmina de fluido.

Apesar das diferenças hidráulicas entre os ensaios, as propriedades reológicas do fluido mantiveram-se relativamente constantes, uma vez que a concentração de Carbopol foi a mesma em toda a campanha. As pequenas variações observadas nos valores da tensão limite de escoamento (τ_0), do índice de comportamento (n) e do coeficiente de consistência (k_n), são atribuídas às incertezas inerentes aos ensaios reológicos diários e ao processo mecânico de preparo dos lotes de fluido. Os valores de massa específica permaneceram próximos, indicando boa homogeneidade da mistura. De modo geral, os resultados caracterizam adequadamente o escoamento subcrítico ($Fr < 1$) e laminar na região central, fornecendo a base para a estimativa da STIV sob efeito de correção de perspectiva.

Por sua vez, a Tabela 7 detalha as condições experimentais e os parâmetros calculados para os ensaios realizados próximos à parede lateral (C_4 , C_5 e C_6), contemplando as fases de escoamento não perturbado (MPU) e com instabilidades superficiais. Para facilitar a apresentação dos dados, a Tabela 7 foi organizada em duas partes: a primeira reúne as condições experimentais e as propriedades reológicas do fluido, enquanto a segunda apresenta as vazões características, a velocidade média do escoamento e os números adimensionais calculados.

A principal diferença metodológica desses ensaios em relação aos ensaios centrais reside na posição transversal de medição, realizada próxima à parede lateral do canal. Nessa configuração, a análise permite avaliar a influência da parede lateral sobre os perfis de velocidade e sobre as estimativas hidráulicas obtidas por STIV, especialmente por meio da comparação entre a vazão global medida pelo método

gravimétrico (Q_{global}), a vazão local associada ao perfil medido (q_{local}) e a vazão global equivalente estimada por STIV ($Q_{eq,STIV}$).

A massa específica (ρ) foi determinada experimentalmente pelo método gravimétrico, a partir da razão entre a massa de uma amostra de fluido e um volume conhecido. Para cada condição, foram realizadas medições repetidas, e o valor apresentado corresponde à média obtida.

Tabela 7 – Condições experimentais dos ensaios laterais, contemplando as fases MPU e Perturbado (Onda)

Exp.	Conc. (%)	Rotação (rpm)	θ (°)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n (-)	ρ (kg/m ³)	u_s (mm/s)	h (mm)
C_4	0,12	500	5	1,51	0,75	0,54	1003,38	125,41	10,36
C_5	0,12	600	5	2,85	1,40	0,48	1001,08	143,54	13,01
C_6	0,12	600	5	2,85	1,40	0,48	1001,08	166,42	12,67

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 8 – Parâmetros hidráulicos e adimensionais dos ensaios laterais

Exp.	Q_{global} (L/s)	q_{local} (L/s)	$Q_{eq,STIV}$ (L/s)	$\bar{u}$ (mm/s)	Re_{HB}	C^*	Fr	Fr_{min}
C_4	0,49	0,059	0,36	157,56	31,01	0,1715	0,49	0,31
C_5	0,60	0,082	0,49	153,73	19,93	0,2563	0,43	0,25
C_6	0,60	0,095	0,57	157,85	20,65	0,2632	0,45	0,25

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Devido à cronologia da campanha, o ensaio C_4 possui uma caracterização reológica própria. Em contrapartida, os ensaios C_5 e C_6 , realizados no mesmo dia com o mesmo lote, compartilham as mesmas propriedades do material, diferindo apenas na distância da parede lateral.

Na segunda parte da Tabela 7, observa-se que a velocidade média do escoamento ($\bar{u}$) foi calculada a partir da vazão global obtida pelo método gravimétrico, conforme definido na metodologia. Essa escolha garante consistência no cálculo dos números adimensionais (Re_{HB}), (Fr) e (Fr_{min}), permitindo a comparação direta entre os diferentes ensaios. Por outro lado, os valores de (q_{local}) e ($Q_{eq,STIV}$) foram utilizados como parâmetros comparativos associados ao perfil de velocidade obtido localmente por STIV.

Os valores de (Re_{HB}), calculados com base na velocidade média gravimétrica, indicam que os escoamentos permanecem em regime predominantemente laminar,

com valores iguais a 31,01 para (C_4), 19,93 para (C_5) e 20,65 para (C_6). Esses resultados evidenciam a predominância dos efeitos viscosos e viscoplásticos sobre os efeitos inerciais, característica esperada para os escoamentos de Carbopol analisados.

Em relação ao número de Froude, os valores obtidos foram ($Fr = 0,49$), ($Fr = 0,43$) e ($Fr = 0,45$). Esses valores foram superiores aos respectivos valores de (Fr_{min}), estimados em 0,31, 0,25 e 0,25. Assim, os ensaios atendem ao critério mínimo de Froude adotado para a ocorrência de instabilidades superficiais.

Entretanto, deve-se destacar que no presente aparato experimental, as perturbações foram introduzidas no sistema de modo que a comparação entre (Fr) e (Fr_{min}) deve ser interpretada como uma análise hidráulica complementar (necessária), e não como uma condição suficiente para caracterizar a formação de ondas mais estabilizadas como *roll waves* plenamente desenvolvidas.

A análise paramétrica dos ensaios C_4 , C_5 e C_6 evidencia uma progressão física coerente com a fluidodinâmica de canais abertos. O aumento da rotação da bomba de 500 rpm (C_4) para 600 rpm (C_5), mantendo-se a coordenada transversal (5cm da parede) e mesma inclinação do canal, resulta na elevação esperada tanto da profundidade da lâmina (10,36 mm para 13,01 mm) quanto da velocidade superficial (125,41 mm/s para 143,54 mm/s), em virtude do incremento da vazão volumétrica imposta.

Outro fenômeno de interesse, no entanto, é revelado ao comparar os ensaios C_5 e C_6 . Sob a mesma condição de vazão (600 rpm) e inclinação (5°), o deslocamento do plano de medição de 5 cm para 10 cm de distância da parede lateral resultou em um notável aumento da velocidade superficial, que passou de 143,54 mm/s para 166,42 mm/s. Esse aumento indica a influência da parede lateral sobre o campo de velocidades, uma vez que regiões mais próximas à parede tendem a apresentar velocidades menores devido aos efeitos de cisalhamento lateral e à formação de uma camada limite junto à parede de acrílico.

A comparação entre Q_{global} e $Q_{eq,STIV}$ mostra que a estimativa obtida a partir do perfil local é inferior à vazão gravimétrica nos três ensaios. Esse resultado é esperado devido à influência da parede lateral sobre o campo de velocidades, de modo que $Q_{eq,STIV}$ deve ser interpretada apenas como uma estimativa equivalente e comparativa, e não como uma medição direta da vazão total do canal.

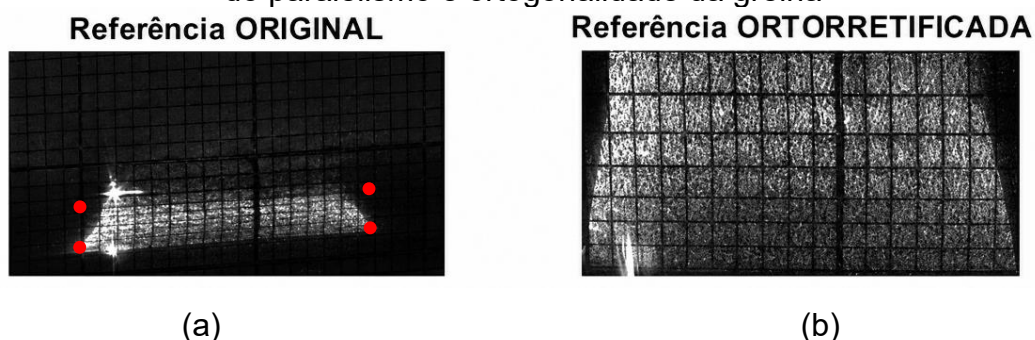
4.3 EFEITO DA ORTORRETIFICAÇÃO E QUALIDADE DAS IMAGENS

Devido às restrições físicas impostas pelo arranjo experimental para a aquisição na região central do canal, a câmera de alta velocidade foi posicionada com um ângulo de visada oblíquo em relação à superfície livre do escoamento. Essa configuração, embora necessária para a visualização adequada da lâmina de fluido e das partículas traçadoras, introduz uma distorção de perspectiva significativa nas imagens brutas adquiridas. Como consequência, a escala espacial (relação pixel/mm) torna-se não uniforme ao longo do campo de visão, inviabilizando a medição direta e precisa da inclinação das estrias e, portanto, da velocidade superficial do escoamento.

Para corrigir esse efeito sistemático, foi aplicado um processo de ortorretificação baseado em uma transformação projetiva (homografia), conforme descrito na Seção 3.5. Inicialmente, a matriz de transformação foi determinada a partir de uma imagem de referência correspondente a uma malha de calibração submersa no fluido, adquirida sob as mesmas condições geométricas do ensaio. A Figura 28 apresenta uma comparação direta entre a imagem original da malha de referência e o resultado após a aplicação do procedimento de ortorretificação para o ensaio C_1 (200 RPM, 3° de inclinação).

Neste procedimento, a malha de calibração atua como um referencial físico rigoroso, possuindo um espaçamento regular conhecido (1×1 mm) que fornece as coordenadas físicas no plano de medição necessárias para o mapeamento. Ao identificar os pontos de controle nas interseções da grade distorcida e associá-los a um plano cartesiano ideal, o algoritmo computa os coeficientes exatos da matriz de transformação bidimensional. É importante destacar que, sem essa correção, o erro de perspectiva se propagaria de forma não linear ao longo do domínio espacial, comprometendo severamente o cálculo do ângulo das estrias.

Figura 28 – Processo de calibração geométrica: (a) Imagem original da malha de referência evidenciando a distorção de perspectiva e a seleção dos pontos de controle; (b) Imagem de referência ortorretificada, demonstrando o restabelecimento do paralelismo e ortogonalidade da grelha



Fonte: Elaborado pelo Autor.

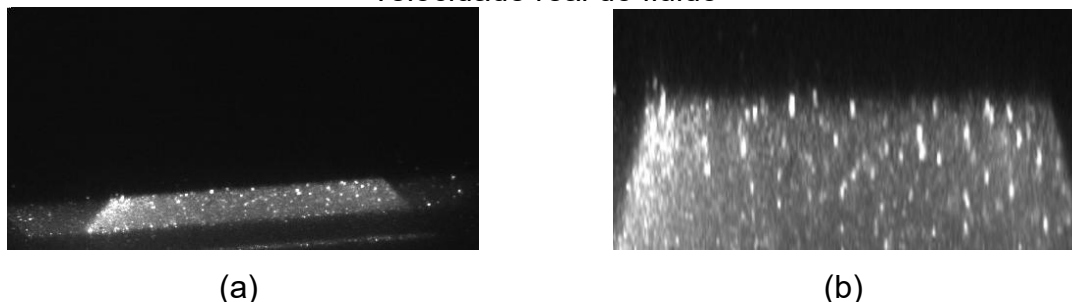
Como pode ser observado na Figura 28 (a), as linhas da malha original não se apresentam paralelas na imagem bruta, convergindo para um ponto de fuga característico da projeção em perspectiva. Após o cálculo e aplicação da matriz de homografia (Figura 28 (b)), a geometria da malha é corrigida, reduzindo as distorções de perspectiva e melhorando a correspondência entre o plano físico de medição e o plano da imagem. Esse procedimento contribui para a consistência métrica necessária às análises.

Adicionalmente, cabe destacar que os ensaios foram realizados com um sistema de iluminação a laser de potência relativamente reduzida, condição imposta por limitações experimentais e de segurança operacional. Essa característica resultou em imagens com menor intensidade luminosa e contraste limitado entre as partículas traçadoras e o fundo, especialmente nas regiões mais profundas da lâmina de fluido. Embora tal condição não inviabilize a aplicação da técnica STIV, ela reforça a necessidade de um tratamento cuidadoso das imagens, tanto do ponto de vista geométrico quanto de iluminação, para garantir a confiabilidade das análises.

Uma vez validada a matriz de transformação com a imagem de referência, o mesmo operador matemático foi aplicado a toda a sequência de imagens do escoamento do fluido (gel de Carbopol).

Figura 29 ilustra o impacto da correção geométrica nas imagens experimentais utilizadas para a construção das imagens espaço-temporais (STI), exemplificando o ensaio C_1 .

Figura 29 – Aplicação da correção geométrica ao escoamento (Ensaio C_1): (a) Imagem original do escoamento de Carbopol com distorção perspectiva; (b) Imagem ortorretificada do escoamento, onde a orientação das estrias corresponde à velocidade real do fluido



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na imagem bruta do escoamento (Figura 29 (a)), as estrias formadas pelo movimento das partículas traçadoras apresentam-se geometricamente distorcidas, o que conduziria a erros significativos na determinação da inclinação das estruturas e, consequentemente, da velocidade superficial. Após a ortorretificação (Figura 29 (b)), a influência da perspectiva é eliminada, permitindo que a técnica STIV interprete corretamente o deslocamento das estruturas do escoamento ao longo do tempo. Ressalta-se que esse procedimento foi aplicado individualmente a cada condição experimental (C_1 , C_2 e C_3), utilizando-se as respectivas alturas de lâmina e imagens de referência, assegurando a consistência geométrica de todo o conjunto de dados.

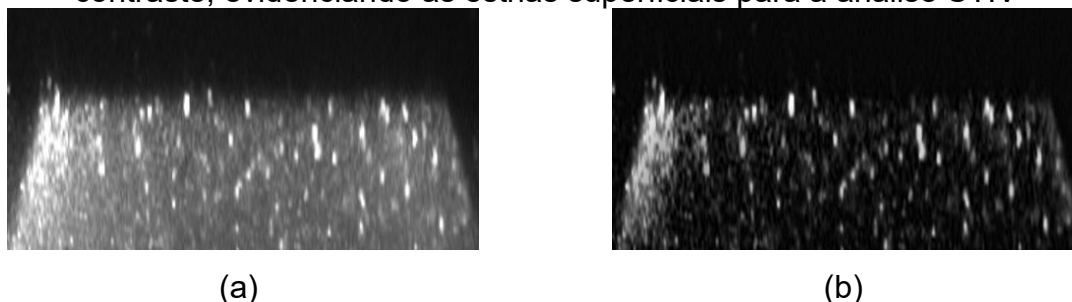
Apesar da correção geométrica obtida pela ortorretificação, as imagens resultantes ainda preservam características de iluminação inerentes ao processo de aquisição, tais como variações de intensidade do laser, iluminação não uniforme e ruído de fundo, que podem dificultar a detecção precisa da orientação das estrias.

Esses efeitos tornam-se particularmente relevantes em função da menor potência do laser utilizada, que reduz a razão sinal-ruído das imagens brutas. Com o objetivo de mitigar esses efeitos e padronizar a entrada para os algoritmos de análise STIV, foi aplicada a rotina de pré-processamento digital descrita na Seção 3.5.3, utilizando o software ImageJ.

A Figura 30 apresenta o resultado deste tratamento. À esquerda (Figura 30 (a)), observa-se a imagem apenas ortorretificada, onde o contraste entre as estrias e o fundo é baixo. À direita (Figura 30 (b)), tem-se o resultado após a aplicação sequencial dos filtros no software ImageJ: conversão para 8-bit, subtração de fundo

(*rolling ball radius* = 25 pixels), realce de contraste normalizado e suavização gaussiana ($\sigma = 0.5$).

Figura 30 – Efeito do pré-processamento digital (ImageJ): (a) Imagem ortorretificada original com baixo contraste; (b) Imagem final após subtração de fundo e realce de contraste, evidenciando as estrias superficiais para a análise STIV



Fonte: Elaborado pelo Autor.

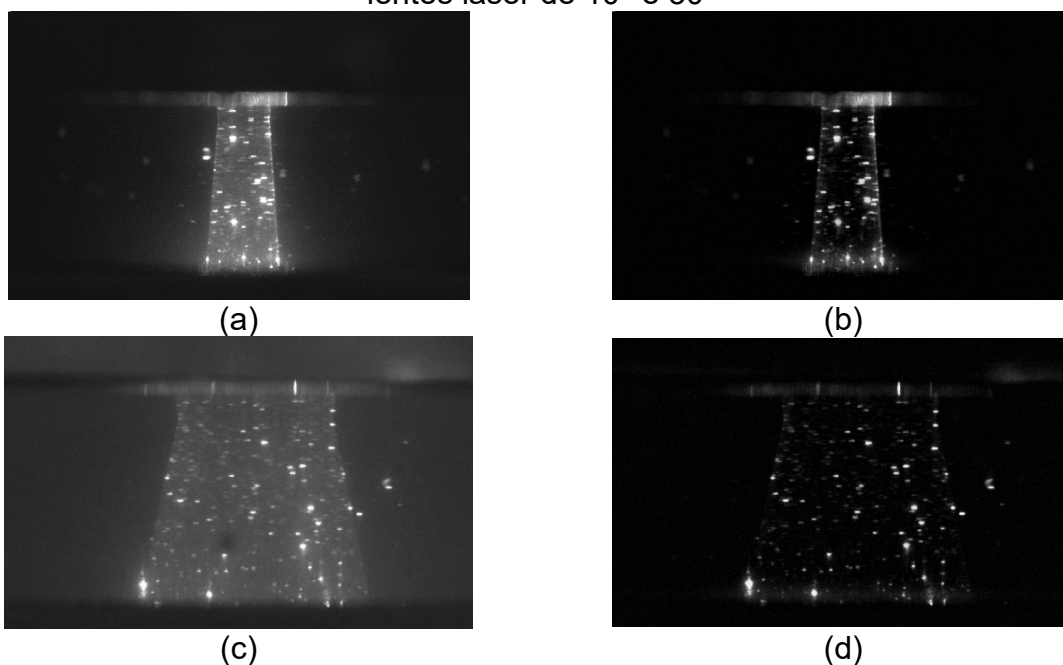
A comparação visual evidencia que o pré-processamento digital foi eficaz na melhoria da qualidade das imagens. A subtração de fundo reduziu significativamente as não uniformidades associadas à iluminação do laser, enquanto o realce de contraste aumentou a definição das estruturas superficiais do escoamento. A aplicação de uma suavização gaussiana leve contribuiu para a redução do ruído de alta frequência, sem comprometer a definição angular das estrias nem introduzir viés direcional nas imagens.

Essa combinação de filtros atua de maneira complementar. O algoritmo de subtração de fundo (*rolling ball*) corrige especificamente o perfil de intensidade irregular inerente ao feixe do laser e a atenuação óptica gradativa que ocorre ao longo da profundidade do fluido viscoplástico. Por sua vez, o realce de contraste atua diretamente sobre o histograma da imagem, maximizando a distinção tonal entre o sinal útil (partículas traçadoras) e o fluido escuro.

Para demonstrar a eficácia dessa rotina de pré-processamento digital nos ensaios laterais que dispensaram a ortorretificação, mas exigiram adaptações ópticas, a Figura 31 apresenta o efeito dos filtros em função das diferentes lentes permutáveis utilizadas no gerador de plano laser. Ressalta-se que as imagens apresentadas possuem caráter qualitativo, uma vez que o tempo de exposição foi ajustado durante a aquisição conforme a intensidade luminosa disponível e a nitidez das estrias. Assim, a comparação entre as imagens tem como objetivo ilustrar o efeito do pré-

processamento digital e das lentes utilizadas, não constituindo uma comparação fotométrica quantitativa.

Figura 31 – Efeito do pré-processamento digital nas imagens frontais utilizando lentes laser de 10° e 30°



Fonte: Elaborado pelo Autor.

As imagens (a) e (b) da Figura 31 correspondem ao ensaio conduzido a 500 rpm (C_4). A utilização da lente de 10° concentrou a luz em uma região espacial mais restrita, garantindo intensidade suficiente, cujo contraste foi otimizado pela filtragem digital (Figura 31 (b)). Por outro lado, para os ensaios de maior velocidade a 600 rpm, como o C_5 (Figura 31 (c)), fez-se necessária a utilização de uma lente de 30°. Essa alteração ampliou a área iluminada na direção do escoamento para captar partículas mais rápidas, mas diluiu a intensidade do feixe. A aplicação das mesmas rotinas no ImageJ (Figura 31 (d)) mitigou o escurecimento do fundo e realçou os traçadores, comprovando a robustez do protocolo.

É importante destacar que este protocolo de filtragem no ImageJ foi aplicado integralmente a todo o conjunto de dados experimentais da dissertação (C_1 a C_6). Dessa forma, as imagens resultantes, sejam as submetidas à ortorretificação prévia (como exemplificado na Figura 30) ou as corrigidas óticamente de forma direta (Figura 31), constituem uma base de dados padronizada e otimizada.

4.3.1 Efeitos ópticos de reflexão na interface ar-fluido nos ensaios laterais

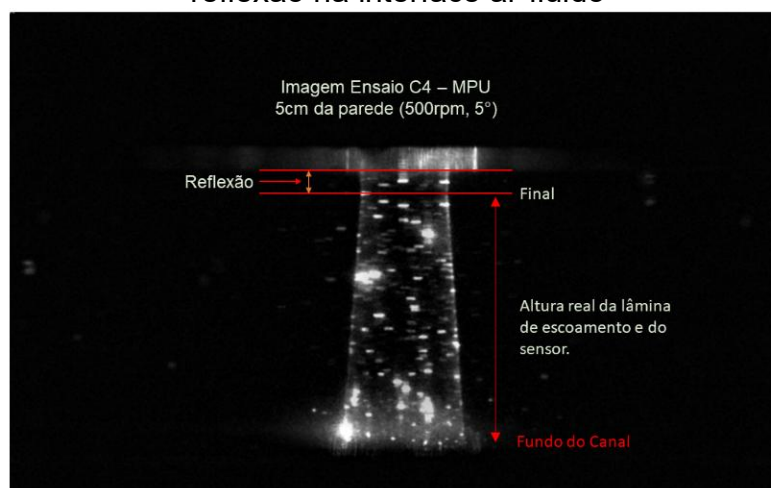
Durante a condução dos ensaios próximos à parede lateral (C_4 , C_5 e C_6), cuja aquisição de imagens ocorreu com visada frontal direta, observou-se a formação de uma zona de reflexão luminosa espúria na superfície livre do escoamento. Esse fenômeno óptico é decorrente da diferença de índice de refração entre a lâmina de fluido viscoplástico e o ar, o que transforma a interface em uma superfície parcialmente espelhada sob a intensa incidência do plano laser.

Durante o ajuste fino do aparato experimental, constatou-se que a posição aparente desse reflexo no campo de visão da câmera era altamente dependente do ângulo de inclinação vertical do tripé (*pitch*). Movimentos de inclinação para baixo projetavam o reflexo para a região superior da imagem, enquanto inclinações para cima deslocavam o artefato luminoso em direção ao fundo do canal.

Do ponto de vista fluidodinâmico, a região próxima ao fundo do canal (camada limite) é de extrema importância para a técnica STIV, pois abriga os maiores gradientes de velocidade e as estrias cruciais para a identificação do deslizamento de parede. Por essa razão, optou-se deliberadamente por ajustar a câmera de modo a confinar a zona de reflexão na parte superior da lâmina de fluido (acima da superfície livre real), preservando a nitidez absoluta das partículas traçadoras próximas ao leito.

A Figura 32 apresenta um esquema visual dessa configuração geométrica, exemplificada com uma imagem bruta do ensaio C4 em regime MPU.

Figura 32 – Detalhamento óptico da zona de escoamento (Ensaio C4 MPU, 500 rpm, 5 cm da parede): distinção entre a altura real da lâmina de fluido e a zona de reflexão na interface ar-fluido



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A imagem evidencia a distinção clara entre a cota real da superfície do escoamento e a banda superior de reflexão espúria. É imperativo destacar que esse efeito visual não comprometeu a determinação quantitativa da profundidade física da lâmina (h). Para os ensaios laterais, a altura real continuou sendo rigorosamente validada pela concordância entre as leituras do sensor ultrassônico e as medições visuais extraídas a partir da malha de calibração espacial. Diferentemente dos ensaios centrais, onde a malha precisou ser submersa para lidar com a refração da visada oblíqua, conforme fundamentado na Seção 3.5.1, a geometria frontal da câmera nos ensaios de parede permitiu a aquisição da imagem de referência da malha de calibração com o canal vazio, previamente à introdução do fluido. Com a câmera mantida estática, essa abordagem garantiu a exata correspondência métrica (mm/pixel) sem a interferência óptica do material viscoplástico.

Cabe ressaltar que esse artefato reflexivo manifestou-se em todos os ensaios de parede, tanto em regime MPU quanto nas fases de instabilidade induzida (*roll waves*). No caso dos escoamentos transientes, o reflexo mostrou-se mais proeminente durante a passagem das cristas das ondas, sendo sensivelmente atenuado nas regiões de vale devido à mudança no ângulo de incidência entre o laser e a superfície inclinada da interface. O tratamento digital prévio dessas imagens, aliado à robustez da Transformada Wavelet (CWT-2D) nas etapas subsequentes, garantiu que a detecção global das orientações não fosse corrompida por essa fina banda de espalhamento luminoso superior.

4.4 ANÁLISE DAS IMAGENS STI E DETERMINAÇÃO DA ORIENTAÇÃO DAS ESTRIAS

Após o pré-processamento digital, as imagens foram convertidas em imagens espaço-temporais (STI), nas quais a inclinação das estrias está associada à velocidade local do escoamento. Nesta etapa, foram comparadas três abordagens para estimativa da orientação angular: o método do Gradiente Tensorial (GT), a Transformada Wavelet Contínua Bidimensional (CWT-2D) e a medição manual, utilizada como referência de validação.

4.4.1 Análise comparativa dos métodos (Ensaio C_1 , C_2 e C_3)

A escolha de uma coordenada y específica não é arbitrária; ela corresponde a uma profundidade física bem definida no interior da lâmina de fluido. Ao extrair os pixels ao longo dessa linha horizontal sucessivamente a cada frame e empilhá-los cronologicamente, o algoritmo constrói uma representação bidimensional no plano espaço-temporal, na qual a translação das estruturas do escoamento é representada pela inclinação das estrias.

A transição desta textura visual bruta para uma medida quantitativa de velocidade exige algoritmos capazes de lidar com a atenuação do sinal óptico e com ruídos residuais. É neste ponto que a fundamentação matemática dos métodos automáticos se diferencia. O Gradiente Tensorial opera em uma escala estritamente local, avaliando as derivadas da intensidade de cada pixel para gerar uma distribuição estatística de orientações. Em contrapartida, a Transformada Wavelet Contínua Bidimensional (CWT-2D) atua no domínio espectral, buscando a máxima correlação de energia global entre a textura estriada da imagem inteira e uma função matemática base (wavelet de Cauchy).

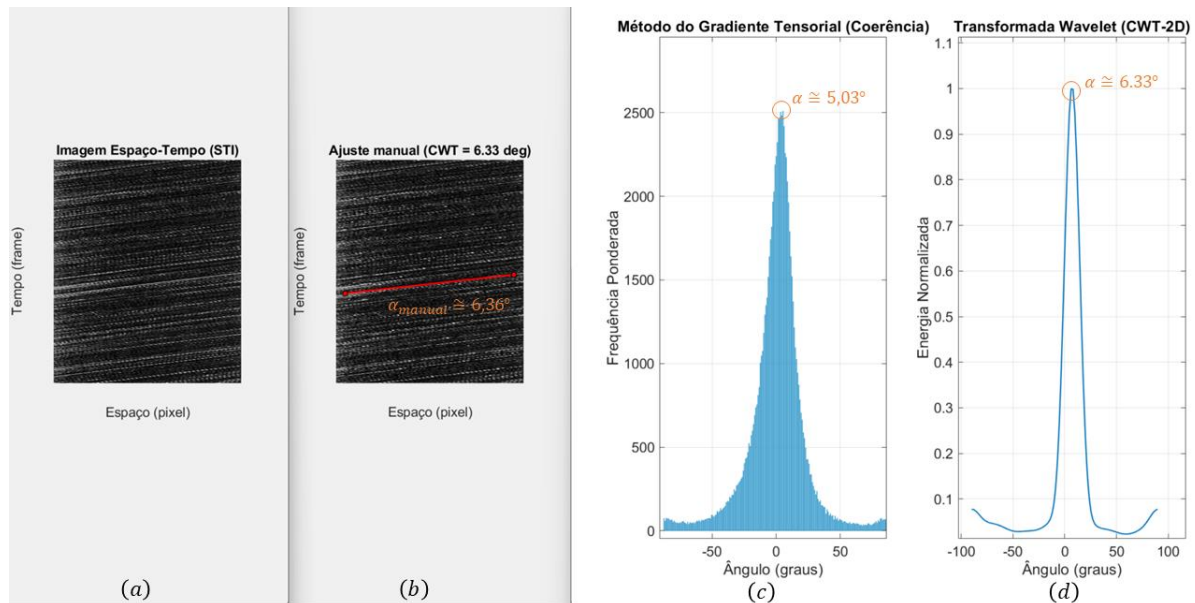
Além das formulações matemáticas automáticas, a inclusão da etapa de validação interativa (método manual) atua como o referencial físico (*ground truth*) fundamental desta análise. O sistema cognitivo humano possui uma capacidade notável de integrar padrões texturais de forma global, filtrando intuitivamente ruídos pontuais, falhas na sementeira de partículas e artefatos de iluminação, para traçar uma diretriz que represente o movimento advectivo real do fluido.

Nos métodos automáticos, a busca da orientação angular foi realizada no intervalo $-90^\circ \leq \alpha < 90^\circ$. Assim, os ângulos negativos eventualmente presentes nos espectros representam orientações geométricas opostas das estruturas na imagem STI, de acordo com a convenção adotada para os eixos espaço-tempo, e não indicam necessariamente velocidades negativas. Neste trabalho, a velocidade foi calculada a partir do pico dominante associado à orientação principal das estrias, enquanto respostas secundárias em ângulos negativos foram interpretadas como contribuições espúrias associadas a ruído, textura residual ou estruturas de baixo contraste.

A Figura 33 apresenta um painel representativo da análise realizada para uma linha específica do Ensaio C_1 (200 RPM, 3° , $y \approx 136 \text{ px}$), ilustrando as principais etapas do processamento das imagens espaço-temporais (STI) e a determinação do ângulo

de inclinação das estrias por diferentes métodos. A comparação direta entre as abordagens permite avaliar a consistência e a robustez de cada técnica na detecção da orientação dominante das estruturas do escoamento.

Figura 33 – Comparação dos métodos de determinação da orientação das estrias para o Ensaio C_1 (200 rpm, 3° , $y \approx 136 \text{ px}$): (a) Imagem Espaço-Tempo (STI) bruta; (b) Validação manual com linha de referência ($\alpha_{\text{manual}} = 6,36^\circ$); (c) Estimativa de ângulo pelo método do GT com pico em $\alpha = 5,03^\circ$; (d) Espectro de energia da Transformada Wavelet (CWT-2D), com pico em $\alpha = 6,33^\circ$



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A imagem apresentada na Figura 33(a) corresponde à STI bruta gerada a partir da extração sucessiva de linhas horizontais da sequência de imagens adquiridas. Neste domínio espaço-temporal, o eixo horizontal (x) representa a posição espacial (pixels) ao longo da linha de varredura, enquanto o eixo vertical (t) representa a evolução temporal (correspondente aos 429 frames capturados). A textura visual formada apresenta estrias inclinadas, cuja inclinação em relação à vertical é proporcional à velocidade de advecção do fluido.

A Figura 33 (b) ilustra o procedimento de validação manual da orientação das estrias. Sobre o mesmo domínio espaço-temporal (x vs t), o operador ajustou interativamente uma linha de referência tangente às estruturas visuais dominantes, obtendo um ângulo de inclinação $\alpha_{\text{manual}} = 6,36^\circ$. Este valor é considerado a

referência física (*ground truth*) para o ponto analisado, por integrar a interpretação global da textura do escoamento ao longo de todo o domínio espaço-temporal.

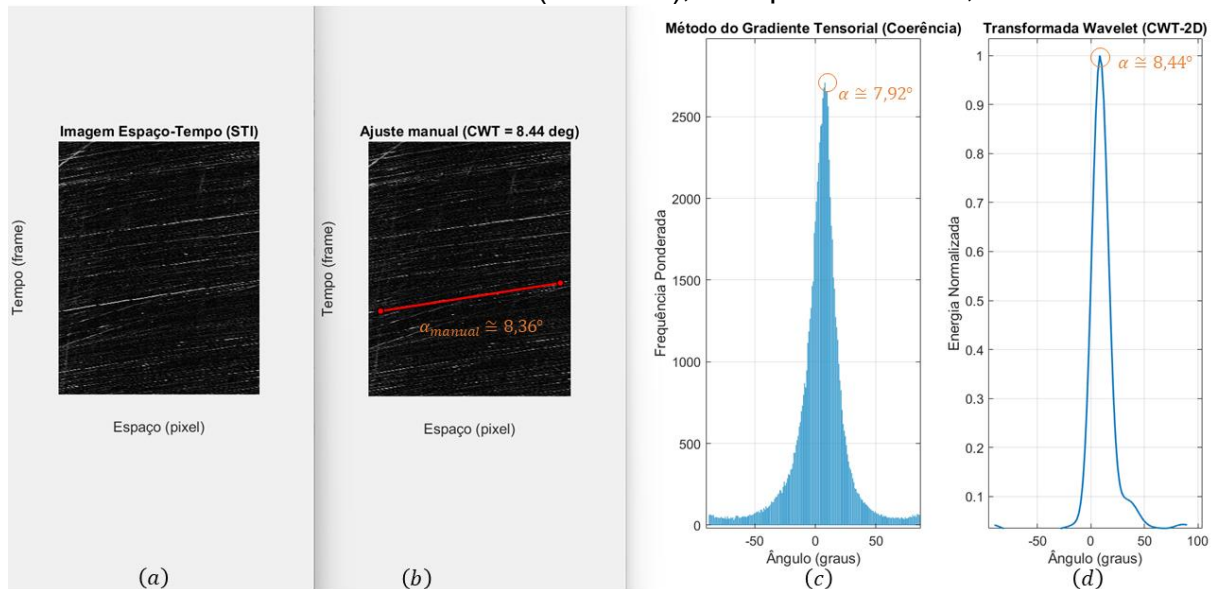
O resultado do método do Gradiente Tensorial (STI Gaussiano) é apresentado na Figura 33 (c), na forma de um histograma de orientações locais. O eixo horizontal representa o ângulo de orientação (α , em graus), enquanto o eixo vertical indica a frequência de ocorrência dessas orientações ao longo da imagem. O pico da distribuição corresponde à inclinação dominante identificada pelo algoritmo, resultando em $\alpha = 5,03^\circ$. Observa-se uma discrepância significativa em relação ao valor manual, indicando que, para este caso específico, o método baseado em gradientes locais mostrou-se sensível a ruídos e a estruturas secundárias menos inclinadas presentes na imagem.

Por fim, a Figura 33 (d) apresenta o espectro de energia angular obtido por meio da Transformada Wavelet Contínua Bidimensional (CWT-2D). O eixo horizontal representa o ângulo de orientação (α), enquanto o eixo vertical corresponde à energia normalizada. O ângulo associado ao máximo da energia espectral foi $\alpha = 6,33^\circ$, valor que apresenta excelente concordância com a medição manual, com uma diferença insignificante. Este resultado evidencia a maior robustez do método CWT-2D na identificação de orientações coerentes, especialmente em imagens com variações de contraste e ruído residual. Para os ensaios centrais (C_1 , C_2 e C_3), as posições verticais analisadas correspondem a alturas da lâmina previamente validadas, sendo utilizadas como referência para a seleção das linhas horizontais nas imagens STI.

De modo geral, a comparação apresentada na Figura 33 evidencia que a CWT-2D apresentou maior proximidade em relação à medição manual, enquanto o Gradiente Tensorial mostrou maior sensibilidade às variações locais da textura da imagem. Essa diferença está associada à própria natureza dos métodos: enquanto a CWT-2D avalia a resposta energética global da imagem para diferentes orientações, o GT depende diretamente dos gradientes locais de intensidade, podendo ser mais afetado por ruídos pontuais, falhas de contraste e estruturas secundárias presentes na STI.

A Figura 34 apresenta um exemplo adicional da análise da orientação das estrias para o Ensaio C_2 (300 rpm, 5°), considerando uma linha localizada aproximadamente em $y \approx 214\text{ px}$. Este caso é particularmente ilustrativo das limitações do método do Gradiente Tensorial (STI Gaussiano) em situações onde coexistem padrões texturais concorrentes na imagem espaço-temporal.

Figura 34 – Comparação dos métodos de determinação da orientação das estrias para o Ensaio C_2 (300 rpm, 5° , $y \approx 214 \text{ px}$): (a) Imagem Espaço-Temporal (STI) bruta; (b) Validação manual com linha de referência ($\alpha_{\text{manual}} = 8,36^\circ$), (c) Estimativa de ângulo pelo método do GT com pico em $\alpha = 7,92^\circ$ e (d) Espectro de energia da Transformada Wavelet (CWT-2D), com pico em $\alpha = 8,44^\circ$



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 34 (a) mostra a imagem STI correspondente, na qual são observadas estrias inclinadas principais, bem como padrões quase horizontais de menor relevância física. A Figura 34(b) apresenta a validação manual da orientação dominante, resultando em um ângulo $\alpha_{\text{manual}} = 8,36^\circ$, considerado representativo da velocidade local do escoamento neste ponto.

O histograma angular obtido pelo método do Gradiente Tensorial (Figura 34 (c)) aponta um pico dominante de $\alpha \approx 7,92^\circ$. Em contraste, a análise realizada por meio da Transformada Wavelet Contínua Bidimensional (Figura 34 (d)) resultou em um ângulo dominante de $\alpha \approx 8,44^\circ$, em excelente concordância com a medição manual. O espectro de energia angular da CWT-2D evidencia um pico bem definido e isolado, indicando maior capacidade do método em filtrar componentes não coerentes e selecionar a orientação global dominante da textura.

Este exemplo comprova que o método baseado em gradientes locais (GT) pode ser influenciado por padrões secundários, enquanto a abordagem espectral baseada

em wavelets mostrou-se mais robusta e consistente, reforçando sua adequação para a análise automática de escoamentos opacos e transientes.

Para o Ensaio C_3 , o procedimento de análise foi mantido idêntico ao descrito para os Ensaios C_1 e C_2 . Dessa forma, assegura-se a consistência metodológica na extração dos ângulos de inclinação e das velocidades locais ao longo da profundidade na região central do escoamento. Nos ensaios subsequentes (C_4 , C_5 e C_6), realizados a 5 cm e 10 cm da parede lateral e segmentados nas fases de MPU e presença de ondas, a aplicação destes mesmos algoritmos é avaliada frente à forte indução de cisalhamento, conforme discutido nas próximas subseções.

4.4.2 Análise comparativa dos métodos aplicados aos ensaios laterais em regime MPU (C4, C5 e C6)

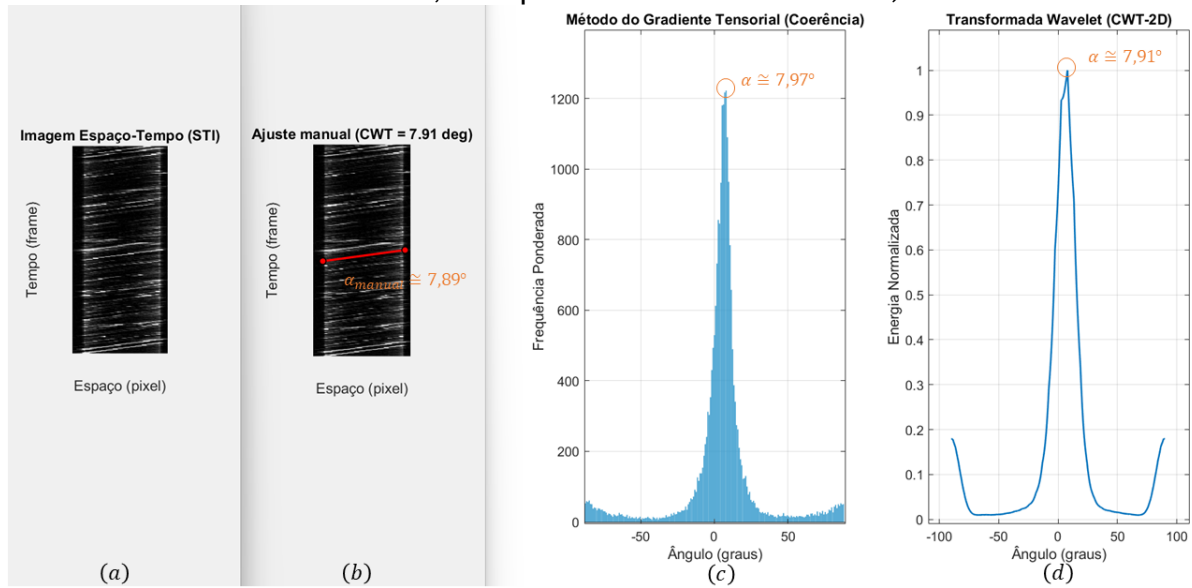
Nesta subseção, estende-se a análise comparativa dos algoritmos de detecção angular para os ensaios conduzidos próximos à parede lateral do canal C_4 , C_5 e C_6 , operando estritamente em regime de Movimento Permanente Uniforme (MPU), antes do acionamento do sistema de perturbação mecânica. O objetivo consiste em avaliar a robustez das técnicas automáticas frente aos desafios relacionados à iluminação impostos pela proximidade da parede de acrílico (reflexos) e pela utilização de lentes laser de diferentes aberturas angulares, sob a condição de visada frontal direta (sem ortorretificação).

O painel apresentado integra diferentes níveis de análise da orientação das estrias, organizados de forma a permitir uma comparação direta entre a abordagem manual e os métodos automáticos. Essa estrutura facilita a identificação das principais diferenças entre as técnicas, especialmente no que se refere à sensibilidade ao ruído, à definição do pico angular e à estabilidade da estimativa.

Nesses ensaios, diferentemente dos casos centrais, a aquisição frontal reduziu a necessidade de correção geométrica, mas aumentou a influência de efeitos ópticos locais, como reflexos na parede de acrílico e variações de intensidade do plano laser. Assim, a comparação entre os métodos permite verificar não apenas a proximidade entre os ângulos estimados, mas também a capacidade de cada abordagem em manter uma estimativa estável em imagens com ruído residual e contraste não uniforme.

A Figura 35 apresenta um painel representativo da análise realizada para o Ensaio C_4 (5 cm da parede, 500 rpm), em uma profundidade correspondente à coordenada $y \approx 311 px$.

Figura 35 – Painel representativo da análise de orientação (Ensaio C_4 MPU - 500 rpm, 5 cm da parede, 5° , $y \approx 311 px$): (a) Imagem Espaço-Tempo (STI) bruta; (b) Validação manual com linha de referência ($\alpha_{manual} \approx 7,89^\circ$); (c) Estimativa de ângulo pelo método do GT com pico em $\alpha = 7,97^\circ$; (d) espectro de energia angular da CWT-2D, com pico dominante em $\alpha \approx 7,91^\circ$



Fonte: Elaborado pelo Autor.

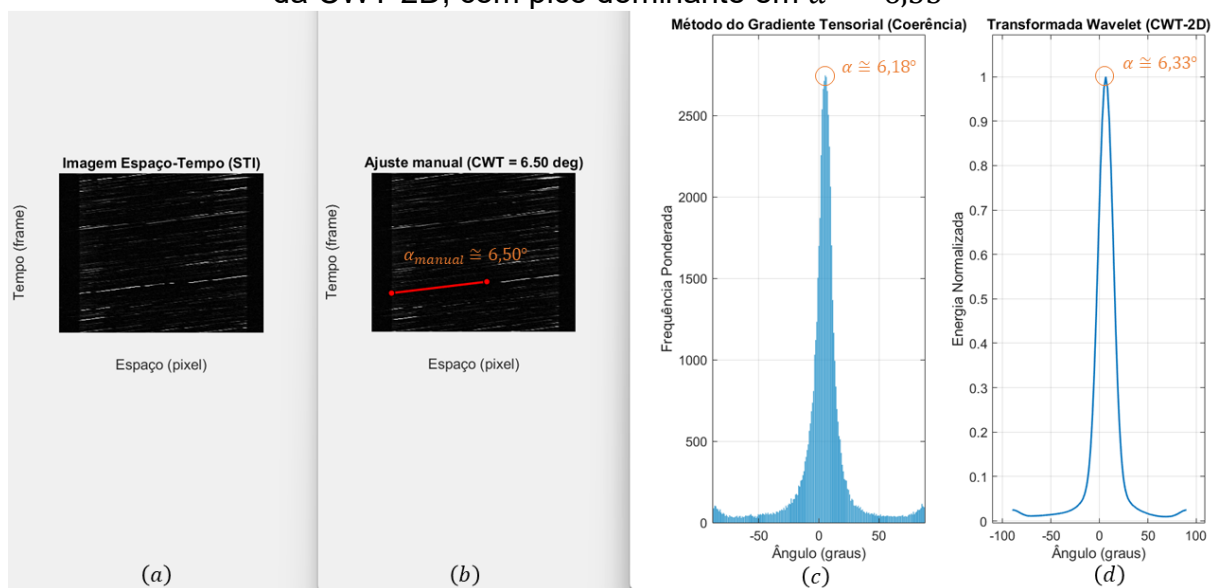
Na imagem STI bruta do ensaio C_4 (Figura 35 (a)), observa-se a presença de estrias associadas transporte das partículas traçadoras pelo escoamento, permeadas por ruído residual. A validação manual (Figura 35 (b)) estabeleceu o ângulo físico de referência em $\alpha_{manual} \approx 7,89^\circ$, considerado representativo da velocidade local do fluido para a altura analisada.

O histograma obtido pelo método do Gradiente Tensorial (Figura 35 (c)) apresenta um pico dominante em $\alpha \approx 7,97^\circ$. Embora o algoritmo GT tenha conseguido identificar a orientação principal com razoável precisão neste caso, a distribuição angular apresenta uma base alargada, indicando a influência de ruídos e orientações secundárias mapeadas localmente. Em contrapartida, o espectro energético da Transformada Wavelet (CWT-2D), apresentado na Figura 34 (d), atua como um filtro global eficaz: resulta em um pico energético isolado, extremamente agudo e bem definido em $\alpha \approx 7,91^\circ$, alinhando-se de forma ainda mais rigorosa com

a medição física manual e atestando a sua superioridade na supressão de ruídos laterais.

Para avaliar o impacto do incremento de velocidade e da troca óptica, a Figura 36 ilustra a análise do Ensaio C_5 (5 cm da parede, 600 rpm), utilizando a lente laser de 30° .

Figura 36 – Painel representativo da análise de orientação (Ensaio C_5 MPU - 600 rpm, 5 cm da parede, 5° , $y \approx 264 \text{ px}$): (a) Imagem Espaço-Tempo (STI) bruta; (b) Validação manual com linha de referência ($\alpha_{\text{manual}} \approx 6,50^\circ$); (c) Estimativa de ângulo pelo método do GT com pico em $\alpha = 6,18^\circ$; (d) espectro de energia angular da CWT-2D, com pico dominante em $\alpha \approx 6,33^\circ$



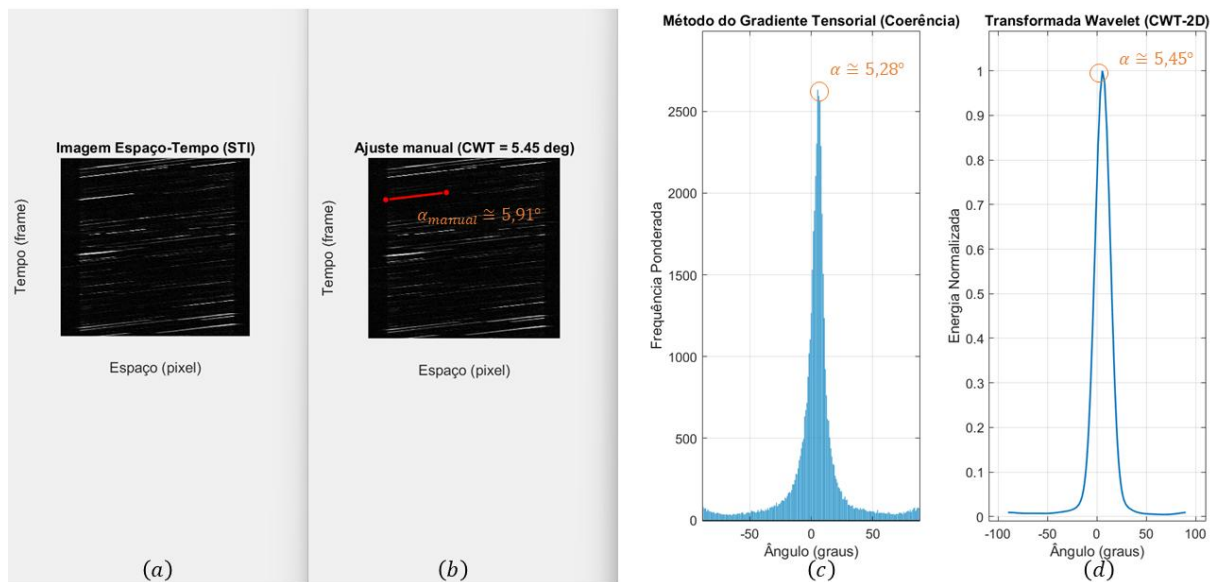
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com o aumento da rotação para 600 rpm, associado ao aumento da vazão do escoamento, as partículas traçadoras deslocam-se mais rapidamente pelo campo de visão, resultando em estrias com menor inclinação em relação ao eixo vertical, quando comparadas ao ensaio anterior. A lente de maior abertura (30°) foi utilizada apenas para ampliar a região iluminada pelo plano laser, adequando a visualização das partículas à nova condição de escoamento. A validação manual estabeleceu a referência física em $\alpha_{\text{manual}} \approx 6,50^\circ$. A abordagem espectral da CWT-2D (Figura 36 (d)) conseguiu rastrear essa mudança cinemática com precisão, isolando o ângulo de máxima energia global em $\alpha \approx 6,33^\circ$. O método do Gradiente Tensorial (Figura 36 (c)), embora tenha identificado um pico evidente em $\alpha = 6,18^\circ$, apresentou uma subestimativa em relação ao valor de referência. Esse desvio reforça que a análise

baseada em gradientes locais pode sofrer leves distorções direcionais devido à variação de contraste induzida pela dispersão do feixe laser mais aberto.

Por fim, o Ensaio C6 (10 cm da parede, 600 rpm) permitiu avaliar a estabilidade dos métodos em uma região de menor influência da camada limite lateral (menor cisalhamento de parede), mantendo a mesma rotação do ensaio anterior e a mesma lente óptica de 30° . A Figura 37 detalha essa análise para uma profundidade correspondente a $y \approx 170 \text{ px}$.

Figura 37 – Painel representativo da análise de orientação (Ensaio C₆ MPU - 600 rpm, 10 cm da parede, 5° , $y \approx 170 \text{ px}$): (a) Imagem Espaço-Tempo (STI) bruta; (b) Validação manual com linha de referência ($\alpha_{\text{manual}} \approx 5,91^\circ$); (c) Estimativa de ângulo pelo método do GT com pico em $\alpha = 5,28^\circ$; (d) espectro de energia angular da CWT-2D, com pico dominante em $\alpha \approx 5,45^\circ$



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nesta posição mais afastada da parede lateral, o escoamento pode apresentar uma dinâmica local distinta em função da menor influência direta da parede sobre o plano de medição. A medição manual resultou em $\alpha_{\text{manual}} \approx 5,91^\circ$. O espectro da CWT-2D (Figura 37 (d)) rastreou essa orientação com um pico de energia bem definido em $\alpha \approx 5,45^\circ$. O método do Gradiente Tensorial (Figura 37 (c)), seguindo a tendência observada no ensaio C5, apresentou uma subestimativa mais acentuada do ângulo ($\alpha = 5,28^\circ$). Esse comportamento consistente de desvio do GT sob a iluminação da lente de 30° evidencia sua maior vulnerabilidade às variações locais de intensidade luminosa dos traçadores quando o feixe laser encontra-se mais disperso.

Em síntese, a análise sistemática destas três configurações em regime MPU (C_4 , C_5 e C_6) revela que a visada frontal sem ortorretificação é plenamente viável, mas exige um método de processamento robusto para lidar com os reflexos e as adaptações ópticas.

Os painéis representativos apresentados (Figuras 35 a 37) evidenciam, para estas profundidades típicas, que a Transformada Wavelet (CWT-2D) demonstrou maior robustez qualitativa ao lidar com variações de iluminação, gerando espectros de energia mais agudos e isolados. Contudo, é fundamental pontuar que essa análise qualitativa baseada em profundidades isoladas representa apenas uma fração das vinte posições sistematicamente avaliadas ao longo de toda a lâmina de fluido. A análise numérica detalhada e global de todo o conjunto de dados, considerando métricas estatísticas robustas como o erro quadrático médio (RMSE), revelará particularidades de desempenho distintas e competitivas entre os métodos automáticos, dependendo de cada caso experimental específico, conforme será discutido em seção subsequente da dissertação.

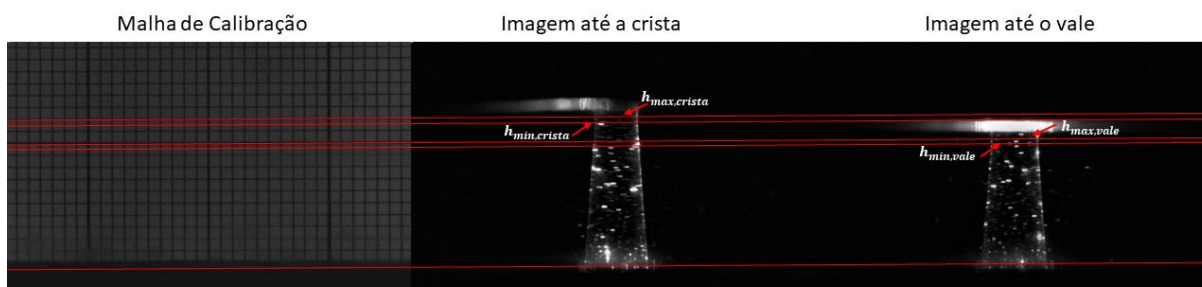
4.4.3 Critério geométrico e delimitação das fases de crista e vale

Após a validação das técnicas de detecção angular no regime permanente (MPU), a análise avança para os escoamentos submetidos à indução mecânica. A principal complexidade na avaliação das instabilidades superficiais reside no caráter transiente do fenômeno. Diferentemente do regime MPU, a posição da superfície livre varia continuamente no tempo, exigindo uma delimitação dinâmica da região de interesse (ROI) para garantir que a extração da velocidade ocorra exclusivamente dentro do domínio físico real do fluido em cada instante.

A passagem de uma onda altera significativamente o campo hidrodinâmico local. Na região da crista, observa-se um espessamento brusco da lâmina, associado ao aumento local da velocidade do escoamento. Em contrapartida, no vale subsequente, o escoamento desacelera e a profundidade da lâmina sofre redução.

A Figura 38 apresenta, de forma ilustrativa, o critério geométrico adotado para a identificação e o isolamento das fases de crista e vale, utilizando o Ensaio C_4 (500 rpm, 5 cm da parede) como primeiro caso representativo.

Figura 38 – Definição visual das referências geométricas e delimitação da região de interesse para as fases de crista e vale (Ensaio C_4): (a) Referência da malha de calibração; (b) Imagem da fase de crista com as alturas analisadas; (c) Imagem da fase de vale



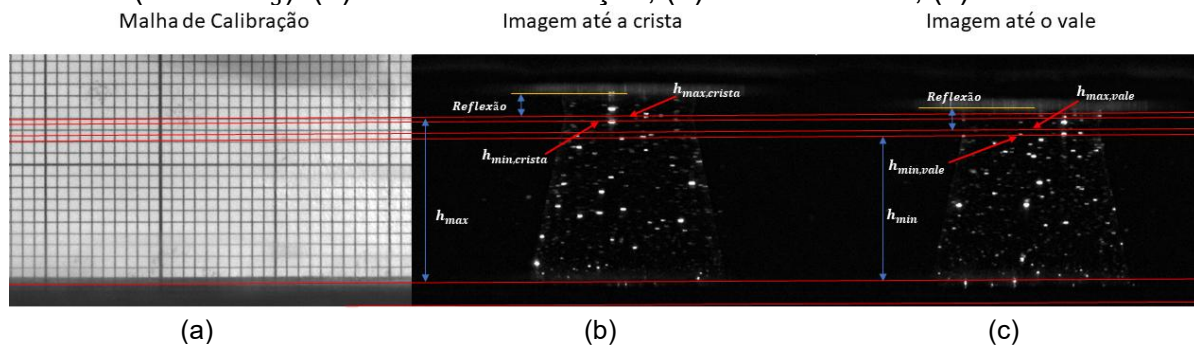
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Ressalta-se que a configuração apresentada não representa uma ROI fixa ao longo de toda a sequência experimental, mas sim a metodologia empregada para a delimitação das alturas máxima e mínima da crista ($h_{max,crista}$) e ($h_{min,crista}$), assim como para o vale ($h_{max,vale}$) e ($h_{min,vale}$), válidas para cada estrutura ondulatória que passa pelo campo de visão.

A imagem da malha de calibração (Figura 38 (a)), adquirida com o canal vazio, permitiu fixar a escala espacial local em 20,5 pixels/mm e estabelecer o fundo do canal como a cota zero de referência (linha vermelha inferior). Com base nessa métrica, as sequências de vídeo correspondentes à passagem da onda foram inspecionadas. Durante a passagem da crista (Figura 38 (b)), as linhas horizontais vermelhas superiores delimitam a fração da lâmina efetivamente submetida à análise espaço-temporal. Analogamente, a Figura 38 (c) ilustra o instante de passagem do vale da onda, onde a espessura da lâmina é substancialmente reduzida, exigindo o rebaixamento da cota máxima analisada para garantir que o algoritmo processe apenas a textura gerada pelas partículas submersas.

Para corroborar e expandir essa metodologia, a Figura 39 detalha o mesmo procedimento aplicado ao Ensaio C_5 (600 rpm, 5 cm da parede, lente de 30°), fixando a escala em 19,75 pixels/mm. Neste caso específico, a representação visual evidencia de forma explícita a zona de reflexão espúria na interface ar-fluido, fenômeno previamente discutido na Seção 4.3.1.

Figura 39 – Definição visual e isolamento da zona de reflexão para as fases de crista e vale (Ensaio C_5): (a) Malha de calibração; (b) Fase de crista; (c) Fase de vale



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Observa-se na Figura 39 que a banda de reflexão (indicada acima das linhas vermelhas) projeta-se sobre a posição real da superfície livre. O estabelecimento criterioso de $h_{max,crista}$ e $h_{max,vale}$, logo abaixo dessa zona de espalhamento luminoso foi imperativo para ambas as fases. Essa delimitação estratégica garante que a extração das linhas para a construção das texturas STI ocorra exclusivamente na região onde os traçadores transmitem informações cinemáticas reais, blindando os algoritmos automáticos contra as variações de iluminação geradas pelo "espelho" superficial. Essa estratégia de delimitação dinâmica foi sistematicamente replicada para todos os ensaios instáveis (incluindo o C_6). Com as fronteiras físicas de crista e vale rigorosamente definidas e imunes aos artefatos ópticos, a próxima subseção detalhará o desempenho dos métodos de extração angular (GT e CWT-2D) durante a passagem dessas instabilidades, utilizando um caso transiente representativo.

4.4.4 Análise comparativa dos métodos nas fases de crista e vale

Nesta subseção, estende-se a avaliação dos algoritmos de detecção angular para os regimes de escoamento não permanentes induzidos mecanicamente. O objetivo consiste em verificar a robustez das técnicas (Gradiente Tensorial e CWT-2D) frente às variações dinâmicas de velocidade superficial e profundidade que ocorrem durante a passagem dessas instabilidades superficiais, utilizando os ensaios próximos à parede lateral.

Para contextualizar a análise geométrica, a Tabela 8 sintetiza as profundidades isoladas para cada ensaio, detalhando a altura máxima atingida pelo pico da onda na fase de crista (h_{max}) e a altura mínima residual na fase de vale (h_{min}) representado na Figura 39. Adicionalmente, a tabela introduz o parâmetro de intensidade relativa da onda, utilizado para quantificar a variação relativa da profundidade da lâmina entre a crista e o vale. Esse parâmetro foi calculado pela relação $I_r = [(h_{max} - h_{min}) / h_{max}] \times 100$, em que h_{max} representa a profundidade da lâmina na crista e h_{min} a profundidade correspondente ao vale. É fundamental ressaltar que esses valores não foram arbitrados visualmente, mas sim extraídos a partir do perfil temporal de elevação da superfície livre, registrado de forma contínua pelo sensor ultrassônico (os gráficos completos das séries temporais de elevação para cada ensaio encontram-se detalhados no Apêndice B). Esses dados instrumentais foram, posteriormente, rigorosamente correlacionados e validados com a inspeção visual das imagens da câmera de alta velocidade, seguindo o critério geométrico estabelecido na Seção 4.4.3.

Quadro 1 – Características geométricas das fases de crista e vale para os ensaios laterais e a respectiva intensidade relativa da instabilidade

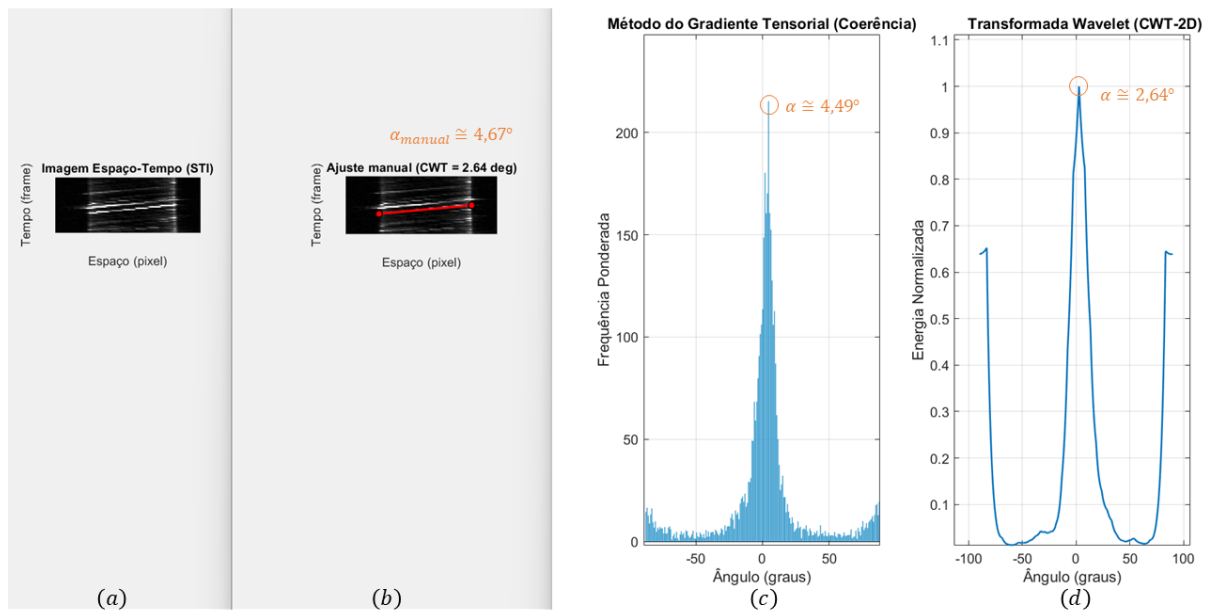
Exp	Rotação (rpm)	Distância da Parede (cm)	Fase da Onda	Altura da Lâmina h (mm)	Intensidade Relativa da Onda
C_4	500	5	Crista	11,55	18,61 %
C_4	500	5	Vale	9,40	
C_5	600	5	Crista	13,96	10,81 %
C_5	600	5	Vale	12,45	
C_6	600	10	Crista	13,19	9,78 %
C_6	600	10	vale	11,90	

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A análise comparativa inicia-se pelo Ensaio C_4 (500 rpm, 5 cm da parede, 5°), focando especificamente na região da crista, que apresentou a maior intensidade relativa de variação (18,61%) entre os casos estudados. A escolha da crista é estratégica, pois ela representa o ponto de maior energia e aceleração hidráulica da onda. Conforme rastreado pelo sensor ultrassônico e validado pela delimitação visual, o escoamento adquire um perfil transiente no qual a profundidade da lâmina de Carbopol atinge seu valor máximo de $h_{max} = 11,55 \text{ mm}$

A Figura 40 apresenta o painel representativo da análise de orientação realizada para uma linha horizontal profunda, correspondente à coordenada $y \approx 128 \text{ px}$, inserida no contexto deste fluxo acelerado.

Figura 40 – Painel representativo da análise de orientação (Ensaio C_4 - 500 rpm, crista da onda, 5° , $y \approx 128 \text{ px}$): (a) Imagem Espaço-Tempo (STI) bruta; (b) Validação manual com linha de referência ($\alpha_{\text{manual}} \approx 4,67^\circ$); (c) Estimativa de ângulo pelo método do GT com pico em $\alpha = 4,49^\circ$; (d) espectro de energia angular da CWT-2D, com pico dominante em $\alpha \approx 2,64^\circ$



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Um aspecto metodológico fundamental na construção da imagem STI de crista (Figura 40 (a)) diz respeito à redução do intervalo temporal analisado. Diferentemente do regime MPU, em que um número maior de frames é processado para representar uma condição aproximadamente permanente do escoamento, a análise da crista requer uma janela temporal mais restrita, capaz de representar o estado instantâneo associado à passagem do pico da onda. Neste caso específico, foram processados 46 frames, correspondentes às imagens 0055 a 0100 da sequência original de 324 frames em 1000 ms. Essa janela temporal restrita permite capturar a velocidade local do fluido durante o desenvolvimento e a passagem do pico da onda, evitando que o algoritmo combine informações provenientes de fases distintas do escoamento.

O resultado desta STI transiente apresenta estrias notavelmente mais inclinadas (ângulo menor em relação ao eixo vertical temporal) quando comparadas

ao escoamento não perturbado. A validação manual (Figura 40 (b)) estabeleceu o ângulo físico de referência em $\alpha_{manual} \approx 4,67^\circ$. Este valor representa uma redução expressiva em relação ao ângulo de $7,89^\circ$ obtido para o regime permanente (MPU) na mesma posição transversal (conforme demonstrado na Seção 4.4.2). Do ponto de vista cinemático, essa diminuição angular indica aumento local da velocidade do escoamento durante a passagem da crista, em comparação ao fluxo base observado em regime MPU.

O histograma obtido pelo método do Gradiente Tensorial (Figura 40 (c)) identificou a orientação principal com pico em $\alpha = 4,49^\circ$, valor próximo à referência manual. Esse resultado indica que, para esta condição específica, o método baseado em gradientes locais foi capaz de acompanhar a orientação visual dominante das estrias, mesmo em uma janela temporal curta. Em contrapartida, a análise espectral da CWT-2D (Figura 40 (d)) apresentou um pico dominante em $\alpha = 2,64^\circ$, indicando maior desvio em relação à medição manual nesse caso específico.

Essa diferença pode estar associada às características da imagem STI nessa fase da onda. Durante a passagem da crista, a interface livre apresenta variações rápidas de posição e de textura, além de alterações locais de iluminação e contraste. Como a CWT-2D avalia a distribuição global de energia angular na janela analisada, componentes secundárias da textura, ruídos residuais ou estruturas de baixo contraste podem influenciar a seleção do pico dominante. Já o Gradiente Tensorial, por operar localmente sobre os gradientes de intensidade, pode apresentar melhor resposta quando a orientação principal das estrias permanece visualmente identificável em regiões específicas da imagem.

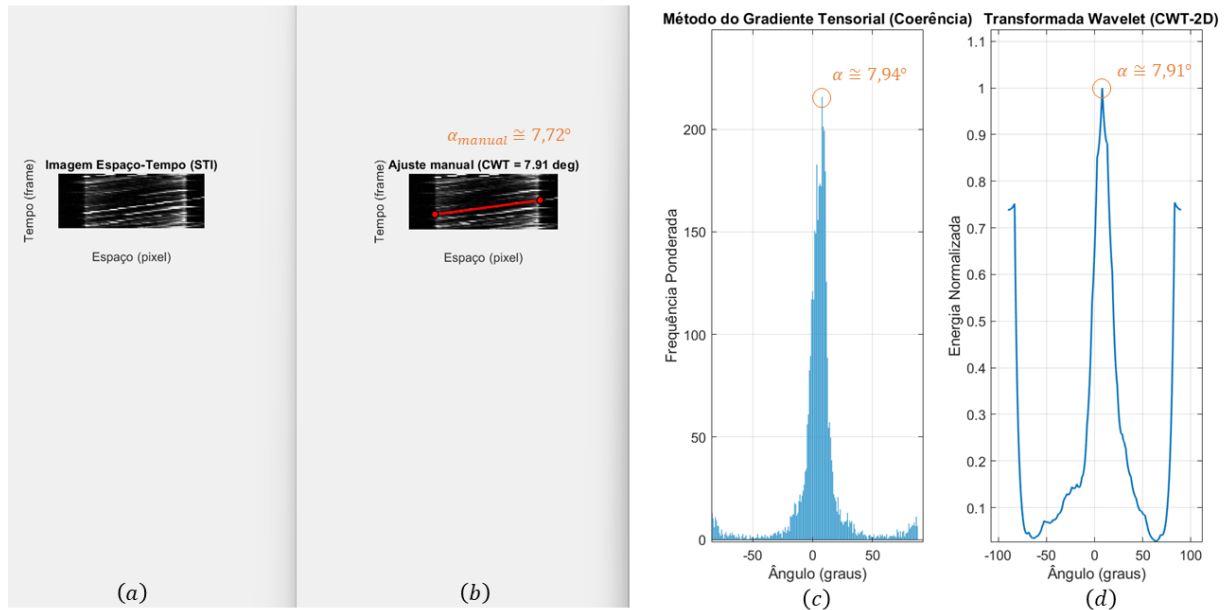
Assim, este caso evidencia que o desempenho relativo dos métodos pode depender não apenas da formulação matemática empregada, mas também das características ópticas e temporais da imagem analisada. Em particular, janelas muito curtas, embora necessárias para preservar a natureza transiente da crista, reduzem a quantidade de informação disponível para métodos globais de análise espectral. Por esse motivo, a comparação entre GT, CWT-2D e medição manual deve ser interpretada em conjunto com a qualidade visual da STI, o número de frames utilizados e a coerência das estrias observadas.

A menor inclinação das estrias observada na fase de crista, em comparação ao regime MPU, indica aumento local da velocidade do escoamento durante a passagem da onda. A análise da fase de vale, apresentada a seguir, permite avaliar a resposta

cinemática correspondente à região posterior da instabilidade, na qual se espera uma redução da profundidade da lâmina e uma alteração da orientação das estrias na imagem espaço-temporal.

A avaliação cinemática transiente prossegue com a análise da fase de vale do Ensaio C_4 , utilizando a mesma coordenada transversal (5 cm da parede) e inclinação (5°). Diferentemente da crista, o vale representa a região de remanso da onda, onde o sensor ultrassônico registrou uma profundidade mínima residual de $h_{min} = 9,40 \text{ mm}$ (conforme a Tabela 8). A Figura 41 apresenta o painel representativo da análise de orientação, conduzida para uma linha profunda localizada em $y \approx 210 \text{ px}$.

Figura 41 – Painel representativo da análise de orientação (Ensaio C_4 - 500 rpm, vale da onda, 5° , $y \approx 210 \text{ px}$): (a) Imagem Espaço-Tempo (STI) bruta; (b) Validação manual com linha de referência ($\alpha_{manual} \approx 7,72^\circ$); (c) Estimativa de ângulo pelo método do GT com pico em $\alpha = 7,94^\circ$; (d) espectro de energia angular da CWT-2D, com pico dominante em $\alpha \approx 7,91^\circ$



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A construção da imagem STI de vale (Figura 41 (a)) seguiu o mesmo critério transiente da crista, processando uma janela temporal restrita de 45 frames (correspondentes às imagens 0220 a 0270 da sequência total de 324 frames capturadas em 1000 ms). Essa abordagem instantânea permitiu capturar a dinâmica do fluido exclusivamente durante a passagem da região de depressão ondulatória.

A textura visual gerada apresenta estrias menos inclinadas quando comparadas à fase de crista. A validação manual (Figura 41 (b)) estabeleceu o ângulo

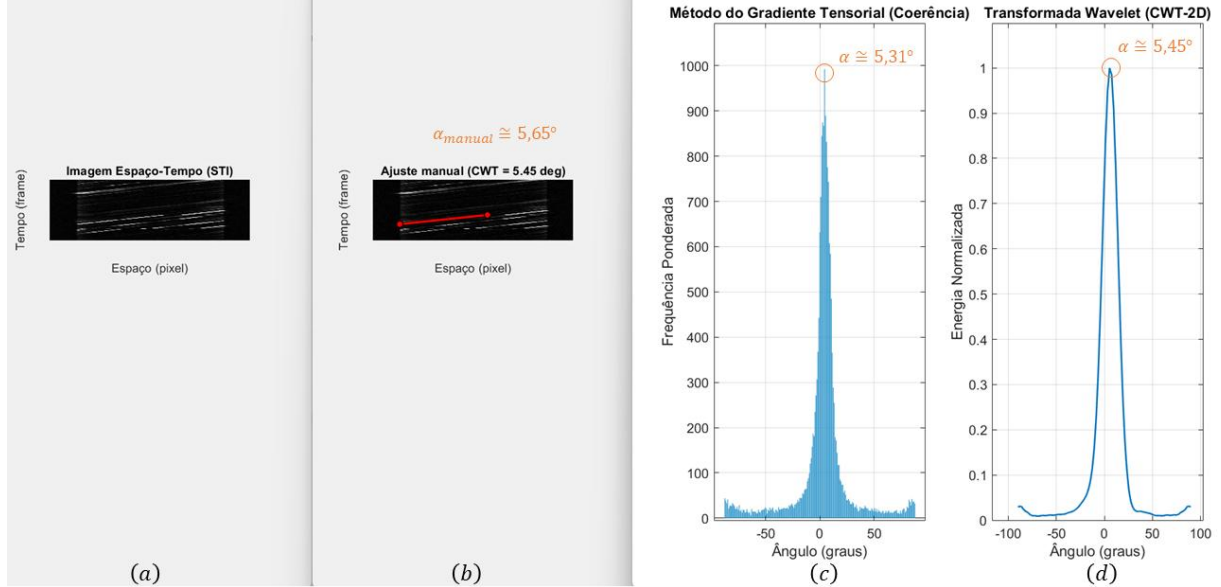
físico de referência em $\alpha_{manual} \approx 7,72^\circ$. Este valor representa um aumento significativo em relação aos $4,67^\circ$ da crista, evidenciando a desaceleração local do escoamento.

Mais importante ainda, as estimativas consistentes fornecidas pelos métodos automáticos (GT com $\alpha = 7,94^\circ$ e CWT-2D com $\alpha = 7,91^\circ$) revelam inclinações superiores ao ângulo característico da superfície livre no regime não perturbado (que apresentou $\alpha_{manual} \approx 7,73^\circ$ no topo da lâmina em MPU). Do ponto de vista cinemático, essa relação angular indica que, durante a passagem da região de depressão, o fluido desacelera em relação ao pico da onda, podendo atingir velocidade local inferior à do fluxo de base (MPU).

Na fase de vale, o histograma do Gradiente Tensorial (Figura 41 (c)) e o espectro de energia angular da CWT-2D (Figura 41 (d)) apresentam boa concordância entre si. Esse resultado indica que, em janelas temporais curtas com textura mais coerente, ambos os métodos automáticos podem fornecer estimativas consistentes da orientação das estrias. A síntese numérica do desempenho global, baseada no RMSE, será apresentada a seguir.

Para avaliar o impacto do aumento da vazão volumétrica sobre a dinâmica transiente, a análise prossegue com o Ensaio C_5 (600 rpm, 5 cm da parede, 5°). O incremento na rotação da bomba eleva a energia do sistema, refletindo-se em uma lâmina globalmente mais espessa e em estruturas ondulatórias com maior amplitude.

Figura 42 – Painel representativo da análise de orientação (Ensaio C_5 - 600 rpm, crista da onda, 5° , $y \approx 218 \text{ px}$): (a) Imagem Espaço-Temporal (STI) bruta; (b) Validação manual com linha de referência ($\alpha_{\text{manual}} \approx 5,65^\circ$); (c) Estimativa de ângulo pelo método do GT com pico em $\alpha = 5,31^\circ$; (d) espectro de energia angular da CWT-2D, com pico dominante em $\alpha \approx 5,45^\circ$



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A construção da imagem STI da crista (Figura 42 (a)) empregou uma janela temporal interativa composta por 91 frames (abrangendo as imagens 0000 a 0090, extraídas da sequência total de 331 quadros capturados em 1000 ms). Embora esta janela seja ligeiramente mais ampla que a delimitada para o ensaio C_4 , ela se mantém rigorosamente focada no instante de passagem do topo da onda, garantindo o isolamento da cinemática de aceleração.

A medição manual (Figura 42 (b)) indicou uma orientação de referência em $\alpha_{\text{manual}} \approx 5,65^\circ$. Esse valor é inferior ao observado para o regime MPU na mesma configuração geométrica (que foi de $6,50^\circ$, conforme Seção 4.4.2). A redução angular observada está associada à aceleração advectiva do fluido na região de instabilidade.

Sob estas condições transientes, ambos os métodos automáticos apresentaram respostas coesas. A Transformada Wavelet (Figura 42 (d)) detectou um pico aguçado em $\alpha \approx 5,45^\circ$, exibindo uma aproximação coerente em relação à referência física. O Gradiente Tensorial (Figura 42 (c)) identificou a orientação primária em $\alpha \approx 5,31^\circ$. Esse comportamento evidencia que, em janelas temporais contendo um número ligeiramente maior de quadros e estrias bem delineadas (apesar das dispersões causadas pela lente de 30°), a análise global espectral da CWT-2D

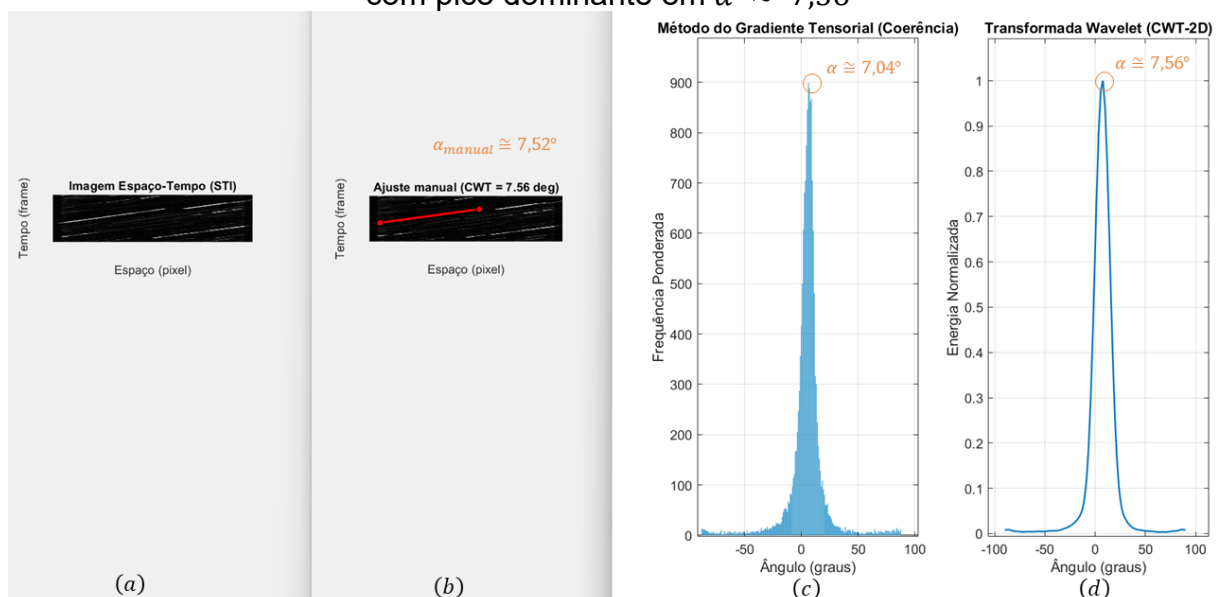
consegue filtrar eficientemente os ruídos transientes e fornecer a estimativa mais aderente à realidade.

A fase de remanso deste mesmo ensaio, correspondente ao vale da onda (com profundidade mínima residual de $h_{min} = 12,45$ mm, foi analisada para a mesma coordenada transversal.

Do ponto de vista físico, a região de vale da onda caracteriza-se por uma condição de escoamento mais delgado, na qual a redução da profundidade implica uma diminuição da contribuição gravitacional efetiva e um aumento relativo dos efeitos viscosos. Como consequência, observa-se uma desaceleração local do escoamento, refletida na inclinação menos acentuada das estrias nas imagens espaço-temporais. Essa diferença entre as duas regiões reforça a necessidade de análise separada, permitindo avaliar de forma mais completa o desempenho dos métodos em diferentes condições hidrodinâmicas ao longo do perfil da onda.

A Figura 43 apresenta o painel representativo para uma linha profunda posicionada em $y \approx 244$ px, empregando uma janela temporal restrita, análoga à utilizada na crista.

Figura 43 – Painel representativo da análise de orientação (Ensaio C_5 - 600 rpm, vale da onda, 5° , $y \approx 244$ px): (a) Imagem Espaço-Temporal (STI) bruta; (b) Validação manual com linha de referência ($\alpha_{manual} \approx 7,52^\circ$); (c) Estimativa de ângulo pelo método do GT com pico em $\alpha = 7,04^\circ$; (d) espectro de energia angular da CWT-2D, com pico dominante em $\alpha \approx 7,56^\circ$



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A avaliação cinemática no vale do Ensaio C_5 confirma o padrão de desaceleração intrínseco às ondas. O ângulo de referência extraído manualmente ($\alpha_{manual} \approx 7,52^\circ$) evidencia um escoamento notavelmente mais lento quando comparado ao ápice da onda ($5,65^\circ$). Os métodos automáticos acompanharam essa tendência, com a Transformada Wavelet (CWT-2D) apresentando um pico em $\alpha \approx 7,56^\circ$, demonstrando mais uma vez precisão em relação à referência física, enquanto o Gradiente Tensorial (GT) estimou a orientação em $\alpha = 7,04^\circ$. Assim como verificado no ensaio C_4 , as inclinações superiores àquelas do regime MPU confirmam a redução da velocidade advectiva na região de vale da onda.

O procedimento analítico detalhado para os ensaios C_4 e C_5 foi rigorosamente estendido ao Ensaio C_6 , realizado a 10 cm da parede lateral e 600 rpm. A metodologia de delimitação dinâmica das alturas de crista ($h_{max} = 13,19 \text{ mm}$) e vale ($h_{min} = 11,90 \text{ mm}$) e a aplicação dos algoritmos STIV mantiveram a mesma consistência.

Contudo, uma particularidade fenomenológica importante foi observada na região correspondente ao Ensaio C_6 . Devido ao maior afastamento da parede lateral acrílica, a amplitude e a definição visual da instabilidade superficial foram sensivelmente atenuadas no plano focal da câmera. Como consequência direta dessa atenuação morfológica, a variação cinemática entre as fases da onda tornou-se substancialmente menor.

Por exemplo, a orientação dominante detectada para a superfície da crista no ensaio C_6 foi de $5,45^\circ$, valor virtualmente idêntico ao ângulo representativo obtido no topo do escoamento em regime MPU (também em torno de $5,45^\circ$, como visto na Seção 4.4.2). Na fase de vale, a redução de velocidade foi muito discreta, com a inclinação dominante apresentando valores próximos a $5,62^\circ$. Essa aproximação cinemática indica que, a 10 cm da parede, a energia da onda induzida se dispersou, fazendo com que o perfil transiente de velocidades se assemelhasse muito ao escoamento base não perturbado.

Essa constatação indica que a resposta cinemática associada às instabilidades superficiais apresentou variações conforme a posição transversal de medição. Nos ensaios realizados a 5 cm da parede lateral (C_4 e C_5), as diferenças entre as fases de crista e vale foram mais evidentes, principalmente em função das variações locais de velocidade ao longo da profundidade. Por outro lado, no ensaio C_6 , realizado em uma posição mais afastada da parede lateral, essas diferenças apresentaram menor

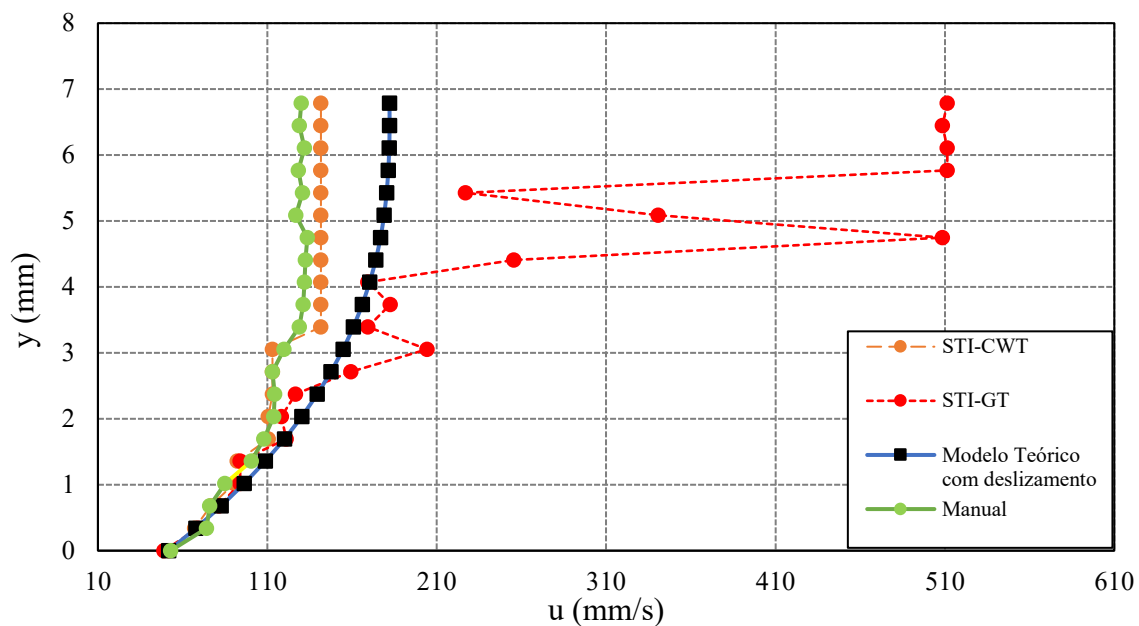
intensidade relativa. Assim, os resultados sugerem a influência da posição transversal na leitura cinemática das fases da onda, sem permitir afirmar de forma conclusiva que a dinâmica das ondas seja necessariamente maior junto à parede. A quantificação global destas variações e a consolidação do desempenho dos algoritmos em toda a profundidade da lâmina de fluido são objeto de análise nas métricas de erro RMSE e nos perfis verticais de velocidade, apresentados a seguir.

4.5 PERFIS DE VELOCIDADE AO LONGO DA PROFUNDIDADE

Nesta seção, são apresentados e discutidos os perfis de velocidade obtidos experimentalmente por meio da técnica STIV, considerando os métodos Manual, Gradiente Tensorial (GT) e Transformada Wavelet Contínua Bidimensional (CWT-2D). Para os ensaios realizados no centro do canal (C_1 , C_2 , e C_3), onde a hipótese de escoamento unidimensional é válida e o processo de ortorretificação foi aplicado, os resultados são comparados com o perfil teórico previsto pelo modelo reológico de Herschel–Bulkley.

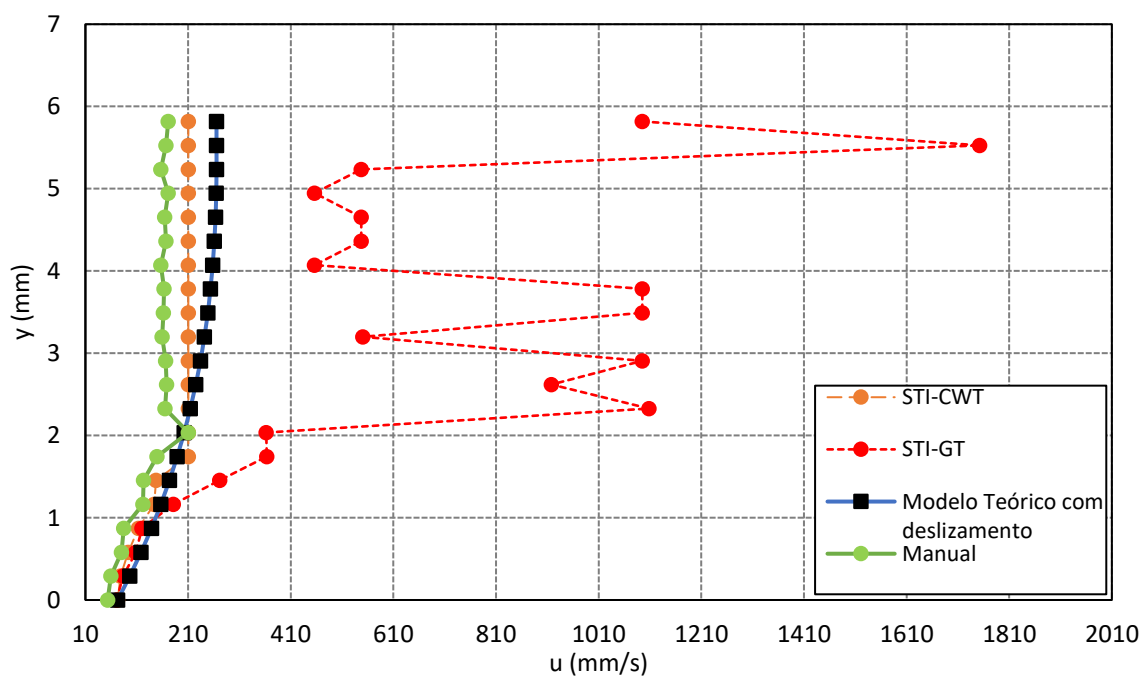
As Figuras 44, 45 e 46 apresentam, sequencialmente, a confrontação entre os perfis experimentais e o modelo teórico para os três ensaios centrais, permitindo uma avaliação visual direta da influência das condições de vazão e inclinação na estrutura cinemática do fluido.

Figura 44 – Confrontação experimental-teórica: perfis de velocidade ao longo da profundidade para o Ensaio C_1 (200 rpm, 3°)



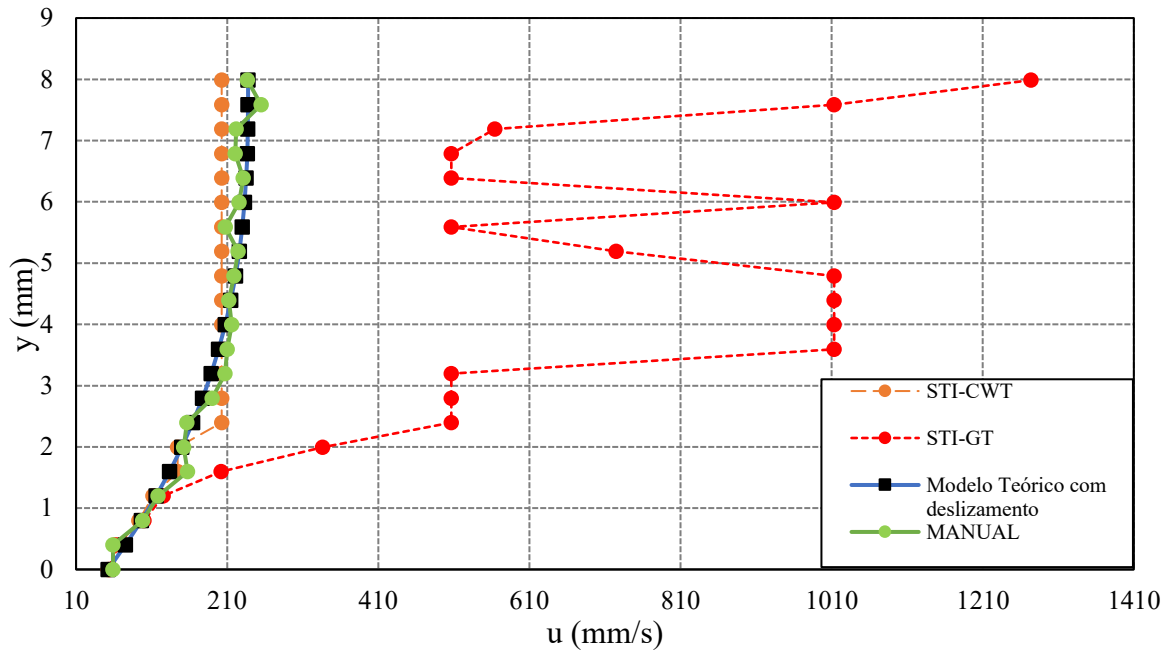
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 45 – Confrontação experimental-teórica: perfis de velocidade ao longo da profundidade para o Ensaio C_2 (300 rpm, 5°)



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 46 – Confrontação experimental-teórica: perfis de velocidade ao longo da profundidade para o Ensaio C_3 (400 rpm, 3°)



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A análise do Ensaio C_1 (Figura 44) revela a característica cinemática de um fluido viscoplástico em canal aberto. Observa-se uma região de gradiente de velocidade elevado próxima ao fundo, correspondente à zona de cisalhamento, e um perfil que tende à verticalidade em direção à superfície livre. Diferentemente de outros regimes, o núcleo rígido (*plug flow*) nestas condições é extremamente delgado (aproximadamente 0,27 mm), tornando a transição para a velocidade constante sutil e muito próxima à superfície livre. Nota-se que a curva teórica de Herschel-Bulkley sem correção de fundo subestima as velocidades experimentais; no entanto, ao incorporar a velocidade de deslizamento ($V_{slip} \approx 50 \text{ mm/s}$), o modelo atinge uma concordância excelente com os dados da CWT-2D e do método manual.

Entretanto, observa-se que o método STI-GT apresenta discrepâncias pontuais acentuadas, principalmente nas regiões intermediárias e superiores da lâmina. Esses desvios resultam em velocidades muito superiores às obtidas pelos demais métodos, indicando que, nessas posições, o GT não conseguiu identificar de forma robusta a orientação física dominante das estrias. Esse comportamento pode estar associado à elevada sensibilidade do método aos gradientes locais de intensidade, ruídos ópticos, reflexos e discontinuidades texturais presentes na imagem STI.

No Ensaio C_2 (Figura 45), o aumento da inclinação para 5° e da rotação para 300 rpm elevou consideravelmente a energia do sistema. A lâmina de fluido apresentou-se mais delgada ($h \approx 5,81 \text{ mm}$), atingindo velocidades teóricas com efeito de fundo máximas na ordem de 265 mm/s, enquanto o método CWT-2D rastreou velocidades superficiais em torno de 210 mm/s. Nesta condição de forte aceleração gravitacional, o núcleo rígido é reduzido a apenas 0,32 mm. A robustez da Transformada Wavelet é destacada: apesar da alta velocidade e de possíveis ruídos inerentes à imagem STI, o perfil da CWT-2D manteve-se suave e aderente aos pontos manuais. O efeito de deslizamento no fundo torna-se severo nesta configuração geométrica, evidenciando-se como parâmetro indispensável para o correto ajuste do modelo teórico aos dados experimentais.

Por fim, o Ensaio C_3 (Figura 46) representa a condição de maior vazão (400 rpm) e espessura de lâmina ($h \approx 7,98 \text{ mm}$) entre os casos estacionários centrais. Mesmo com o expressivo aumento da espessura, a região de *plug flow* permanece restrita à vizinhança imediata da superfície livre (aproximadamente 0,20 mm), indicando que a tensão de cisalhamento domina praticamente toda a profundidade da lâmina em movimento. Este cenário impõe um desafio à estimativa angular pelos algoritmos de detecção, pois as maiores velocidades geram estrias com menor inclinação angular, tendendo à horizontalidade na imagem STI. Nessa condição, pequenas variações na estimativa do ângulo podem produzir diferenças relevantes na velocidade calculada. A boa concordância entre a CWT-2D, o método manual e o modelo teórico ajustado com efeito de fundo indica a adequação da técnica STIV ortorretificada para a reconstrução dos perfis de velocidade nessas condições experimentais.

Em síntese, para os ensaios centrais (C_1 , C_2 , e C_3), a técnica STIV demonstrou plena capacidade de reproduzir o comportamento reológico esperado. A seletividade direcional da CWT-2D provou ser eficiente na extração cinemática. Ademais, a discrepância sistemática entre o modelo teórico clássico e os dados experimentais próximos à base do canal confirma a existência de uma camada de deslizamento (*wall slip*), fenômeno detalhado de forma específica a seguir.

Como antecipado na análise global dos perfis de velocidade, a extrapolação do modelo teórico clássico de Herschel-Bulkley para a base do canal ($y = 0$) pressupõe a condição de aderência perfeita (condição de não deslizamento, onde $u = 0$). Contudo, fluidos viscoplásticos estruturados, como as dispersões de microgéis de

Carbopol, frequentemente exibem o fenômeno de deslizamento aparente (*wall slip*) quando em contato com superfícies sólidas lisas, como o fundo de vidro do canal (PIAU, 2007, CLOITRE e BONNECAZE, 2017). Esse comportamento decorre da formação de uma fina camada limite de lubrificação (composta predominantemente por solvente) entre a estrutura do gel e a parede sólida, permitindo que o fluido escorregue.

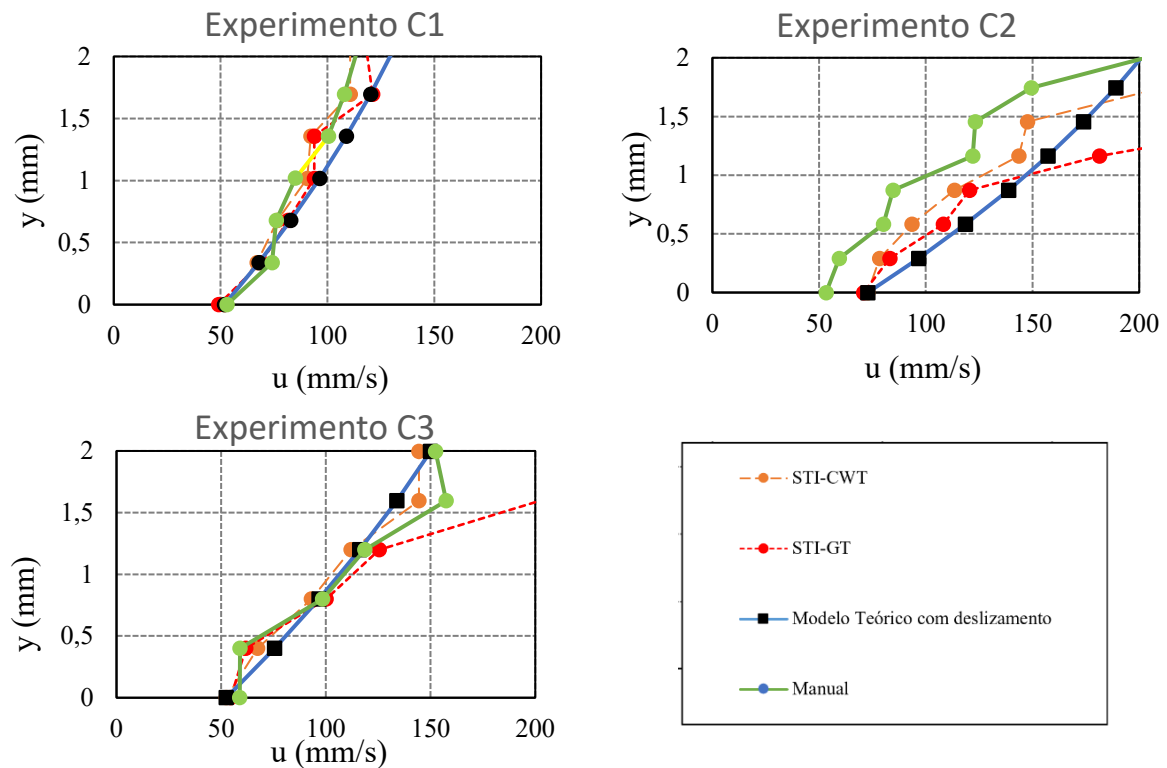
Para investigar essa dinâmica em nível local, realiza-se uma análise detalhada da região de cisalhamento próxima ao fundo do canal (de $y \approx 0$ até aproximadamente $y \approx 1,5$ mm) para os três ensaios centrais analisados, cujos perfis ampliados estão consolidados na Figura 47 (apresentada na sequência).

A inspeção detalhada da Figura 47 (Experimento C_1), revela que os pontos experimentais extraídos pelas técnicas automáticas (CWT-2D e GT) e pela medição manual não tendem a zero na base. Pelo contrário, indicam uma velocidade aparente de deslizamento (V_{slip}) de aproximadamente 50 mm/s. Ressalta-se que esse valor não corresponde a uma medição direta exatamente em $y = 0$, mas sim a uma estimativa obtida a partir do comportamento dos pontos experimentais próximos ao fundo e do deslocamento horizontal necessário para ajustar o modelo teórico aos dados medidos. O deslocamento horizontal da curva teórica por esse valor melhora a concordância do modelo matemático com a cinemática observada experimentalmente.

O impacto das condições de contorno sobre o deslizamento torna-se evidente ao analisar a Figura 47 (Experimento C_2). Com o aumento da inclinação do canal para 5° , a componente tangencial da força gravitacional aumenta significativamente, elevando a tensão de cisalhamento na parede. Como consequência dessa maior solicitação mecânica, o fluido apresenta maior tendência ao deslizamento aparente sobre o fundo de vidro, com velocidade estimada de deslizamento de $V_{slip} = 72$ mm/s.

A análise ampliada da região próxima ao fundo evidencia a sensibilidade da técnica STIV para identificar alterações locais no perfil de velocidades, embora a interpretação dos primeiros pontos de medição deva considerar as limitações de resolução espacial e a proximidade com a parede.

Figura 47 – Detalhamento do perfil de velocidades na região próxima ao fundo do canal, evidenciando o fenômeno de deslizamento (*wall slip*)



Fonte: Elaborado pelo Autor.

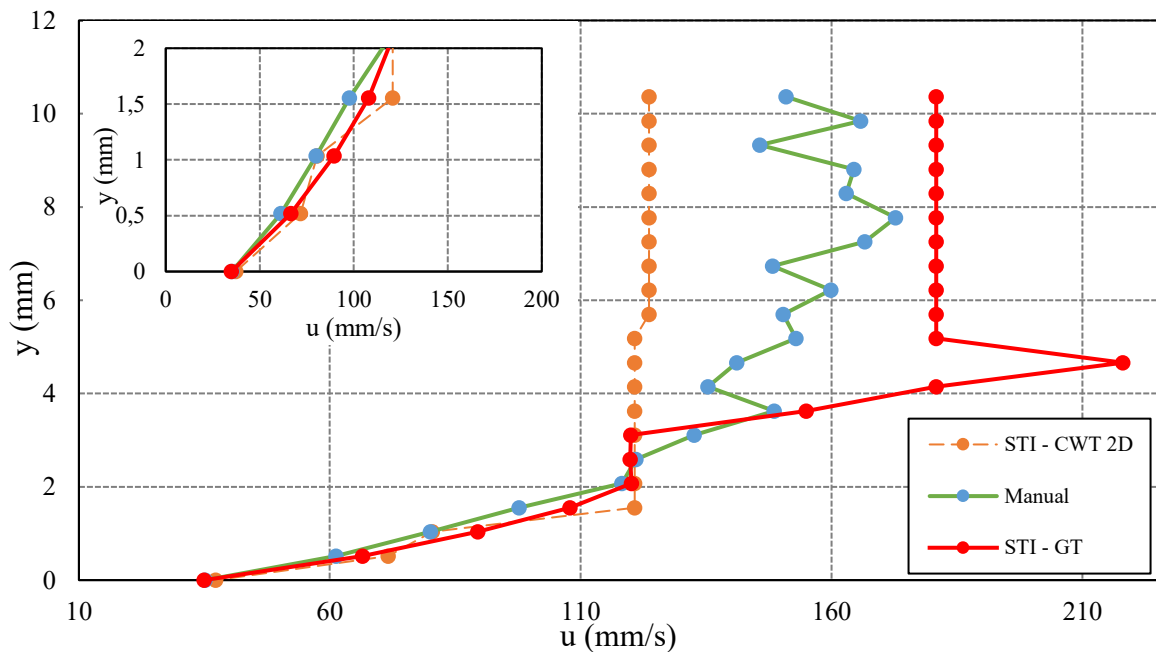
Por outro lado, a Figura 47 Experimento C_3 submetido à maior rotação (400 rpm), porém com a inclinação retornada a 3° , apresenta uma velocidade de deslizamento em torno de $V_{slip} = 45 \text{ mm/s}$. Este valor é ligeiramente inferior ao do Ensaio C_1 e consideravelmente menor que o do Ensaio C_2 . Esse comportamento indica que, para este fluido específico e configuração de canal, o fenômeno de deslizamento é governado predominantemente pela tensão de cisalhamento no fundo (ditada pela inclinação do canal), sendo menos sensível ao simples aumento da vazão volumétrica da bomba.

A capacidade de capturar a velocidade de deslizamento através do processamento de imagens corrobora a técnica STIV ortorretificada. Ignorar a medição experimental deste parâmetro resultaria em erros severos na modelagem do perfil de tensões e na estimativa da vazão do canal. Com o comportamento cinemático e a validação do modelo teórico devidamente estabelecidos para a região central do escoamento, a análise avança para os ensaios conduzidos próximos à parede lateral

de acrílico (C_4 , C_5 , e C_6). Nesses casos, o escoamento adquire caráter tridimensional devido ao expressivo efeito de borda associado aos efeitos viscosos junto às paredes laterais, sendo avaliado inicialmente em regime não perturbado (MPU) e, posteriormente, durante a passagem das instabilidades (fases de crista e vale).

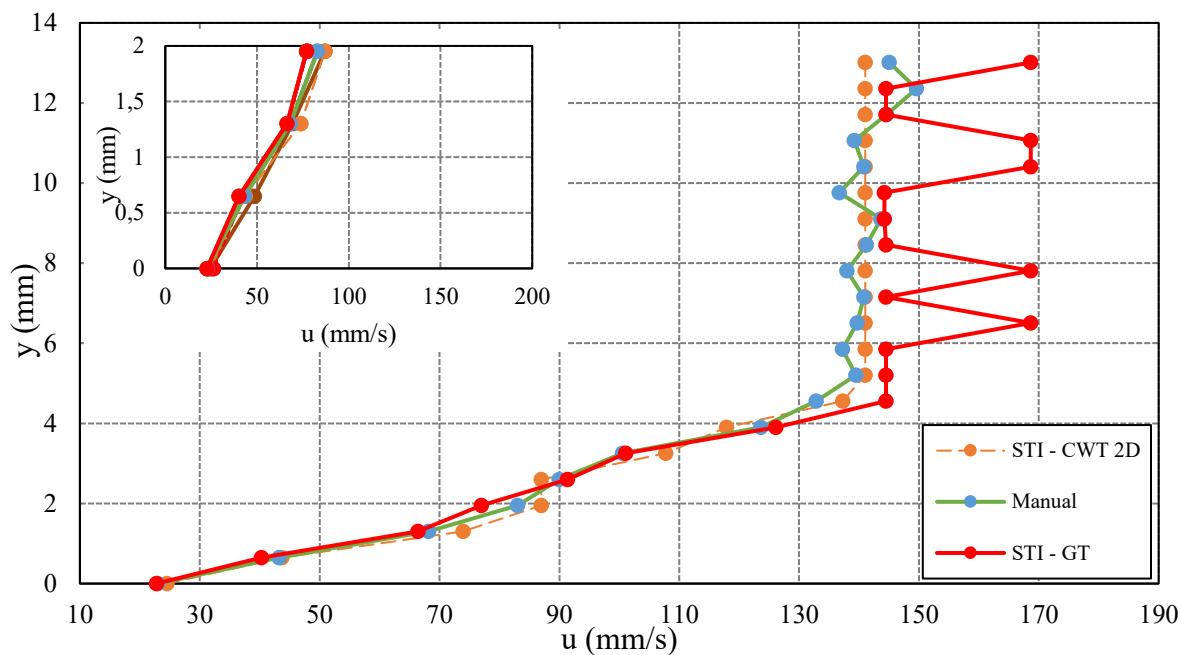
A evolução cinemática do escoamento não perturbado (MPU) na região periférica do canal é apresentada sequencialmente nas Figuras 48, 49 e 50, abrangendo os ensaios C_4 , C_5 , e C_6 . Para otimizar a visualização do fenômeno de deslizamento (*wall slip*) frente às elevadas espessuras das lâminas, cada gráfico integra um diagrama ampliado (*inset plot*) detalhando a região próxima ao fundo do canal. Devido ao acentuado efeito de borda, que compromete a premissa de escoamento bidimensional infinito imposta pelo modelo de Herschel-Bulkley (conforme fundamentação teórica na seção 2.4.1), optou-se pela exclusão rigorosa da representação da curva teórica nesta subseção, focando-se na consistência entre as abordagens de processamento digital de imagens e as medições manuais de referência.

Figura 48 – Perfis de velocidade ao longo da profundidade em regime não perturbado (MPU) para o Ensaio C_4 (500 rpm, 5° , a 5 cm da parede)



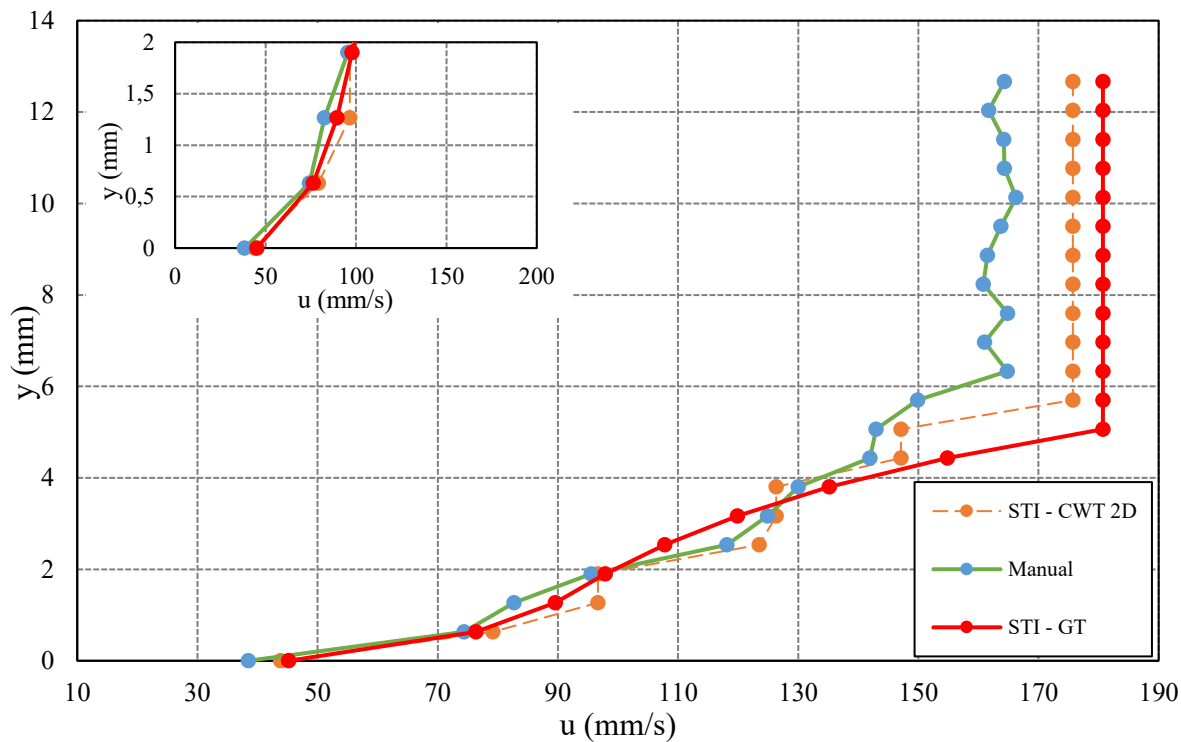
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 49 – Perfis de velocidade ao longo da profundidade em regime não perturbado (MPU) para o Ensaio C_5 (600 rpm, 5° , a 5 cm da parede)



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 50 – Perfis de velocidade ao longo da profundidade em regime não perturbado (MPU) para o Ensaio C_6 (600 rpm, 5° , a 10 cm da parede)



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A análise do Ensaio C_4 , (Figura 48), conduzido a 500 rpm com inclinação de 5° a uma distância de 5 cm da parede, evidencia a influência das paredes acrílicas laterais na desaceleração do escoamento. Embora esta configuração apresente considerável energia hidráulica, a velocidade máxima observada limitou-se a 123 mm/s. Em contraste, sob a mesma inclinação, o escoamento central do Ensaio C_2 , conduzido a 300 rpm, apresentou velocidade superior a 210 mm/s. Essa redução de velocidade na região próxima à parede evidencia a influência das tensões de cisalhamento transversais, que dissipam parcelas significativas da energia cinética disponível, moldando um perfil de velocidades vertical consideravelmente atenuado que se estende por toda a profundidade ($h \approx 10,36 \text{ mm}$). O gráfico integrado do fundo revela a ocorrência do fenômeno de escorregamento, com velocidades iniciais em torno de 35 mm/s. As estimativas geradas pelos algoritmos STIV (CWT-2D e GT) mostraram robusta concordância com os registros manuais em todos os níveis.

No ensaio subsequente, Ensaio C_5 (Figura 49), a elevação da rotação para 600 rpm sob a mesma configuração geométrica (5 cm da parede) instaura um incremento de vazão que reforça a influência do efeito viscoso na lateral do canal. O aumento modesto da velocidade máxima para a faixa de 141-149 mm/s evidencia o estrangulamento energético provocado pela borda. Ao deparar-se com essa barreira, o escoamento reage com um espessamento hídrico, elevando a lâmina para $h \approx 13,01 \text{ mm}$. O deslizamento inicial no fundo do canal manteve-se presente ($V_{slip} \approx 22 - 25 \text{ mm/s}$). Esse comportamento foi detectado por ambas as técnicas automáticas, indicando que a camada de lubrificação prevalece mesmo sob elevadas tensões normais exercidas pelo escoamento.

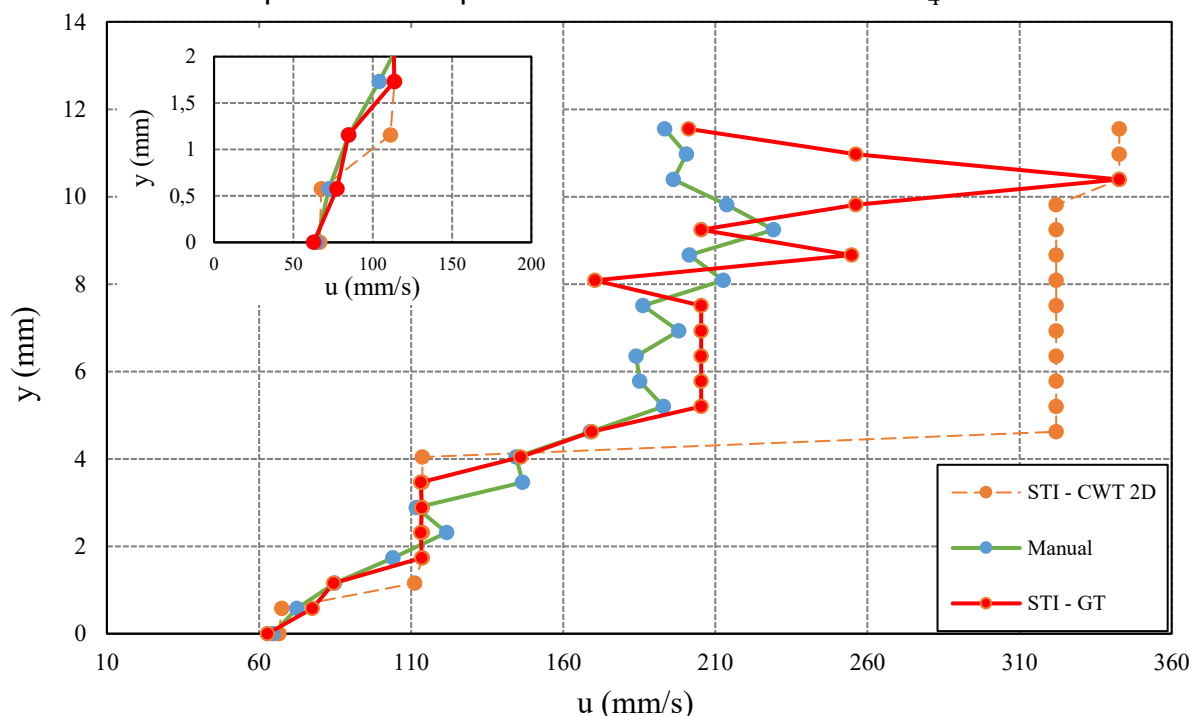
O Ensaio C_6 (Figura 50) fornece o cenário de transição ao deslocar a medição para 10 cm da borda. Este afastamento resulta na atenuação do efeito lateral, com a velocidade superficial máxima subindo para níveis próximos a 175 mm/s e a espessura da lâmina recuando para 12,66 mm de espessura. Devido à menor restrição física nesta região, o deslizamento inicial intensifica-se para $V_{slip} \approx 40 \text{ mm/s}$. Diferentemente dos ensaios anteriores, o C_5 e C_6 apresenta um núcleo rígido (*plug flow*) mais perceptível, calculado em aproximadamente 3,33 mm.

4.5.1 Análise transiente: fases de crista e vale

Dando continuidade à avaliação cinemática transiente induzida pela passagem de *roll waves*, esta subseção apresenta a confrontação dos perfis de velocidade para o Ensaio C_4 (500 rpm, 5° , a 5 cm da parede), comparando as fases extremas de crista e vale. A análise detalhada destas regiões é fundamental para compreender a dinâmica de aceleração e desaceleração local imposta pela instabilidade superficial em fluidos viscoplásticos próximo às fronteiras físicas.

Sob a perspectiva hidrodinâmica, a passagem da crista está associada a um aumento abrupto da espessura da lâmina de escoamento, o que resulta em uma intensificação da componente gravitacional ao longo do plano inclinado. Esse mecanismo promove uma aceleração local do fluido, alterando significativamente o perfil de velocidades ao longo da profundidade e ampliando o gradiente de cisalhamento na região próxima ao fundo do canal.

Figura 51 – Confrontação cinemática transiente: perfil de velocidades ao longo da profundidade para a fase de crista do Ensaio C_4



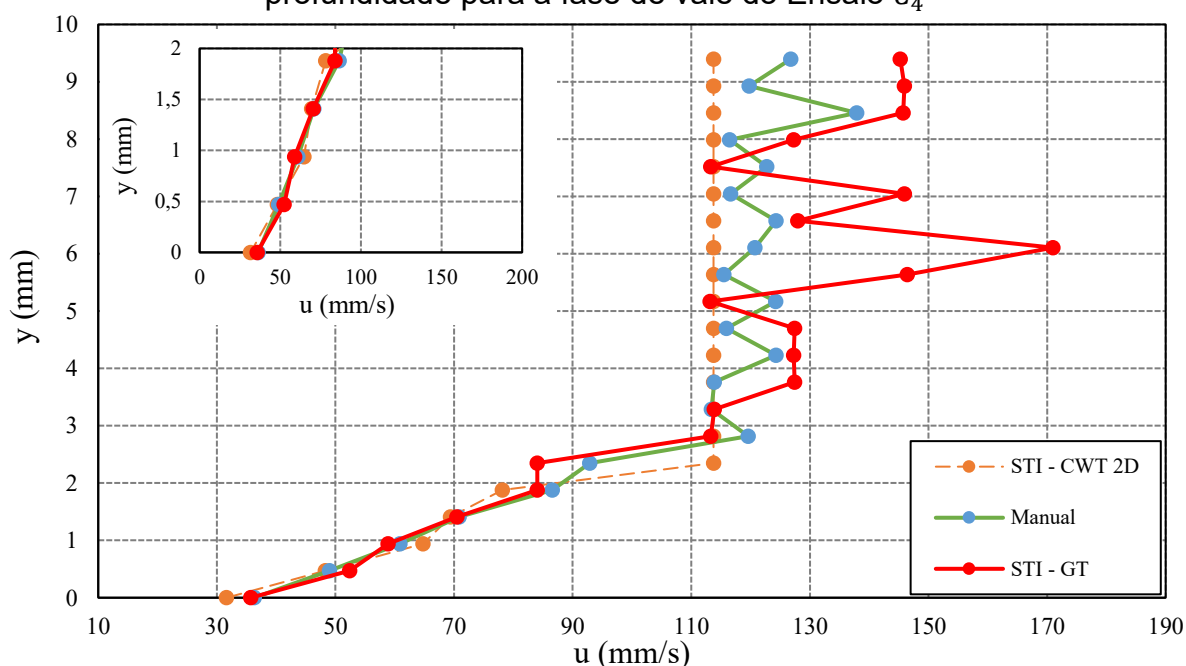
Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 51 ilustra o perfil de velocidades vertical durante a passagem do pico da onda (crista). A análise desta fase demonstra aceleração imposta pela instabilidade.

Observa-se que as medições manuais e os resultados obtidos pelo método do Gradiente Tensorial (GT) demonstraram boa concordância mútua, situando a velocidade superficial na faixa de 215 a 240 mm/s. Em contrapartida, o algoritmo Wavelet (CWT-2D) apresentou maior dificuldade analítica devido às variações rápidas da interface livre e às alterações locais de textura da imagem STI, superestimando o movimento local do escoamento para valores entre 320 e 340 mm/s. O efeito de deslizamento aparente junto ao fundo também se mostrou mais pronunciado na fase de crista. Essa interpretação foi obtida a partir do deslocamento horizontal necessário para aproximar o modelo teórico dos perfis experimentais, resultando em valores estimados de $V_{slip} \approx 60 - 66 \text{ mm/s}$. Esse aumento sugere maior influência dos efeitos de parede durante a passagem da crista, possivelmente associada ao aumento local da velocidade e da solicitação cisalhante próxima ao fundo.

Em contrapartida, a fase de vale caracteriza-se por uma condição de escoamento mais raso, na qual a redução da altura da lâmina implica uma diminuição da contribuição inercial e uma maior influência relativa dos efeitos viscosos e da tensão limite de escoamento. Nessa situação, o escoamento tende a apresentar velocidades mais reduzidas e maior sensibilidade a perturbações locais, especialmente nas regiões próximas à parede lateral.

Figura 52 – Confrontação cinemática transiente: perfil de velocidades ao longo da profundidade para a fase de vale do Ensaio C_4

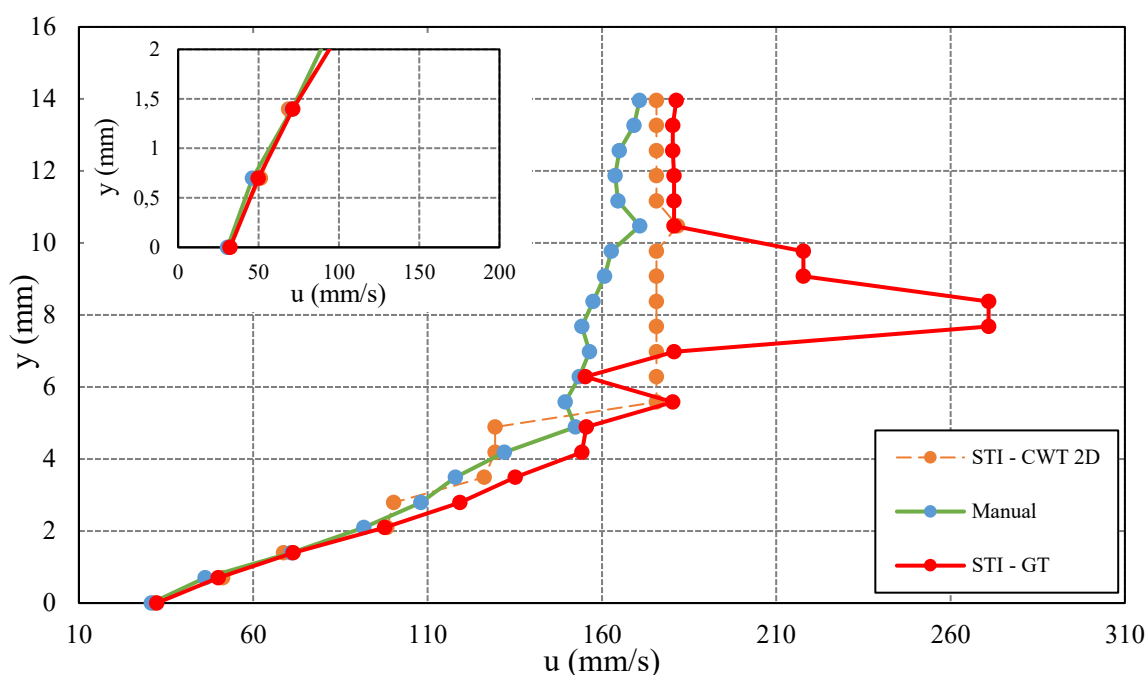


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na sequência, a Figura 52 apresenta a caracterização cinemática correspondente à região de vale da onda. Nesta fase de remanso, observa-se uma súbita desaceleração do fluido, que retorna a velocidades superficiais na faixa de 113 a 120 mm/s. Diferentemente da crista, nota-se uma paridade entre os três métodos analíticos (CWT-2D, GT e Manual) ao longo de toda a profundidade. Esse comportamento confirma que, em regiões onde a textura da imagem é coerente e imune à agitação extrema da interface, os algoritmos baseados em energia global (CWT) recuperam sua precisão. O deslizamento no fundo do vidro também recuou para valores entre 30 e 35 mm/s, aproximando-se do comportamento observado no regime permanente (MPU).

Avançando na caracterização cinemática transiente, a análise foca agora no Ensaio C_5 (600 rpm, 5° , a 5 cm da parede), que apresenta lâminas significativamente mais espessas devido à elevada vazão e ao efeito de frenagem lateral. As Figuras 53 e 54 apresentam a confrontação dos perfis de velocidade para este ensaio nas fases de crista e vale, respectivamente.

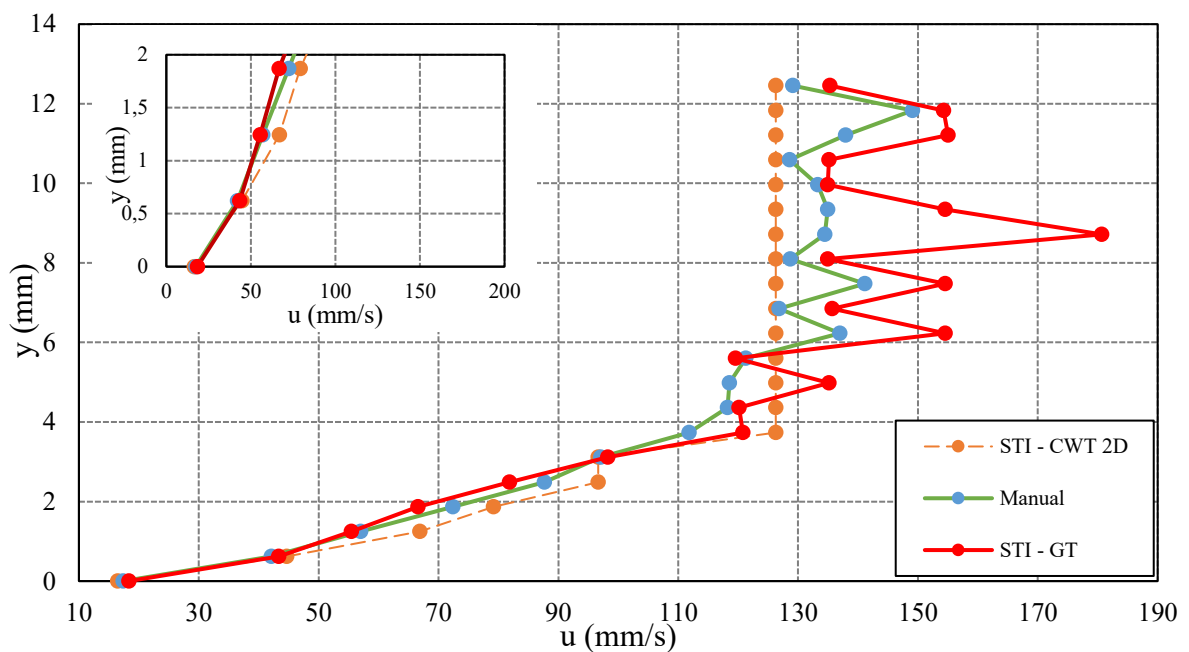
Figura 53– Confrontação cinemática transiente: perfil de velocidades ao longo da profundidade para a fase de crista do Ensaio C_5



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 53 ilustra o perfil vertical de velocidades durante a passagem da crista. Nesta fase, observa-se o espessamento máximo da lâmina ($h_{max} = 13,96 \text{ mm}$) e a aceleração do escoamento, com velocidades superficiais variando na faixa de 160 a 175 mm/s. Diferentemente do ensaio anterior, no Ensaio C_5 nota-se uma concordância entre o algoritmo Wavelet (CWT-2D) e o método Manual ao longo de toda a profundidade. O método do Gradiente Tensorial (GT), por sua vez, acompanhou a tendência geral, porém registrou perto de quatro pontos discrepantes fora da leitura comum em alturas específicas. Estes desvios locais são justificados pela sensibilidade inerente da formulação do GT a ruídos texturais pontuais ou à passagem de bolhas na zona de interrogação durante a curta janela temporal de análise. O deslizamento no fundo de vidro (V_{slip}) intensificou-se sob a crista, situando-se entre 27 e 32 mm/s.

Figura 54 – Confrontação cinemática transiente: perfil de velocidades ao longo da profundidade para a fase de vale do Ensaio C_5



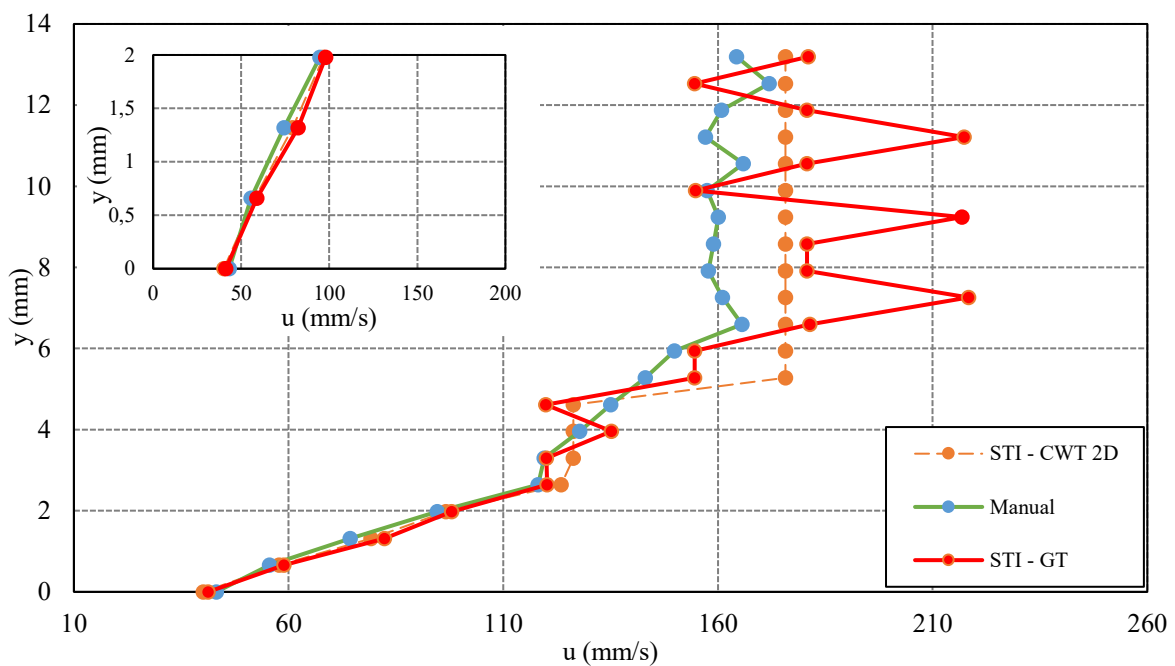
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na sequência, a Figura 54 apresenta o comportamento cinemático na região de vale. Caracterizada como uma zona de remanso e desaceleração brusca, a velocidade superficial recua para a faixa de 125 a 135 mm/s, evidenciando a perda de energia cinética após a passagem da instabilidade. Nesta fase de maior estabilidade da superfície livre, os três métodos (CWT-2D, GT e Manual) recuperam a paridade analítica. O alívio na tensão de cisalhamento reflete-se diretamente na base do canal,

com o escorregamento basal (V_{slip}) diminuindo significativamente para valores entre 16 e 18 mm/s. A aderência consistente dos dados experimentais atesta a capacidade das técnicas de processamento STIV em monitorar as flutuações hidrodinâmicas locais, mesmo sob o acúmulo espesso de fluido gerado pelo efeito de borda.

Finalizando a análise transiente, as Figuras 55 e 56 apresentam o comportamento cinemático para o Ensaio C_6 (600 rpm, 5° , a 10 cm da parede), detalhando os perfis durante a passagem da crista e do vale, respectivamente. Este ensaio é particularmente desafiador do ponto de vista óptico e algorítmico, visto que o afastamento da parede lateral altera a morfologia da onda e reduz a incidência de iluminação localizada, impondo severas limitações à detecção de textura na superfície livre.

Figura 55 – Confrontação cinemática transiente: perfil de velocidades ao longo da profundidade para a fase de crista do Ensaio C_6



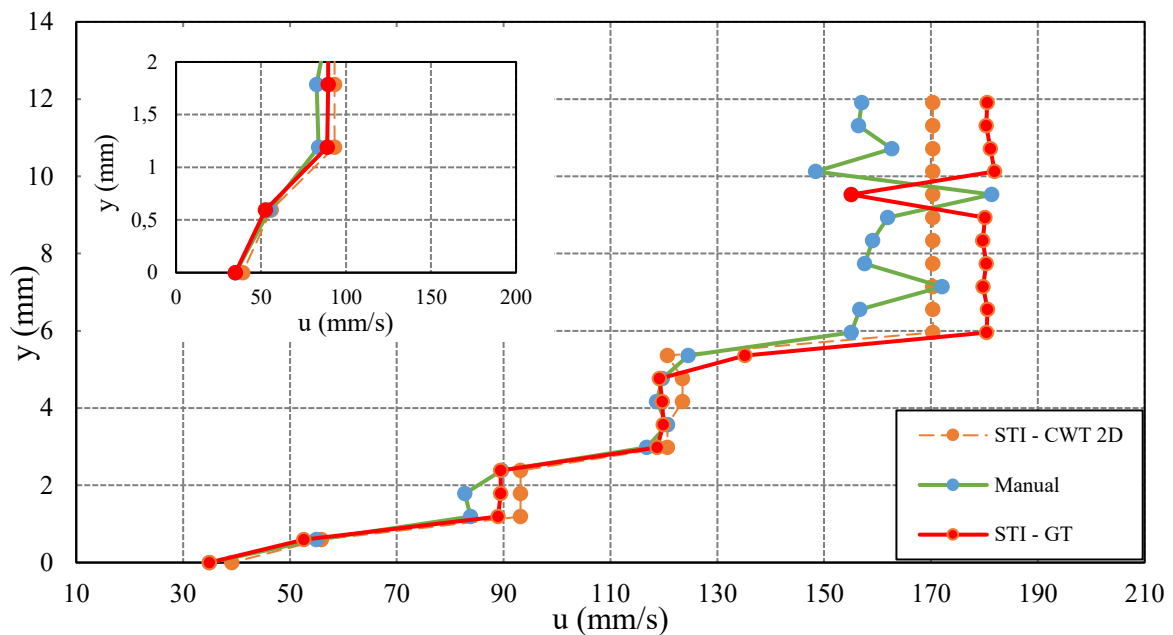
Fonte: Elaborado pelo Autor.

A análise da fase de crista (Figura 55) ilustra a complexidade hidrodinâmica a 10 cm da borda. Diferentemente dos ensaios marginais (C_4 e C_5), o aumento da altura da lâmina ($h_{max} = 13,19 \text{ mm}$) não foi acompanhado por uma detecção clara de aceleração superficial por todos os métodos. O algoritmo Wavelet (CWT-2D) registrou um ângulo direcional de $5,45^\circ$, equivalente a uma velocidade de aproximadamente

175,71 mm/s, valor próximo ao obtido no regime permanente (MPU) para este mesmo ensaio.

Essa proximidade sugere que, nesse caso específico, a CWT-2D não identificou uma variação cinemática significativa na região analisada da crista. O método do Gradiente Tensorial (GT) e a medição manual apresentaram maior variabilidade na região próxima à superfície (entre 154 e 217 mm/s para GT; 157 a 165 mm/s no manual). Contudo, a partir da cota $y \approx 6,0 \text{ mm}$ em direção ao fundo do canal, todos os métodos retomam concordância, indicando maior consistência da técnica STIV no mapeamento da zona de intenso cisalhamento basal, onde a velocidade de deslizamento atingiu cerca de 40 mm/s.

Figura 56 – Confrontação cinemática transiente: perfil de velocidades ao longo da profundidade para a fase de vale do Ensaio C_6



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na fase de vale (Figura 56), o recuo da lâmina ($h_{min} = 11,91 \text{ mm}$) é acompanhado por uma leve desaceleração do fluido. O algoritmo CWT-2D capturou um ângulo direcional ligeiramente maior ($5,62^\circ$), o que reflete uma redução na velocidade para cerca de 170,36 mm/s. Embora o método GT e as medições manuais continuem exibindo oscilações pontuais na superfície (faixas de 155-180 mm/s e 157-162 mm/s, respectivamente), observa-se, de modo geral, uma estabilização cinemática em relação à passagem da crista. Semelhante ao ocorrido no pico da onda,

a região inferior do escoamento (abaixo de $y = 6,0 \text{ mm}$) demonstrou semelhança entre os três métodos analíticos. A medição global da velocidade superficial, validada fisicamente em MPU pelo método do flutuador com 10 repetições (166,42 mm/s), corrobora as faixas de valores detectadas, demonstrando a robustez da instrumentação STIV nas camadas inferiores, mesmo sob as limitações impostas pela interface agitada longe da parede.

4.6 ANÁLISE QUANTITATIVA DO ERRO (RMSE) análise quantitativa do erro (RMSE)

Com o objetivo de complementar as análises hidrodinâmicas e qualitativas apresentadas nas subseções anteriores, e fornecer uma avaliação métrica exaustiva e rigorosa do desempenho dos algoritmos automáticos desenvolvidos, conduziu-se uma análise quantitativa fundamentada na Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE — *Root Mean Square Error*).

Nesta avaliação, o método de rastreamento Manual foi estabelecido como a verdade de campo (*ground truth*) experimental. Consequentemente, os valores de RMSE reportados quantificam a discrepância quadrática média entre as orientações angulares das estrias espaço-temporais estimadas pelas rotinas computacionais, Transformada Wavelet Contínua Bidimensional (CWT-2D) e Gradiente Tensorial (GT), e as medições manuais correspondentes. Como o cálculo foi realizado a partir dos ângulos de orientação α , os valores de RMSE estão expressos em graus ($^{\circ}$), não representando diretamente erro percentual nem erro de velocidade em mm/s. Este cálculo abrange todas as posições verticais (profundidade y) analisadas ao longo da lâmina de fluido em cada experimento. A Tabela 9 consolida os resultados integrais desta análise de erro para a totalidade do plano experimental, segmentando os regimes permanentes (MPU) e os instáveis (crista e vale).

Quadro 2 – Erro quadrático médio (RMSE) dos métodos CWT-2D e Gradiente Tensorial em relação à validação manual para os diferentes ensaios experimentais

Experimento	CWT 2D	Gradiente Tensorial (GT)
C_1	0,54	3,06
C_2	0,51	2,16
C_3	0,78	2,92
$C_4(MPU)$	1,48	1,09
$C_5(MPU)$	0,49	0,65
$C_6(MPU)$	0,79	0,95
C_4 Crista	1,68	0,79
C_4 Vale	0,95	0,92
C_5 Crista	0,70	1,14
C_5 Vale	0,88	0,76
C_6 Crista	0,64	0,84
C_6 Vale	0,74	0,72

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Uma análise detalhada dos ensaios centrais conduzidos em regime permanente e uniforme (C_1 , C_2 e C_3) evidencia a superioridade global, em termos de RMSE, da Transformada Wavelet. Nestas condições hidrodinâmicas, o método CWT-2D exibiu valores de RMSE sistematicamente contidos e inferiores à unidade (0,54, 0,51 e 0,78, respectivamente). Esta métrica consolida a premissa teórica de que a decomposição espectral, por ser baseada na energia direcional global da imagem, atua como um filtro computacional robusto contra ruídos estáticos, gradientes de iluminação não ideais e artefatos de fundo do canal. Em nítido contraste, o método do Gradiente Tensorial apresentou uma instabilidade intrínseca significativa nestes mesmos ensaios, situando-se em valores de erro substancialmente mais elevados (3,06, 2,16 e 2,92). Este desvio quantitativo atesta que a dependência matemática do GT em relação às derivadas parciais locais de intensidade de pixel o torna altamente vulnerável a quaisquer variações locais de contraste na textura da imagem central.

Ao transitar para a região periférica do canal em regime permanente (C_4 , C_5 e C_6 em MPU), observa-se uma reconfiguração na performance dos algoritmos. O espessamento da lâmina de fluido e a consequente redução da velocidade advectiva devido ao intenso efeito de borda favoreceram o rastreamento local das derivadas espaciais. Isso resultou em uma melhoria na precisão do GT, cujos erros caíram para valores entre 0,65 e 1,09. Paralelamente, a CWT-2D manteve sua alta fidelidade, com erros de 0,49 no C_5 e 0,79 no C_6 . A única exceção ocorreu no MPU do Ensaio C_4 , onde a complexidade tridimensional imposta pela proximidade extrema da parede (a 5 cm) gerou um erro marginalmente superior na CWT-2D (1,48), embora ainda contido em uma faixa aceitável.

Entretanto, a transição para a análise do regime instável, caracterizado pela formação e propagação de ondas, evidencia de forma mais clara as particularidades e limitações de cada técnica. Na fase de crista do Ensaio C_4 , a lâmina de fluido foi submetida a uma aceleração e máxima agitação interfacial dentro de uma janela temporal extremamente reduzida. Os dados matemáticos confirmam o diagnóstico visual prévio: o algoritmo wavelet sofreu uma degradação analítica pontual devido à intensa agitação interfacial e às variações rápidas da superfície livre na região da crista, registrando seu maior erro no regime transiente (1,68) ao superestimar a velocidade na superfície livre. Nessa mesma condição, a abordagem baseada no Gradiente Tensorial apresentou maior robustez, explorando informações locais de textura da imagem e mantendo um RMSE de 0,79.

Essa dinâmica, contudo, inverte-se por completo na Crista do Ensaio C_5 . Neste caso, a passagem de bolhas aprisionadas e o surgimento de ruídos texturais isolados prejudicaram o rastreamento diferencial do Gradiente Tensorial, o que se traduz diretamente no aumento de seu RMSE para 1,14. Simultaneamente, a CWT-2D demonstrou insensibilidade a esses artefatos locais, filtrando o ruído por meio de sua análise energética apresentando RMSE de 0,70. Já na Crista do Ensaio C_6 , apesar da expressiva dispersão óptica observada exclusivamente na superfície livre devido ao distanciamento da parede (10 cm), a concordância ao longo do restante do perfil manteve o erro médio global baixo para ambos os métodos (0,64 para CWT e 0,84 para GT), reafirmando a capacidade do STIV de avaliar o cisalhamento basal.

Por fim, as fases de vale comportam-se hidrodinamicamente como zonas de remanso e desaceleração brusca, onde a textura da imagem retoma sua coerência estrutural imperturbada. A Tabela 6 evidencia que, nesse cenário de estabilidade recuperada, tanto a CWT-2D quanto o GT restauram imediatamente sua máxima precisão de rastreamento. Ambos os métodos entregam erros consistentes e sempre abaixo de 1 (oscilando em uma faixa estreita de 0,72 a 0,95) para todas as configurações de onda analisadas (C_4 , C_5 e C_6).

Em síntese, a métrica do RMSE quantifica e ratifica todas as observações fenomenológicas: o processamento de imagens espaço-temporais via CWT-2D confirma-se como a ferramenta computacional estável, robusta e de adequada precisão geral para o mapeamento contínuo de campos de velocidade em escoamentos viscoplásticos estruturados. Por sua vez, o método do Gradiente Tensorial demonstra forte relevância técnica por sua abordagem estritamente local, provando-se particularmente indispensável em janelas transientes de extrema agitação interfacial, onde os métodos globais atingem seus limites espectrais.

5 CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

5.1 CONCLUSÕES

A presente dissertação atingiu seu objetivo geral ao validar a Velocimetria por Imagem Espaço-Temporal (STIV) como uma ferramenta não intrusiva e de adequada precisão para a caracterização cinemática de escoamentos viscoplásticos. A estruturação da cadeia metodológica, iniciada pela etapa de ortorretificação das imagens, provou-se essencial para corrigir distorções de perspectiva e garantir a confiabilidade métrica dos dados experimentais.

Em relação aos objetivos específicos, o estudo conclui que a extração da orientação das estrias exige uma abordagem híbrida, não existindo um algoritmo superior. A Transformada Wavelet Contínua Bidimensional (CWT-2D) consolida-se como o método definitivo para escoamentos em regime permanente e zonas de remanso (vales), oferecendo máxima estabilidade e imunidade contra ruídos ópticos. Em contrapartida, o Gradiente Tensorial (GT) demonstrou maior robustez em condições transientes, particularmente nas regiões de crista das ondas, ao explorar informações locais de textura da imagem.

Do ponto de vista hidrodinâmico, a técnica demonstrou adequabilidade do campo de velocidade ao se ajustar ao modelo teórico de Herschel-Bulkley na região central do canal. Simultaneamente, comprovou sua sensibilidade física ao identificar a perda da hipótese unidimensional nas regiões periféricas, quantificar os efeitos de borda associados às paredes laterais e detectar de forma consistente o fenômeno de deslizamento basal (*wall slip*) característico do gel de Carbopol.

Por fim, a avaliação sob condições adversas e com presença de ondas (situação perturbada) confirmou a aplicabilidade da instrumentação e da metodologia proposta. Apesar das limitações de captação luminosa na superfície livre identificadas a maiores distâncias da parede (10 cm), a metodologia STIV mostrou-se fisicamente coerente nas camadas profundas. A integração entre a instrumentação óptica e o processamento digital de imagens demonstrou a viabilidade da técnica para a investigação de fluidos complexos em condições experimentais desafiadoras, ampliando as possibilidades de análise além das limitações associadas aos modelos teóricos clássicos.

5.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Apesar do rigor metodológico e dos resultados obtidos na validação da técnica STIV, a presente investigação apresenta algumas limitações experimentais, instrumentais e analíticas que devem ser consideradas na interpretação dos dados.

A primeira limitação refere-se à potência do sistema de iluminação a laser disponível para esta campanha experimental. A utilização de um laser de menor potência inviabilizou a captação nítida das estrias espaço-temporais na região central do canal durante a ocorrência do regime transiente, restringindo a caracterização óptica desse fenômeno às regiões mais próximas da parede de acrílico, onde a incidência luminosa era suficiente. Adicionalmente, no Ensaio C_6 (realizado a 10 cm da parede), mesmo com a utilização de uma lente divergente de 30° , a câmera não conseguiu capturar com nitidez a passagem e a variação altimétrica da superfície livre da onda. Isso gerou dispersão nos métodos automáticos exclusivamente nas camadas superiores do escoamento.

Outro fator instrumental relevante envolveu o hardware de aquisição de imagens. A câmera ultrarrápida apresentou tendência ao aquecimento durante operações prolongadas. Em aquisições de maior volume de dados (por exemplo, sequências de 400 imagens), o aumento da temperatura do equipamento ocasionava a perda pontual de quadros (*dropped frames*). Essa limitação impôs a necessidade de pausas regulares para o resfriamento da câmera entre os ensaios e exigiu o uso de hardware computacional de alto desempenho para garantir a integridade da gravação.

No que tange à instrumentação de medição da altura da lâmina, os sensores ultrassônicos demonstraram ser eficazes, porém exigiram um rigoroso processo de calibração prévia com o auxílio de um micrômetro. Embora essa calibração tenha sanado as divergências iniciais observadas quando as leituras eram comparadas com a malha de calibração na parede, as medições dinâmicas durante o regime transiente conservam uma incerteza inerente ao sensor, recomendando-se sempre o acompanhamento da avaliação visual geométrica.

Do ponto de vista algorítmico, confirmou-se que a decomposição espectral via Transformada Wavelet (CWT-2D) encontra seu limite operacional sob condições de aceleração extrema e janelas temporais curtas (como na crista da onda), superestimando as velocidades. Para contornar isso, a adoção do rastreamento manual como verdade de campo (*ground truth*) é necessária, o que, por sua vez,

introduz um fator de subjetividade humana e inviabiliza análises de alto volume em tempo real devido ao tempo operacional exigido.

Por fim, a modelagem reológica baseada na equação unidimensional de Herschel-Bulkley, utilizada como referência teórica, pressupõe hipóteses simplificadoras (escoamento laminar, regime permanente e ausência de efeitos tridimensionais). Nesse contexto, a inexistência de modelos analíticos mais abrangentes, capazes de incorporar os efeitos de borda associados às paredes laterais e as instabilidades superficiais observadas experimentalmente, limitou a comparação direta entre os resultados experimentais obtidos via STIV e previsões teóricas nos cenários tridimensionais e transientes associados à presença de ondas. Além disso, não foi realizada, no escopo desta pesquisa, uma modelagem numérica específica das ondas geradas capaz de reproduzir o campo interno de velocidades durante as fases de crista e vale. Dessa forma, a análise das velocidades internas nas regiões de instabilidade superficial ficou restrita aos resultados experimentais obtidos por STIV, sem comparação direta com simulações numéricas do escoamento transiente.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Os resultados, as validações e as próprias limitações mapeadas nesta dissertação estabelecem uma base metodológica que abre um horizonte para futuras investigações na área de mecânica dos fluidos não newtonianos e processamento de sinais ópticos. A perspectiva mais promissora para a continuidade desta linha de pesquisa consiste em evoluir da medição de velocidade direcional pura para a análise de campos de vorticidade do escoamento instável. O mapeamento do operador matemático rotacional do campo de velocidades ($\nabla \times V$) durante a passagem das ondas permitirá compreender em profundidade a dissipação de energia e a turbulência interna gerada por essa instabilidade dinâmica, sobretudo em regimes de Reynolds mais elevado.

Para viabilizar essas análises avançadas em toda a seção transversal do canal e superar as limitações focais mapeadas nos ensaios distanciados da parede, faz-se necessária a adoção de um sistema de iluminação a laser de maior potência e com lentes colimadoras mais eficientes. Essa melhoria instrumental não apenas aumentará a razão sinal-ruído durante o regime transiente, mas também facilitará a integração

simultânea da técnica STIV com os métodos clássicos de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV). A utilização de rotinas consagradas como o PIVlab, trabalhando de forma acoplada à STIV, desponta como um avanço metodológico promissor, permitindo uma confrontação cruzada (*cross-validation*) rigorosa entre os campos bidimensionais completos de vetores e a alta resolução temporal fornecida pela extração de estrias.

Do ponto de vista computacional, a incorporação de novas arquiteturas para a detecção da orientação das imagens espaço-temporais apresenta-se como um campo a ser explorado. A implementação de técnicas baseadas em aprendizado de máquina (*machine learning/deep learning*) ou abordagens híbridas espectrais (como FFT acoplada a Wavelets) tem o potencial de automatizar a análise paramétrica e superar os limites operacionais mapeados para a CWT-2D nas cristas das ondas de alta frequência. Paralelamente, a consolidação dos perfis cinemáticos que comprovam o efeito de borda imposto pelas paredes fornece o banco de dados experimental ideal para o desenvolvimento e a calibração de modelos matemáticos e simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) tridimensionais, superando definitivamente as restrições dos modelos analíticos unidimensionais.

Em síntese, o domínio da instrumentação e do desenvolvimento matemático alcançados neste trabalho consolidam a técnica STIV como uma ferramenta promissora para a investigação de escoamentos viscoplásticos. O desenvolvimento experimental e metodológico realizado, incluindo a instrumentação óptica, os procedimentos de processamento digital de imagens e as rotinas de análise implementadas, fornece uma base consistente para futuras investigações em condições hidrodinâmicas mais complexas. Dessa forma, a metodologia proposta contribui para o avanço da caracterização de fluidos não newtonianos, com potencial aplicação em problemas associados a escoamentos de detritos, corridas de lama e rompimentos de barragens.

REFERÊNCIAS

ABERLE, J. *et al.* **Experimental Hydraulics: Methods, Instrumentation, Data Processing and Management**. Boca Raton: CRC Press, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315158921>.

ABERLE, J.; SMART, G. M. The influence of roughness structure on flow resistance on steep slopes. **Journal of Hydraulic Research**, v. 41, n. 3, p. 259-269, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1080/00221680309499971>.

ALBRECHT, H. E.; BORYS, M.; DAMASCHKE, N.; TROPEA, C. **Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques**. Berlin: Springer, 2003. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-05165-8_8.

ANCEY, C.; COCHARD, S. The dam-break problem for Herschel-Bulkley viscoplastic fluids down steep flumes. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 158, n. 1-3, p. 18-35, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2008.08.008>.

ANDREINI, N.; EPELY-CHAUVIN, G.; ANCEY, C. Internal dynamics of Newtonian and viscoplastic fluid avalanches down a sloping bed. **Physics of Fluids**, v. 24, n. 5, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4718018>.

ANTOINE, J.-P. *et al.* **Two-Dimensional Wavelets and Their Relatives**. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511543395>.

ANTON PAAR. **Basics of rheology**. Anton Paar Wiki, 2024. Disponível em: <https://wiki.anton-paar.com/en/basics-of-rheology/>.

AZIMI, A. H. Free surface flow characteristics of multi-phase viscoplastic fluids on inclined flumes and planes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 78, p. 59-69, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.09.013>.

BALMFORTH, N. J. *et al.* Viscoplastic flow over an inclined surface. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 139, n. 1-2, p. 103-127, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2006.07.010>.

BALMFORTH, N. J.; FRIGAARD, I. A.; OVARLEZ, G. Yielding to stress: recent developments in viscoplastic fluid mechanics. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 46, p. 121–146, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010313-141424>.

BALMFORTH, N. J.; LIU, J. J. Roll waves in mud. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 519, p. 33–54, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112004000801>.

BANFILL, P. F. G. Rheology of fresh cement and concrete. In: RHEOLOGY REVIEWS 2006. British Society of Rheology, 2006. p. 61–130.

BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. **An introduction to rheology**. Amsterdam: Elsevier, 1989.

BATES, B. M.; ANCEY, C. The dam-break problem for eroding viscoplastic fluids. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 243, p. 64–78, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnnfm.2017.01.009>.

BIGÜN, J.; GRANLUND, G. H. Optimal orientation detection of linear symmetry. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION, 1987, London. **Proceedings...** London: IEEE, 1987. p. 433–438.

BOGER, D. V. Rheology of slurries and environmental impacts in the mining industry. **Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering**, v. 4, p. 239–257, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-061312-103347>

BOGER, D. V.; WALTERS, K. **Rheological phenomena in focus**. Amsterdam: Elsevier, 1993. (Rheology Series, 4).

BRETAS, R. E. S.; D'AVILA, M. A. **Reologia de polímeros fundidos**. São Carlos: Editora da UFSCar, 2000.

CHAMBON, G.; GHEMMOUR, A.; NAAIM, M. Experimental investigation of viscoplastic free-surface flows in a steady uniform regime. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 754, p. 332–364, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2014.378>.

CHANSON, H. **Hydraulics of Open Channel Flow**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2004.

CLOITRE, M.; BONNECAZE, R. T. A review on wall slip in high solid dispersions. **Rheologica Acta**, v. 56, n. 3, p. 283–305, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00397-017-1002-7>.

COCHARD, S.; ANCEY, C. 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, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2008.08.007>.

COUSSOT, P. **Mudflow rheology and dynamics**. Lisse: A.A. Balkema Publishers, 1997.

COUSSOT, P. *et al.* Direct determination of rheological characteristics of debris flows. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 124, n. 8, p. 865-868, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:8\(865\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:8(865)).

COUSSOT, P.; PIAU, J. M. On the behavior of fine mud suspensions. **Rheologica Acta**, v. 33, n. 3, p. 175-184, 1994.

CUNHA, E. F. da. **Implementação de um aparato experimental para medição de instabilidade em superfície livre com fluido não-newtoniano**. 2018. Tese (Doutorando em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2018.

CUNHA, E. F. da. **Implementação de aparato experimental para medição de instabilidades tipo roll waves em fluidos não-newtonianos**. 2013. 225 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2013.

DI CRISTO, C.; IERVOLINO, M.; VACCA, A. On the applicability of minimum channel length criterion for roll-waves in mud-flows. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 61, n. 4, p. 286–292, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2478/johh-2013-0036>.

DOBSON, D. W.; HOLLAND, K. T.; CALANTONI, J. Fast, large-scale, particle image velocimetry-based estimations of river surface velocity. **Computers and Geosciences**, v. 70, p. 35-43, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2014.05.007>

DRESSLER, R. F. Mathematical solution of the problem of roll-waves in inclined open channels. **Communications on Pure and Applied Mathematics**, v. 2, n. 2-3, p. 149–194, 1949. DOI: <https://doi.org/10.1002/cpa.3160020203>.

FERREIRA, F. O. **Estabilidade e controle dinâmico de roll waves**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2013.

FERREIRA, F. O.; MACIEL, G. F.; FIOROT, G. H.; CUNHA, E. F. Numerical analysis of roll waves generation on non-Newtonian fluids flowing down an inclined plane. **Advanced Materials Research**, v. 1006–1007, p. 160–167, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1006-1007.160>

FIOROT, G.H. **Mitigação de riscos e catástrofes naturais**: análise numérico-experimental de roll waves evoluindo em canais inclinados. Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira/SP, 2012.

FIOROT, G. H. *et al.* Experimental setup for measuring roll waves on laminar open channel flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 41, p. 149–157, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.10.020>

FIOROT, G. H.; ROCHO, V. R.; MÖLLER, S. V.; PEREIRA, J. B.; CUNHA, E. F.; MACIEL, G. F. An experimental assessment of roll waves evolution in mud-like fluids flowing down steep slopes. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 46, artigo 483, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-024-05053-z>

FÖRSTNER, W. A feature based correspondence algorithm for image matching. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 26, n. 3, p. 150-166, 1986.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1995.

FREYDIER, P.; CHAMBON, G.; NAAIM, M. 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, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2017.01.002>.

FUJITA, I.; MUSTE, M.; KRUGER, A. Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. **Journal of Hydraulic Research**, v. 36, n. 3, p. 397–414, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1080/00221689809498626>.

FUJITA, I.; WATANABE, H.; TSUBAKI, R. 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, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1080/15715124.2007.9635310>.

GAMBARUTO, A. M. Processing the image gradient field using a topographic primal sketch approach. **International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering**, v. 31, n. 3, p. e02706, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/cnm.2706>.

HALDENWANG, R.; SLATTER, P. T.; CHHABRA, R. P. Laminar and transitional flow in open channels for non-Newtonian fluids. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDROTRANSPORT, 15., 2002, Banff. Anais [...]. Banff: BHR Group, 2002. p. 755–768.

HU, Q. *et al.* Space-Time Image Velocimetry Based on Improved MobileNetV2. **Electronics**, v. 12, n. 2, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12020399>.

HUTTON, J. F. The British Standard Glossary of Rheological Terms. **Bulletin of the British Society of Rheology**, v. 18, n. 1, p. 3-11, 1975.

IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.

IVERSON, R. M.; REID, M. E.; LAHUSEN, R. G. Debris-flow mobilization from landslides. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 25, p. 85–138, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.25.1.85>

JÄHNE, B. **Spatio-temporal image processing: theory and scientific applications**. Berlin: Springer-Verlag, 1993.

LIU, K. F.; MEI, C. C. Roll waves on a layer of a muddy fluid flowing down a gentle slope - A Bingham model. **Physics of Fluids**, v. 6, n. 8, p. 2577–2590, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.868148>.

LONG, W. J. *et al.* Rheological approach in proportioning and evaluating prestressed self-consolidating concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 82, p. 105–116, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.05.008>.

LU, H. *et al.* Characterization of non-Newtonian rheological behaviors of powders. **Powder Technology**, v. 417, p. 118281, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118281>.

LU, J.; YANG, X.; WANG, J. Velocity Vector Estimation of Two-Dimensional Flow Field Based on STIV. **Sensors**, v. 23, n. 2, p. 955, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23020955>.

MACIEL, G. F.; FERREIRA, F. O.; FIOROT, G. H. Control of instabilities in non-Newtonian free surface fluid flows. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 35, n. 3, p. 217–229, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-013-0025-y>.

MACIEL, G. F.; SANTOS, H. K. dos; FERREIRA, F. O. Rheological analysis of water clay compositions in order to investigate mudflows developing in canals. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 31, n. 1, p. 64–74, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-58782009000100010>.

MACIEL, G. F.; TONIATI, A. L.; FERREIRA, F. O. Cultura de gestão de riscos na mitigação de desastres ‘naturais’. **Revista Ibero-Americana de Ciências**

Ambientais, v. 12, n. 2, p. 671–686, 2021. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.002.0056>.

MACOSKO, C. W. **Rheology: principles, measurements, and applications**. New York: VCH Publishers, 1994.

MALKIN, A. Y.; ISAYEV, A. I. **Rheology: Concepts, Methods, and Applications**. 2. ed. Toronto: ChemTec Publishing, 2006.

MARR, D.; HILDRETH, E. Theory of edge detection. **Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences**, v. 207, n. 1167, p. 187–217, 1980. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspb.1980.0020>.

MAUCHER, J. Gaussian Filter and Derivatives of Gaussian. In: **Online Resource for Computer Vision**, 2021. Disponível em: <https://maucher.pages.mi.hdm-stuttgart.de/orbook/preprocessing/04gaussianDerivatives.html>.

MINUSSI, R. B.; MACIEL, G. F. 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, 2012.

MUSTE, M.; FUJITA, I.; HAUET, A. Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. **Water Resources Research**, v. 44, n. 4, W00D18, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008WR006950>.

MUSTE, M.; HO, H. C.; KIM, D. Considerations on direct stream flow measurements using video imagery: Outlook and research needs. **Journal of Hydro-Environment Research**, v. 5, n. 4, p. 289–300, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jher.2010.11.002>.

NG, C.-O.; MEI, C. C. Roll waves on a shallow layer of mud modelled as a power-law fluid. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 263, p. 151–184, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112094004064>.

NGUYEN, Q. D.; BOGER, D. V. Measuring the flow properties of yield stress fluids. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 24, p. 47-88, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.24.010192.000403>.

PATALANO, A.; GARCÍA, C. M.; RODRÍGUEZ, A. 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**, v. 109, p. 323-330, 2017.

PEREIRA, J. B. *et al.* Medição de perfil de velocidade de fluido viscoplástico: aplicação da função CWT 2D na análise de velocimetria STIV. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 30., 2022, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: IAHR, 2022.

PEREIRA, J. B.; MACIEL, G. F. Application of space-time image analysis for measuring viscoplastic fluid flow in open channel. **Measurement Science and Technology**, v. 37, n. 10, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ae4cbd>.

PEREIRA, J. B.; MACIEL, G. F. Escoamentos viscoplásticos evoluindo em canal inclinado a partir de ruptura tipo barragem. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 25., 2023, Aracaju. **Anais...** Aracaju: ABRHidro, 2023.

PIAU, J. M. 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, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2007.02.011>.

PIAU, J. M.; DEBIANE, K. Consistometers rheometry of power-law viscous fluids. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 127, n. 2–3, p. 213–224, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2005.03.010>.

SILVA, P. H. de L. Introdução aos conceitos de mecânica dos fluidos e de reologia em produtos do cotidiano. **Cadernos UniFOA**, v. 13, n. 37, 2018.

TAURO, F.; PETROSELLI, A.; GRIMALDI, S. Optical sensing for stream flow observations: a review. **Journal of Agricultural Engineering**, v. 49, n. 2, p. 57-68, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4081/jae.2018.836>.

TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, n. 1, p. 61–78, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2).

TSUBAKI, R. On the Texture Angle Detection Used in Space-Time Image Velocimetry (STIV). **Water Resources Research**, v. 53, n. 12, p. 10908–10914, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017WR021913>.

WATANABE, K. *et al.* Improving accuracy and robustness of space-time image velocimetry (Stiv) with deep learning. **Water**, v. 13, n. 15, p. 2043, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13152079>.

WHITHAM, G. B. **Linear and Nonlinear Waves**. New York: Wiley-Interscience, 1974. DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.4290040514>

WIEDERSEINER, S. *et al.* Refractive-index and density matching in concentrated particle suspensions: A review. **Experiments in Fluids**, v. 50, n. 5, p. 1183-1206, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00348-010-0996-8>

APÊNDICE A - PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Ao longo do período de desenvolvimento do mestrado, foram elaborados três trabalhos técnico-científicos voltados à divulgação dos resultados desta pesquisa em eventos científicos nacionais e internacionais, tendo como temática central a reologia de materiais não newtonianos do tipo Herschel–Bulkley e a aplicação da técnica STIV para a caracterização do escoamento.

Os trabalhos desenvolvidos são listados a seguir:

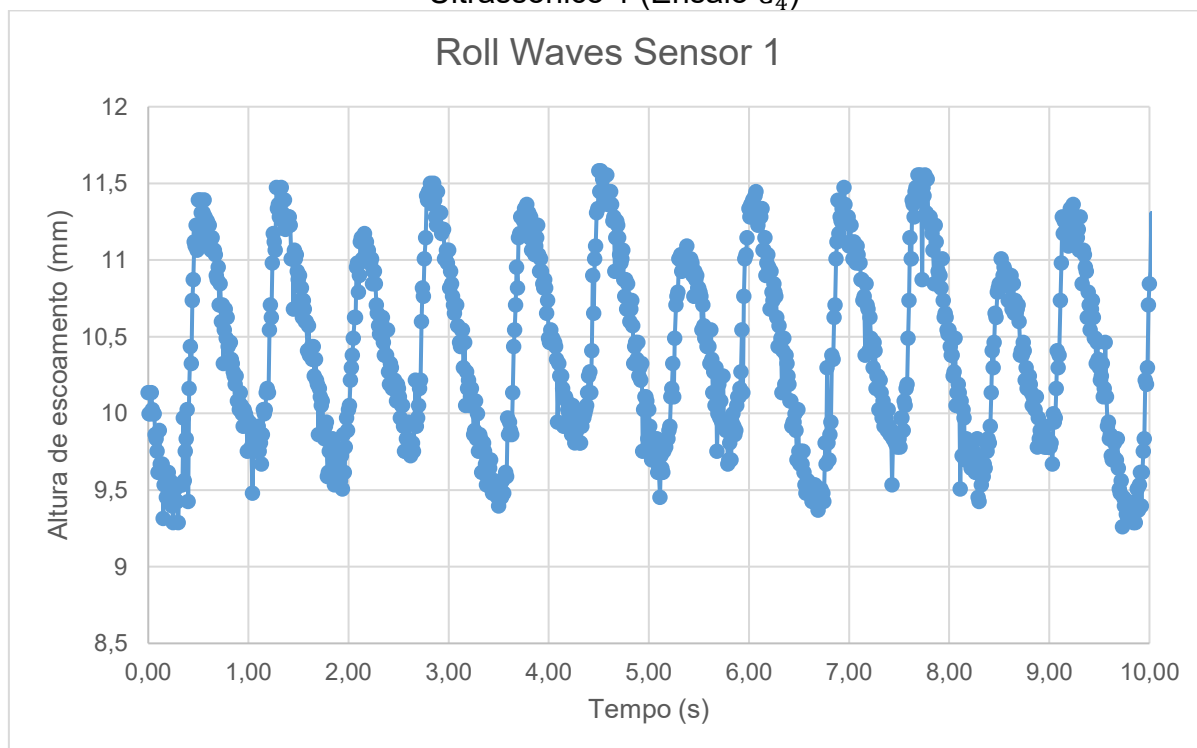
- TERUEL, M. J. V.; PEREIRA, J. B.; MACIEL, G. F. Obtaining the velocity profile of the non-newtonian flow with surface instability using the STIV technique. Trabalho apresentado e publicado nos anais do 28th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM), 2025.
- TERUEL, M. J. V.; PEREIRA, J. B.; MACIEL, G. F. Comparação de métodos para determinação da velocidade em escoamentos viscoplásticos via imagens STI. Trabalho publicado nos anais do XXVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH), 2025.
- PEREIRA, J. B.; TERUEL, M. J. V.; MACIEL, G. F.; RICO, H. G. Efeito do deslizamento de fundo na reconstrução da curva de fluxo em escoamentos de fluidos não newtonianos em canal aberto. Trabalho aceito ao XVII Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica e Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos (FluHidros), 2026.

APÊNDICE B - SÉRIES TEMPORAIS DE ALTURA DAS *ROLL WAVES*

Este apêndice apresenta os registros ultrassônicos da variação temporal da altura da lâmina de fluido (h) para o regime de escoamento com instabilidades superficiais. Os gráficos a seguir ilustram a passagem das perturbações superficiais induzidas nos ensaios transientes analisados (C_4 , C_5 e C_6), evidenciando a alternância entre elevações locais da lâmina, associadas às regiões de crista, e zonas de menor altura, associadas aos vales.

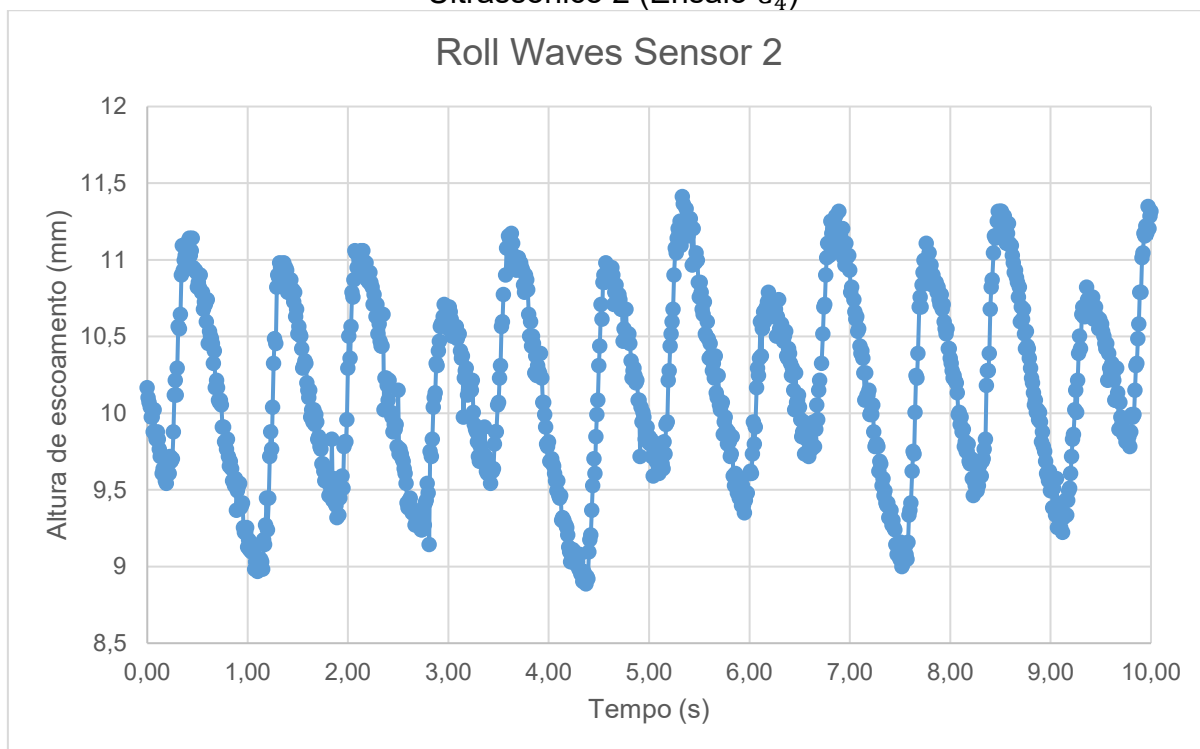
Esses dados forneceram a ordem de grandeza da variação da lâmina de escoamento e fundamentaram a delimitação das fronteiras geométricas, representadas pelas alturas locais máximas e mínimas, utilizadas como referência para o posicionamento da janela de interrogação e para a validação visual direta nas imagens STIV durante as análises cinemáticas discutidas no Capítulo 4.

Figura B1 – Série temporal da altura da lâmina de fluido obtida pelo Sensor Ultrassônico 1 (Ensaio C_4)



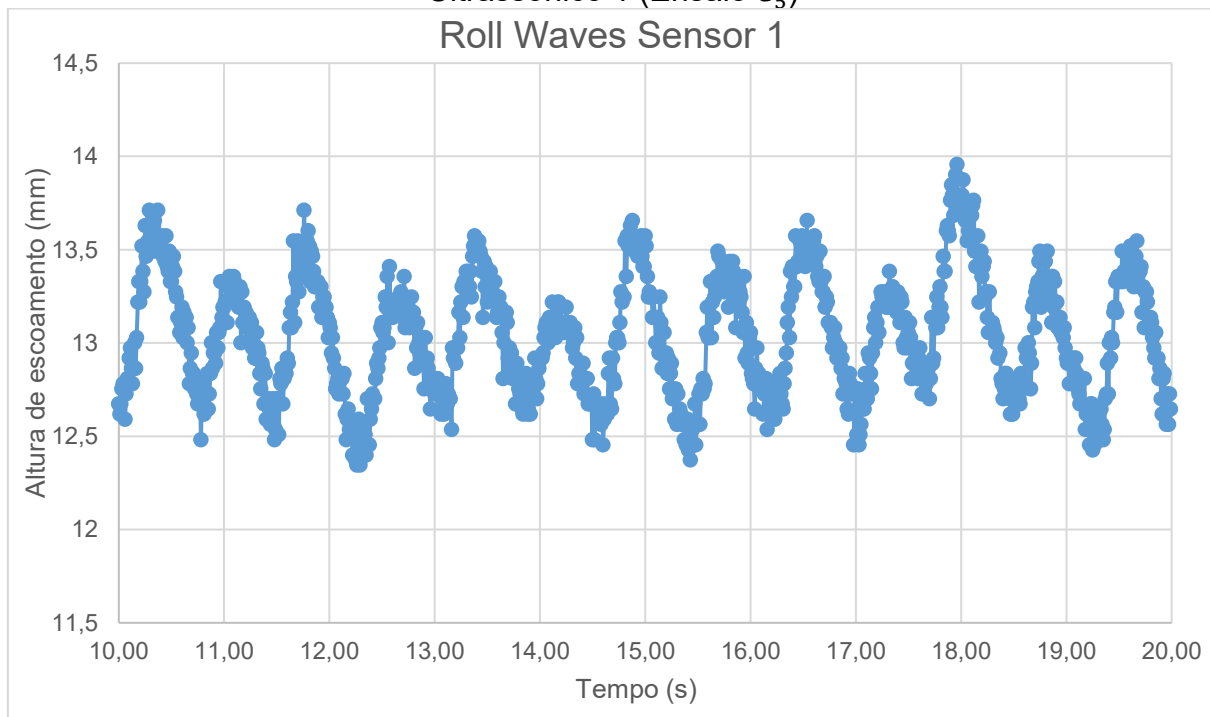
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura B2 – Série temporal da altura da lâmina de fluido obtida pelo Sensor Ultrassônico 2 (Ensaio C_4)



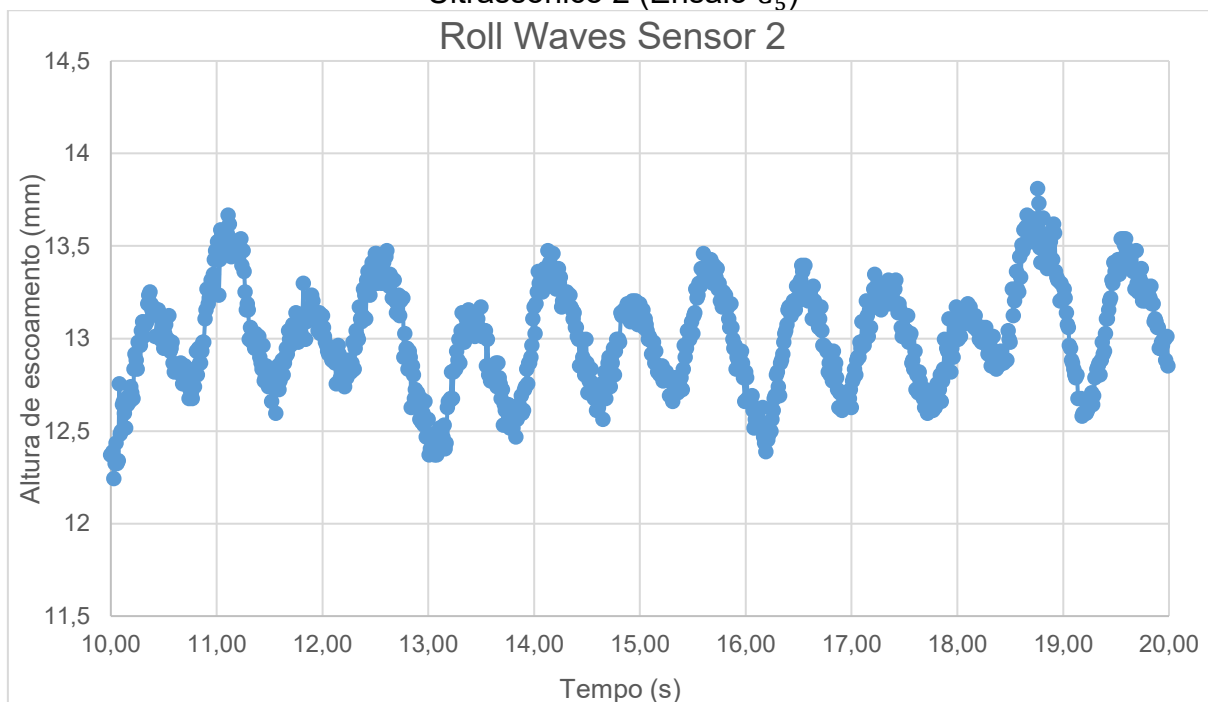
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura B3 – Série temporal da altura da lâmina de fluido obtida pelo Sensor Ultrassônico 1 (Ensaio C_5)



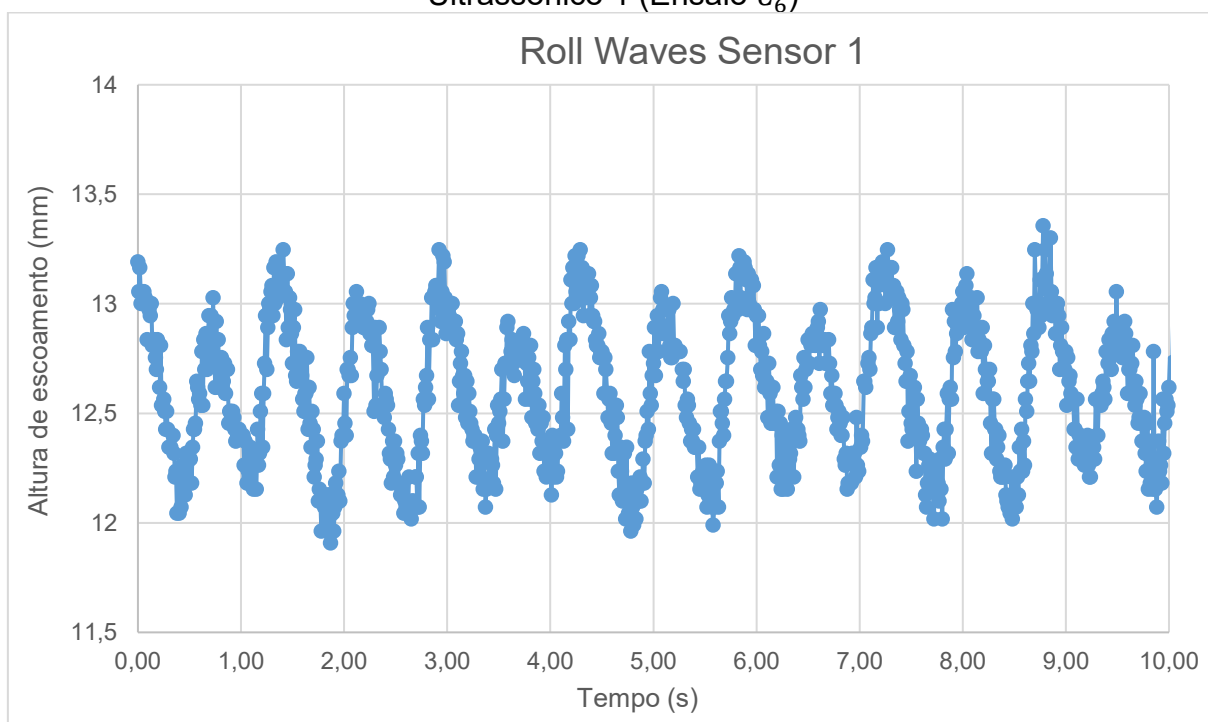
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura B4 – Série temporal da altura da lâmina de fluido obtida pelo Sensor Ultrassônico 2 (Ensaio C_5)



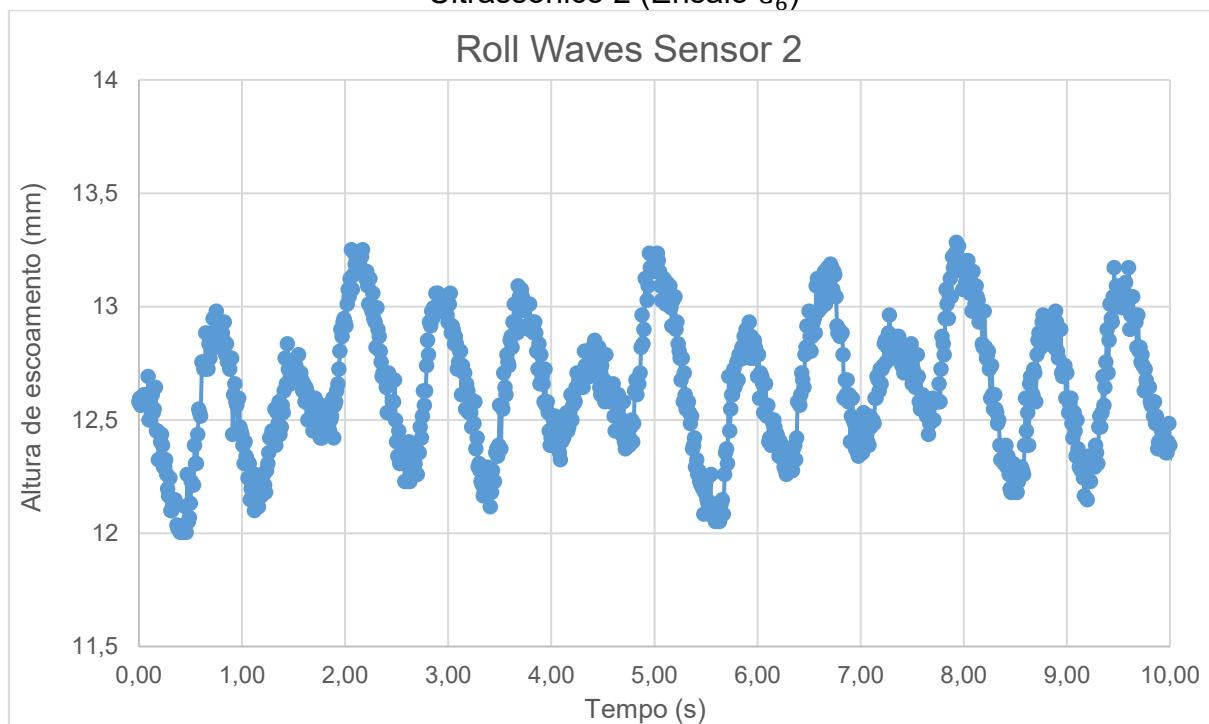
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura B5 – Série temporal da altura da lâmina de fluido obtida pelo Sensor Ultrassônico 1 (Ensaio C_6)



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura B6 – Série temporal da altura da lâmina de fluido obtida pelo Sensor Ultrassônico 2 (Ensaio C_6)



Fonte: Elaborado pelo Autor.