UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA - ENGENHARIA CIVIL

RELATÓRIO DE PÓS-DOUTORADO

ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE INSTABILIDADES EM SUPERFÍCIE LIVRE COM FLUIDO NÃO NEWTONIANO POR MACHINE LEARNING

PESQUISADOR: Dr. Evandro Fernandes da Cunha
SUPERVISOR: Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel

Ilha Solteira – SP
2025

RESUMO

Este relatório apresenta as contribuições do projeto de pós-doutorado *Estudo e Caracterização de Instabilidades em Superfície Livre com Fluido Não Newtoniano por Machine Learning*, desenvolvido no Laboratório de Hidrologia e Hidrometria (LH2) da UNESP – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS). O projeto investiga a viabilidade do uso de Machine Learning (ML) na caracterização de dados dinâmicos de escoamentos de fluidos não Newtonianos com instabilidades na superfície livre, com ênfase nas *roll waves* reproduzidas em aparato experimental laboratorial. O fluido teste foi o Gel de Carbopol 996, análogo viscoplástico de lamas naturais descrito pelo modelo de Herschel-Bulkley. As atividades cobriram três frentes: (i) instrumentação e desenvolvimento de aparatos de medição de parâmetros de superfície livre, conduzidos com a coorientação de doze bolsistas em três ciclos consecutivos do PIBIC Jr (2022–2025); (ii) produção científica indexada, com dois artigos publicados em periódicos internacionais — *Measurement* (JCR 5,6) e *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* (JCR 2,2); e (iii) aplicação de algoritmos de ML sobre o banco experimental construído no projeto. Em resposta às restrições operacionais documentadas — indisponibilidade do reômetro e necessidade de substituição do canal de ensaios —, propôs-se um pipeline original de aumento de dados em três camadas fisicamente fundamentadas: Bootstrapping por Ruído Gaussiano, Interpolação Linear Intra-Campanha e Processo Gaussiano com Amostragem por Hipercubo Latino, expandindo o banco original de 9 ensaios reais para 391 instâncias validadas (fator 43,4×). Os classificadores supervisionados k-NN, SVM e Random Forest alcançaram acurácia de 100% na validação cruzada *leave-one-out*; o Clustering Hierárquico recuperou espontaneamente a estrutura experimental (silhueta = 0,5212); e a análise de pertinência por distância euclidiana normalizada mostrou a viabilidade de transferência do conhecimento laboratorial a cenários de campo, com aplicação direta a protocolos de monitoramento e previsão de risco em encostas com escoamentos viscoplásticos.

Palavras-chave: *roll waves*; fluido não Newtoniano; Gel de Carbopol 996; Machine Learning; aumento de dados; instabilidades hidrodinâmicas.

ABSTRACT

This report presents the contributions of the post-doctoral project *Study and Characterization of Free-Surface Instabilities in Non-Newtonian Fluid by Machine Learning*, developed at the Laboratory of Hydrology and Hydrometry (LH2) of UNESP – Faculty of Engineering of Ilha Solteira (FEIS). The project investigates the feasibility of using Machine Learning (ML) for characterizing dynamic data from non-Newtonian fluid flows with free-surface instabilities, with emphasis on *roll waves* reproduced in a laboratory experimental apparatus. The test fluid was Carbopol 996 Gel, a viscoplastic analog of natural mud described by the Herschel-Bulkley model. The activities covered three fronts: (i) instrumentation and development of free-surface measurement apparatuses, conducted with the co-supervision of twelve scholarship holders across three consecutive cycles of the PIBIC Jr program (2022–2025); (ii) indexed scientific production, with two articles published in international journals — *Measurement* (JCR 5.6) and *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* (JCR 2.2); and (iii) application of ML algorithms to the experimental database built in the project. In response to documented operational constraints — rheometer unavailability and the need to replace the experimental channel —, an original three-layer data augmentation pipeline was proposed, physically grounded: Gaussian Noise Bootstrapping, Linear Intra-Campaign Interpolation, and Gaussian Process Regression with Latin Hypercube Sampling, expanding the original database of 9 real experiments to 391 validated instances (factor 43.4×). The k-NN, SVM, and Random Forest supervised classifiers achieved 100% accuracy in *leave-one-out* cross-validation; Hierarchical Clustering spontaneously recovered the experimental structure (silhouette = 0.5212); and the relevance analysis based on normalized Euclidean distance demonstrated the feasibility of transferring laboratory knowledge to field scenarios, with direct application to monitoring and risk-prediction protocols in slopes with viscoplastic flows.

Keywords: *roll waves*; non-Newtonian fluid; Carbopol 996 Gel; Machine Learning; data augmentation; hydrodynamic instabilities.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista panorâmica do canal experimental (a) e vista superior (b), com indicação dos sistemas de medição fotométrico e ultrassônico. 24

Figura 2 - Diagrama de blocos do aparato experimental, indicando os módulos de circulação do fluido, geração de perturbação, medição e aquisição de dados. 24

Figura 3 - Curvas de absorbância versus comprimento de onda (nm) para diferentes concentrações volumétricas de azul de metileno (MB), com destaque para a combinação ótima selecionada (×).....25

Figura 4 - Perfis de profundidade do escoamento h(t) medidos pelos sistemas fotométrico (linha vermelha) e ultrassônico (linha azul) para rotações de 225, 275, 325, 375, 425 e 475 RPM (ensaios I5R225 a I5R475). Os valores de $\Delta h/h_0$ e λ_w/L são indicados para cada 27

Figura 5 - Perfis de profundidade do escoamento h(t) obtidos pelo sistema fotométrico com os fatores de correção V_max (linha cinza), V_min (linha amarela), V_mean (linha vermelha) e sem correção (linha verde), para o ensaio I5R475.....28

Figura 6 - Vista isométrica do aparato experimental em configuração real: (a) canal inclinado de seção retangular; (b) reservatório; (c) bomba hidráulica de cavidade progressiva; (d) sistema de perturbação; (e) sistema de medição com transdutores ultrassônicos. 31

Figura 7 - (a) Esquema de posicionamento do sistema de perturbação e dos transdutores ultrassônicos ao longo do canal (posições 0,30 m a 2,40 m a jusante da perturbação); (b) fotografia do canal experimental durante ensaio, com indicação dos sensores e da frente.....32

Figura 8 - Perfis temporais de altura da superfície livre h(t) registrados nas posições x = 0,30; 0,60; 0,90; 1,20; 1,50; 1,80; 2,10 e 2,40 m a jusante da perturbação, para o 5.° ensaio (n = 0,39; C = 0,23; R = 17; F = 0,78). O eixo vertical indica a altura em m ..33

Figura 9 - (a) Densidade espectral de energia dos sinais h(t) nas diferentes posições longitudinais, mostrando a frequência fundamental dominante (1,5 Hz) e o crescimento dos harmônicos a jusante; (b) evolução da energia espectral na frequência fundamental ao lo 34

Figura 10 - Fluxograma do pipeline de aumento e aplicação dos modelos de Machine Learning: dados experimentais reais (n = 9) → Camada 1 (Bootstrapping) → Camada 2 (Interpolação) → Camada 3 (GPR + LHS) → Banco Aumentado (391 instâncias) → Modelos de ML (Classifica 44

Figura 11 - Diagramas de dispersão das features antes (marcadores sólidos, n = 9) e após aumento (marcadores semitransparentes, n = 391) nos planos (a) Fr × Re e (b) θ × Q. Cores por campanha: C1 (azul, θ = 14°) e C2 (laranja, θ = 5°). As regiões delimitadas pela 48

Figura 12 - Projeção PCA dos ensaios reais (marcadores sólidos, n = 9) e do banco aumentado (marcadores semitransparentes, n = 391) nas duas primeiras componentes principais. Cores por campanha: C1 (azul, θ = 14°) e C2 (laranja, θ = 5°). Os percentuais de variânc 51

Figura 13 - Dendrograma do Clustering Hierárquico (ligação de Ward) aplicado sobre os 9 ensaios reais normalizados. A linha tracejada horizontal indica o corte para k = 2 grupos, resultando na separação espontânea entre C1 (θ = 14°) e C2 (θ = 5°). Coeficiente de silhueta para k = 2: 0,5212. 52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Síntese bibliométrica dos artigos vinculados ao projeto de pós-doutorado. 22

Tabela 2 - Features escalares dos 9 ensaios reais: identificação do ensaio, campanha, parâmetros operacionais (θ, Q, RPM), parâmetros hidráulicos (u_s, h_0, $\bar{u}_0$, Fr, Re), parâmetros reológicos (n, K_n, ρ) e features de onda em P1 (h_1, Δh). 39

Tabela 3 - Comparativo das três técnicas de aumento de dados: técnica, fundamento físico, parâmetros de implementação, vantagens, limitações e número de amostras geradas. Linha da Camada 3: "Kernel Matérn v=2,5; 100 candidatos LHS; filtro Fr∈[0,50;1,05]; reter 5 42

Tabela 4 - Estatísticas descritivas do banco original (n = 9) e do banco aumentado (n = 391): média, desvio padrão, mínimo e máximo por feature, para os grupos de parâmetros [A]–[E]. 46

Tabela 5 - Composição do banco aumentado por camada de virtualização e campanha de origem: instâncias reais, sintéticas por camada e total por classe. 46

Tabela 6 - Desempenho dos classificadores supervisionados na tarefa de identificação de campanha (C1 vs. C2): acurácia LOO-CV, acertos por ensaio e observações metodológicas. 49

Tabela 7 - Ranking de pertinência dos 9 ensaios reais em relação ao cenário hipotético (θ = 10°, Q = 3,5 × 10^{-4} m^3/s, Fr ≈ 0,72, Re ≈ 20, n ≈ 0,665, K_n ≈ 0,173 Pa·s^n): posição, identificação do ensaio e distância euclidiana normalizada. 53

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 9
1.1 OBJETIVO GERAL 10
1.1.1 Objetivos Específicos 10
1.2 JUSTIFICATIVA 11
1.3 ESTRUTURA DO RELATÓRIO 12

2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS: ESTADO DA ARTE 13
2.1 ESCOAMENTOS COM SUPERFÍCIE LIVRE E FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS 13
2.2 INSTABILIDADES HIDRODINÂMICAS E ROLL WAVES 14
2.3 PARÂMETROS HIDRÁULICOS E REOLÓGICOS EM ESCOAMENTOS DE FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS 15
2.4 MACHINE LEARNING APLICADO À DINÂMICA DE FLUIDOS E SUPERFÍCIES LIVRES 16

3 SÍNTESE ATIVIDADES DE COORIENTAÇÃO PIBIC Jr (2022–2025) 18
3.1 Ciclo 2022–2023: Instrumentação e Sistemas de Medição (Apêndice A) 18
3.2 Ciclo 2023–2024: Implementação de Aparatos para Lagos de Barragens (Apêndice B) 19
3.3 Ciclo 2024–2025: Técnicas Avançadas de Sensoriamento em Fluidos Não Newtonianos (Apêndice C) 20
3.4 Síntese Integrada e Contribuições Estruturais 21

4 PRODUÇÃO CIENTÍFICA VINCULADA 22
4.1 ARTIGO I — TÉCNICA FOTOMÉTRICA DE ABSORBÂNCIA PARA MEDIÇÃO DE ROLL WAVES EM SUPERFÍCIE LIVRE DE ESCOAMENTO DE FLUIDO NÃO NEWTONIANO 23
4.1.1 Materiais e Métodos 23
4.1.2 Resultados e Discussão 26
4.2 ARTIGO II — AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA EVOLUÇÃO DE ROLL WAVES EM FLUIDOS DO TIPO LAMA ESCOANDO EM DECLIVES ACENTUADOS 29
4.2.1 Materiais e Métodos 30
4.2.2 Resultados e Discussão 33
4.3 SÍNTESE DAS CONTRIBUIÇÕES 35

5 ESTUDO PRINCIPAL: MACHINE LEARNING APLICADO AO BANCO DE DADOS EXPERIMENTAL....37
5.1 MATERIAIS E MÉTODOS....37
5.1.1 Aparato Experimental e Fluido-Teste....37
5.1.2 Constituição e Estrutura do Banco de Dados....38
5.1.3 Survey de Técnicas de ML e Aumento Aplicáveis....40
5.1.4 Pipeline de Aumento e Modelos de ML Implementados....44
5.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO....45
5.2.1 Banco de Dados: Características Originais e Expandidas....45
5.2.2 Avaliação das Técnicas de Aumento....47
5.2.3 Classificação e Caracterização dos Ensaios por ML....49
5.2.4 Análise de Pertinência entre Ensaios Experimentais....52
5.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO E PERSPECTIVAS....54

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS....56
6.1 CONCLUSÕES....56
6.2 PERSPECTIVAS FUTURAS....57

REFERÊNCIAS....59

APÊNDICE A — INSTRUMENTAÇÃO E SISTEMAS DE MEDIÇÃO | PIBIC Jr 2022–2023....62
A.1 Coorientação I — Julia Silva Belini | PIBIC Jr 2022–2023....62
A.1.1 Materiais e Métodos....62
A.1.2 Resultados e Discussão....63
A.2 Coorientação II — Yan Vanin Inácio | PIBIC Jr 2022–2023....64
A.2.1 Materiais e Métodos....64
A.2.2 Resultados e Discussão....64
A.3 Coorientação III — Pedro Henrique Souza Menoni | PIBIC Jr 2022–2023....65
A.3.1 Materiais e Métodos....65
A.3.2 Resultados e Discussão....65

APÊNDICE B — IMPLEMENTAÇÃO DE APARATOS DE MEDIÇÃO DE ONDA EM LAGOS DE BARRAGENS | PIBIC Jr 2023–2024....66
B.1 Coorientação IV — Emily Vitória de Oliveira / Júlia Silva Belini | PIBIC Jr 2023–2024....66

B.1.1 Materiais e Métodos....66
B.1.2 Resultados e Discussão....67
B.2 Coorientação V — Yan Vanin Inácio | PIBIC Jr 2023–2024....68
B.2.1 Materiais e Métodos....68
B.2.2 Resultados e Discussão....68
B.3 Coorientação VI — Pedro Henrique Souza Menoni / João Pedro Dantas Pereira | PIBIC Jr 2023–2024....69
B.3.1 Materiais e Métodos....69
B.3.2 Resultados e Discussão....70

APÊNDICE C — TÉCNICAS AVANÇADAS DE SENSORIAMENTO E MEDIÇÃO EM FLUIDOS | PIBIC Jr 2024–2025....71
C.1 Coorientação VII — Alexandre Lima de A. V. Borges | PIBIC Jr 2024–2025....71
C.1.1 Materiais e Métodos....71
C.1.2 Resultados e Discussão....72
C.2 Coorientação VIII — Júlia Jardim Amorim | PIBIC Jr 2024–2025....72
C.2.1 Materiais e Métodos....72
C.2.2 Resultados e Discussão....73
C.3 Coorientação IX — Luiz Eduardo Landin Rodrigues | PIBIC Jr 2024–2025....73
C.3.1 Materiais e Métodos....73
C.3.2 Resultados e Discussão....73
C.4 Coorientação X — Ana Alice Noguchi França | PIBIC Jr 2024–2025....74
C.4.1 Materiais e Métodos....74
C.4.2 Resultados e Discussão....74
C.5 Coorientação XI — Emily Vitória de Oliveira | PIBIC Jr 2024–2025....75
C.5.1 Materiais e Métodos....75
C.5.2 Resultados e Discussão....75
C.6 Coorientação XII — João Pedro Dantas Pereira | PIBIC Jr 2024–2025....76
C.6.1 Materiais e Métodos....76
C.6.2 Resultados e Discussão....76

1 INTRODUÇÃO

Eventos hidrológicos extremos — corridas de detritos, deslizamentos e rupturas de barragens de rejeitos — exigem modelos preditivos que permitam intervenção em tempo hábil na gestão de riscos. Nesses escoamentos, o comportamento não Newtoniano do material transportado e a formação de *roll waves* na superfície livre determinam o potencial destrutivo do evento. A combinação entre ensaios laboratoriais controlados e técnicas de Machine Learning oferece um caminho para caracterizar e classificar essas instabilidades a partir de dados experimentais — base sobre a qual sistemas de alerta e protocolos de resposta podem, futuramente, ser desenvolvidos.

Em canais inclinados com fluido não Newtoniano, as *roll waves* nascem da amplificação de perturbações de pequena amplitude até a configuração estável de trens de ondas, com velocidade de propagação e comprimento de onda definidos. Sua geração e evolução respondem aos parâmetros viscoplásticos do fluido e às condições hidráulicas do escoamento — número de Froude, inclinação do canal e vazão. Reproduzir o fenômeno em laboratório, com sensoriamento adequado, fornece o conjunto de dados necessário ao treinamento de modelos de ML para a identificação e a classificação dos regimes.

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Hidrologia e Hidrometria (LH2) da UNESP – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), sob supervisão do Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel. Investiga-se a viabilidade do uso de Machine Learning para caracterizar dados dinâmicos de escoamentos de fluidos não Newtonianos com instabilidades na superfície livre, adotando o Gel de Carbopol 996 como fluido teste — análogo reológico de lamas naturais usado em laboratório. As atividades cobriram três frentes: (i) instrumentação e aparatos de medição de parâmetros de superfície livre; (ii) produção científica em periódicos indexados; e (iii) aplicação de algoritmos de ML sobre o banco experimental construído ao longo do pós-doutorado.

A pesquisa esteve articulada com duas atividades formativas: a coorientação de doze projetos de Iniciação Científica Júnior (PIBIC Jr), em parceria com alunos do Ensino Médio Técnico da Etec de Ilha Solteira (Centro Paula Souza) e, em um dos casos, do IFSP – Campus de Ilha Solteira; e a consolidação do Grupo de Estudos,

Pesquisa Aplicada e Trabalhos em Inteligência Artificial (GEPATI), iniciativa multi-institucional voltada à formação em IA aplicada à engenharia.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a viabilidade do uso de técnicas de Machine Learning na caracterização de dados dinâmicos derivados de parâmetros hidráulicos e reológicos de escoamentos de fluidos não Newtonianos com instabilidades na superfície livre, com ênfase nas *roll waves* reproduzidas em aparato experimental.

1.1.1 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

a) instrumentar e operar sistemas de medição de parâmetros de superfície livre em escoamentos de fluidos não Newtonianos, com técnicas fotométricas, ultrassônicas e ópticas;

b) construir e estruturar um banco de dados experimental composto por séries temporais adquiridas sob condições hidráulicas e reológicas controladas, envolvendo escoamentos com e sem perturbação na superfície livre;

c) levantar as técnicas de ML aplicáveis ao problema (*survey*), selecionando, implementando e treinando os modelos mais adequados às características do banco;

d) classificar e caracterizar os ensaios experimentais por meio dos modelos de ML treinados, avaliando a pertinência entre experimentos e a consistência das predições;

e) coorientar projetos de Iniciação Científica Júnior (PIBIC Jr) com foco no desenvolvimento e na validação de sistemas de sensoriamento e medição voltados à dinâmica de superfícies livres;

f) publicar artigos vinculados ao projeto em periódicos indexados, contribuindo para a produção científica do grupo LH2–FEIS.

1.2 JUSTIFICATIVA

Desastres naturais associados a escoamentos de materiais viscoplásticos — corridas de detritos, fluxos de lama após chuvas intensas, rupturas de barragens de rejeitos — colocam à comunidade científica e aos órgãos gestores a tarefa de desenvolver modelos que antecipem a dinâmica e o alcance desses eventos. No Brasil, as rupturas das barragens de Fundão (2015) e Brumadinho (2019) deixaram explícito o custo humano e ambiental da ausência de ferramentas preditivas confiáveis.

Fisicamente, esses escoamentos são complexos porque os fluidos envolvidos são não Newtonianos: sua reologia impõe relações não lineares entre tensão e taxa de deformação. Esse comportamento define as condições para o surgimento e a evolução das *roll waves*, cujas propriedades (amplitude, comprimento, velocidade de fase) dependem dos parâmetros reológicos e hidráulicos do escoamento. Compreender e prever essas instabilidades é condição para estimar o potencial destrutivo de eventos reais.

O Machine Learning complementa a modelagem analítica clássica por uma via distinta: os modelos teóricos baseados em equações diferenciais exigem hipóteses simplificadoras que restringem sua aplicabilidade a casos particulares, enquanto os algoritmos de ML extraem padrões e relações funcionais de dados de alta dimensionalidade sem demandar conhecimento explícito da estrutura matemática subjacente. Treinados sobre dados experimentais consistentes, podem classificar regimes de escoamento, detectar a ocorrência de *roll waves* e caracterizar ensaios por suas assinaturas dinâmicas — saídas diretamente aplicáveis a sistemas de apoio à decisão em cenários de risco.

Três frentes sustentam este trabalho: a relevância social e ambiental do problema; a originalidade da abordagem, que combina produção experimental controlada e aplicação de ML em um terreno pouco explorado da hidráulica computacional; e a contribuição formativa, materializada nas coorientações do PIBIC Jr e na consolidação do GEPATI como espaço de formação em IA aplicada à engenharia.

1.3 ESTRUTURA DO RELATÓRIO

O relatório está organizado em oito capítulos, na ordem em que as atividades foram desenvolvidas ao longo do pós-doutorado.

O Capítulo 2 trata do estado da arte: fundamentos de escoamentos com superfície livre e fluidos não Newtonianos, instabilidades hidrodinâmicas e *roll waves*, parâmetros hidráulicos e reológicos pertinentes, e o panorama do uso de Machine Learning em dinâmica de fluidos.

Os Capítulos 3 descrevem as coorientações dos ciclos do PIBIC Jr de 2022–2023, 2023–2024 e 2024–2025, com ênfase nos sistemas de instrumentação, medição e sensoriamento construídos para o estudo de parâmetros de superfície livre.

O Capítulo 4 apresenta os dois artigos publicados no âmbito do projeto, com seus materiais, métodos, resultados e contribuições ao estado da arte.

O Capítulo 5 é o núcleo científico do relatório e expõe o estudo principal de Machine Learning: aparato experimental, estrutura do banco de dados, levantamento e seleção de técnicas de ML, treinamento dos modelos e análise dos resultados.

O Capítulo 6 sintetiza as conclusões e indica os desdobramentos para investigações subsequentes.

2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS: ESTADO DA ARTE

2.1 ESCOAMENTOS COM SUPERFÍCIE LIVRE E FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS

Escoamentos com superfície livre formam uma classe central de problemas em hidráulica e mecânica dos fluidos, definidos por uma interface fluido–ar cuja posição varia no espaço e no tempo segundo a dinâmica do próprio escoamento. Em canais inclinados, a gravidade é a força motriz dominante, e a profundidade da lâmina, a velocidade média e a distribuição de tensões dependem das propriedades físicas e reológicas do fluido. A hipótese de águas rasas — profundidade muito menor do que o comprimento longitudinal — torna as equações de conservação tratáveis e amplamente aplicáveis a problemas de engenharia hidráulica (CHAUDHRY, 2008; STOKER, 1957).

Fluidos Newtonianos e não Newtonianos diferem na relação constitutiva entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação: nos primeiros, a relação é linear e a viscosidade dinâmica é constante; nos segundos, observa-se dependência da viscosidade com a taxa de cisalhamento — pseudoplásticos ($n < 1$) e dilatantes ($n > 1$) —, presença de tensão limite de escoamento (viscoplásticos), ou combinação dos dois efeitos. Em eventos hidrológicos extremos — corridas de detritos, fluxos de lama após chuvas intensas, rupturas de barragens de rejeitos —, os materiais transportados exibem comportamento não Newtoniano pronunciado, o que dificulta tanto a modelagem matemática quanto a caracterização experimental desses escoamentos (COUSSOT, 1994; HUANG; GARCÍA, 1998).

O modelo reológico de Herschel-Bulkley, de três parâmetros, é referência consolidada para fluidos lamosos sob cisalhamento simples. Em formulação unidimensional para escoamento em canal:

$$\tau xz = \tau c + Kn \cdot (\partial u/\partial z)^n , \quad se\ \tau xz \geq \tau c$$

$$\partial u/\partial z = 0 , \qquad se\ \tau xz < \tau c$$

em que τ_{XZ} é a tensão de cisalhamento, τ_C é a tensão limite de escoamento, Kn é o índice de consistência, $\partial u/\partial z$ é a taxa de deformação e n é o índice de escoamento. A

tensão limite τ_C separa a região de comportamento rígido (*plug*) da região de fluência viscosa, conferindo ao material a capacidade de suportar tensões moderadas sem deformar — comportamento típico de lamas e materiais viscoplásticos naturais (COUSSOT, 1994; MACIEL et al., 2017).

O Gel de Carbopol 996 em solução aquosa é um dos análogos reológicos mais empregados em estudos laboratoriais de escoamentos viscoplásticos. Transparente, com composição e parâmetros reológicos ajustáveis ao modelo de Herschel-Bulkley, permite a visualização de fenômenos de superfície livre e o uso de técnicas ópticas de medição — vantagens que o distinguem dos fluidos argilosos naturais e justificam sua adoção como fluido teste de referência no grupo LH2–FEIS (PIAU, 2007; VARGES et al., 2019; CUNHA, 2018).

2.2 INSTABILIDADES HIDRODINÂMICAS E ROLL WAVES

Instabilidades hidrodinâmicas em escoamentos com superfície livre resultam da amplificação de perturbações de pequena amplitude que, sob condições críticas, crescem até configurações estáveis e auto-organizadas. Entre as instabilidades de superfície livre de maior relevância prática, as *roll waves* recorrem em escoamentos de lamas e corridas de detritos e amplificam de forma expressiva a energia cinética e o alcance do evento (DRESSLER, 1949; NEEDHAM; MERKIN, 1987). Fisicamente, manifestam-se como trens de ondas periódicas com frente íngreme, amplitude e comprimento de onda definidos, propagando-se com celeridade característica na direção do escoamento.

O estudo do fenômeno tem origem em Dressler (1949), com soluções analíticas periódicas para escoamentos Newtonianos em regime turbulento, e em Kapitza (1948), com investigação experimental em filmes viscosos de alta viscosidade. Em canais abertos, Brock (1969) conduziu experimentos pioneiros com fluido Newtoniano que ainda servem como referência de validação. A investigação experimental em fluidos não Newtonianos é mais escassa: Coussot (1994) observou o fenômeno em misturas argilosas (Herschel-Bulkley) sem medir o perfil das ondas; Tamburrino e Ihle (2013) e Aranda et al. (2016) registraram *roll waves* em bentonita por correlação digital de imagens. Maciel et al. (2017) e, mais recentemente, Fiorot et al. (2024) ampliaram a base experimental para fluidos viscoplásticos tipo Herschel-Bulkley, empregando medição ultrassônica e fotométrica em canal instrumentado.

A análise de estabilidade linear das equações de águas rasas com modelo de Herschel-Bulkley estabelece a condição necessária para a formação de *roll waves* na superfície livre: um número de Froude crítico mínimo Fr_{min}, determinado pelos parâmetros reológicos do fluido — índice de escoamento n e adimensional de tensão limite $C^* = \tau^c / (\rho g\ h^0 \text{ sen } \theta)$ — conforme formulação de Maciel et al. (2013). Uma segunda condição, de natureza espacial, define o domínio de frequências de perturbação em que as instabilidades efetivamente se propagam e estabilizam (FERREIRA, 2013; CUNHA, 2018). Ambos os critérios precisam ser satisfeitos simultaneamente para que o fenômeno ocorra em condições controladas de laboratório.

Reproduzir *roll waves* em fluidos não Newtonianos em laboratório exige aparato dedicado: mecanismo de perturbação com amplitude e frequência controláveis, sistema de recirculação do fluido viscoplástico e instrumentação para medição do perfil de superfície livre. A infraestrutura desenvolvida pelo grupo LH2–FEIS ao longo de mais de uma década reúne canal inclinável, bomba de cavidade progressiva, mesa inercial para amortecimento de vibrações externas, sistema de perturbação por pulso de ar controlado e instrumentação ultrassônica e fotométrica, configurando uma das instalações nacionais aptas à geração, controle e medição de *roll waves* em fluidos não Newtonianos sob condições controladas (CUNHA, 2018; FIOROT et al., 2024).

2.3 PARÂMETROS HIDRÁULICOS E REOLÓGICOS EM ESCOAMENTOS DE FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS

A caracterização quantitativa de escoamentos de fluidos não Newtonianos com superfície livre depende de um conjunto de parâmetros hidráulicos e reológicos interdependentes. Sua medição rigorosa é pré-requisito para formular, calibrar e validar modelos matemáticos e de Machine Learning.

No domínio reológico, os três parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley — tensão limite de escoamento (τc), índice de consistência (Kn) e índice de escoamento (n) — são obtidos por reometria rotacional, ajustando-se a curva de escoamento (reograma) em reômetro de geometria cone-plato ou placa-placa. A tensão limite τc marca o limiar a partir do qual o material começa a escoar; n mede o grau de não-linearidade da relação tensão-deformação (n < 1 para pseudoplásticos como o Carbopol); e Kn atua como parâmetro de escala viscosa. A massa específica ρ

completa o conjunto de parâmetros físicos necessários ao cálculo dos adimensionais característicos (PIAU, 2007; VARGES et al., 2019).

No domínio hidráulico, os parâmetros principais são a profundidade da lâmina (h^0), a velocidade superficial (u^s) e a vazão volumétrica (Q). A partir delas, calculam-se a velocidade média do escoamento ($\bar{u}^0$) — que, para fluidos de Herschel-Bulkley, depende dos parâmetros reológicos e da inclinação do canal (θ) —, o número de Froude ($Fr = \bar{u}^0 / \sqrt{(g\ h^0 \cos\theta)}$) e o número de Reynolds generalizado (Re). O adimensional C^**, que expressa a razão entre a resistência plástica do fluido e a força motriz gravitacional, define o Froude crítico mínimo de geração das* roll waves*. O coeficiente de distribuição de velocidade* α*, presente nas equações de quantidade de movimento em razão do perfil não uniforme de velocidade dos fluidos viscoplásticos, é calculado a partir de* n *e* C^* (MACIEL et al., 2013; FIOROT et al., 2024).

Entre as técnicas experimentais para aferição dos parâmetros de superfície livre estão sistemas ultrassônicos de pulso-eco, fotometria por absorção luminosa, LIDAR em plataformas de prototipagem eletrônica e óptica por triangulação a laser, refração de padrões e correlação de imagens digitais. Combinadas, essas técnicas geram séries temporais do perfil de lâmina com resolução suficiente para caracterizar as *roll waves* — amplitude, comprimento de onda, período, frequência e celeridade de propagação —, alimentando o banco de dados experimental sobre o qual os modelos de Machine Learning são treinados e avaliados (CUNHA, 2018; FIOROT et al., 2024). A medição precisa e reprodutível desses parâmetros permanece em aberto como desafio experimental, sobretudo em fluidos transparentes de baixa viscosidade e em ambientes sensíveis a vibrações externas — desafio que motiva o desenvolvimento contínuo de sistemas de sensoriamento de baixo custo e alta reprodutibilidade no presente projeto.

2.4 MACHINE LEARNING APLICADO À DINÂMICA DE FLUIDOS E SUPERFÍCIES LIVRES

O Machine Learning (ML) reúne algoritmos e técnicas computacionais que identificam padrões, extraem conhecimento e produzem predições ou classificações a partir de dados, sem regras explícitas programadas a priori. As abordagens dividem-se usualmente em três paradigmas: aprendizado supervisionado, em que o modelo é treinado com pares entrada-saída rotulados; aprendizado não supervisionado, que

opera sobre dados sem rótulos em busca de estruturas latentes; e aprendizado por reforço, baseado em interação iterativa do agente com o ambiente. Para a classificação e caracterização de regimes de escoamento a partir de séries temporais, a literatura tem privilegiado as abordagens supervisionada e não supervisionada (BRUNTON; NOACK; KOUMOUTSAKOS, 2020; GÉRON, 2019).

A aplicação de ML à dinâmica de fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics* — CFD) e experimental tem crescido na última década. Entre as principais linhas reportadas estão: a aceleração de simulações de CFD por modelos substitutos (*surrogate models*) baseados em redes neurais artificiais; a identificação de estruturas coerentes em campos de velocidade obtidos por velocimetria por imagem de partículas (PIV); o desenvolvimento de modelos de turbulência informados por dados (*data-driven turbulence modeling*); e a classificação de regimes de escoamento em dutos e canais a partir de sinais de sensores (BRUNTON; NOACK; KOUMOUTSAKOS, 2020; DURAISAMY; IACCARINO; XIAO, 2019).

Em escoamentos com superfície livre e gestão de eventos hidrológicos extremos, o ML tem sido aplicado à identificação de padrões precursores de cheias e corridas de detritos em dados hidrométricos, à classificação de eventos a partir de imagens de satélite e modelos digitais de elevação, e à predição de parâmetros de impacto em sistemas de alerta precoce. Transferir modelos treinados em laboratório para contextos de campo é um dos horizontes mais promissores de aplicação: parâmetros mensuráveis *in situ* — inclinação do terreno, estimativa de vazão e características reológicas do material escoante — podem servir de entrada para modelos treinados com dados laboratoriais, ampliando o alcance preditivo do sistema (IPCC, 2023).

A aplicação de ML à classificação de regimes de escoamento com *roll waves* em fluidos não Newtonianos, contudo, é fronteira pouco explorada na literatura especializada. A escassez de bancos de dados experimentais estruturados, com condições reológicas e hidráulicas bem determinadas, restringe o desenvolvimento de modelos de ML robustos para o problema. O presente projeto de pós-doutorado responde a essa lacuna ao construir um banco de dados experimental sistemático e avaliar técnicas de ML — classificação supervisionada, agrupamento não supervisionado e extração de características de séries temporais — para a identificação e caracterização dos regimes de escoamento e das instabilidades de superfície livre induzidas em laboratório.

3 SÍNTESE ATIVIDADES DE COORIENTAÇÃO PIBIC JR (2022–2025)

O presente capítulo apresenta uma síntese estruturada das atividades de coorientação desenvolvidas ao longo de três ciclos consecutivos do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica Júnior (PIBIC Jr), abrangendo os períodos 2022–2023, 2023–2024 e 2024–2025. Ao todo, doze estudantes do ensino médio técnico — vinculados ao Centro Paula Souza – Etec de Ilha Solteira e ao Instituto Federal de São Paulo – Campus de Ilha Solteira — foram coorientados em projetos de iniciação científica conduzidos junto ao Laboratório de Hidrologia e Hidrometria (LH2) da UNESP – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS). Os detalhamentos completos — contendo a descrição metodológica, os resultados, as discussões e as referências de cada coorientação — estão compilados nos Apêndices A, B e C deste relatório.

A progressão temática observada ao longo dos três ciclos caracteriza uma trajetória deliberada de complexidade crescente, que partiu do inventário e da operacionalização de equipamentos de medição disponíveis no laboratório (2022–2023), avançou para a implementação e o teste de campo de aparatos instrumentais de baixo custo para lagos de barragens (2023–2024) e culminou na investigação sistemática de técnicas avançadas de sensoriamento — ultrassônico, LIDAR, óptico e computacional — aplicadas ao estudo de instabilidades do tipo roll waves em escoamento de Gel de Carbopol 996 em canal inclinado (2024–2025). Essa progressão espelha o amadurecimento da linha de pesquisa experimental do grupo LH2–FEIS e a consolidação de infraestrutura instrumental própria para o estudo de fluidos não Newtonianos.

3.1 CICLO 2022–2023: INSTRUMENTAÇÃO E SISTEMAS DE MEDIÇÃO (APÊNDICE A)

O primeiro ciclo de coorientações envolveu três bolsistas — Julia Silva Belini, Yan Vanin Inácio e Pedro Henrique Souza Menoni — e teve como eixo temático o inventário, a manutenção e a operacionalização dos sistemas de medição de vento e onda pertencentes ao LH2. As atividades incluíram o aprendizado de eletrônica básica com plataformas Arduino, a elaboração de catálogos técnicos dos equipamentos do

laboratório (anemômetros, dataloggers Campbell Scientific, sistema SonTek RiverSurveyor M5 e sonar EdgeTech 4600) e o desenvolvimento de protótipos instrumentados para medição de parâmetros de superfície livre.

A bolsista Julia Silva Belini desenvolveu um protótipo de ondógrafo direcional baseado em plataforma ESP32, sensor inercial MPU6050 e transmissão de dados via Wi-Fi, voltado à medição de ondas em lagos de barragens. O bolsista Yan Vanin Inácio concentrou-se no desenvolvimento de um ondógrafo tipo régua com sensor ótico a laser para medição não invasiva de nível de superfície livre em canais experimentais. O bolsista Pedro Henrique Souza Menoni ficou responsável pela catalogação sistemática dos equipamentos profissionais do laboratório, incluindo documentação dos princípios de operação do perfilador ADCP e do sonar de varredura lateral. Em virtude da qualidade dos resultados obtidos, a bolsista Julia Silva Belini foi indicada para representar a UNESP no Prêmio CNPq PIBIC Jr. O detalhamento completo deste ciclo encontra-se no Apêndice A.

3.2 CICLO 2023–2024: IMPLEMENTAÇÃO DE APARATOS PARA LAGOS DE BARRAGENS (APÊNDICE B)

O segundo ciclo contou com três coorientações — envolvendo Emily Vitória de Oliveira / Júlia Silva Belini, Yan Vanin Inácio e Pedro Henrique Souza Menoni / João Pedro Dantas Pereira — e representou a evolução direta dos protótipos iniciados no ciclo anterior, com foco no aprimoramento técnico e na implementação efetiva dos aparatos de medição de ondas em corpos d'água interiores.

Emily Vitória de Oliveira, com colaboração de Júlia Silva Belini, avançou o protótipo de ondógrafo direcional incorporando cinco módulos de sensoriamento simultâneo (inercial, magnetométrico, temperatura, pressão atmosférica e estimativa de altura de onda), transmissão em tempo real via protocolo HTTP para banco de dados InfluxDB e visualização por dashboard na plataforma Grafana. Yan Vanin Inácio modernizou o ondógrafo tipo régua com sensor laser, implementando cadeia de condicionamento de sinal com divisor de tensão resistivo e transmissão via módulo Bluetooth HC-06, obtendo curva de calibração linear ($y = 0{,}9363\,x - 0{,}9936$; distância em metros; tensão em volts), validada por testes em bancada.

Pedro Henrique Souza Menoni e João Pedro Dantas Pereira aprofundaram o estudo dos sistemas profissionais SonTek RiverSurveyor M5 (ADCP com

georreferenciamento GNSS) e EdgeTech 4600 (sonar de varredura lateral e batimetria interferométrica), documentando procedimentos de calibração e elaborando catálogo técnico de referência para as atividades futuras do laboratório. O detalhamento completo deste ciclo encontra-se no Apêndice B.

3.3 CICLO 2024–2025: TÉCNICAS AVANÇADAS DE SENSORIAMENTO EM FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS (APÊNDICE C)

O terceiro ciclo representou o salto de maior maturidade científica da série, com seis coorientações — Alexandre Lima de A. V. Borges, Júlia Jardim Amorim, Luiz Eduardo Landin Rodrigues, Ana Alice Noguchi França, Emily Vitória de Oliveira e João Pedro Dantas Pereira — organizadas em torno de quatro frentes tecnológicas para o sensoriamento não intrusivo de roll waves em escoamento de Gel de Carbopol 996 em canal experimental de inclinação regulável.

Alexandre Lima de A. V. Borges avaliou comparativamente cinco sensores LIDAR de baixo custo, selecionando o VL53L1X como plataforma para caracterização qualitativa de roll waves, e identificou limitações metrológicas associadas à transparência óptica do Carbopol (±3,5 mm de incerteza efetiva). Júlia Jardim Amorim elaborou um manual interativo abrangente para o software OndisAPY, documentando os fundamentos das metodologias SMB e JONSWAP e os procedimentos de operação para usuários de qualquer nível. Luiz Eduardo Landin Rodrigues otimizou o sistema de monitoramento de ondas em espelhos d'água, desenvolvendo um dashboard web em Streamlit para visualização interativa em tempo real das séries temporais do ondógrafo.

Ana Alice Noguchi França aplicou uma técnica óptica não intrusiva baseada na Lei de Snell-Descartes — com câmera de alta velocidade Grasshopper3 e padrão quadriculado de referência — para determinação do perfil de roll waves por análise da deformação do padrão refratado. Emily Vitória de Oliveira empregou a técnica de reflexão óptica com triangulação a laser e processamento por Fluxo Óptico de Lucas-Kanade (bibliotecas OpenCV/NumPy/Python) para obtenção do perfil temporal das ondas, com precisão de deslocamento subpixel. João Pedro Dantas Pereira investigou a viabilidade de sensores ultrassônicos HC-SR04 integrados a Arduino UNO para medição não intrusiva de roll waves, desenvolvendo um osciloscópio virtual em Python para aquisição e visualização em tempo real, com desvio médio inferior a 2 mm em

1000 medições consecutivas a 12 Hz. O detalhamento completo deste ciclo encontra-se no Apêndice C.

3.4 SÍNTESE INTEGRADA E CONTRIBUIÇÕES ESTRUTURAIS

As doze coorientações descritas neste capítulo e detalhadas nos Apêndices A, B e C compõem um programa coeso de formação científica precoce com impacto direto sobre a infraestrutura experimental do grupo LH2–FEIS. A abordagem de aprendizado por projeto, adotada sistematicamente em todos os ciclos, garantiu a transferência progressiva de competências em eletrônica embarcada, instrumentação hidráulica, processamento de sinais e programação científica, capacitando os bolsistas para contribuições técnicas efetivas ao laboratório.

Do ponto de vista da pesquisa principal, as atividades PIBIC Jr cumpriram papel central na ampliação do acervo instrumental do laboratório e na pré-qualificação de técnicas de medição para o estudo de instabilidades em fluidos não Newtonianos. As plataformas de sensoriamento — ondógrafos, sensores LIDAR, câmeras de alta velocidade, sensores ultrassônicos e sistemas ópticos — validadas nos projetos de iniciação científica constituem o substrato instrumental sobre o qual se apoia o estudo principal descrito no Capítulo 5. A progressão documentada nos três ciclos demonstra, portanto, não apenas o compromisso com a formação de recursos humanos em nível básico, mas também o alinhamento estratégico das atividades de iniciação científica com os objetivos científicos centrais do projeto de pós-doutoramento.

4 PRODUÇÃO CIENTÍFICA VINCULADA

Este capítulo apresenta os dois artigos científicos publicados no decorrer do projeto de pós-doutorado, vinculados às atividades experimentais e ao escopo temático da pesquisa. Em lugar de um resumo das publicações, contextualiza-se cada trabalho na trajetória do projeto, articulando as contribuições reportadas entre si e com os objetivos do estudo de instabilidades hidrodinâmicas em escoamentos de fluidos não Newtonianos com superfície livre.

O primeiro artigo, publicado em *Measurement* (JCR 5,6), desenvolve e valida uma técnica fotométrica de absorbância para medição de amplitudes de *roll waves* em escoamentos de Gel de Carbopol 996 em canal inclinado, com maior precisão que os sistemas ultrassônicos convencionais, sobretudo na região de choque das ondas. O segundo, publicado no *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* (JCR 2,2), investiga experimentalmente a evolução espacial das *roll waves* ao longo do canal, caracterizando o crescimento, a estabilização e a propagação dessas instabilidades em fluidos do tipo lama com reologia Herschel-Bulkley.

Juntas, as publicações sustentam a base metrológica e experimental das análises de Machine Learning do Capítulo 5. O Artigo I estabelece o protocolo de medição de alta resolução; o Artigo II fornece um banco de dados de evolução espaciotemporal das ondas — duas contribuições complementares e necessárias à proposta de modelagem do fenômeno. A Tabela 1 sintetiza as informações bibliométricas dos dois trabalhos.

Tabela 1 - Síntese bibliométrica dos artigos vinculados ao projeto de pós-doutorado.

Item	Artigo I	Artigo II
Periódico	Measurement	J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.
Ano	2024	2024
JCR	5,6	2,2
DOI	10.1016/j.measurement.2024.114880	10.1007/s40430-024-05053-z
Papel no Projeto	Protocolo de medição fotométrica de alta precisão	Evolução espaciotemporal das *roll waves*

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

4.1 ARTIGO I — TÉCNICA FOTOMÉTRICA DE ABSORBÂNCIA PARA MEDIÇÃO DE ROLL WAVES EM SUPERFÍCIE LIVRE DE ESCOAMENTO DE FLUIDO NÃO NEWTONIANO

Periódico: Measurement | JCR 5,6 | DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114880
Autores: Evandro Fernandes da Cunha, Fabiana de Oliveira Ferreira, Geraldo de Freitas Maciel, Cláudio Kitano

A motivação do trabalho parte de uma limitação técnica bem documentada na literatura: os sistemas de medição ultrassônicos por pulso-eco, largamente empregados em estudos de *roll waves*, apresentam baixa resolução temporal e erros expressivos na região de choque da onda — o trecho de maior relevância física e metrológica, em que o gradiente de altura livre é máximo (MACIEL et al., 2013; MIAO et al., 2020). Nessa região, o diâmetro do feixe acústico — da ordem de 50 mm para o transdutor RPS-401A (Migatron Corp.) — integra a superfície livre sobre uma área demasiado extensa, suavizando artificialmente as variações abruptas de lâmina. A técnica fotométrica de absorbância, fundamentada na lei de Beer-Lambert, oferece alternativa não intrusiva e de medição pontual: explora a proporcionalidade direta entre a espessura da camada de fluido translúcido e a absorção de luz monocromática.

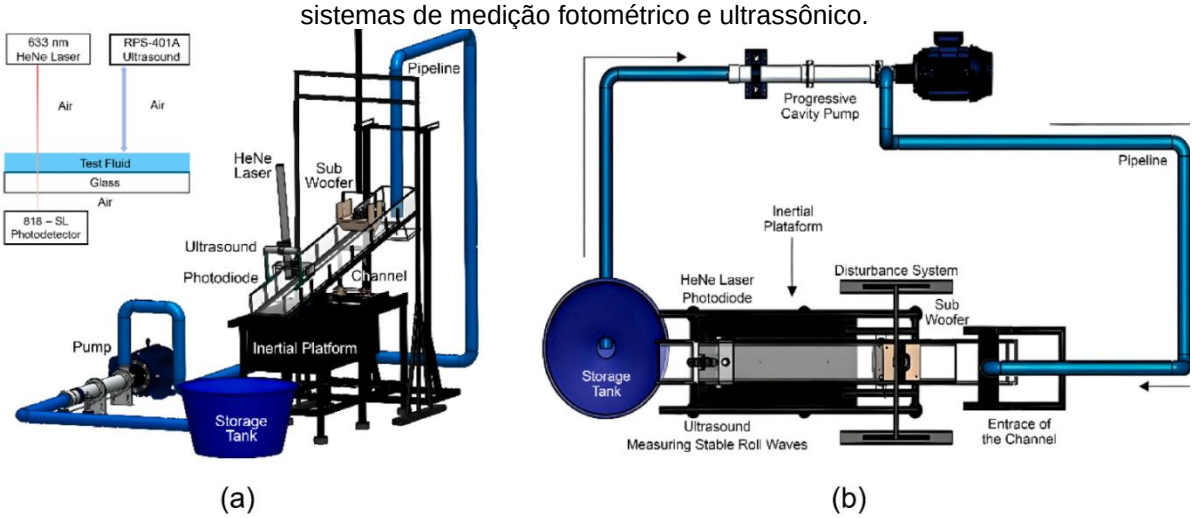
No projeto de pós-doutorado, o artigo cumpre dupla função: (i) propõe e valida uma metodologia de medição de alta precisão, apta a capturar os perfis temporais de *roll waves* com fidelidade suficiente para alimentar modelos de Machine Learning; (ii) estabelece os parâmetros operacionais do fluido-teste — concentrações de Gel de Carbopol 996 e de azul de metileno — adotados sistematicamente nos experimentos seguintes, consolidando um protocolo reprodutível para o grupo LH2 e para os bolsistas de Iniciação Científica Júnior coorientados.

4.1.1 Materiais e Métodos

O aparato experimental, ilustrado nas Figuras 1 e 2, foi concebido para produzir e medir *roll waves* forçadas em escoamento laminar uniforme de fluido não Newtoniano translúcido. O canal de ensaios — seção retangular de 3,00 m × 0,30 m × 0,25 m, fundo de vidro e paredes de plexiglass — atende aos requisitos estruturais

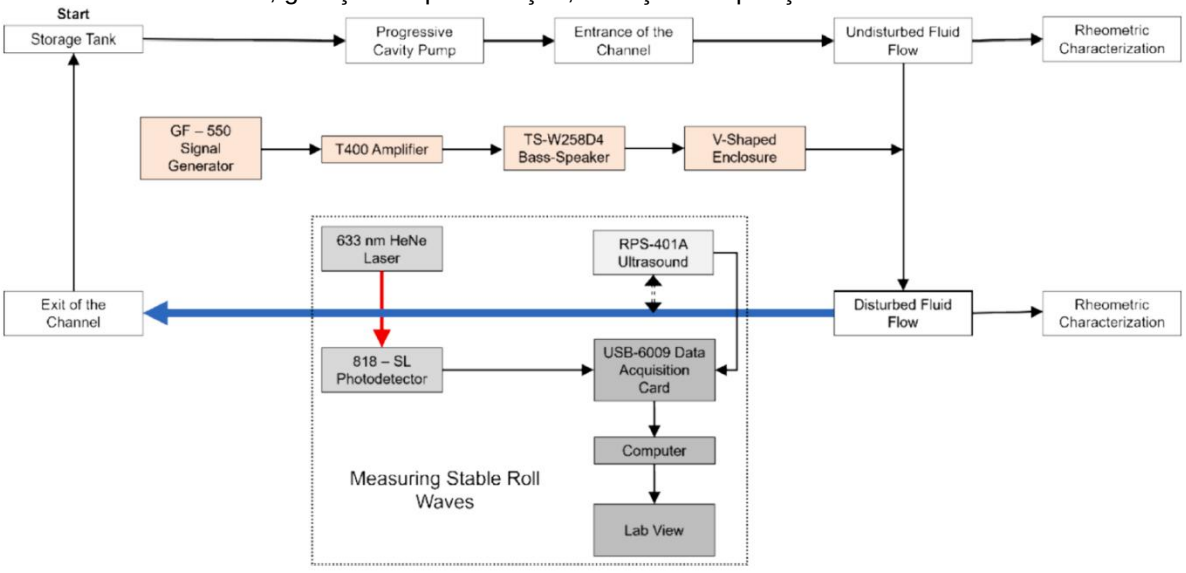
para a passagem do feixe laser. O canal repousa sobre plataforma inercial ajustável de 0° a 25° em relação ao piso do laboratório, com amortecimento de vibrações externas.

Figura 1 - Vista panorâmica do canal experimental (a) e vista superior (b), com indicação dos sistemas de medição fotométrico e ultrassônico.



Fonte: Cunha et al. (2024).

Figura 2 - Diagrama de blocos do aparato experimental, indicando os módulos de circulação do fluido, geração de perturbação, medição e aquisição de dados.



Fonte: Cunha et al. (2024).

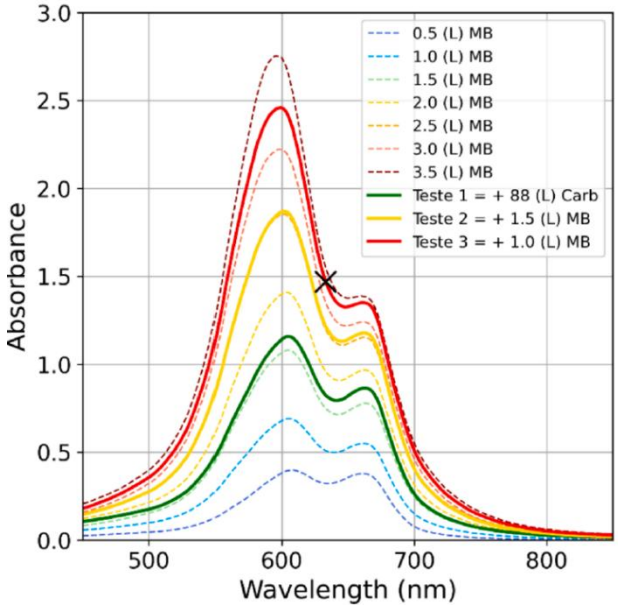
O fluido de ensaio foi o Gel de Carbopol 996, produzido segundo as recomendações do fabricante (NOVEON, LUBRIZOL, 2007). 88 L do gel foram preparados e utilizados nos ensaios, circulando em circuito fechado impulsionado por bomba de deslocamento positivo helicoidal (3.300 W) com controle digital de frequência. A descarga foi determinada por procedimento gravimétrico e confirmada por medição volumétrica. A velocidade superficial do escoamento uniforme foi

estimada por dispositivo flutuante de poliestireno expandido (baixa interferência no escoamento), com detecção por sensor de barreira óptica.

A caracterização reológica do fluido foi realizada em reômetro R/S Brookfield (Brookfield Engineering Laboratories, Middleboro, Massachusetts) com cilindros coaxiais, operado no modo CSS (*Controlled Stress Shear*). O modelo reológico adotado foi o de Herschel-Bulkley, $\tau = \tau_c + K_n \cdot \dot{\gamma}^n$, com incerteza de ±3% nas grandezas medidas. Os parâmetros reológicos representativos obtidos para os ensaios de medição de *roll waves* foram: tensão de escoamento $\tau_c = 0{,}400$ Pa; índice de fluxo n = 0,710; índice de consistência $K_n = 0{,}172\ \text{Pa}\cdot\text{s}^n$; e massa específica $\rho = 1.035\ \text{kg/m}^3$.

Para viabilizar a técnica fotométrica, azul de metileno (MB, cloreto de metiltionínio) foi adicionado ao Gel de Carbopol em diferentes concentrações volumétricas (0,5 a 3,5 L em 88 L de gel), aumentando a absorbância óptica do fluido sem comprometer sua translucidez. A compatibilidade espectral do laser de Hélio-Neônio (HeNe, $\lambda = 633$ nm) com a mistura Carbopol-MB foi avaliada por ensaios espectrofotométricos em espectrofotômetro Harch DR 5000, para comprimentos de onda de 450 a 850 nm e três concentrações mássicas de Carbopol (x% = 0,08; 0,10; 0,12), conforme o protocolo exemplificado na Figura 3.

Figura 3 - Curvas de absorbância versus comprimento de onda (nm) para diferentes concentrações volumétricas de azul de metileno (MB), com destaque para a combinação ótima selecionada (×).



Fonte: Cunha et al. (2024).

A relação entre absorbância e profundidade de escoamento é expressa pela lei de Beer-Lambert na forma $A = \log_{10}[I_0(\lambda)/I(\lambda)] = \varepsilon \cdot c_M \cdot X$, onde c_M é a concentração molar (mol/L), ε é o coeficiente molar de extinção ($\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$) e X é o comprimento de

caminho óptico (cm), diretamente proporcional à profundidade do escoamento. Para a aplicação a *roll waves* com inclinações de superfície livre menores que 12° (pior caso na região de choque), foram adotadas duas simplificações: (i) aproximação de inclinação fraca e (ii) feixe laser com polarização em p, ambas garantindo que os efeitos de reflexão nas interfaces ar–fluido e fluido–vidro fossem desprezíveis (<5%) em comparação ao efeito dominante de absorção, em consonância com os resultados de Mouza et al. (2004) e Nevas et al. (2012).

O sistema de perturbação consistiu em um *subwoofer* (1.200 W, membrana retangular de 0,3 m × 1,0 mm) instalado em caixa acústica perpendicular à superfície livre do escoamento. O sinal de acionamento foi gerado por gerador de funções (GF-55-Instrutherm) e amplificado por amplificador classe D (400 W RMS), com controle preciso de frequência e amplitude das perturbações. Seis cenários de vazão foram ensaiados para inclinação fixa do canal, todos com perturbação a 1,5 Hz — frequência inferior à frequência de corte f_c calculada para o regime de escoamento, condição necessária para a geração de *roll waves* estáveis.

O sistema de medição fotométrica foi implementado com placa de aquisição NI USB-6009 (National Instruments), programada em LabVIEW 2011 a 100 Hz de frequência de amostragem, com escala de entrada de 0 a 10 V. A calibração foi feita com cubeta de vidro preenchida com diferentes alturas de fluido em escoamento uniforme, percorrida verticalmente em incrementos de 2 mm por micrômetro fixado à parede lateral do canal. O transdutor ultrassônico RPS-401A (Migatron Corp.) operou simultaneamente como sistema de referência, com distância à superfície livre entre 150 mm e 165 mm.

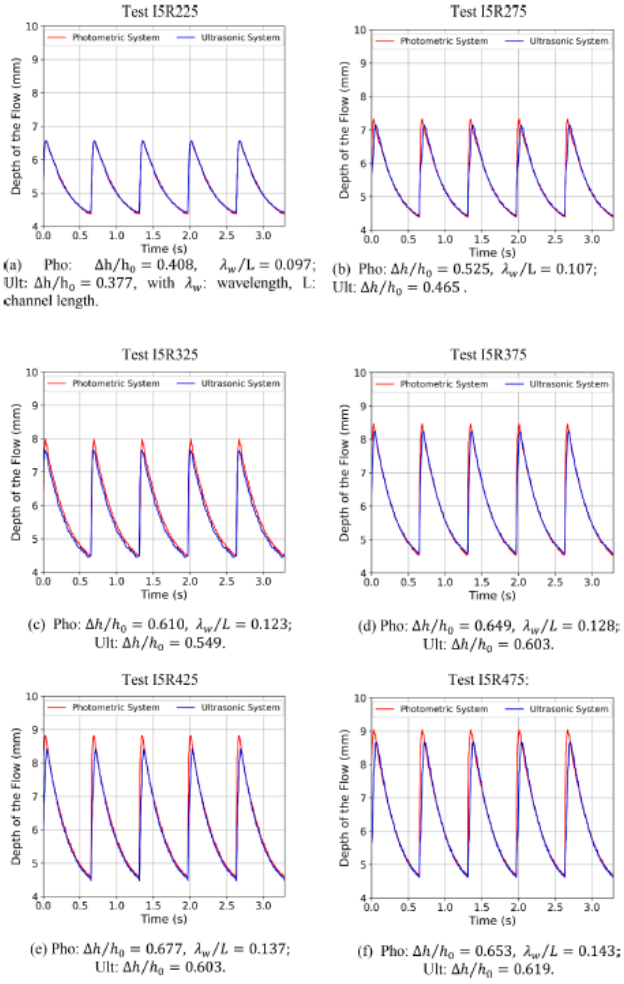
4.1.2 Resultados e Discussão

Os ensaios espectrofotométricos confirmaram a compatibilidade operacional do laser HeNe (λ = 633 nm): o pico de absorbância do azul de metileno ocorre próximo a λ = 600 nm, com absorbância de 2,8 para 3,5 L de MB — acima do limite mínimo funcional de 1,5 exigido para relação sinal-ruído adequada. As curvas da Figura 3 indicam a combinação ótima selecionada — 1,5 L de MB em 88 L de Gel de Carbopol 996 a x% = 0,10 —, com absorbância próxima a 1,5 em λ = 633 nm, resolução suficiente para a faixa de diluições analisada e sem comprometer a translucidez exigida pelo sistema fotônico.

A frequência de perturbação f = 1,5 Hz é inferior à frequência de corte fc calculada (entre 3,48 Hz e 4,65 Hz para os seis ensaios, conforme Tabela 2 do artigo), satisfazendo o critério de instabilidade. Em todos os ensaios, o número de Froude (Fr) excedeu o Froude mínimo (Fr_{min} = 0,41, calculado segundo a formulação de Herschel-Bulkley), e o número de Reynolds (Re) situou-se entre 10,9 e 25,8 — regime laminar com intensidade de perturbação crescente.

A Figura 4 compara os perfis de *roll waves* obtidos pelos sistemas fotométrico e ultrassônico nos seis cenários de rotação de bomba investigados (225 a 475 RPM). Os perfis temporais de profundidade do escoamento exibem a morfologia característica de ondas de choque — frente abrupta seguida de rampa descendente suave —, típica de *roll waves* em regime supercrítico (COUSSOT, 1994; BALMFORTH; LIU, 2004). A concordância qualitativa entre as duas técnicas é nítida; as divergências quantitativas concentram-se na região de maior gradiente.

Figura 4 - Perfis de profundidade do escoamento h(t) medidos pelos sistemas fotométrico (linha vermelha) e ultrassônico (linha azul) para rotações de 225, 275, 325, 375, 425 e 475 RPM (ensaios I5R225 a I5R475). Os valores de Δh/h_0 e λ_w/L são indicados para cada



(a) Pho: $\Delta h/h_0 = 0.408$, $\lambda_w/L = 0.097$; Ult: $\Delta h/h_0 = 0.377$, with λ_w: wavelength, L: channel length.

(b) Pho: $\Delta h/h_0 = 0.525$, $\lambda_w/L = 0.107$; Ult: $\Delta h/h_0 = 0.465$.

(c) Pho: $\Delta h/h_0 = 0.610$, $\lambda_w/L = 0.123$; Ult: $\Delta h/h_0 = 0.549$.

(d) Pho: $\Delta h/h_0 = 0.649$, $\lambda_w/L = 0.128$; Ult: $\Delta h/h_0 = 0.603$.

(e) Pho: $\Delta h/h_0 = 0.677$, $\lambda_w/L = 0.137$; Ult: $\Delta h/h_0 = 0.603$.

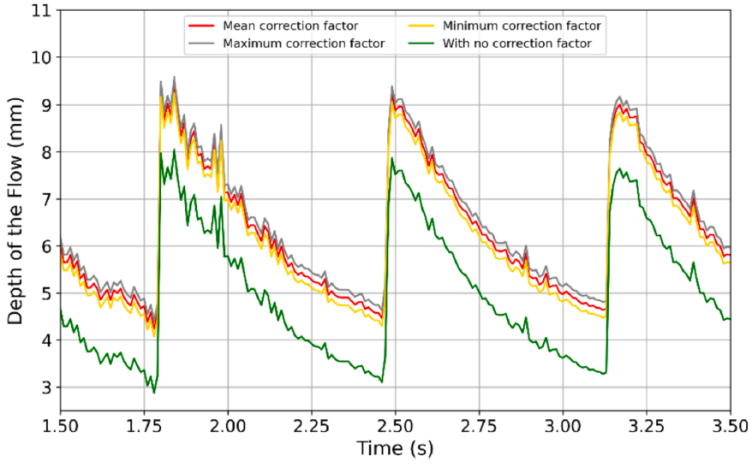
(f) Pho: $\Delta h/h_0 = 0.653$, $\lambda_w/L = 0.143$; Ult: $\Delta h/h_0 = 0.619$.

Fonte: Cunha et al. (2024).

A comparação quantitativa estabelece a superioridade da abordagem fotométrica: no ensaio I5R475 (475 RPM), o erro máximo na região de choque foi de 0,11 mm para o sistema fotométrico contra 1,37 mm para o sistema ultrassônico — redução de aproximadamente uma ordem de grandeza. A discrepância decorre da natureza dos dois sistemas: o transdutor ultrassônico RPS-401A possui feixe acústico de 50 mm de diâmetro, que integra espacialmente a superfície livre sobre área extensa e suaviza artificialmente as variações abruptas da região de choque; o sistema fotométrico, com feixe laser de ~1 mm de diâmetro, comporta-se como sonda pontual e resolve com fidelidade a morfologia do choque.

A Figura 5 exibe os perfis de *roll waves* obtidos pelo sistema fotométrico com diferentes fatores de correção aplicados ao sinal bruto. Vmax, Vmin e Vmean correspondem, respectivamente, às voltagens máxima, mínima e média detectadas pelo fotodiodo na ausência de escoamento, necessárias para compensar a variação natural da intensidade óptica ao longo do campo de medição. Os três fatores produzem curvas praticamente sobrepostas — sinal de robustez e baixa sensibilidade do método às imprecisões de calibração na faixa operacional investigada.

Figura 5 - Perfis de profundidade do escoamento h(t) obtidos pelo sistema fotométrico com os fatores de correção V_max (linha cinza), V_min (linha amarela), V_mean (linha vermelha) e sem correção (linha verde), para o ensaio I5R475.



Fonte: Cunha et al. (2024).

Em resolução temporal, o sistema fotométrico apresenta tempo de resposta de 0,04 s contra 1,00 s do sistema ultrassônico — diferença de 25 vezes. Essa superioridade é decisiva para a captura fiel da região de choque, que apresenta variações abruptas de lâmina em escalas de tempo inferiores a 0,1 s. A análise de incerteza na região de choque (Tabela 3 do artigo), feita para instantes entre 0,65 s e

0,72 s, confirma que as maiores incertezas do sistema ultrassônico (até 127 mm no intervalo considerado) concentram-se nos instantes de maior gradiente, enquanto as do sistema fotométrico permanecem inferiores a 0,11 mm em toda a região investigada.

Nos seis cenários ensaiados, tanto a amplitude adimensional ($\Delta h/h0$) quanto o comprimento de onda adimensional ($\lambda w/L$) das *roll waves* crescem monotonicamente com o aumento da rotação da bomba — ou seja, com o aumento dos números de Froude e Reynolds. O comportamento alinha-se às previsões teóricas e aos resultados experimentais anteriores para escoamentos de fluidos não Newtonianos em canais inclinados (BALMFORTH; LIU, 2004; FIOROT et al., 2021; MACIEL et al., 2013), confirmando a capacidade do aparato de reproduzir as condições de instabilidade documentadas na literatura.

No projeto de pós-doutorado, o protocolo de seleção das concentrações de Gel de Carbopol 996 e de azul de metileno estabelecido neste artigo foi incorporado aos experimentos seguintes, incluindo as atividades de Iniciação Científica Júnior supervisionadas (Capítulos 3) e à campanha experimental principal de composição do banco de dados do Capítulo 5. A técnica fotométrica de absorbância consolidou-se como método de referência do grupo LH2 para a medição de instabilidades de superfície livre em fluidos não Newtonianos translúcidos.

4.2 ARTIGO II — AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA EVOLUÇÃO DE ROLL WAVES EM FLUIDOS DO TIPO LAMA ESCOANDO EM DECLIVES ACENTUADOS

Periódico: Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering | JCR 2,2 | DOI: 10.1007/s40430-024-05053-z
Autores: Guilherme H. Fiorot, Valdirene da R. Rocha, Sergio V. Möller, João B. Pereira, Evandro Fernandes da Cunha, Geraldo de Freitas Maciel

A *evolução espacial* das *roll waves* — como essas instabilidades crescem, se estabilizam e propagam ao longo de um canal inclinado — é uma das questões abertas mais relevantes da hidrodinâmica de escoamentos com superfície livre de fluidos não Newtonianos. As formulações analíticas disponíveis para o comprimento de estabelecimento das *roll waves* (Lrw), desenvolvidas para fluidos Newtonianos em regimes turbulentos (MONTUORI, 1963; ROCHO et al., 2023), carecem de validação

experimental para escoamentos laminares de fluidos viscoplásticos em declives acentuados. A influência das propriedades reológicas — em especial a tensão limite de escoamento (τ_0) e o índice de escoamento (n) — sobre a evolução espacial das ondas permanece insuficientemente caracterizada.

No projeto de pós-doutorado, o artigo é complementar ao Artigo I: a primeira publicação estabelece a metodologia de medição pontual de alta precisão para caracterização temporal das *roll waves*; o Artigo II explora a *dimensão espacial* do fenômeno com múltiplos transdutores ultrassônicos posicionados simultaneamente ao longo do canal. Os dois artigos operam, portanto, em regimes experimentais distintos: o Artigo I emprega Carbopol de menor concentração ($\tau_0 = 0{,}400$ Pa) em vazões da ordem de 10^{-4} m³/s, enquanto o Artigo II opera com Carbopol mais concentrado (τ_0 = 7,52–9,56 Pa) em vazões da ordem de 10^{-3} m³/s — diferença que explica os valores distintos de frequência de corte fc obtidos em cada estudo. A abordagem distribuída do Artigo II gera um conjunto de dados espaço-temporais que estrutura o tipo de banco apropriado para o treinamento de modelos de Machine Learning de classificação e previsão das instabilidades — conforme desenvolvido no Capítulo 5.

4.2.1 Materiais e Métodos

O aparato experimental do Artigo II é o mesmo do Artigo I e de trabalhos anteriores do grupo (MACIEL et al., 2013; FIOROT et al., 2021), conforme vista isométrica da Figura 6. O sistema reúne cinco módulos integrados: (a) canal inclinado de seção retangular; (b) reservatório de fluido; (c) bomba hidráulica de cavidade progressiva; (d) sistema de geração de perturbação; e (e) sistema de medição distribuído. O uso do mesmo aparato em ambas as publicações assegura consistência metrológica e rastreabilidade experimental entre os dois trabalhos e as atividades de Iniciação Científica Júnior do projeto.

Figura 6 - Vista isométrica do aparato experimental em configuração real: (a) canal inclinado de seção retangular; (b) reservatório; (c) bomba hidráulica de cavidade progressiva; (d) sistema de perturbação; (e) sistema de medição com transdutores ultrassônicos.

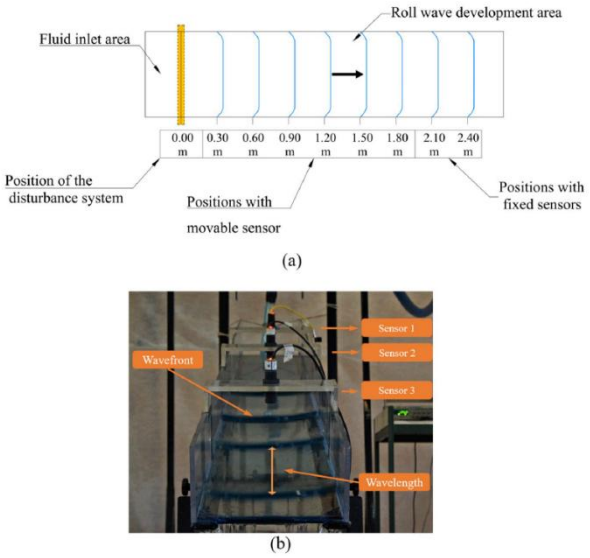


Fonte: Fiorot et al. (2024).

O canal inclinado (seção retangular 3,00 m × 0,30 m) operou com inclinações θ entre 13° e 20° e vazões Q entre 0,88 × 10^{-3} m^3/s e 1,07 × 10^{-3} m^3/s. O fluido de ensaio foi o Gel de Carbopol 996 com reologia Herschel-Bulkley ($\tau = \tau_0 + K_n \cdot \dot{\gamma}^n$), com tensão limite de escoamento τ_0 entre 7,52 Pa e 9,56 Pa, índice de escoamento n entre 0,39 e 0,42, índice de consistência K_n entre 3,73 Pa·s^n e 5,73 Pa·s^n e massa específica $\rho \approx 1.003$ kg/m^3. O fluido foi circulado por bomba de cavidade progressiva com controlador de rotação, com vazão determinada por procedimento gravimétrico (10 repetições por condição de ensaio).

A inovação metodológica do Artigo II é a instrumentação de medição distribuída, esquematizada na Figura 7. Três transdutores ultrassônicos RPS-401A (Migatron Corp.), calibrados por curvas tensão elétrica/distância obtidas em micrômetro, foram posicionados em pontos longitudinais distintos do canal: dois fixos (x = 2,10 m e x = 2,40 m a jusante da perturbação) e um móvel (deslocado entre x = 0,30 m e x = 1,50 m). A configuração registrou simultaneamente o perfil temporal da superfície livre h(t) em oito posições ao longo do canal.

Figura 7 - (a) Esquema de posicionamento do sistema de perturbação e dos transdutores ultrassônicos ao longo do canal (posições 0,30 m a 2,40 m a jusante da perturbação); (b) fotografia do canal experimental durante ensaio, com indicação dos sensores e da frente



Fonte: Fiorot et al. (2024).

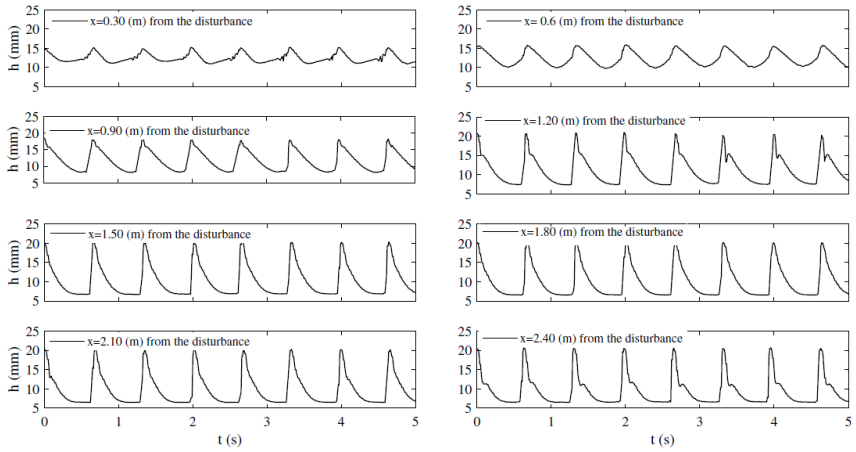
Foram realizados cinco ensaios com diferentes combinações de inclinação e vazão (Tabela 1 do artigo), precedidos pela verificação do regime de escoamento uniforme — ausência de variações detectáveis na lâmina livre por período mínimo de 20 s antes da ativação da perturbação. O sistema de perturbação foi acionado por controlador Arduino a frequência de 1,5 Hz, obtida de jato de ar pulsante perpendicular à superfície livre. A perturbação satisfaz, em todos os ensaios, dois critérios necessários para a geração de *roll waves*: (i) $F > Fmin \approx 0{,}23$; e (ii) $f < fc$, com fc na faixa de 1,7–1,9 Hz para os cenários testados.

A caracterização do regime de escoamento usou os adimensionais de Reynolds (R) e de Froude (F) para fluidos de Herschel-Bulkley, definidos pelas Equações 4 e 5 do artigo, que incorporam o coeficiente de distribuição de quantidade de movimento α — função do índice de escoamento n e do adimensional de plasticidade $C = \tau_0/(\rho g h_0 \cdot \text{sen}\,\theta)$. O coeficiente α quantifica a não uniformidade do perfil de velocidades do escoamento viscoplástico: para $n < 1$, a distribuição difere do perfil parabólico Newtoniano, afetando os critérios de estabilidade da superfície livre e a velocidade de propagação das *roll waves*. A análise espectral dos sinais temporais h(t) foi feita por Transformada Rápida de Fourier (FFT), com janela temporal de 20 s a 100 Hz de frequência de amostragem, truncada em f = 18 Hz.

4.2.2 Resultados e Discussão

A Figura 8 exibe a evolução temporal dos perfis de altura livre h(t) registrados nas oito posições longitudinais do canal para o 5.° ensaio (n = 0,39; C = 0,23; R = 17; F = 0,78). O conjunto de curvas revela com clareza a dinâmica espacial das *roll waves*: a perturbação imposta a montante é progressivamente amplificada ao longo do canal, com amplitude crescente e frentes de choque cada vez mais pronunciadas à medida que avançam. Os perfis correspondem à morfologia característica de *roll waves* em escoamentos laminares de fluidos não Newtonianos — ondas longas com frente íngreme e cauda suave —, validando as hipóteses de escoamento em águas rasas (*shallow water*) usadas nos modelos matemáticos, mesmo para fluidos viscoelastoplásticos.

Figura 8 - Perfis temporais de altura da superfície livre h(t) registrados nas posições x = 0,30; 0,60; 0,90; 1,20; 1,50; 1,80; 2,10 e 2,40 m a jusante da perturbação, para o 5.° ensaio (n = 0,39; C = 0,23; R = 17; F = 0,78). O eixo vertical indica a altura em m

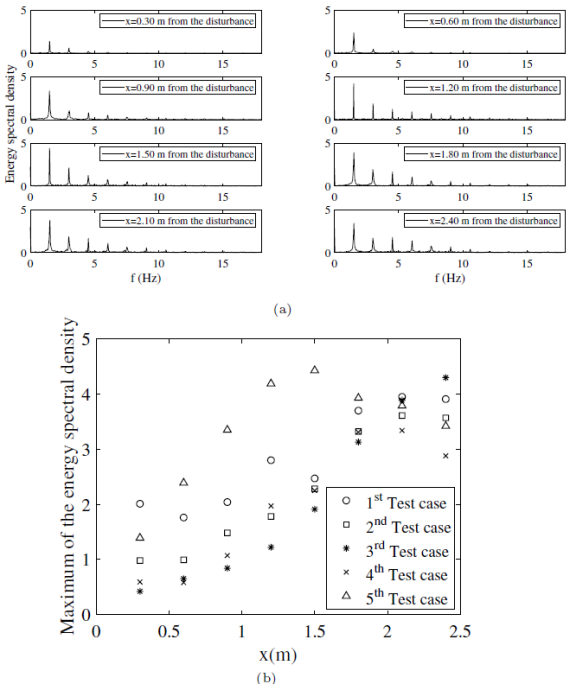


Fonte: Fiorot et al. (2024).

Um resultado central é a identificação do comprimento de estabilização das *roll waves*: a partir de x ≈ 1,20 m a jusante da perturbação, as amplitudes de onda não apresentaram crescimento estatisticamente significativo na série temporal — a estabilização ocorre após aproximadamente três comprimentos de onda percorridos, comportamento observado nos demais ensaios. Há, portanto, uma assíntota espacial da amplitude, relevante para o dimensionamento de sistemas de monitoramento e para a definição das janelas de aquisição: a partir de x ≈ 1,20 m, as *roll waves* atingem o estado desenvolvido e tornam-se estatisticamente estacionárias em amplitude, aptas à caracterização sistemática.

A análise por FFT dos sinais temporais (Figura 9) mostrou que a densidade espectral de energia concentra-se na frequência fundamental de 1,5 Hz em todas as oito posições do canal, com enriquecimento harmônico progressivo a jusante. Esse padrão espectral espacialmente estável confirma que o escoamento preserva a periodicidade imposta pela perturbação em toda a extensão monitorada, amplificando a energia sem alterar a frequência dominante. O escoamento comporta-se, portanto, como *amplificador seletivo de frequências*: a componente na frequência de perturbação cresce monotonicamente, enquanto as harmônicas emergem e se desenvolvem progressivamente a jusante.

Figura 9 - (a) Densidade espectral de energia dos sinais h(t) nas diferentes posições longitudinais, mostrando a frequência fundamental dominante (1,5 Hz) e o crescimento dos harmônicos a jusante; (b) evolução da energia espectral na frequência fundamental ao lo



Fonte: Fiorot et al. (2024).

Um achado crítico do estudo é a inadequação das formulações analíticas disponíveis na literatura para prever o comprimento de estabelecimento de *roll waves* (Lrw) no escoamento laminar de fluidos de Herschel-Bulkley. As expressões de Montuori (1963) para escoamentos turbulentos Newtonianos e a formulação de Di Cristo et al. (2013) para fluidos não Newtonianos — aplicadas aos parâmetros reológicos medidos experimentalmente — produziram estimativas de Lrw com discrepâncias expressivas em relação aos valores observados. Pequenas variações nos parâmetros de entrada (inclinação θ, vazão Q, propriedades reológicas τ_0 e n) afetaram fortemente as previsões — evidência da alta sensibilidade do fenômeno e

das limitações das formulações analíticas, que partem de simplificações de fluido e de regime não contempladas nos cenários laminares não Newtonianos estudados.

Essa limitação das abordagens analíticas, documentada experimental e quantitativamente no Artigo II, é uma das justificativas mais diretas para a adoção de técnicas de Machine Learning como estratégia complementar de modelagem no projeto de pós-doutorado. Alta sensibilidade a variações de parâmetros reológicos, complexidade da dinâmica de amplificação e estabilização, e disponibilidade de um banco de dados experimental espaço-temporal estruturado são as condições que favorecem o emprego de modelos de aprendizado de máquina para classificação, caracterização e previsão do comportamento das *roll waves* — desenvolvido no Capítulo 5.

Em termos de contribuição original ao conhecimento, o Artigo II fornece o primeiro conjunto de dados experimentais espaço-temporais de *roll waves* em fluido não Newtoniano tipo Herschel-Bulkley com monitoramento simultâneo em múltiplas seções, em escoamento laminar sobre declives acentuados (13°–20°). Cinco ensaios documentados em oito posições longitudinais constituem contribuição inédita à literatura do campo, preenchendo uma lacuna experimental identificada desde os trabalhos de Coussot (1994) e Tamburrino & Ihle (2013). O conjunto de dados é parte essencial do banco utilizado no Capítulo 5 para o treinamento e a avaliação dos modelos de Machine Learning de identificação e caracterização das instabilidades de superfície livre em fluidos não Newtonianos.

4.3 SÍNTESE DAS CONTRIBUIÇÕES

As duas publicações apresentam contribuições complementares ao estado da arte no estudo experimental de *roll waves* em fluidos não Newtonianos. O Artigo I avança na dimensão *metrológica*, ao propor e validar uma técnica de medição de maior resolução espacial e temporal para a região de choque das ondas — aspecto crítico à qualidade dos dados experimentais. O Artigo II avança na dimensão *fenomenológica*, ao mapear a evolução espaciotemporal das *roll waves* ao longo do canal e documentar experimentalmente as limitações das formulações analíticas disponíveis para fluidos viscoelastoplásticos em regime laminar.

Juntos, os trabalhos estabelecem o arcabouço experimental — protocolo de medição, caracterização reológica, critérios de geração de *roll waves*, banco de dados

espaço-temporal — que sustenta a proposta de modelagem por Machine Learning do Capítulo 5. A cadeia metodológica Artigo I → Artigo II → Capítulo 5 segue a lógica progressiva do projeto: primeiro a instrumentação, depois a caracterização experimental do fenômeno e, por fim, as técnicas de modelagem para identificar padrões e automatizar a classificação das instabilidades.

5 ESTUDO PRINCIPAL: MACHINE LEARNING APLICADO AO BANCO DE DADOS EXPERIMENTAL

5.1 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1.1 Aparato Experimental e Fluido-Teste

O banco de dados foi constituído a partir de ensaios no aparato experimental do Laboratório de Hidrologia e Hidrometria (LH2) — UNESP-FEIS, descrito em detalhe no Capítulo 4. O aparato reúne canal inclinado de seção retangular (comprimento útil 3,00 m, largura 0,30 m, profundidade 0,25 m, fundo de vidro e paredes de plexiglass), sistema de bombeamento por cavidade progressiva, reservatório de fluido, sistema de perturbação controlada por pulso de ar (*air knife* pneumático) e sistemas de aquisição ultrassônico e fotométrico. O fluido-teste foi o Gel de Carbopol 996 em solução aquosa — análogo reológico de lamas naturais, descrito pelo modelo viscoplástico de Herschel-Bulkley com tensão limite de escoamento $\tau_0 = 0{,}400$ Pa.

Os dados provêm de duas campanhas experimentais independentes — Campanha 1 (C1) e Campanha 2 (C2) —, em condições distintas de inclinação, rotação de bomba e protocolo de instrumentação. A Campanha 1, originada na tese de Cunha (2018), foi conduzida com inclinação $\theta = 14°$ e três ensaios com rotações de bomba de 400, 420 e 440 RPM (C1G14R400, C1G14R420 e C1G14R440). A aquisição usou o sistema ultrassônico de pulso-eco (transdutor RPS-401A, Migatron Corp.) em doze pontos de medição (P1–P12) distribuídos longitudinalmente ao canal com espaçamento $\Delta x = 0{,}10$ m, a partir de 2,10 m do ponto de perturbação. Em cada posição, registraram-se séries temporais da profundidade $h(t)$ a 100 Hz ($\Delta t = 0{,}01$ s), caracterizadas por média e desvio padrão sobre um conjunto de *roll waves* estabilizadas, conforme as Fichas Técnicas do Apêndice C de Cunha (2018).

A Campanha 2 foi realizada com inclinação $\theta = 5°$ e seis ensaios com rotações entre 225 e 475 RPM em incrementos de 50 RPM (C2G5R225 a C2G5R475). Em relação à C1, o protocolo de aquisição incorporou dupla instrumentação: além do sistema ultrassônico, o sistema fotométrico de absorbância, fundamentado na Lei de Beer-Lambert e validado no Artigo I (Capítulo 4), forneceu medição pontual e de alta resolução temporal da lâmina baixa h_1 e da amplitude Δh das *roll waves* em P1. A cobertura espacial foi ampliada progressivamente: cinco ensaios tiveram medições

em P1, P2 e P3, e C2G5R375 estendeu a aquisição ultrassônica até P9, documentando a evolução espacial das instabilidades em maior trecho do canal — banco de dados do Artigo II. A maior cobertura espacial e instrumental entre as campanhas reflete a maturação do protocolo ao longo do projeto e relaciona-se às implementações de instrumentação do PIBIC Jr (Capítulos 3).

A adoção dessas duas campanhas como fonte de dados para o estudo de Machine Learning apoia-se em três fatores. Primeiro, a rastreabilidade completa dos parâmetros hidráulicos e reológicos: todos os ensaios estão documentados nas Fichas Técnicas do Apêndice C de Cunha (2018), com caracterização reométrica em reômetro Brookfield R/S por ensaio da C2 e aferição coletiva para a C1. Segundo, a validação do protocolo por publicações indexadas: os dados sustentam os Artigos I e II, em *Measurement* (JCR 5,6) e *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* (JCR 2,2). Terceiro, a diversidade de condições operacionais — inclinação, número de Froude ($Fr = 0{,}577–0{,}924$), número de Reynolds ($Re = 10{,}9–29{,}9$) e índice de escoamento ($n = 0{,}626–0{,}710$) — fornece variabilidade suficiente ao banco para o treinamento e a avaliação dos modelos de ML, apesar do reduzido número de ensaios, conforme discutido na seção 5.1.2.

5.1.2 Constituição e Estrutura do Banco de Dados

O banco de dados experimental contém nove ensaios reais nas duas campanhas: três da C1 (C1G14R400, C1G14R420 e C1G14R440) e seis da C2 (C2G5R225, C2G5R275, C2G5R325, C2G5R375, C2G5R425 e C2G5R475). De cada ensaio extraíram-se variáveis escalares em quatro grupos de *features*:

O grupo [A] reúne as variáveis de configuração operacional: inclinação do canal θ (graus), vazão volumétrica Q (m^3/s) e rotação da bomba (RPM). O grupo [B] reúne os parâmetros hidráulicos medidos no canal sem perturbação: velocidade de superfície u_s (m/s) e lâmina do escoamento uniforme h_0 (mm). O grupo [C] contém os parâmetros hidráulicos calculados a partir das grandezas medidas e das propriedades reológicas: velocidade média da seção transversal $\bar{u}_0$ (m/s), número de Froude generalizado Fr e número de Reynolds generalizado Re, definidos para fluidos de Herschel-Bulkley conforme Cunha (2018). O grupo [D] reúne os parâmetros reológicos do fluido-teste: índice de escoamento n, índice de consistência K_n ($Pa \cdot s^n$) e massa específica ρ (kg/m^3). A tensão limite de escoamento $\tau_0 = 0{,}400$ Pa é constante em todos

os ensaios e foi excluída do conjunto de *features* por ser invariante e não discriminar entre ensaios.

Em complemento, extraíram-se *features* de onda referenciadas à posição P1 (2,10 m do ponto de perturbação): lâmina baixa h_1 (mm), nível mínimo do escoamento entre ondas consecutivas; e amplitude Δh (mm), variação total de profundidade entre a lâmina baixa e a crista. Na C1, esses parâmetros foram obtidos pelo sistema ultrassônico; na C2, adotou-se o sistema fotométrico como referência, em razão de sua maior resolução temporal e pontual demonstrada no Artigo I. A Tabela 2 compila os valores de h_1 e Δh em P1 para todos os ensaios.

A Tabela 2 evidencia dois aspectos estruturantes do banco. O primeiro é a separação natural entre as campanhas: os ensaios da C1 operam com $\theta = 14°$ e $n = 0{,}626$, e os da C2 com $\theta = 5°$ e $n \approx 0{,}710$ — diferenças que produzem regimes hidráulicos distintos, com Re entre 22,6 e 29,9 na C1 e entre 10,9 e 25,8 na C2, e Fr na faixa 0,646–0,804 na C1 e 0,577–0,924 na C2. O segundo é a diferença marcante de amplitude entre as campanhas: os ensaios de C1, em maior inclinação, apresentam Δh em P1 entre 7,5 mm e 7,9 mm, e os de C2 entre 2,2 mm e 4,3 mm — reflexo direto da influência de θ e da reologia sobre a intensidade das *roll waves*.

Tabela 2 - Features escalares dos 9 ensaios reais: identificação do ensaio, campanha, parâmetros operacionais (θ, Q, RPM), parâmetros hidráulicos (u_s, h_0, $\bar{u}_0$, Fr, Re), parâmetros reológicos (n, K_n, ρ) e features de onda em P1 (h_1, Δh).

Ensaio	[A] Configuração	[B] Hidráulico medido	[C] Hidráulico calculado	[D] Reológico						
	θ(°)	Q(m³/s)	u_s(m/s)	h_0(mm)	$\bar{u}_0$(m/s)	Fr	Re	n	K_n	ρ
C1G14R400	14	3,800×10⁻⁴	0,222	7,255	0,171	0,646	22,632	0,626	0,176	1000
C1G14R420	14	4,400×10⁻⁴	0,225	7,394	0,197	0,739	27,512	0,626	0,176	1000
C1G14R440	14	4,600×10⁻⁴	0,246	7,449	0,211	0,804	29,851	0,626	0,176	1000
C2G5R225	5	2,200×10⁻⁴	0,176	5,490	0,134	0,577	10,900	0,710	0,171	1035
C2G5R275	5	2,700×10⁻⁴	0,206	5,660	0,159	0,676	13,878	0,710	0,172	1035
C2G5R325	5	3,200×10⁻⁴	0,232	5,757	0,186	0,783	17,100	0,710	0,172	1035
C2G5R375	5	3,600×10⁻⁴	0,263	6,061	0,198	0,814	18,900	0,710	0,176	1035
C2G5R425	5	4,100×10⁻⁴	0,287	6,253	0,219	0,885	23,602	0,707	0,165	1035
C2G5R475	5	4,600×10⁻⁴	0,319	6,554	0,234	0,924	25,783	0,709	0,169	1035

Fonte: elaborado pelo autor (2026) a partir das Fichas Técnicas de Cunha (2018) e dos dados experimentais do Artigo II.

O banco em sua forma original, composto por $n = 9$ ensaios, apresenta limitação inerente à aplicação de modelos de Machine Learning: a escassez amostral impede

treinamento e validação estatisticamente robustos dos classificadores e não representa adequadamente a continuidade do espaço paramétrico físico entre as condições das duas campanhas. A limitação decorre de impedimentos operacionais documentados ao longo do projeto — notadamente a indisponibilidade do reômetro por período prolongado e a necessidade de substituição do canal de ensaios —, que inviabilizaram novas campanhas experimentais no prazo do pós-doutorado. Adotou-se, portanto, a estratégia de aumento de dados, conforme detalhado nas seções 7.1.3 e 7.1.4: o banco original de 9 ensaios reais é expandido por três camadas de virtualização fisicamente fundamentadas, resultando em um banco aumentado de 391 instâncias — fator de expansão de 43,4× —, sobre o qual os modelos são treinados; a validação fica restrita aos ensaios reais originais.

Nota: o banco de dados aumentado não está disponibilizado publicamente neste momento, sendo mantido como propriedade do grupo LH2 até publicação futura.

5.1.3 Survey de Técnicas de ML e Aumento Aplicáveis

A aplicação de modelos de Machine Learning a bancos de dados experimentais de dimensão reduzida exige análise crítica da adequação das técnicas disponíveis às características dos dados. Esta seção apresenta o levantamento (*survey*) das abordagens consideradas em duas partes: (A) técnicas de aumento e virtualização de dados, adotadas para expandir o banco original de n = 9 ensaios reais; e (B) modelos de ML selecionados para classificação, agrupamento e análise de pertinência.

A — Técnicas de Aumento de Dados Experimentais Hidráulicos

O aumento de dados experimentais consiste na geração de instâncias sintéticas que ampliam o espaço amostral sem violar as restrições físicas do fenômeno. Em escoamento hidráulico com superfície livre, a estratégia justifica-se pela existência de incertezas instrumentais quantificadas e pela continuidade física das variáveis de resposta em função dos parâmetros de controle. Três técnicas foram selecionadas e organizadas em camadas sequenciais de virtualização:

A Camada 1 — Bootstrapping por Ruído Gaussiano — fundamenta-se na teoria de erros de medição. Cada ensaio real é perturbado por ruído aditivo gaussiano com desvio padrão σ = 2% do valor de cada *feature* — abaixo das incertezas instrumentais

documentadas nas Fichas Técnicas: ±3% para os parâmetros reométricos e ±2% para os parâmetros hidráulicos medidos (CUNHA, 2018). Cada ensaio gera 30 realizações independentes, totalizando 270 amostras sintéticas (30 × 9). Fisicamente, a dispersão introduzida permanece dentro do envelope de incerteza experimental real, de modo que cada instância sintética representa uma realização plausível do mesmo ensaio sob condições ligeiramente distintas de medição. A técnica é largamente empregada em aprendizado com dados escassos quando a variabilidade do processo é bem caracterizada metrologicamente (GÉRON, 2019).

A Camada 2 — Interpolação Linear Intra-Campanha — fundamenta-se na continuidade física das variáveis hidráulicas e reológicas em função da rotação da bomba dentro de cada campanha. Em regime permanente com bomba de cavidade progressiva, a resposta do sistema — vazão, lâmina, velocidade — varia aproximadamente de forma linear com a rotação, o que valida a interpolação entre pares de ensaios consecutivos da mesma campanha como gerador de condições intermediárias fisicamente plausíveis. Por par de ensaios consecutivos são gerados 8 pontos interpolados: 2 pares na C1 (R400–R420 e R420–R440) produzem 16 amostras; 5 pares na C2 (R225–R275, R275–R325, R325–R375, R375–R425 e R425–R475) produzem 40 amostras — total de 56 instâncias sintéticas por esta camada.

A Camada 3 — Processo Gaussiano com Amostragem por Hipercubo Latino (GPR + LHS) — é a contribuição de maior alcance paramétrico do pipeline. Um modelo de Processo Gaussiano (GPR) é treinado nos 9 ensaios reais, com kernel de Matérn ($\nu = 2{,}5$), que impõe suavidade diferenciável de primeira ordem às funções modeladas — adequada para respostas hidráulicas contínuas como Fr, Re, h_0, $\bar{u}_0$ e u_s em função de (θ, Q, n, K_n, ρ, RPM). O GPR fornece predições pontuais e estimativas de incerteza para cada ponto do espaço paramétrico, viabilizando um filtro de validade física: são retidas apenas as amostras candidatas com $Fr \in [0{,}50;\ 1{,}05]$ e $\sigma Fr < 0{,}15$, garantindo regime subcrítico próximo ao limiar de instabilidade de *roll waves*. Os candidatos são gerados por Amostragem por Hipercubo Latino (LHS) com 100 pontos no espaço paramétrico definido pelas faixas observadas nas duas campanhas, assegurando cobertura estratificada e uniforme das dimensões — propriedade que a amostragem aleatória simples não garante para n pequeno (MCKAY; BECKMAN; CONOVER, 1979). Das 100 amostras candidatas, 56 passam pelo filtro de validade física e são incorporadas ao banco aumentado.

Tabela 3 - Comparativo das três técnicas de aumento de dados: técnica, fundamento físico, parâmetros de implementação, vantagens, limitações e número de amostras geradas. Linha da Camada 3: "Kernel Matérn v=2,5; 100 candidatos LHS; filtro Fr∈[0,50;1,05]; reter 5

Camada / Técnica	Fundamento Físico	Parâmetros	Vantagens	Limitações	Amostras geradas
Camada 1 Bootstrapping (Ruído Gaussiano)	Teoria de erros de medição; dispersão intra-ensaio dentro da incerteza instrumental	σ = 2% por feature; 30 realizações por ensaio real	Simples; preserva média; fisicamente fundamentado	Não expande o espaço paramétrico; instâncias próximas ao real	270 (30 × 9)
Camada 2 Interpolação Linear Intra-Campanha	Continuidade física da resposta hidráulica com Q e RPM dentro de cada campanha	8 pontos/par; 2 pares C1 e 5 pares C2	Preserva relações físicas dentro de cada campanha; determinístico	Limitado ao interior das campanhas; não cobre região entre C1 e C2	56 (C1: 16; C2: 40)
Camada 3 GPR + LHS (Processo Gaussiano + Hipercubo Latino)	GPR como modelo substituto contínuo; LHS garante cobertura estratificada do espaço paramétrico	Kernel Matérn v=2,5; 200 candidatos LHS; filtro Fr∈[0,50;1,05]; reter 56 de menor σ_Fr	Expande fronteiras inter-campanhas; cobre θ∈[5°;14°] continuamente	Incerteza elevada longe dos dados de treino; depende da qualidade do GPR	56 (de 200 candidatos)

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

A Tabela 3 sintetiza as três técnicas de aumento adotadas, comparando fundamento físico, parâmetros de implementação, vantagens, limitações e número de amostras geradas por cada camada.

B — Survey de Modelos de Machine Learning

A seleção dos modelos de ML considerou três critérios: (i) adequação a bancos de dimensão reduzida, mesmo após aumento; (ii) interpretabilidade dos resultados no contexto físico do problema; e (iii) diversidade de paradigmas de aprendizado, para obter perspectivas complementares sobre a estrutura do banco. Foram selecionados três classificadores supervisionados — k-NN, SVM e Random Forest —, um algoritmo de agrupamento não supervisionado — Clustering Hierárquico — e uma métrica de similaridade por distância euclidiana normalizada para a análise de pertinência entre ensaios.

O classificador k-Nearest Neighbors (k-NN) opera por votação majoritária entre os k vizinhos mais próximos no espaço de *features* normalizado, sem treinamento explícito — o modelo é o próprio banco. Sua baixa complexidade paramétrica e a ausência de pressupostos distribucionais tornam-no adequado a bancos pequenos, em que modelos mais complexos tendem ao sobreajuste. Para k = 3, o classificador privilegia a estrutura local do espaço de *features*, com robustez a amostras sintéticas periféricas (GÉRON, 2019).

O classificador Support Vector Machine (SVM) com kernel de Base Radial (RBF) maximiza a margem geométrica entre as classes no espaço de *features* transformado pela função kernel, capturando fronteiras de decisão não lineares com número reduzido de vetores de suporte. O parâmetro de regularização C, determinado por validação cruzada, controla o compromisso entre a maximização da margem e a tolerância a erros de classificação. O SVM é reconhecidamente eficaz em cenários de alta dimensionalidade relativa — número de *features* comparável ao tamanho amostral —, condição do banco original (VAPNIK, 1995; GÉRON, 2019).

O classificador Random Forest constrói um conjunto (*ensemble*) de árvores de decisão treinadas sobre subconjuntos aleatórios do banco e das *features*, combinando suas predições por votação. A diversidade induzida pela aleatorização reduz a variância do modelo sem aumentar o viés, conferindo robustez a bancos com ruído e dimensionalidade moderada. Para este estudo, é relevante a estimativa da importância relativa das *features* — calculada como a redução média da impureza de Gini por variável ao longo de todas as árvores —, que permite identificar os parâmetros físicos com maior contribuição para a discriminação entre as condições experimentais (BREIMAN, 2001; GÉRON, 2019).

O Clustering Hierárquico com ligação de Ward constrói uma hierarquia de agrupamentos pela minimização sequencial da variância intra-cluster a cada fusão. A representação como dendrograma fornece interpretação visual direta da estrutura de similaridade entre os ensaios, independentemente de rótulos de classe. Aplicado sobre os 9 ensaios reais sem o rótulo de campanha, o algoritmo verifica se a estrutura experimental é espontaneamente recuperada a partir das *features* físicas — validação não supervisionada da coerência do banco (WARD, 1963; GÉRON, 2019).

A análise de pertinência entre ensaios usa a distância euclidiana no espaço normalizado de *features* (normalização MinMax sobre o banco completo). A distância euclidiana $d(i, j)$ entre dois ensaios i e j é definida como:

$$d(i, j) = \sqrt{[\, \Sigma_k \, (f_k(i) - f_k(j))^2 \,]}$$

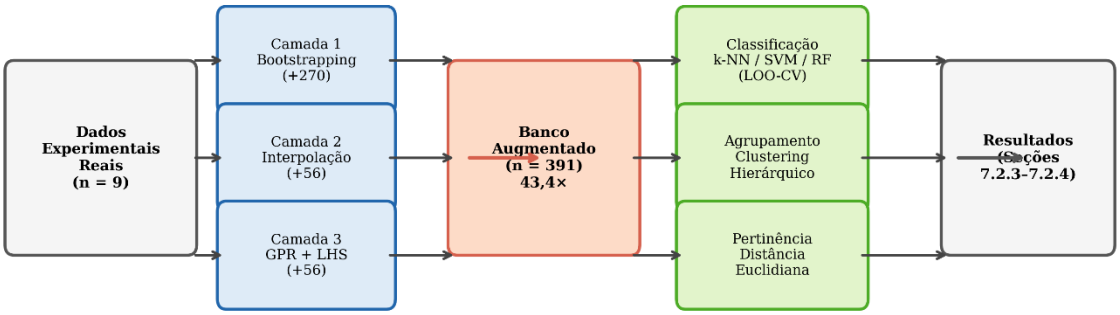
em que $f_k(i)$ é o valor normalizado da k-ésima *feature* do ensaio i. Para um cenário hipotético definido por um vetor de *features* (θ, Q, Fr, Re, n e demais parâmetros), o ranking de pertinência ordena os ensaios reais por distância crescente ao ponto hipotético, identificando o ensaio laboratorial mais similar ao cenário de

campo de interesse. A abordagem não requer treinamento, é interpretável em termos físicos e produz resultados rastreáveis para cada variável de entrada.

5.1.4 Pipeline de Aumento e Modelos de ML Implementados

As técnicas da seção 7.1.3 foram integradas em pipeline computacional sequencial de três camadas, implementado em Python 3.x com as bibliotecas scikit-learn (PEDREGOSA et al., 2011), NumPy, SciPy e GPy. A Figura 10 ilustra o fluxograma do pipeline, dos dados experimentais reais aos resultados dos modelos de ML.

Figura 10 - Fluxograma do pipeline de aumento e aplicação dos modelos de Machine Learning: dados experimentais reais (n = 9) → Camada 1 (Bootstrapping) → Camada 2 (Interpolação) → Camada 3 (GPR + LHS) → Banco Aumentado (391 instâncias) → Modelos de ML (Classifica



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Na primeira etapa do pipeline, os 9 ensaios reais passam pela Camada 1 (Bootstrapping por Ruído Gaussiano), gerando 270 amostras sintéticas. A Camada 2 (Interpolação Linear Intra-Campanha) acrescenta 56 amostras a partir dos pares de ensaios consecutivos de cada campanha. A Camada 3 (GPR + LHS) contribui com 56 amostras validadas pelo filtro físico. O banco aumentado resultante reúne 391 instâncias no total — 9 reais e 382 sintéticas —, fator de expansão de 43,4× em relação ao banco original. A Tabela 4 apresenta a contagem por camada e campanha de origem.

Antes de qualquer modelo de ML, todas as *features* são normalizadas pelo escalonador MinMax (scikit-learn *MinMaxScaler*), que projeta cada variável para o intervalo [0, 1] com base nos valores mínimo e máximo do banco aumentado

completo. A normalização é indispensável a algoritmos sensíveis à escala das variáveis — k-NN, SVM e distância euclidiana — e garante que nenhuma *feature* domine o espaço de distâncias por razões dimensionais. Os parâmetros de normalização (mín. e máx. por variável) são ajustados exclusivamente sobre o banco aumentado de treino e aplicados sem reajuste sobre os ensaios de teste, evitando contaminação dos dados de validação.

A estratégia de validação é a Validação Cruzada Deixe-Um-De-Fora (Leave-One-Out Cross-Validation — LOO-CV), aplicada sobre os 9 ensaios reais originais. Em cada iteração, um ensaio real é reservado para teste e os demais 8 ensaios reais, com todas as amostras sintéticas do banco aumentado, compõem o conjunto de treino. O protocolo garante que o desempenho reportado é sempre avaliado sobre dados experimentais reais — nunca sobre instâncias sintéticas —, preservando a validade externa dos resultados. A escolha da LOO-CV é motivada pelo tamanho reduzido do banco real (n = 9): maximiza o uso dos dados de treino em cada iteração e fornece estimativa de desempenho com variância mínima para esse regime amostral (GÉRON, 2019).

Para as tarefas de agrupamento não supervisionado (Clustering Hierárquico) e de análise de pertinência (distância euclidiana), os modelos operam diretamente sobre os 9 ensaios reais normalizados, sem particionamento treino-teste — essas abordagens não requerem ajuste de parâmetros por otimização e seu resultado é uma descrição estrutural do banco, não uma generalização preditiva.

5.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.2.1 Banco de Dados: Características Originais e Expandidas

As características do banco experimental original (9 ensaios reais) estão compiladas na Tabela 2, na seção 7.1.2. A tabela revela estrutura paramétrica bem definida apesar do volume reduzido: duas condições de inclinação ($\theta = 5°$ e $\theta = 14°$), duas faixas distintas de índice de escoamento ($n = 0{,}626$ e $n \approx 0{,}710$) e cobertura de números de Froude na faixa $Fr \in [0{,}577;\ 0{,}924]$, abrangendo regimes subcríticos próximos ao limiar de geração de *roll waves*. As estatísticas descritivas do banco original — média, desvio padrão, mínimo e máximo por *feature* — são apresentadas

na Tabela 4, com os valores correspondentes do banco aumentado para comparação direta entre as distribuições antes e após a expansão.

Tabela 4 - Estatísticas descritivas do banco original (n = 9) e do banco aumentado (n = 391): média, desvio padrão, mínimo e máximo por feature, para os grupos de parâmetros [A]–[E].

Feature	Orig. Média	Orig. DP	Orig. Mín.	Orig. Máx.	Aum. Média	Aum. DP	Aum. Mín.	Aum. Máx.
θ(°)	8.000	4.243	5.000	14.000	7.975	4.010	4.762	14.600
Q(m³/s)	3.69×10⁻4	8.00×10⁻5	2.20×10⁻4	4.60×10⁻4	3.66×10⁻4	7.70×10⁻5	2.10×10⁻4	4.83×10⁻4
u_s(m/s)	0.242	0.041	0.176	0.319	0.242	0.037	0.169	0.329
h_0(mm)	6.430	0.727	5.490	7.449	6.409	0.690	5.308	7.754
$\tilde{u}_0$(m/s)	0.190	0.029	0.134	0.234	0.190	0.027	0.128	0.243
Fr	0.761	0.106	0.577	0.924	0.762	0.097	0.559	0.972
Re	21.13	6.01	10.90	29.85	21.05	5.58	10.42	31.75
n	0.682	0.039	0.626	0.710	0.681	0.039	0.601	0.750
K_n	0.173	0.004	0.165	0.176	0.172	0.004	0.159	0.186
ρ(kg/m³)	1023	16	1000	1035	1023	24	947	1093

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

O aumento em três camadas resultou em banco expandido de 391 instâncias, fator de expansão 43,4× em relação ao original. A Tabela 5 detalha a contribuição de cada camada por campanha de origem e evidencia a assimetria entre C1 (3 ensaios reais) e C2 (6 ensaios reais): a Camada 1, por aplicar número fixo de realizações por ensaio, gera proporcionalmente o dobro de amostras sintéticas para C2; a Camada 2 acompanha a diferença de pares disponíveis por campanha (2 em C1, 5 em C2); a Camada 3 (GPR + LHS) distribui as amostras validadas em função da densidade do espaço paramétrico, favorecendo regiões com maior variabilidade — neste banco, predominantemente C2.

Tabela 5 - Composição do banco aumentado por camada de virtualização e campanha de origem: instâncias reais, sintéticas por camada e total por classe.

Camada / Técnica	C1 (θ=14°)	C2 (θ=5°)	Total	% do banco
Ensaios Reais	3	6	9	2.3%
Camada 1 — Bootstrapping	90	180	270	69.1%
Camada 2 — Interpolação	16	40	56	14.3%
Camada 3 — GPR + LHS	17	39	56	14.3%
TOTAL	126	265	391	100%

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

A composição do banco aumentado por classe é: C1 — 3 ensaios reais + 90 amostras da Camada 1 + 16 amostras da Camada 2 = 109 instâncias; C2 — 6 ensaios reais + 180 amostras da Camada 1 + 40 amostras da Camada 2 + 56 amostras da Camada 3 = 282 instâncias. O desbalanceamento resultante (C1: 27,9%; C2: 72,1%) reflete a assimetria do banco original e é inerente à estrutura das campanhas. O desbalanceamento é tratável pela LOO-CV sobre os ensaios reais, que opera sobre classes perfeitamente balanceadas no conjunto de teste (1 ensaio real por iteração), e pelo parâmetro *class_weight='balanced'* das implementações scikit-learn, que pondera os erros de classificação inversamente ao tamanho de cada classe no conjunto de treino.

A comparação das estatísticas descritivas entre o banco original e o aumentado (Tabela 4) evidencia que o aumento preservou os valores médios e as faixas de variação das *features* originais, com ampliação controlada dos desvios padrão — sobretudo nas variáveis mais sensíveis ao espaço paramétrico coberto pela Camada 3 (GPR + LHS): θ, Q, Fr e Re. O comportamento é esperado: os dados sintéticos ampliam a cobertura do espaço paramétrico sem extrapolar as fronteiras físicas delimitadas pelo filtro de validade. A análise visual da distribuição das *features* antes e após o aumento é apresentada na Figura 11 (seção 7.2.2).

5.2.2 Avaliação das Técnicas de Aumento

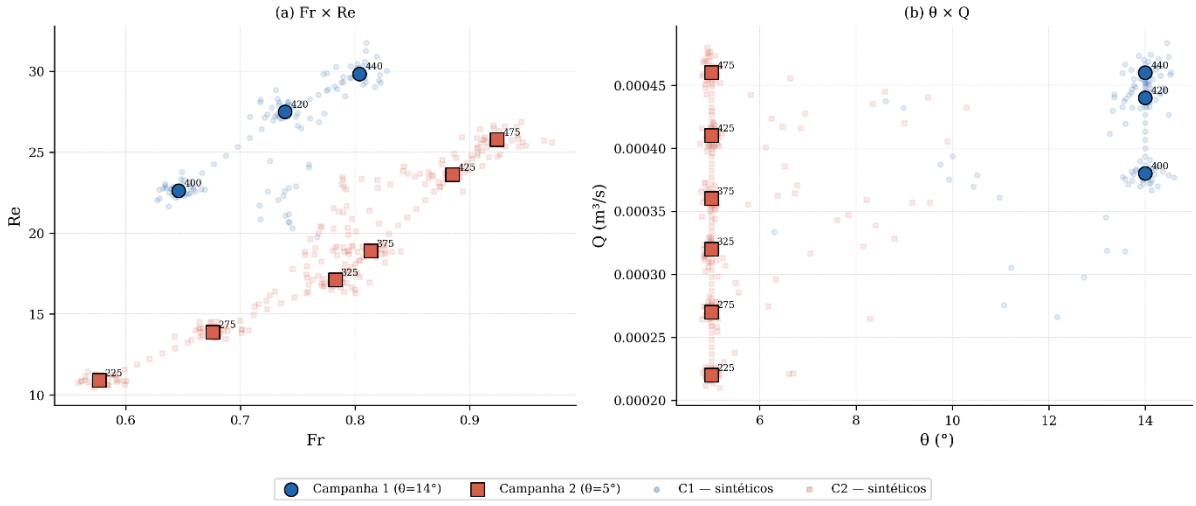
A validade do banco aumentado como substituto funcional de um banco experimental de maior volume depende da capacidade das amostras sintéticas de preservar as relações físicas entre as *features* do banco original sem extrapolar as fronteiras do domínio fisicamente plausível. A avaliação baseia-se em dois critérios: (i) respeito às restrições físicas do escoamento — número de Froude, regime de escoamento e coerência reológica; e (ii) cobertura e distribuição das amostras sintéticas no espaço de *features*, visualizada na Figura 11.

No critério de validade física, todas as 382 amostras sintéticas do banco aumentado satisfazem as restrições do pipeline: $Fr \in [0{,}50;\ 1{,}05]$, compatível com regime subcrítico próximo ao limiar de instabilidade de *roll waves*; regime laminar preservado ($Re < 50$ em todas as instâncias sintéticas, coerente com os ensaios reais: $Re \in [10{,}9;\ 29{,}9]$); e parâmetros reológicos n e K_n nas faixas experimentais de cada campanha. As Camadas 1 e 2, por construção, não extrapolam os limites dos ensaios

reais — a Camada 1 introduz perturbações inferiores à incerteza instrumental, e a Camada 2 interpola estritamente entre pares de ensaios existentes. A Camada 3 (GPR + LHS) é a única apta a gerar candidatos fora do domínio observado, e o filtro físico ($Fr \in [0{,}50;\ 1{,}05]$ e $\sigma Fr < 0{,}15$) é o mecanismo de controle que garante a plausibilidade física das 56 amostras retidas, rejeitando os 44 candidatos restantes.

A Figura 11 apresenta os diagramas de dispersão das *features* antes e após o aumento nos planos $Fr \times Re$ e $\theta \times Q$ — dois pares de variáveis informativos para o regime hidráulico e as condições operacionais. As instâncias estão coloridas por campanha de origem (C1: azul; C2: laranja), permitindo verificar visualmente se o aumento preserva a separação entre as condições experimentais das duas campanhas.

Figura 11 - Diagramas de dispersão das features antes (marcadores sólidos, n = 9) e após aumento (marcadores semitransparentes, n = 391) nos planos (a) Fr × Re e (b) θ × Q. Cores por campanha: C1 (azul, θ = 14°) e C2 (laranja, θ = 5°). As regiões delimitadas pela



Fonte: elaborado pelo autor (2026).

A análise dos diagramas da Figura 11 revela três aspectos. Primeiro, o aumento amplia a densidade amostral nos entornos dos ensaios reais de cada campanha sem preencher o hiato paramétrico entre C1 e C2 nas Camadas 1 e 2 — comportamento esperado, dado que essas camadas operam intra-campanha. Segundo, a Camada 3 (GPR + LHS) gera instâncias na região intermediária do espaço paramétrico — θ entre 5° e 14°, Fr e Re em faixas não cobertas pelos ensaios originais —, ampliando a representatividade do banco para condições físicas não realizadas experimentalmente. Esse é o principal valor agregado da Camada 3: enquanto as Camadas 1 e 2 densificam o espaço existente, a Camada 3 expande suas fronteiras de forma fisicamente controlada. Terceiro, a separação entre as nuvens de C1 e C2

permanece visível após o aumento, antecipando a separabilidade observada nos classificadores supervisionados (seção 7.2.3).

Uma limitação da Camada 3 merece registro: o GPR é treinado sobre apenas 9 pontos, o que implica elevada incerteza preditiva nas regiões distantes dos ensaios reais — refletida no critério de corte $\sigma\mathrm{Fr} < 0{,}15$, que exclui candidatos gerados em regiões de baixa confiança do modelo substituto. A limitação decorre diretamente do tamanho do banco original e reforça a perspectiva de ampliar o conjunto de ensaios em trabalhos futuros — o que reduziria a incerteza do GPR e aumentaria o número de amostras retidas pela Camada 3, melhorando a qualidade e a densidade do banco aumentado nas regiões de maior interesse físico.

5.2.3 Classificação e Caracterização dos Ensaios por ML

Os três classificadores supervisionados — k-NN (k = 3), SVM (kernel RBF) e Random Forest — foram treinados sobre o banco aumentado e avaliados pela LOO-CV sobre os 9 ensaios reais originais, conforme o protocolo da seção 7.1.4. A Tabela 6 apresenta as métricas de desempenho de cada modelo.

Tabela 6 - Desempenho dos classificadores supervisionados na tarefa de identificação de campanha (C1 vs. C2): acurácia LOO-CV, acertos por ensaio e observações metodológicas.

Modelo	Tipo de Aprendizado	Acurácia LOO-CV	Acertos (9 ensaios)	Observação
k-NN (k=3)	Supervisionado	100.0%	9/9	Sem treinamento explícito; baseado em distância
SVM (RBF)	Supervisionado	100.0%	9/9	Maximização de margem; kernel RBF
Random Forest	Supervisionado	100.0%	9/9	Ensemble de 200 árvores; class_weight=balanced

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Os três modelos alcançaram acurácia de 100% na LOO-CV (9/9 acertos), classificando corretamente todos os ensaios reais em suas campanhas. O resultado, aparentemente absoluto, não é trivial nem indicativo de sobreajuste — sua interpretação correta exige análise das condições físicas que o tornam possível.

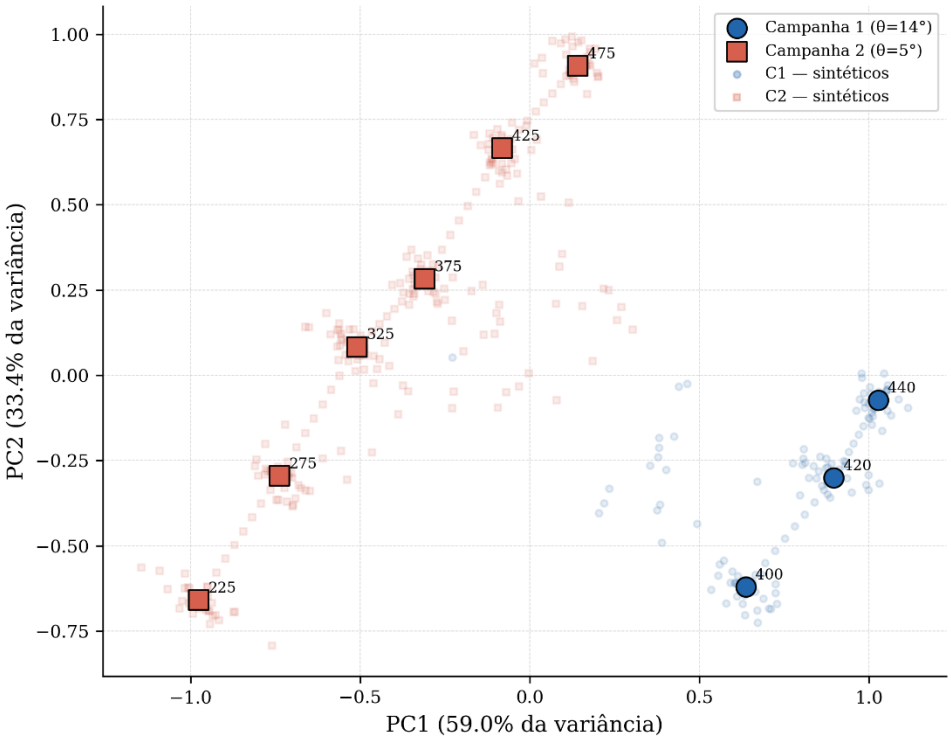
A separabilidade perfeita entre C1 e C2 decorre diretamente das diferenças físicas substanciais entre as duas campanhas. A inclinação θ difere por fator de 2,8 (14° vs. 5°), o índice de escoamento n difere em 13,4% (0,626 vs. ≈ 0,710), e os regimes hidráulicos cobrem faixas de Re com sobreposição limitada — C1 opera entre

Re = 22,6 e 29,9, e C2 entre Re = 10,9 e 25,8, com interseção apenas na faixa superior de C2. Em conjunto, essas diferenças definem duas regiões do espaço de *features* naturalmente separadas — não por artefato algorítmico, mas pela física dos experimentos. A acurácia perfeita mostra que o banco aumentado preservou fielmente essa separação estrutural: os dados sintéticos gerados nas vizinhanças de cada campanha não contaminaram a fronteira de decisão entre as classes, e os classificadores aprenderam fronteiras fisicamente consistentes. O escopo é a limitação real desse resultado: apenas duas classes (campanhas) foram testadas, consequência do banco disponível e não restrição metodológica. A extensão a cenários com maior número de condições experimentais — diferentes inclinações, concentrações de Carbopol e faixas de vazão — é o desdobramento natural deste estudo.

A análise de importância de *features* pelo Random Forest — calculada como a redução média da impureza de Gini por variável ao longo de todas as árvores — revelou que θ (inclinação) e n (índice de escoamento) são as variáveis de maior poder discriminatório entre as campanhas, seguidas por ρ (massa específica) e Re. O resultado é fisicamente coerente: θ e n são os parâmetros que determinam mais diretamente o critério de instabilidade das *roll waves* em escoamentos de Herschel-Bulkley — a inclinação governa a tensão motriz gravitacional e o número de Froude de equilíbrio, e o índice de escoamento n controla a distribuição de velocidades no perfil laminar e, com isso, a taxa de amplificação das perturbações de superfície livre (COUSSOT, 1994; CUNHA, 2018). A identificação dessas variáveis como discriminadoras primárias pelo Random Forest é, portanto, validação indireta da consistência física do banco aumentado: o modelo aprendeu a distinguir as campanhas pelos mesmos parâmetros que a teoria hidrodinâmica indica como governantes do fenômeno.

A Figura 12 apresenta a projeção dos 9 ensaios reais e do banco aumentado completo no plano das duas primeiras componentes principais (PCA), obtidas pela decomposição da matriz de covariância das *features* normalizadas. As cores indicam a campanha de origem (C1: azul; C2: laranja), e os marcadores sólidos maiores identificam os ensaios reais. A projeção permite visualizar em duas dimensões a estrutura de separabilidade do espaço de *features* que os classificadores exploram em dimensionalidade completa.

Figura 12 - Projeção PCA dos ensaios reais (marcadores sólidos, n = 9) e do banco aumentado (marcadores semitransparentes, n = 391) nas duas primeiras componentes principais. Cores por campanha: C1 (azul, θ = 14°) e C2 (laranja, θ = 5°). Os percentuais de variânc

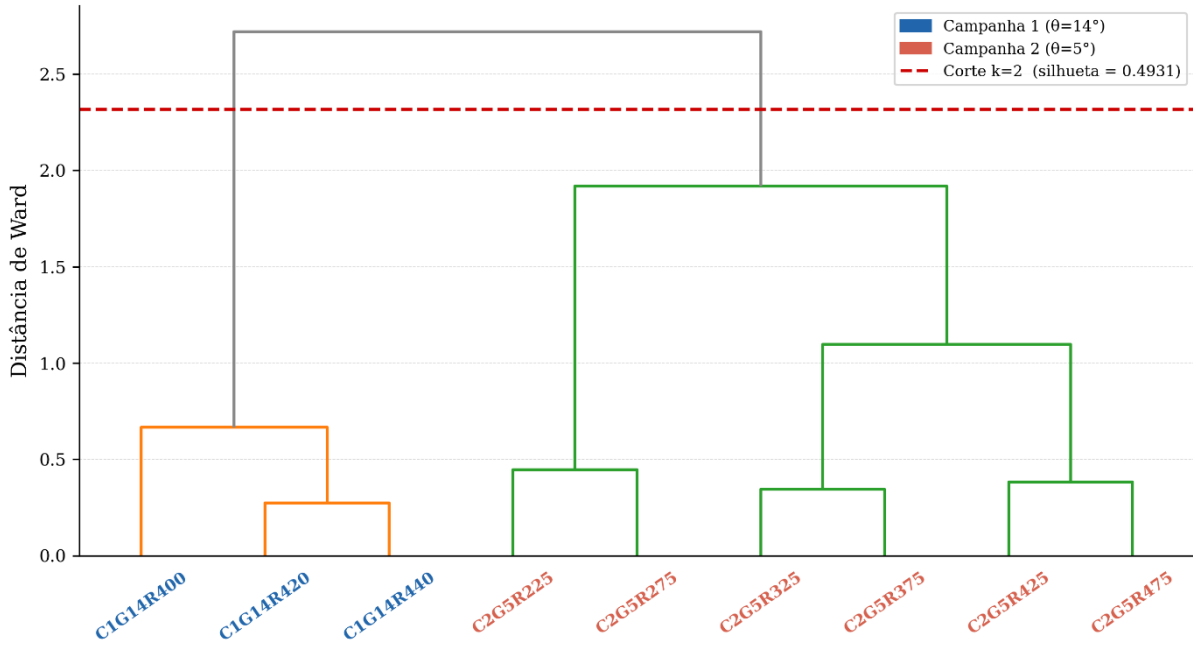


Fonte: elaborado pelo autor (2025).

O Clustering Hierárquico com ligação de Ward foi aplicado sobre os 9 ensaios reais normalizados, sem o rótulo de campanha, como validação não supervisionada da estrutura do banco. Para k = 2 grupos, o algoritmo recuperou espontaneamente a partição exata entre C1 e C2: o Cluster 1 agrupou os três ensaios da C1 (C1G14R400, C1G14R420 e C1G14R440) e o Cluster 2 reuniu os seis da C2 (C2G5R225 a C2G5R475). O coeficiente de silhueta médio obtido foi 0,5212 — separação moderada a boa entre os grupos no espaço de *features* normalizado, refletindo a sobreposição parcial nas faixas de Re entre as campanhas, observada na análise da Tabela 2.

A recuperação espontânea da estrutura experimental por um algoritmo não supervisionado tem relevância metodológica: confirma que as diferenças entre as campanhas são suficientemente pronunciadas nas *features* físicas para serem detectadas independentemente de qualquer rótulo. Esse comportamento reforça a coerência interna do banco e a adequação das variáveis selecionadas como descritores do fenômeno. A Figura 13 apresenta o dendrograma do agrupamento hierárquico, em que as distâncias de fusão entre os nós refletem a dissimilaridade de Ward entre os grupos a cada etapa.

Figura 13 - Dendrograma do Clustering Hierárquico (ligação de Ward) aplicado sobre os 9 ensaios reais normalizados. A linha tracejada horizontal indica o corte para k = 2 grupos, resultando na separação espontânea entre C1 (θ = 14°) e C2 (θ = 5°). Coeficiente de silhueta para k = 2: 0,5212.



Fonte: elaborado pelo autor (2026).

O dendrograma da Figura 13 revela também a estrutura interna de similaridade dentro de cada campanha. Na C1, o par C1G14R420–C1G14R440 apresenta a menor distância de fusão, com maior similaridade entre os ensaios de maior rotação — coerente com a proximidade de seus parâmetros hidráulicos (Fr = 0,739 e Fr = 0,804, respectivamente). Na C2, os ensaios de menor rotação (C2G5R225 e C2G5R275) fundem-se primeiro, e a incorporação progressiva dos ensaios de maior rotação à medida que a distância de corte aumenta reflete o gradiente monotônico de Fr ao longo da sequência de RPM — de Fr = 0,577 (R225) a Fr = 0,924 (R475). A estrutura hierárquica é internamente consistente com a física do escoamento: em cada campanha, a rotação da bomba é o parâmetro de controle primário, e seu efeito sobre as variáveis hidráulicas é capturado pelo algoritmo de forma não supervisionada.

5.2.4 Análise de Pertinência entre Ensaios Experimentais

A análise de pertinência tem por objetivo identificar, no banco experimental disponível, qual ensaio laboratorial é a melhor referência para um cenário de campo hipotético definido por um conjunto de parâmetros mensuráveis *in situ*: inclinação do terreno θ, estimativa de vazão Q e caracterização reológica básica do material

escoante (n, K_n, ρ). A abordagem usa a distância euclidiana no espaço normalizado de *features* (MinMax), conforme descrito na seção 7.1.3. O método não requer treinamento adicional e é diretamente interpretável: quanto menor a distância entre o cenário hipotético e um ensaio real, maior a pertinência daquele ensaio como referência para a predição do comportamento das *roll waves* esperadas.

Para ilustrar a aplicação prática do método, considera-se um ensaio hipotético com os parâmetros de entrada: $\theta = 10°$, $Q = 3{,}5 \times 10^{-4}$ m³/s, $Fr \approx 0{,}72$, $Re \approx 20$, $n \approx 0{,}665$ e $K_n \approx 0{,}173$ Pa·sⁿ. O cenário corresponde a uma condição de campo intermediária entre as duas campanhas — inclinação entre 5° e 14°, índice de escoamento entre 0,626 e 0,710 —, fora do espaço diretamente coberto pelos ensaios reais, porém dentro do domínio expandido pela Camada 3 do pipeline de aumento. A Tabela 7 apresenta o ranking completo de pertinência dos 9 ensaios reais em relação a esse cenário hipotético.

Tabela 7 - Ranking de pertinência dos 9 ensaios reais em relação ao cenário hipotético ($\theta = 10°$, $Q = 3{,}5 \times 10^{-4}$ m³/s, $Fr \approx 0{,}72$, $Re \approx 20$, $n \approx 0{,}665$, $K_n \approx 0{,}173$ Pa·sⁿ): posição, identificação do ensaio e distância euclidiana normalizada.

Pos.	Ensaio	Campanha	Distância eucl. norm.	Observação
1	C1G14R400	C1 (θ=14°)	0,988	Fr e Re mais próximos do cenário hipotético
2	C2G5R375	C2 (θ=5°)	1,052	Fr = 0,814; Re = 18,9 — proximidade combinada
3	C2G5R325	C2 (θ=5°)	1,064	Fr = 0,783; Re = 17,1
4	C1G14R420	C1 (θ=14°)	1,112	Inclinação igual (14°); Fr = 0,739
5	C2G5R275	C2 (θ=5°)	1,213	Fr = 0,676; Re = 13,9
6	C1G14R440	C1 (θ=14°)	1,237	Fr = 0,804; Re = 29,9
7	C2G5R425	C2 (θ=5°)	1,375	Fr = 0,885 — acima do hipotético
8	C2G5R475	C2 (θ=5°)	1,451	Fr = 0,924 e Re = 25,8
9	C2G5R225	C2 (θ=5°)	1,551	h_0, θ, Q, n, $\bar{u}_0$ e Re distantes do cenário hipotético

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

O ensaio C1G14R400 ocupa a primeira posição do ranking, com distância euclidiana normalizada d = 0,988 — o menor valor entre os ensaios reais. O resultado é fisicamente coerente: C1G14R400 apresenta Fr = 0,646, o mais próximo do Fr = 0,72 do cenário hipotético entre os ensaios da C1, e seu número de Reynolds (Re = 22,6) é o mais próximo do Re ≈ 20 hipotético na faixa intermediária do banco. O segundo ensaio mais pertinente é C2G5R375 (d = 1,052), que combina Fr = 0,814 e Re = 18,9 — valores próximos ao cenário hipotético apesar da menor inclinação (θ = 5°), evidenciando que o número de Froude e o número de Reynolds exercem peso

relevante na métrica de pertinência por condensarem os efeitos de inclinação, vazão e reologia sobre o regime hidráulico.

Os ensaios C2G5R325 (d = 1,064) e C1G14R420 (d = 1,112) ocupam a terceira e a quarta posições, refletindo a convergência de seus perfis hidráulicos ao cenário hipotético por caminhos distintos: C2G5R325 pelo lado da vazão e do número de Froude (Fr = 0,783), e C1G14R420 pelo lado da inclinação (θ = 14°). O ensaio C2G5R225 ocupa a última posição (d = 1,551) por acumular as maiores distâncias em h_0, θ, Q, n, $\bar{u}_0$ e Re — combinação que o coloca simultaneamente afastado em múltiplas dimensões do espaço normalizado de *features*. O ranking completo apresentado na Tabela 7 fornece a visão integral das distâncias euclidianas normalizadas entre o cenário hipotético e cada um dos nove ensaios reais, com a hierarquia de pertinência ordenada da maior à menor proximidade.

A análise de pertinência pode ser estendida a cenários de gestão de riscos hidrológicos: dado um local de campo com inclinação θ mensurável por levantamento topográfico, estimativa de vazão Q por métodos batimétricos ou hidrométricos, e caracterização reológica básica do material escoante por reometria portátil, o modelo identifica automaticamente qual ensaio laboratorial é a referência mais adequada para estimar os parâmetros das *roll waves* esperadas — amplitude Δh, lâmina baixa h_1 e comprimento de onda. A transferência de conhecimento do laboratório para o campo, apoiada em dados experimentais validados e métricas de similaridade interpretáveis, é contribuição concreta do estudo à metodologia de monitoramento e previsão de escoamentos viscoplásticos em encostas inclinadas.

5.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO E PERSPECTIVAS

Este capítulo desenvolveu de forma integrada as etapas metodológicas e os resultados do estudo principal de Machine Learning aplicado ao banco de dados experimental de *roll waves* em Gel de Carbopol 996. A contribuição central é o pipeline de aumento em três camadas — Bootstrapping por Ruído Gaussiano, Interpolação Intra-Campanha e Processo Gaussiano com Amostragem por Hipercubo Latino — que expandiu o banco de 9 ensaios reais para 391 instâncias fisicamente validadas (fator 43,4×), viabilizando a aplicação de classificadores supervisionados com validação cruzada rigorosa. Os três modelos supervisionados (k-NN, SVM e Random Forest) alcançaram acurácia de 100% na LOO-CV sobre os ensaios reais — resultado cuja

interpretação correta remete à separabilidade física substancial entre as condições das duas campanhas, e não a sobreajuste ou trivialidade algorítmica. O Clustering Hierárquico recuperou espontaneamente a estrutura experimental sem uso de rótulos (silhueta = 0,52), confirmando a coerência interna do banco, e a análise de importância de *features* identificou θ e n como discriminadoras primárias — resultado alinhado à teoria de instabilidade de *roll waves* em fluidos de Herschel-Bulkley. A análise de pertinência mostra a viabilidade de transferência do conhecimento laboratorial a cenários de campo, a partir de parâmetros mensuráveis *in situ*.

O Capítulo 6 sistematiza as conclusões gerais do projeto de pós-doutorado, integrando as contribuições deste capítulo aos avanços em instrumentação (Capítulos 3) e à produção científica publicada (Capítulo 4). As principais perspectivas futuras são: a ampliação do banco experimental com novas campanhas em condições reológicas e hidráulicas distintas — viabilizada pelo novo reômetro e pelo canal de ensaios —, o desenvolvimento de modelos de ML de maior complexidade (redes neurais, modelos de séries temporais) e a validação em campo do protocolo de análise de pertinência proposto.

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

6.1 CONCLUSÕES

Este relatório registra as contribuições do projeto de pós-doutorado intitulado *Estudo e Caracterização de Instabilidades em Superfície Livre com Fluido Não Newtoniano por Machine Learning*, conduzido no Grupo de Pesquisa LH2–FEIS da UNESP. O trabalho organizou-se em três eixos complementares: a formação de recursos humanos em instrumentação experimental, com a coorientação de doze bolsistas ao longo de três ciclos consecutivos do PIBIC Jr; a produção científica indexada, com dois artigos em periódicos de alto fator de impacto; e o desenvolvimento de uma metodologia de Machine Learning com aumento de dados aplicada à classificação de regimes de *roll waves* em fluidos viscoplásticos. A convergência desses eixos é a contribuição central deste pós-doutorado ao estado da arte em hidráulica experimental e computacional.

Na formação de recursos humanos, as coorientações dos ciclos do PIBIC Jr de 2022–2023, 2023–2024 e 2024–2025 produziram sistemas originais de instrumentação e sensoriamento — ultrassônico, fotométrico por absorbância, óptico por refração e reflexão, e eletrônico em plataforma Arduino —, voltados à medição de parâmetros de superfície livre em escoamentos de fluidos não Newtonianos. Uma das coorientações elaborou o manual interativo do aplicativo OndisAPY (NISHIGIMA, 2021), ferramenta de previsão de ondas geradas por ventos em reservatórios desenvolvida em ciclo anterior do grupo. A formação de doze bolsistas em metodologia experimental e programação científica é um legado humano e técnico permanente para o grupo de pesquisa.

A produção científica do projeto compreende dois artigos em periódicos indexados internacionais. O primeiro, em *Measurement* (JCR 5,6; DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114880), introduz uma técnica fotométrica de absorbância para medição não intrusiva de *roll waves* em fluidos não Newtonianos — contribuição metodológica à metrologia hidráulica. O segundo, no *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* (JCR 2,2; DOI: 10.1007/s40430-024-05053-z), apresenta a avaliação experimental da evolução de *roll waves* em fluidos do tipo lama em declives acentuados, com Gel de Carbopol 996 como análogo viscoplástico do modelo de Herschel-Bulkley.

O estudo principal de Machine Learning (Capítulo 5) foi conduzido em contexto de restrições operacionais documentadas — indisponibilidade do reômetro por aproximadamente nove meses e necessidade de substituição do canal de ensaios — , que inviabilizaram novas campanhas experimentais no prazo do pós-doutorado. Em resposta, propôs-se e implementou-se um pipeline de aumento de dados em três camadas fisicamente fundamentadas: Bootstrapping por Ruído Gaussiano (Camada 1), Interpolação Linear Intra-Campanha (Camada 2) e Processo Gaussiano com Amostragem por Hipercubo Latino — GPR + LHS — (Camada 3). O pipeline expandiu o banco original de 9 ensaios reais para 391 instâncias validadas (fator de expansão 43,4×), sem extrapolar as fronteiras do domínio fisicamente plausível.

Sobre o banco aumentado, os três classificadores supervisionados avaliados — k-NN (k=3), SVM com kernel RBF e Random Forest — alcançaram acurácia de 100% na validação cruzada *leave-one-out* sobre os ensaios reais, resultado cuja interpretação remete à separabilidade física substancial entre as condições das duas campanhas e não a sobreajuste algorítmico. O Clustering Hierárquico de Ward, aplicado sem rótulos, recuperou espontaneamente a estrutura C1/C2 com coeficiente de silhueta de 0,5212, confirmando a coerência interna do banco. A análise de importância de *features* pelo Random Forest identificou θ (inclinação) e n (índice de escoamento) como variáveis discriminadoras primárias, seguidas por ρ e Re — resultado alinhado à teoria de instabilidade de *roll waves* em fluidos de Herschel-Bulkley. A análise de pertinência por distância euclidiana normalizada mostra a viabilidade de transferência do conhecimento laboratorial a cenários de campo: dado um conjunto de parâmetros mensuráveis *in situ*, o modelo identifica o ensaio laboratorial mais similar, com aplicação direta a protocolos de monitoramento e previsão de risco em encostas com escoamentos de lama.

6.2 PERSPECTIVAS FUTURAS

As perspectivas a seguir decorrem das limitações identificadas e das potencialidades abertas pelo projeto, em ordem decrescente de prioridade e imediação operacional.

A ampliação do banco experimental é a perspectiva de maior prioridade. Com o reômetro restaurado e o novo canal de ensaios em operação, novas campanhas tornam-se viáveis: diferentes concentrações de Gel de Carbopol 996, distintas

inclinações e amplitudes de perturbação controlada — superando a restrição das duas campanhas que condicionou o estudo principal. Um banco de maior dimensão reduzirá a incerteza preditiva do GPR na Camada 3 do pipeline de aumento, aumentará o número de instâncias retidas pelo filtro de validade física e — sobretudo — permitirá avaliar a robustez dos classificadores supervisionados em condições de separabilidade menos extrema do que a observada entre C1 e C2.

A expansão do repertório de modelos de Machine Learning é o segundo desdobramento natural. Os resultados com k-NN, SVM e Random Forest estabelecem linha de base sólida para a adoção de modelos de maior complexidade representacional, como redes neurais artificiais e redes neurais recorrentes do tipo LSTM (*Long Short-Term Memory*) — estas adequadas à modelagem das séries temporais de altura de lâmina d'água característica das *roll waves*. Um banco experimental ampliado é condição necessária para que esses modelos operem fora do regime de escassez amostral.

A validação em campo do protocolo de análise de pertinência (Capítulo 5) é a perspectiva de maior impacto aplicado. A metodologia, baseada na distância euclidiana normalizada no espaço de *features* físicas mensuráveis — inclinação topográfica, estimativa de vazão e caracterização reológica básica —, foi demonstrada em cenário hipotético laboratorial; sua extensão a localidades com histórico de corridas de lama e escoamentos de detritos testaria a viabilidade do método como ferramenta de suporte à decisão em gestão de risco hidrológico.

A disponibilização pública do banco de dados aumentado, hoje mantido como propriedade do grupo LH2–FEIS, está condicionada à submissão de artigo específico sobre o pipeline de aumento e seus resultados. Essa publicação consolidará a contribuição metodológica do pipeline como referência reprodutível para a comunidade que trabalha com bancos experimentais de dimensão reduzida em hidráulica e dinâmica de fluidos não Newtonianos.

A contemplação da bolsa CNPq pelo Edital 49/2025, que motivou o encerramento antecipado deste pós-doutorado, é a perspectiva institucional de continuidade. O projeto subsequente integrará as frentes acima em um programa de pesquisa de maior escopo, consolidando a infraestrutura experimental, o acervo de dados e a linha de Machine Learning aplicada a escoamentos viscoplásticos com superfície livre no grupo LH2–FEIS.

REFERÊNCIAS

ARANDA, J. M. A. et al. Roll-wave measurements in Carbopol flows. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 238, p. 46–58, 2016.

BROCK, R. R. Development of roll waves in open channels. *Journal of the Hydraulics Division*, v. 95, n. HY4, p. 1401–1427, 1969.

BRUNTON, S. L.; NOACK, B. R.; KOUMOUTSAKOS, P. Machine learning for fluid mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 52, p. 477–508, 2020. DOI: 10.1146/annurev-fluid-010719-060214.

CHAUDHRY, M. H. *Open-channel hydraulics*. 2. ed. New York: Springer, 2008.

COUSSOT, P. Steady, laminar, flow of concentrated mud suspensions in open channel. *Journal of Hydraulic Research*, v. 32, n. 4, p. 535–559, 1994.

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

DRESSLER, R. F. Mathematical solution of the problem of roll waves in inclined open channels. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, v. 2, p. 149–194, 1949.

DURAISAMY, K.; IACCARINO, G.; XIAO, H. Turbulence modeling in the age of data. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 51, p. 357–377, 2019. DOI: 10.1146/annurev-fluid-010518-040547.

FERREIRA, F. O. *Estabilidade e controle dinâmico de roll waves*. 2013. 204 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2013.

FIOROT, G. H. et al. 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, n. 483, 2024. DOI: 10.1007/s40430-024-05053-z.

GÉRON, A. *Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow*: concepts, tools, and techniques to build intelligent systems. 2. ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2019. 856 p. ISBN: 978-1-492-03264-9.

HUANG, X.; GARCÍA, M. H. A Herschel–Bulkley model for mud flow down a slope. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 374, p. 305–333, nov. 1998. DOI: 10.1017/S0022112098002845.

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. [Core Writing Team: H. Lee; J. Romero (Eds.)]. Geneva: IPCC, 2023. 184 p. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

KAPITZA, P. L. Wave flow of thin layers of viscous liquid. *Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki*, v. 18, p. 3–18, 1948.

MACIEL, G. F. et al. [Referência citada como MACIEL et al., 2013 e MACIEL et al., 2017 no corpo do capítulo.]

MACIEL, G. F. et al. Roll wave prediction model of Herschel–Bulkley fluids evolving on porous bottom. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 296, 2021. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2021.104606.

NEEDHAM, D. J.; MERKIN, J. H. On roll waves down an open inclined channel. *Proceedings of the Royal Society of London A*, v. 394, p. 259–278, 1987.

PIAU, J. M. Carbopol gels: elastoviscoplastic and slippery glasses made of individual swollen sponges. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 144, n. 1, p. 1–29, 2007. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2007.02.011.

STOKER, J. J. *Water waves: the mathematical theory with applications*. New York: Interscience, 1957.

TAMBURRINO, A.; IHLE, C. Roll waves appearance in bentonite suspensions. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 139, n. 4, p. 453–457, 2013. [VERIFICAR — dados completos com o pesquisador]

VARGES, P. R. et al. Rheological characterization of Carbopol dispersions in water and in water/glycerol solutions. *Fluids*, v. 4, n. 1, 2019. DOI: 10.3390/fluids4010003.

CUNHA, E. F.; MORAIS, V. S.; MACIEL, G. F.; MGINA, F. C. Sistemas de transmissão de dados de vento e onda, via rádio telemetria, em lagos de barragens. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2009. [VERIFICAR — dados completos a serem confirmados]

MENDES, A. L. *Desenvolvimento de uma bóia-ondógrafo brasileira.* 2012. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. [VERIFICAR — tipo de trabalho e dados completos]

OLIVEIRA, E. B. *Automação de sensor para medição de ondas em águas rasas e desenvolvimento de ondógrafo óptico.* 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2012.

APÊNDICE A — INSTRUMENTAÇÃO E SISTEMAS DE MEDIÇÃO | PIBIC JR 2022–2023

O presente apêndice descreve as atividades de coorientação desenvolvidas no ciclo do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica Júnior (PIBIC Jr) referente ao período 2022–2023, vinculadas ao Laboratório de Hidrologia e Hidrometria (LH2) da UNESP – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS). As três coorientações conduzidas nesse período — Julia Silva Belini, Yan Vanin Inácio e Pedro Henrique Souza Menoni — tiveram como eixo temático comum o inventário, a manutenção e a operacionalização de sistemas de medição de vento e onda disponíveis no laboratório, acrescido do desenvolvimento de protótipos instrumentados para aquisição de parâmetros de superfície livre em lagos de barragens e em canais experimentais.

A.1 COORIENTAÇÃO I — JULIA SILVA BELINI | PIBIC JR 2022–2023

A.1.1 Materiais e Métodos

A bolsista Julia Silva Belini desenvolveu o projeto intitulado "Inventário, Manutenção e Operacionalização de Sistemas de Medição de Ondas e Ventos", estruturado em três frentes complementares. A primeira frente consistiu na aquisição de fundamentos de eletrônica e prototipagem: foram montados e testados circuitos em protoboard com a plataforma Arduino, envolvendo componentes como servo motores, sensor LDR (Light Dependent Resistor), push-buttons e LEDs, com o objetivo de capacitar a bolsista para as etapas subsequentes de instrumentação.

A segunda frente contemplou o inventário e a operacionalização dos sistemas de medição de vento do LH2. Os equipamentos levantados incluem o Anemômetro RM 05103 Young 2D, o Wind Speed e o Wind Sonic — anemômetro ultrassônico bidimensional que fornece direção e velocidade do vento via sinal RS-232 —, integrados ao DataLogger CR10x (Campbell Scientific) e configurados por meio do software LoggerNet. A arquitetura de comunicação adotada segue o esquema: software (computador) → DataLogger → sensor, com suporte às modalidades de conexão direta, ponto a ponto e master/slave com dois escravos. Foi elaborado um

catálogo técnico dos equipamentos, reunindo modelo, fabricante, número de série, tensão de alimentação, características básicas e programação de cada instrumento.

A terceira frente consistiu no desenvolvimento de um protótipo de ondógrafo direcional em plataforma de prototipagem eletrônica, voltado especificamente à medição de parâmetros de ondas em lagos de barragens — ambiente caracterizado por ondas de alta frequência e baixa amplitude, condição incompatível com ondógrafos oceanográficos convencionais. O protótipo foi projetado no software Fritzing e montado em protoboard, incorporando o microprocessador ESP32, o sensor inercial MPU6050 (acelerômetro e giroscópio de seis eixos), baterias de Li-íon 3,7 V e quatro placas solares fotovoltaicas de 6 V para alimentação autônoma. A transmissão dos dados adquiridos foi implementada via Wi-Fi, utilizando o protocolo de comunicação I2C (Inter-Integrated Circuit) para a integração entre os módulos e sensores.

A.1.2 Resultados e Discussão

Como resultado da segunda frente, foi produzido um catálogo técnico completo dos equipamentos de medição de vento e onda presentes no LH2, acompanhado de relatório detalhado com o passo a passo das instalações dos anemômetros, incluindo a configuração do DataLogger e a integração com o sistema de transmissão por rádio. O conjunto de equipamentos foi verificado em bancada, confirmando a correta operação de cada instrumento segundo os procedimentos registrados.

Quanto ao protótipo do ondógrafo direcional, os primeiros testes foram conduzidos manualmente: o dispositivo demonstrou capacidade de captar com eficiência simulações dos movimentos oscilatórios, gerando séries temporais das componentes de aceleração (AccelX, AccelY, AccelZ) e rotação (GyroX, GyroY, GyroZ), além de direção, temperatura, pressão e altitude, visualizadas em tempo real por meio do monitor serial da plataforma Arduino IDE e transmitidas via ESP32. Em virtude da relevância dos resultados e da abrangência das competências desenvolvidas, a bolsista Julia Silva Belini foi indicada para representar a UNESP no Prêmio CNPq PIBIC Jr, reconhecimento que atesta o nível de qualidade atingido pelo projeto no âmbito institucional.

A.2 COORIENTAÇÃO II — YAN VANIN INÁCIO | PIBIC JR 2022–2023

A.2.1 Materiais e Métodos

O bolsista Yan Vanin Inácio desenvolveu o projeto "Inventário, Manutenção e Operacionalização de Sistemas de Medição de Vento e Onda", com estrutura análoga à da Coorientação I, porém com ênfase no desenvolvimento de um sistema de medição de nível de superfície livre por princípio ótico. A etapa inicial de aprendizado compreendeu a montagem de circuitos em protoboard com Arduino UNO, empregando componentes como resistores, servos, sensores foto-resistivos, potenciômetros e botoeiras, com simulação prévia em software específico. Para os sistemas de anemometria, foram utilizados dataloggers Campbell Scientific, rádios, antenas, cabos RS-232 e fontes de alimentação 12 V, na mesma configuração documentada na Coorientação I.

A contribuição específica desta coorientação foi o desenvolvimento de um ondógrafo tipo régua com sensor ótico a laser, concebido para medição não invasiva da lâmina d'água em canais experimentais. O sistema é composto por Arduino UNO, sensor ótico reflexivo a laser, datalogger e módulo de aquisição de dados, capaz de registrar séries temporais de tensão elétrica e distância à superfície livre com resolução de 0,01 m. O projeto de circuito foi simulado computacionalmente e, em seguida, implementado em bancada laboratorial, com foco na definição das faixas de operação, limites de detecção e taxa de amostragem adequada para a captura de perturbações superficiais.

A.2.2 Resultados e Discussão

Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade do ondógrafo tipo régua com sensor ótico para a captura de variações de nível de superfície livre. As séries temporais adquiridas (tensão vs. distância) apresentaram resolução satisfatória, com variações temporais consistentes com os perfis esperados de perturbação superficial. Os dados coletados foram armazenados em formato estruturado para uso em projetos subsequentes, contribuindo para a formação do banco de dados experimental do LH2. O sistema revelou-se de baixo custo, não invasivo e reprodutível, características relevantes para aplicações em hidráulica experimental com fluidos não Newtonianos.

A.3 COORIENTAÇÃO III — PEDRO HENRIQUE SOUZA MENONI | PIBIC JR 2022–2023

A.3.1 Materiais e Métodos

O bolsista Pedro Henrique Souza Menoni desenvolveu o projeto "Inventário, Manutenção e Operacionalização de Sistemas de Medição de Vento e Onda", com ênfase na revisão técnica de circuitos eletrônicos, na elaboração de catálogo de instrumentação e na verificação operacional dos equipamentos de sensoriamento, telemetria e tratamento de dados disponíveis no LH2. A metodologia foi estruturada em duas vertentes: uma teórica, baseada em revisão bibliográfica e pesquisa em catálogos e manuais técnicos; e uma prática, compreendendo testes de bancada e instrumentação em campo. Os equipamentos de maior complexidade abordados incluem o perfilador acústico de corrente SonTek RiverSurveyor M5 — utilizado para medição de vazão, profundidade e velocidade por princípio Doppler — e o sonar de varredura lateral EdgeTech 4600, destinado ao mapeamento do leito de corpos d'água. Adicionalmente, foram documentadas as instalações dos anemômetros em campo, com registro detalhado da arquitetura de transmissão de dados via rádio e DataLogger Campbell Scientific.

A.3.2 Resultados e Discussão

O principal produto desta coorientação foi a elaboração de um catálogo abrangente dos equipamentos de medição presentes no laboratório, sistematizando informações técnicas de cada instrumento — função, modelo, fabricante, tensão de alimentação, entradas e saídas, aplicações e programação — em formato padronizado, de modo a facilitar a consulta e a replicação dos procedimentos de operacionalização. A verificação funcional dos equipamentos em bancada confirmou a operação correta de cada sistema, e os relatórios de instalação produzidos constituem documentação de referência para as coorientações subsequentes. A experiência adquirida pelo bolsista em circuitos eletrônicos e em sistemas de aquisição de dados consolidou a base técnica necessária para a continuidade das atividades de instrumentação previstas nos ciclos 2023–2024 do PIBIC Jr.

APÊNDICE B — IMPLEMENTAÇÃO DE APARATOS DE MEDIÇÃO DE ONDA EM LAGOS DE BARRAGENS | PIBIC JR 2023–2024

O presente apêndice descreve as atividades de coorientação desenvolvidas no ciclo do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica Júnior (PIBIC Jr) referente ao período 2023–2024, vinculadas ao Laboratório de Hidrologia e Hidrometria (LH2) da UNESP – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS). Em continuidade às atividades de inventário e manutenção realizadas no ciclo anterior, as três coorientações conduzidas neste período — Emily Vitória de Oliveira/Júlia Silva Belini, Yan Vanin Inácio e Pedro Henrique Souza Menoni/João Pedro Dantas Pereira — avançaram para a implementação e operacionalização efetiva de aparatos de medição de ondas em lagos de barragens e corpos d'água interiores. O eixo temático compartilhado foi o desenvolvimento e a modernização de instrumentação hidrometeorológica de baixo custo e alta resolução, adequada às características específicas das ondas de alta frequência e baixa amplitude típicas de reservatórios fluviais.

B.1 COORIENTAÇÃO IV — EMILY VITÓRIA DE OLIVEIRA / JÚLIA SILVA BELINI | PIBIC JR 2023–2024

B.1.1 Materiais e Métodos

A bolsista Emily Vitória de Oliveira, com a participação colaborativa de Júlia Silva Belini, desenvolveu o projeto intitulado "Implementação e Operacionalização de Aparato para Medição de Onda em Lago de Barragem", que constituiu o avanço direto do protótipo de ondógrafo direcional iniciado no ciclo 2022–2023. O sistema foi estruturado sobre uma boia de PVC e integrou cinco módulos de sensoriamento: (i) o microcontrolador ESP32, responsável pela integração dos sensores e pela transmissão de dados via Wi-Fi; (ii) o sensor inercial MPU6050, composto por acelerômetro e giroscópio de seis eixos, destinado à estimativa da altura e da direção das ondas a partir da integração dupla da componente vertical da aceleração; (iii) o sensor magnetométrico HMC5883L, utilizado como bússola para determinação da direção de propagação das ondas; (iv) o sensor de temperatura DS18B20, para

monitoramento contínuo da temperatura da água; e (v) o sensor barométrico MS5611, responsável pela medição da pressão atmosférica. A alimentação autônoma do sistema foi assegurada por baterias de Li-íon de 3,7 V, com recarga provida por quatro placas fotovoltaicas de 6 V/1 W, integradas a um circuito de chaveamento por relé para alternância automática entre as unidades de bateria.

A aquisição e o processamento dos dados foram implementados via protocolo de comunicação I2C (Inter-Integrated Circuit) entre os sensores e o ESP32, com transferência das grandezas mensuradas ao banco de dados temporal InfluxDB por protocolo HTTP. A visualização em tempo real foi realizada na plataforma web Grafana, que permitiu o monitoramento simultâneo das séries temporais de todas as variáveis instrumentadas. O projeto eletrônico foi concebido no software Fritzing, e a metodologia de desenvolvimento adotou a abordagem de aprendizado por projeto, estruturada em cronograma bimestral com etapas progressivas de bancada e campo.

B.1.2 Resultados e Discussão

Os testes preliminares em bancada demonstraram a capacidade do ondógrafo direcional de captar, com eficiência, as oscilações induzidas em simulação laboratorial. As séries temporais geradas pela plataforma Grafana evidenciaram a operação simultânea e coerente dos cinco canais de medição — direção (bússola), altitude, temperatura da água, pressão atmosférica e altura de onda estimada por integração da aceleração vertical —, validando a arquitetura de aquisição multiparamétrica adotada. A transmissão via Wi-Fi possibilitou a inspeção em tempo real pelo monitor serial da plataforma Arduino IDE, confirmando a integridade do fluxo de dados entre o sistema embarcado e a infraestrutura de armazenamento. Os dados obtidos constituem base para a verificação de parâmetros hidrológicos em lagos de barragens, contexto ainda carente de instrumentação de baixo custo e alta resolução no âmbito nacional.

B.2 COORIENTAÇÃO V — YAN VANIN INÁCIO | PIBIC JR 2023–2024

B.2.1 Materiais e Métodos

O bolsista Yan Vanin Inácio desenvolveu o projeto "Modernização de um Aparato Experimental para a Medição de Ondas em Pequenos Corpos D'Água", com foco principal na modernização do ondógrafo tipo régua disponível no LH2. O dispositivo baseia-se no princípio de reflexão de um feixe de laser sobre um anteparo móvel solidário a uma boia de flutuação livre, que desliza ao longo de uma haste metálica vertical de dois metros fixada em estrutura de campo. A variação de posição da boia, em resposta às cristas e cavas das ondas na superfície do reservatório, é convertida em variação de distância detectada pelo sensor laser, cuja saída analógica apresenta dependência linear com a distância na faixa de operação de 10 V a 30 V (operado a 12 V neste projeto).

A cadeia eletrônica de condicionamento de sinal compreendeu um divisor de tensão resistivo (resistor de 1 kΩ em série), necessário para adequar o nível de saída máximo do sensor (10 V) à faixa admissível pelas portas analógicas do microcontrolador Arduino UNO (5 V). A transmissão remota dos dados foi implementada pelo módulo Bluetooth HC-06 (protocolo Bluetooth 2.0, alcance de até 10 m). A calibração do sensor foi conduzida por deslocamentos incrementais de 0,125 ± 0,01 m em uma superfície de referência, com monitoramento simultâneo por trena laser e leitura de tensão por multímetro. A regressão linear obtida resultou na equação de calibração $y = 0{,}9363\,x - 0{,}9936$, em que y representa a distância em metros e x a tensão medida em volts. A programação embarcada no Arduino realiza a leitura analógica, aplica a equação de calibração e transmite continuamente os dados calculados via Bluetooth.

B.2.2 Resultados e Discussão

A curva de calibração obtida exibiu comportamento linear consistente com a especificação do fabricante do sensor, validando o procedimento adotado. Os testes de comunicação via Bluetooth confirmaram a estabilidade da transmissão e a coerência entre os valores calculados pela equação de calibração e as distâncias de referência. A série temporal de deslocamento adquirida em bancada evidenciou a

sensibilidade do sistema às variações de posição do anteparo, com resolução compatível com as amplitudes de onda esperadas em lagos de barragens. O protótipo, na configuração final, mostrou-se apto à instalação em campo, com estrutura de fixação em haste vertical e alimentação por bateria, constituindo solução de baixo custo e desempenho adequado para o monitoramento hidrodinâmico de reservatórios fluviais.

B.3 COORIENTAÇÃO VI — PEDRO HENRIQUE SOUZA MENONI / JOÃO PEDRO DANTAS PEREIRA | PIBIC JR 2023–2024

B.3.1 Materiais e Métodos

Os bolsistas Pedro Henrique Souza Menoni e João Pedro Dantas Pereira desenvolveram o projeto "Inventário e Aplicação de Sistemas de Medição de Onda", com ênfase no estudo, catalogação e operacionalização de dois sistemas profissionais de sensoriamento hidrodinâmico pertencentes ao acervo do LH2: o SonTek RiverSurveyor M5 e o EdgeTech 4600. O SonTek RiverSurveyor M5 é um perfilador de correntes por efeito Doppler acústico (Acoustic Doppler Current Profiler — ADCP), combinado a um receptor de posicionamento GNSS (Global Navigation Satellite System), que possibilita a medição simultânea de vazão, profundidade e velocidade da corrente em diferentes células da coluna d'água, com georreferenciamento automático dos perfis adquiridos. O EdgeTech 4600 é um sistema de sonar de varredura lateral de alta resolução, instalado em embarcações, que emite feixes acústicos laterais para obtenção de imagens detalhadas do leito subaquático e para execução de batimetria interferométrica.

A metodologia adotada compreendeu o estudo aprofundado dos manuais e catálogos técnicos dos equipamentos disponíveis no LH2, a execução de procedimentos de calibração do SonTek RiverSurveyor M5 e a documentação sistemática dos princípios de operação de cada sistema. Como etapa preparatória, os bolsistas realizaram o aprendizado de eletrônica básica com componentes discretos, plataforma Arduino e protoboard, consolidando a base instrumental necessária para a compreensão dos sistemas de aquisição de dados de maior complexidade.

B.3.2 Resultados e Discussão

O estudo do SonTek RiverSurveyor M5 permitiu a compreensão e a documentação do procedimento de batimetria em três etapas: medição segmentada das profundidades ao longo de fatias transversais do canal, georreferenciamento de cada fatia por GNSS e interpolação dos perfis para geração de um mapa contínuo de profundidades. O EdgeTech 4600 foi caracterizado quanto às suas duas modalidades operacionais: sonar de varredura lateral, para obtenção de imagens de alta resolução de feições e estruturas submersas, e batimetria interferométrica, para estimativa volumétrica de sedimentos depositados — informação essencial para o controle de assoreamento e a avaliação da segurança estrutural de barragens. O catálogo técnico elaborado pelos bolsistas consolidou, para cada equipamento, as especificações operacionais, os princípios físicos de funcionamento e os procedimentos de calibração, compondo acervo de referência para as atividades contínuas do LH2 e para os ciclos de coorientação subsequentes.

APÊNDICE C — TÉCNICAS AVANÇADAS DE SENSORIAMENTO E MEDIÇÃO EM FLUIDOS | PIBIC JR 2024–2025

O presente apêndice sintetiza as seis coorientações de Iniciação Científica Júnior (PIBIC Jr) desenvolvidas no período 2024–2025 junto ao Laboratório de Hidrologia e Hidrometria (LH2) e ao Laboratório de Optoeletrônica da UNESP – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS). As investigações abrangeram quatro frentes tecnológicas complementares para o sensoriamento não intrusivo de escoamentos de fluidos: (i) sensores LIDAR de prototipagem eletrônica, (ii) instrumentação ultrassônica de baixo custo, (iii) técnicas ópticas baseadas em refração e reflexão de feixes de luz, e (iv) desenvolvimento e documentação de ferramentas computacionais para monitoramento de ondas em espelhos d'água. O fluido teste empregado nos experimentos laboratoriais foi o Gel de Carbopol 996 — fluido não Newtoniano padrão do grupo de pesquisa — escoando em canal de inclinação regulável, no qual instabilidades do tipo roll waves foram induzidas e caracterizadas por cada técnica investigada.

C.1 COORIENTAÇÃO VII — ALEXANDRE LIMA DE A. V. BORGES | PIBIC JR 2024–2025

C.1.1 Materiais e Métodos

O estudo avaliou a viabilidade de sensores de telemetria por luz (LIDAR — Light Detection and Ranging) de baixo custo, integrados a uma plataforma Arduino UNO R3, para a caracterização de roll waves em escoamento de Carbopol em canal instrumentado. Cinco sensores de distância a laser foram avaliados em testes preliminares: GP2Y0A41SK0F, VL53L0X (duas versões), TOF200F e VL53L1X. O critério de seleção considerou relação sinal-ruído, estabilidade de leitura e taxa de aquisição compatível com a dinâmica oscilatória das ondas. O sensor selecionado foi fixado em estrutura de madeira posicionada sobre o canal, permitindo monitoramento direto da superfície livre. O algoritmo de aquisição, desenvolvido em linguagem C/C++ para o Arduino, calculou cinco parâmetros de onda em tempo real: amplitude (A), velocidade de propagação (c), comprimento de onda ($\lambda = c/f$), frequência ($f = nW/t$) e

período (T = 1/f), onde nW representa o número de ondas detectadas no intervalo de tempo t.

C.1.2 Resultados e Discussão

Os testes comparativos identificaram o sensor VL53L1X como o mais adequado, apresentando menor variação impulsiva do sinal e precisão nominal de ±1,5 mm em superfícies opacas fixas. Contudo, sua aplicação sobre o fluido não Newtoniano revelou limitação relevante: a parcial transparência óptica do Carbopol e das paredes de vidro do canal resultou em reflexões secundárias, degradando a precisão efetiva para ±3,5 mm. Mesmo com essa penalidade metrológica, o perfil característico das roll waves — frente íngreme seguida de dorso suave — pôde ser identificado qualitativamente nas séries temporais adquiridas. As limitações observadas foram atribuídas à taxa de aquisição do sensor e ao ruído de quantização, indicando a necessidade de filtragem digital como etapa futura. Concluiu-se que a abordagem LIDAR por prototipagem eletrônica constitui alternativa viável, de baixo custo e não intrusiva, para a detecção de instabilidades em superfícies livres, desde que associada a técnicas de redução de ruído e a fluidos de maior opacidade óptica.

C.2 COORIENTAÇÃO VIII — JÚLIA JARDIM AMORIM | PIBIC JR 2024–2025

C.2.1 Materiais e Métodos

O trabalho focou na elaboração de um manual de usuário abrangente para o software OndisAPY, ferramenta de previsão de ondas geradas por ventos em reservatórios, desenvolvida como modernização do legado OndisaCAD (AutoCAD/LISP) para o ecossistema Python com interface via Jupyter Notebook. A metodologia estruturou-se em três etapas sequenciais: (i) estudo teórico dos fenômenos físicos modelados, com revisão das metodologias SMB (Sverdrup-Munk-Bretschneider) e JONSWAP para previsão de ondas; (ii) análise funcional da arquitetura do software, mapeando cada módulo, parâmetro de entrada e saída; e (iii) elaboração do conteúdo textual e didático, priorizando rigor técnico aliado à clareza de exposição progressiva. O Jupyter Notebook foi o ambiente computacional principal para testes de reprodutibilidade dos procedimentos documentados.

C.2.2 Resultados e Discussão

O produto resultante foi um manual didático estruturado em duas partes complementares. A primeira parte, denominada "Fundamentação e Preparação", contemplou os fundamentos teóricos da geração de ondas por ventos, o guia de instalação do ambiente Python/Jupyter e a preparação de dados de entrada. A segunda parte, "Aplicação Prática e Análise de Resultados", apresentou tutoriais passo a passo para execução do modelo e interpretação dos gráficos gerados, utilizando como caso de aplicação dados da bacia hidrográfica da Usina Hidrelétrica de Porto Colômbia (Rio Grande/SP). O manual habilita qualquer usuário — estudante, pesquisador ou profissional — a operar o OndisAPY de forma autônoma, desde a configuração do ambiente até a análise de parâmetros de onda.

C.3 COORIENTAÇÃO IX — LUIZ EDUARDO LANDIN RODRIGUES | PIBIC JR 2024–2025

C.3.1 Materiais e Métodos

O projeto visou otimizar o sistema de monitoramento de ondas em espelhos d'água desenvolvido em etapas anteriores do PIBIC Jr, atuando em três frentes: (i) aprimoramento da transmissão de dados via rede Wi-Fi entre o ondógrafo embarcado e o sistema de registro; (ii) análise e redução do consumo energético do sistema embarcado; e (iii) desenvolvimento de uma interface web para visualização interativa dos dados em tempo real. As ferramentas computacionais empregadas foram o Visual Studio Code como ambiente de desenvolvimento integrado, Python como linguagem principal e a biblioteca Streamlit para construção do dashboard interativo. A metodologia adotou o paradigma de aprendizado por projeto, com ciclos iterativos de implementação, teste e refinamento.

C.3.2 Resultados e Discussão

O sistema resultante integrou a leitura do ondógrafo, a transmissão sem fio via Wi-Fi e a exibição dos dados em um dashboard web desenvolvido com Streamlit, acessível em tempo real por dispositivos conectados à mesma rede local. A interface

apresentou os dados brutos em formato de data frame estruturado e gerou gráficos dinâmicos de monitoramento de ondas e de ventos, permitindo a identificação visual imediata de variações e tendências temporais. Desafios técnicos relativos à latência da transmissão Wi-Fi, à sincronização de dados e à estabilidade da interface foram enfrentados e superados ao longo do desenvolvimento. O trabalho demonstrou a viabilidade de sistemas de monitoramento distribuídos de baixo custo, com transmissão sem fio e interface web responsiva, para aplicações em segurança de reservatórios e lagos de barragens.

C.4 COORIENTAÇÃO X — ANA ALICE NOGUCHI FRANÇA | PIBIC JR 2024–2025

C.4.1 Materiais e Métodos

A investigação explorou a aplicação de uma técnica óptica não intrusiva, fundamentada na Lei de Snell-Descartes, para determinação do perfil de roll waves em escoamento de Carbopol (100 L). O princípio baseia-se na refração da luz na interface ar–fluido: quando a superfície livre encontra-se ondulada, cada ponto da interface apresenta uma normal distinta, modificando localmente o ângulo de refração e produzindo distorções na imagem de um padrão de referência posicionado no fundo do canal. Para esse fim, um padrão quadriculado de xadrez (espaçamento de 1 cm) foi fixado internamente ao canal experimental de inclinação regulável. Após o estabelecimento do escoamento laminar, perturbações mecânicas controladas induziram as roll waves. Em uma fase inicial, imagens foram capturadas com câmera de celular em modo câmera-lenta e analisadas no software Tracker; na fase final, empregou-se câmera de alta velocidade (Grasshopper3 GS3-U3-23S6M) posicionada verticalmente sobre o canal em tripé calibrado.

C.4.2 Resultados e Discussão

A análise no software Tracker confirmou a extração quantitativa de parâmetros cinemáticos das ondas: o tempo de trânsito entre pontos de referência do tabuleiro permitiu estimar a velocidade de propagação das roll waves, gerando gráficos de deslocamento em função do tempo com boa resolução temporal para o modo câmera-lenta. As imagens da câmera de alta velocidade evidenciaram de forma nítida a

progressão sequencial da crista das ondas e a deformação do padrão quadriculado associada a cada configuração de superfície. Verificou-se que a magnitude da distorção óptica correlaciona-se diretamente com a inclinação e amplitude locais da superfície livre, confirmando a base teórica prevista pela Lei de Snell-Descartes. A metodologia demonstrou-se eficaz, não invasiva e de baixo custo operacional, com perspectiva de desenvolvimento futuro por meio de técnicas de reconstrução tridimensional da superfície a partir de campos de deformação óptica.

C.5 COORIENTAÇÃO XI — EMILY VITÓRIA DE OLIVEIRA | PIBIC JR 2024–2025

C.5.1 Materiais e Métodos

O trabalho aplicou a técnica de reflexão óptica com triangulação a laser para medição não intrusiva do perfil da superfície livre em escoamento de Carbopol (100 L). Um ponteiro laser colimado, fixado em suporte ajustável sobre o canal experimental de inclinação regulável, incidiu sobre a superfície fluida, produzindo um ponto refletido cujo deslocamento lateral, capturado por câmera posicionada em ângulo, fornece informação direta sobre a variação de altura da superfície. Um aparato de medição composto por papel milimetrado montado em suporte metálico serviu como referência de calibração e escala. O processamento dos dados foi realizado em duas abordagens: (i) rastreamento do ponto refletido no software Tracker (incluindo rastreamento automático e análise de vetores de velocidade); e (ii) programação em Python com as bibliotecas OpenCV, NumPy e Matplotlib, empregando o algoritmo de Fluxo Óptico de Lucas-Kanade para estimar o deslocamento subpixel do ponto de luz entre quadros consecutivos.

C.5.2 Resultados e Discussão

Os primeiros experimentos identificaram o fenômeno de múltipla reflexão nas paredes de vidro do canal, contornado pelo foco exclusivo no ponto de reflexão primário. A análise via Tracker gerou gráficos de deslocamento do ponto de laser em função do tempo que revelam, com precisão visual, o perfil de passagem de uma roll wave: o ponto refletido apresenta deslocamento abrupto na passagem da frente da onda, seguido de retorno gradual no dorso. A abordagem por Fluxo Óptico em Python

produziu resultados quantitativos equivalentes, com a vantagem de automação do processamento e exportação estruturada dos dados. O resultado central do trabalho foi a obtenção de gráficos fidedignos que relacionam o deslocamento vertical do ponto refletido com o tempo, constituindo uma representação direta do perfil temporal das roll waves. A técnica mostrou-se não intrusiva, precisa e acessível, configurando-se como alternativa eficaz às metodologias de alto custo para o estudo de escoamentos de fluidos não Newtonianos.

C.6 COORIENTAÇÃO XII — JOÃO PEDRO DANTAS PEREIRA | PIBIC JR 2024–2025

C.6.1 Materiais e Métodos

O trabalho investigou a viabilidade de sensores ultrassônicos HC-SR04 (frequência nominal 40 kHz) integrados a microcontroladores Arduino UNO R3 para medição não intrusiva de roll waves em canal de Carbopol com altura útil aproximada de 160 mm e inclinação ajustável. O método de tempo de voo (TOF) — $d = (v \cdot t)/2$, com $v \approx 343$ m/s a 20 °C — foi empregado para calcular a distância até a superfície livre. A calibração em bancada utilizou blocos de concreto de 5 mm de espessura como anteparos a múltiplas distâncias, determinando a faixa ótima de operação, os limites mínimo e máximo de detecção e a abertura angular efetiva do cone acústico. O código do Arduino foi ajustado para restringir o alcance máximo a 500 mm e aplicar correções de offset na equação de cálculo. Um osciloscópio virtual, desenvolvido em Python com as bibliotecas pyserial e matplotlib, permitiu aquisição, visualização e registro em tempo real das séries temporais.

C.6.2 Resultados e Discussão

A calibração em bancada confirmou que a faixa de operação mais estável situa-se em torno de 500 mm, com desvio médio inferior a 2 mm ao longo de 1000 medições consecutivas a 12 Hz — resultado que valida a confiabilidade metrológica do dispositivo nessa janela operacional. A caracterização do cone de emissão revelou abertura efetiva entre 150 mm e 200 mm, com variabilidade atribuída ao lote de fabricação: sensores mais recentes apresentaram feixe mais disperso, com maior

suscetibilidade a reflexões laterais. Durante os ensaios no canal, oscilações periódicas da altura da lâmina fluida, compatíveis com as roll waves descritas na literatura, foram registradas pelas séries temporais do osciloscópio virtual, distinguindo claramente sinais brutos e séries com filtragem por média móvel. O sistema demonstrou desempenho robusto, confiabilidade metrológica e elevado potencial de aplicação em hidráulica experimental e em contextos didáticos, com perspectivas de aprimoramento via filtragem digital avançada e integração com modelos numéricos de instabilidade em fluidos não Newtonianos.