

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

EVANDRO FERNANDES DA CUNHA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM APARATO EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DE
INSTABILIDADE EM SUPERFÍCIE LIVRE COM FLUIDO NÃO-NEWTONIANO**

Ilha Solteira
2018

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

EVANDRO FERNANDES DA CUNHA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM APARATO EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DE
INSTABILIDADE EM SUPERFÍCIE LIVRE COM FLUIDO NÃO-NEWTONIANO**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
do Campus de Ilha Solteira – UNESP como
parte dos requisitos para obtenção do título
de Doutor em Engenharia Mecânica.
Especialidade: Ciências Térmicas

Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel
Orientador
Prof. Dr. Cláudio Kitano
Coorientador

Ilha Solteira
2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C972i Cunha, Evandro Fernandes da.
Implementação de um aparato experimental para medição de instabilidade em superfície livre com fluido não-Newtoniano / Evandro Fernandes da Cunha.
-- Ilha Solteira: [s.n.], 2018
225 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Térmicas, 2018

Orientador: Geraldo de Freitas Maciel
Coorientador: Cláudio Kitano
Inclui bibliografia

1. *Roll waves*. 2. Fluidos não-Newtonianos. 3. Técnicas fotométricas. 4. Técnicas ultrassônicas. 5. Superfície livre.


Raiane da Silva Santos

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Implementação de um aparato experimental para medição de instabilidade em superfície livre com fluido não-newtoniano

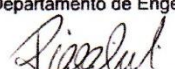
AUTOR: EVANDRO FERNANDES DA CUNHA
ORIENTADOR: GERALDO DE FREITAS MACIEL
COORIENTADOR: CLAUDIO KITANO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA MECÂNICA, área: CIÊNCIAS TÉRMICAS pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. GERALDO DE FREITAS MACIEL
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. JUNO GALLEGO
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. RICARDO TOKIO HIGUTI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. TIAGO ZENKER GIRELI
Departamento de Recursos Hídricos / Universidade Estadual de Campinas


Profa. Dra. FABIANA DE OLIVEIRA FERREIRA
Departamento de Física / Universidade Federal de São Paulo

Ilha Solteira, 31 de julho de 2018

DEDICO

A minha esposa Aline de Assis Silva Cunha e ao meu filho Heitor Gabriel Silva Cunha, que foram minha motivação, e suportaram minha ausência no transcorrer deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade e condição de realizar este trabalho.

Aos meus pais Valdeci Fernandes da Cunha e Haide Costa da Cunha, que apesar das dificuldades e tempestividades, sempre me proporcionaram estudo, e através deste trabalho consegui cumprir o desejo de seus corações.

Ao meu irmão Diego Fernandes da Cunha, que como um anjo veio ao mundo, mas é privado de oportunidades e condições. Este trabalho é meu e seu!

Ao meu irmão Éverton Fernandes da Cunha, que me orgulho em vê-lo seguindo o rumo acadêmico. Sei bem que este trabalho é um exemplo a ser alcançado por ele.

Ao meu primo Eliezer Fernandes de Alcântara, por ter me acompanhado, me dado ânimo e ter-se feito sempre presente em minha vida.

Ao professor Geraldo de Freitas Maciel, uma pessoa ímpar, um educador formidável, um amigo que cultivou em mim o gosto pelo trabalho acadêmico.

Ao professor Cláudio Kitano pelo apoio, questionamentos, discussões, por tudo que me ensinou através de seu grande conhecimento técnico científico, mas também pelo seu exemplo de postura ética.

Ao professor Ricardo Tokio que juntamente com seu grupo, desempenhou um papel de suma importância para o desenvolver deste trabalho.

Aos amigos no Laboratório LH2 - André, João, Renan, Vicente, Pricilla e Sumam, pelo companheirismo, e em especial a Fabiana Oliveira e Guilherme Fiorot, companheiros desde o trabalho de mestrado, responsáveis por diversas discussões que culminaram nos resultados apresentados nesta tese.

Aos amigos da Insight Engenharia – Eduardo Boisa, José Mario e Bruno Onohara que me proporcionaram apoio, ajuda e incentivo em momentos de dificuldades.

Aos técnicos Everaldo (Departamento de Engenharia Elétrica) e Gilberto Brito (Departamento de Física e Química), pela ajuda no desenvolvimento e construção do aparato experimental.

Ao Willian Isique (Departamento de Engenharia Civil) pelas discussões abordando as caracterizações por espectrofotometria.

Ademais, a todos aqueles que de uma forma direta ou indireta proporcionaram o desenvolvimento deste trabalho.

“Ora, àquele que é poderoso para fazer tudo muito mais abundantemente além daquilo que pedimos ou pensamos, segundo o poder que em nós opera,” Efésios 3:20

RESUMO

Esta tese de doutorado traz uma abordagem experimental sobre mecanismos de geração, desenvolvimento e propagação em canal de instabilidade na superfície livre de um escoamento de fluido não-Newtoniano. Estas instabilidades, quando evoluem para um padrão estável, exibem comprimento, amplitude e celeridade bem definidos, sendo denominadas *roll waves*. Na literatura existe uma lacuna no que diz respeito às medições destes fenômenos em condições controladas de laboratório, e com pouquíssimos registros, quando presentes em eventos naturais. Assim, buscou-se neste trabalho projetar e implementar um aparato experimental operacional e de baixo custo com o objetivo de gerar e aferir tais instabilidades, sob condições controladas e sem a influência de vibrações externas (canalete posicionado sobre uma mesa inercial), seguindo metodologia de ensaio proposta e testada. O fluido teste utilizado foi o gel de carbopol 996, que apresentou boa estabilidade e propriedades reológicas aderentes ao modelo de Herschel-Bulkley, tal qual as lamelas encontradas em pés de barragens, lamelas oriundas de fluxos hiperconcentrados ou de corridas propriamente ditas. Um sistema de sucção-recalque, através de uma bomba hidráulica de cavidade progressiva, impulsionava o gel para o canal de ensaio, garantindo fluxo contínuo do material em regime de recirculação. Para gerar as instabilidades na superfície livre, foi imposta, a montante do canal, uma perturbação, por meio de um pulso de ar controlado em intensidade e frequência. Após evolução e estabilização, a onda (*roll wave*) era aferida por meio de sistema de medição ultrassônico na configuração de pulso-eco e, seguindo metodologia inovadora proposta nesta tese, por meio de técnica fotométrica em função da absorção luminosa de um corante (azul de metileno) adicionado ao fluido teste em escoamento. Para confirmação da qualidade dos resultados obtidos pela aplicação das técnicas de medição experimental, foram feitas confrontações entre as técnicas experimentais propostas e entre estas e um modelo numérico, desenvolvido pelo grupo de pesquisa. Por fim, foram testados dois estudos de caso de formação e propagação de *roll waves* no canal, o primeiro visando a obtenção e tratamento das amplitudes em diversos pontos ao longo do canal, e, no segundo, a influência da frequência de perturbação sobre a amplitude da *roll wave*, todos para cenários experimentais com números de Froude superiores ao Froude mínimo, condição necessária à geração do fenômeno.

Palavra-chave – *Roll waves*. Fluidos não-Newtonianos. Técnicas fotométricas. Técnicas ultrassônicas. Superfície livre.

ABSTRACT

This doctoral thesis brings an experimental approach on generation, development and propagation mechanisms of instabilities free-surface flows of a non-Newtonian fluid. When these instabilities evolve to a stable pattern, they display well-defined length, amplitude and celerity, being denominated as roll waves. There is a great gap in literature concerning experimental data. Few experiments are found relating laboratory measurements of these phenomena in controlled conditions; this is also true when it comes to in situ measurements from natural events. Thus, the aim of this project was to design and implement a low cost operational experimental apparatus to generate and measure such instabilities under controlled conditions, isolated from external vibration influences. This project follows a previous methodology developed which was tested and approved. Carbopol gel 996 was used as test fluid, presenting good stability and rheological properties matching to Herschel-Bulkley model, oftenly used for modeling industrial sludge, slurry fluids, natural mud, among others. A hydraulic circuit was installed in which a progressive cavity hydraulic pump pushed the gel to the inlet of the testing channel, ensuring continuous flow of material, capturing the fluid at the channel outlet. A free-surface disturbance was imposed to the flow through a controlled pulse of air (intensity and frequency) on the upstream flow to produce the free-surface instabilities. After evolution and stabilization, the wave (roll wave) was measured through ultrasonic measurement system in the pulse-echo configuration and also through photometric technique using light absorption by a dye (methylene blue) added to the test fluid. Confrontations of the experimental data were made among the proposed experimental techniques and also with numerical simulations developed by the research group in order to assess the quality of the results obtained by the application of the experimental measurement techniques. Lastly, two case studies of formation and propagation of roll waves were tested: the first one aimed to obtain and process the amplitudes in several points along the channel; the second one, the influence of frequency of disturbance over the amplitude of the roll wave was studied. All the experimental scenarios were tested for Froude number over the minimum value necessary for the generation of the phenomenon.

Key Words – *Roll waves*. Non-Newtonian fluids. Photometric Techniques. Ultrasonic Techniques. Free Surface.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquema do problema das roll waves.....	38
Figura 2 - Seção choque de absorção/espalhamento.	47
Figura 3 - Absorbância em série de camadas.	50
Figura 4 - Transmitância/Absorbância.	51
Figura 5 - Faixa linear e não linear da concentração pela absorbância.	51
Figura 6 - Deflexão do feixe laser.	53
Figura 7 - Traçado do raio em meio estratificado.	54
Figura 8 - Transmitância em polarização perpendicular e paralela.	57
Figura 9 - Formas de visualização da onda.	61
Figura 10 - Esquema de funcionamento do aparato experimental.	62
Figura 11 - Esquema do aparato experimental em planta.	63
Figura 12 - Aparato experimental em vista isométrica.....	64
Figura 13 - Canal de ensaios em vista isométrica. (a) Condição inicial do canal de ensaios. (b) Detalhe da armação metálica, fundo de vidro e paredes de acrílico do canal de ensaios.....	65
Figura 14 - Detalhe da caixa de estagnação em vista isométrica.	66
Figura 15 - Mesa inercial em vista isométrica. (a) Detalhe da armação metálica. (b) Detalhe do bloco de concreto incorporado à mesa.	66
Figura 16 - Dispositivo anti-vibração em vista isométrica.....	67
Figura 17 - Esquema do sistema de inclinação. (a) Detalhe da empunhadura acoplado à porca da barra roscada. (b) Detalhe da porca da barra roscada sem empunhadura. (c) Detalhe do sistema de engrenagens e correntes. (d) Detalhe do sistema de inclinação, apresentando as barras roscadas, com o objetivo de estabilização lateral do canal.	67
Figura 18 - Esquema do sistema de manejo de fluido teste em vista isométrica com detalhamento dos itens.....	70
Figura 19 - Reservatório – tanque de armazenamento. (a) Detalhe do dispositivo de entrada no reservatório. (b) Tanque de armazenamento.	71
Figura 20 - Representação do sistema de perturbação. (a) Onda quadrada do gerador de sinais e Amplificador. (b) Amplificador (T 400, classe de operação D), 1 – Detalhe da entrada do sinal (sinal advindo do gerador de sinais), 2 – Detalhe do ajuste da frequência de corte, 3 – Detalhe do botão de aumento da potência (ganho), 4 – Conexão do alto-falante.	71
Figura 21 - Representação do sistema de perturbação. (a) Alto Falante. (b) Caixa em “V” detalhe do furo de entrada de ar na parte superior. (c) Caixa em “V” detalhe do furo da parte inferior, saída de ar. (d) Conjunto do sistema de perturbação montado.....	72
Figura 22 - Desenho do sistema ultrassônico. (a) Transdutor ultrassônico. (b) Suporte do transdutor ultrassônico. (c) Transdutor ultrassônico e suporte montados.	73
Figura 23 - Esquema do campo de medição da frente de onda ultrassônica e o ângulo de inclinação da superfície livre.....	74

Figura 24 - Escala de relação entre distância de medição e diâmetro do feixe.	75
Figura 25 - Esquema do sistema fotométrico. (a) Suporte de fixação do laser. (b) Laser. (c) Suporte de fixação do fotodetector. (d) Fotodetector. (e) Sistema fotométrico montado e fixado no canal de ensaios.....	76
Figura 26 - Esquema representativo da placa de aquisição National Instruments, modelo USB-6009. (a) Apresentação dos componentes da placa de aquisição: 1 – Guia da etiqueta de orientação dos pinos; 2 – Terminal conector; 3 – Etiqueta da pinagem; 4 – Cabo USB. (b) Pinagem da placa de aquisição: GND – Ponto de referência para o sinal; AI (0 até 7) – Canal de entrada do sinal analógico; AO (0 e 1) Canal de saída do sinal analógico; PO (0 até 7) – Entrada e Saída do sinal digital; P1 (0 até 3) - Entrada e Saída do sinal digital; PFI 0 – Gatilho (saída digital), contador de eventos; +2.5 V – Sinal de referência; +5 V Sinal de referência..	77
Figura 27 - Configuração da faixa de tensão elétrica de aquisição.	78
Figura 28 - Configuração entre a placa de aquisição, tela de apresentação e gravação do sinal.	79
Figura 29 - Interface de apresentação software Brookfield, modelo Rheo 2000, versão 2.6. 1 – Block-editor: Bloco de edição da análise reométrica almejada; 2 – Sequence-editor: Edição para análise sequenciais de blocos distintos; 3 – Measure/Analysis: Carregamento de blocos editados; 4 – Exit RHEO: Sair do programa.	80
Figura 30 - Interface de configuração software Brookfield, Modelo Rheo 2000, Versão 2.6. 1 – Mode: Escolha do tipo de análise à ser utilizada (CSS ou CSR); 2 – Measuringsystem: Escolha do spindle utilizado na análise reométrica.; 3 – Primary ramp- new step: Escolha do passo (incremento de tempo); 4 – Primary unit: Escolha da unidade; 5 – Lin/Log: Escolha do reograma plotado (linear ou logaritmo); 6 – Auto regr: Escolha de auto-regressão para o modelo reológico que mais se aproxima da curva reológica obtida; 7 – Step Time, #MP: Escolha do tempo de análise reométrica e número de pontos do reograma; 8 – Startvalue: Escolha do valor final para a variável configurada; 10 – Set step: Finalização do passo; 11 – Save Block: Salvar as configuração para este bloco; 12 – Gráfico: Gráfico que possibilita visualizar as configurações estabelecidas no bloco editor.....	80
Figura 31 - Interface de configuração software <i>Brookfield</i> , Modelo Rheo 2000, Versão 2.6. 1 – <i>Open communication</i> : Comunicação com o reômetro; 2 – <i>Load program-file</i> : Efetua (carrega) as configurações para análise reométrica; 3 – <i>Show program-file</i> : mostra em tela as configurações que serão executadas; 4 – <i>Start</i> : Inicia a análise; 5 – <i>Stop</i> : Finaliza a análise em execução.	81
Figura 32 - Interface de configuração software <i>Brookfield</i> , Modelo Rheo 2000, Versão 2.6. 1 – <i>Calculate regression</i> : Apresenta uma regressão numérica da curva reométrica para um modelo reológico com maior correlação estatística; 2 – <i>Analysis-results</i> : Apresenta uma interface que mostra os parâmetros reométrico da curva; 3 – <i>Data-grid</i> : Apresenta uma interface que mostra os valores obtidos ao longo do tempo para todas as variáveis analisadas em forma de tabela.	82
Figura 33 - Esquema representativo da calibração do ultrassom, observado na saída do canal.	84
Figura 34 - Fluxograma de caracterização do fluido teste utilizando o espectrofotômetro.....	85
Figura 35 - Fluxograma de caracterização do fluido teste no canal de ensaios.....	86
Figura 36 - Esquema representativo do aparato para variar a lâmina de fluido teste aferida pelo laser.....	87

Figura 37 - Fluxograma do tratamento de dados das amplitudes das ondas.	90
Figura 38 - Representação de W12 (12 ondas – roll waves). W1 – Onda 1. W2 – Onda 2. W11 – Onda 11. W12 – Onda 12. Input no canal – rotação 475 RPM e 5 graus de inclinação. Sistema de medição ultrassônico.....	90
Figura 39 – Exemplo de representação de W12 (1 onda – roll waves) com pontos de erros. Input no canal – rotação 475 RPM e 5 graus de inclinação. Sistema de medição – ultrassônico.	92
Figura 40 - Representação de W12 (1 ondas – roll waves) sem pontos de erros. Input no canal – rotação 475 RPM e 5 graus de inclinação. Sistema de medição – ultrassônico.....	93
Figura 41 - Representação de W12 (12 ondas – roll waves). Input no canal – rotação 475 RPM e 5 graus de inclinação. Sistema de medição – ultrassônico.....	94
Figura 42 - Curva de calibração do sistema ultrassônico.....	99
Figura 43 - Perfil Característico de roll wave média da segunda campanha experimental, apresentando cada instante de medição (66 pontos, 1 a cada 0,01 segundo) – Sistema de Medição Ultrassônico.....	101
Figura 44 - Caracterização do desvio padrão, apresentado em cada instante de medição (66 pontos, 1 a cada 0,01 segundo) – Sistema de Medição Ultrassônico.....	102
Figura 45 - Perfil das roll waves aferidas pelo sistema ultrassônico.....	103
Figura 46 - Variação da absorbância em função da concentração de azul de metileno.	105
Figura 47 - Curvas de absorbância em função do comprimento de onda para diversas CAzM, configuração inicial.	107
Figura 48- Curvas de absorbância em função do comprimento de onda, para diversas CAzM, configuração final.....	108
Figura 49 - Evolução de tensão elétrica através da adição de azul de metileno.....	109
Figura 50 - Estudo da precisão do sistema fotométrico através das diferentes tensões elétricas dos níveis da sonda, no tempo. Input no aparato experimental de 750 RPM de rotação da bomba hidráulica e 5 graus de inclinação do canal.	110
Figura 51 - Estudo da precisão do sistema fotométrico através das diferentes tensões elétrica dos níveis da sonda, no tempo. Input no aparato experimental de 475 RPM de rotação da bomba hidráulica e 5 graus de inclinação do canal.	111
Figura 52 - Retas de calibração para determinação dos fatores de correção.....	113
Figura 53 - Roll waves obtidas a partir dos fatores de correção. Input no aparato experimental de 475 RPM de rotação da bomba hidráulica e 5 graus de inclinação do canal. Sistema de perturbação em 1,5 Hz. Obtidas pelo Sistema Fotométrico no ponto P1.....	114
Figura 54 - Retas de calibração para determinação dos fatores de correção.....	115
Figura 55 - Caracterização de 1 roll wave apresentando cada instante de medição (66 pontos, 1 a cada 0,01 segundo) – sistema de medição fotométrico.	116
Figura 56 - Caracterização do desvio padrão apresentado em cada instante de medição (66 pontos, 1 a cada 0,01 segundo) – sistema de medição ultrassônico.....	117
Figura 57 - Perfil das roll waves aferidas pelo sistema fotométrico.	117
Figura 58 - Perfil das roll waves simuladas pelo modelo numérico 1D.....	118

Figura 59 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelo sistema ultrassônico (linha de cor azul) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 225 rotações por minuto. (a) <i>Roll waves</i> – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) <i>Roll wave</i> – 1 onda em 0,65 segundos.	123
Figura 60 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelo sistema ultrassônico (linha de cor azul) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 275 rotações por minuto. (a) <i>Roll waves</i> – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) <i>Roll wave</i> – 1 onda em 0,65 segundos.	124
Figura 61 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelo sistema ultrassônico (linha de cor azul) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 325 rotações por minuto. (a) <i>Roll waves</i> – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) <i>Roll wave</i> – 1 onda em 0,65 segundos.	125
Figura 62 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelo sistema ultrassônico (linha de cor azul) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 375 rotações por minuto. (a) <i>Roll waves</i> – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) <i>Roll wave</i> – 1 onda em 0,65 segundos.	126
Figura 63 - Perfil de <i>Roll waves</i> aferido pelo sistema ultrassônico (linha de cor azul) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 425 rotações por minuto. (a) <i>Roll waves</i> – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) <i>Roll wave</i> – 1 onda em 0,65 segundos.	127
Figura 64 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelo sistema ultrassônico (linha de cor azul) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 475 rotações por minuto. (a) <i>Roll waves</i> – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) <i>Roll wave</i> – 1 onda em 0,65 segundos.	128
Figura 65 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelo sistema fotométrico (linha de cor vermelha) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela) Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 225 rotações por minuto. (a) <i>Roll waves</i> – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) <i>Roll wave</i> – 1 onda em 0,65 segundos.	129
Figura 66 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelo sistema fotométrico (linha de cor vermelha) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 275 rotações por minuto. (a) <i>Roll waves</i> – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) <i>Roll wave</i> – 1 onda em 0,65 segundos.	130
Figura 67 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelo sistema fotométrico (linha de cor vermelha) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 325 rotações por minuto. (a) <i>Roll waves</i> – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) <i>Roll wave</i> – 1 onda em 0,65 segundos.	131

Figura 68 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelo sistema fotométrico (linha de cor vermelha) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 375 rotações por minuto. (a) <i>Roll waves</i> – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) <i>Roll wave</i> – 1 onda em 0,65 segundos.	132
Figura 69 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelo sistema fotométrico (linha de cor vermelha) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 425 rotações por minuto. (a) <i>Roll waves</i> – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) <i>Roll wave</i> – 1 onda em 0,65 segundos.	133
Figura 70 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelo sistema fotométrico (linha de cor vermelha) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 475 rotações por minuto. (a) <i>Roll waves</i> – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) <i>Roll wave</i> – 1 onda em 0,65 segundos.	134
Figura 71 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelos sistemas fotométrico (linha de cor vermelha) e ultrassônico (linha de cor azul). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 225 rotações por minuto. (a) <i>Roll waves</i> – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) <i>Roll wave</i> – 1 onda em 0,65 segundos.	135
Figura 72 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelos sistemas fotométrico (linha de cor vermelha) e ultrassônico (linha de cor azul). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 275 rotações por minuto. (a) <i>Roll waves</i> – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) <i>Roll wave</i> – 1 onda em 0,65 segundos.....	136
Figura 73 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelos sistemas fotométrico (linha de cor vermelha) e ultrassônico (linha de cor azul). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 325 rotações por minuto. (a) <i>Roll waves</i> – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) <i>Roll wave</i> – 1 onda em 0,65 segundos.....	137
Figura 74 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelos sistemas fotométrico (linha de cor vermelha) e ultrassônico (linha de cor azul). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 375 rotações por minuto. (a) <i>Roll waves</i> – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) <i>Roll wave</i> – 1 onda em 0,65 segundos.	138
Figura 75 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelos sistemas fotométrico (linha de cor vermelha) e ultrassônico (linha de cor azul). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 425 rotações por minuto. (a) <i>Roll waves</i> – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) <i>Roll wave</i> – 1 onda em 0,65 segundos.	139
Figura 76 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelos sistemas fotométrico (linha de cor vermelha) e ultrassônico (linha de cor azul). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 475 rotações por minuto. (a) <i>Roll waves</i> – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) <i>Roll wave</i> – 1 onda em 0,65 segundos.	140
Figura 77 - Perfil representativo e genérico de uma <i>roll wave</i> , sem escala.	141
Figura 78 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelo sistema ultrassônico. Caracterização feita na primeira campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 14 graus e a bomba hidráulica a 400 rotações por minuto. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m); Ponto 2 – 2,00 (m); Ponto 3 – 1,90 (m); Ponto 4 – 1,80 (m); Ponto 5 – 1,70 (m); Ponto 6 – 1,60 (m); Ponto 7 – 1,50 (m); Ponto 8 – 1,40 (m); Ponto 9 – 1,30 (m); Ponto 10 – 1,20 (m); Ponto 11 – 1,10 (m); Ponto 12 – 1,00 (m).....	142

Figura 79 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelo sistema ultrassônico. Caracterização feita na primeira campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 14 graus e a bomba hidráulica a 420 rotações por minuto. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m); Ponto 2 – 2,00 (m); Ponto 3 – 1,90 (m); Ponto 4 – 1,80 (m); Ponto 5 – 1,70 (m); Ponto 6 – 1,60 (m); Ponto 7 – 1,50 (m); Ponto 8 – 1,40 (m); Ponto 9 – 1,30 (m); Ponto 10 – 1,20 (m); Ponto 11 – 1,10 (m); Ponto 12 – 1,00 (m).....	143
Figura 80 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelo sistema ultrassônico. Caracterização feita na primeira campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 14 graus e a bomba hidráulica a 440 rotações por minuto. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m); Ponto 2 – 2,00 (m); Ponto 3 – 1,90 (m); Ponto 4 – 1,80 (m); Ponto 5 – 1,70 (m); Ponto 6 – 1,60 (m); Ponto 7 – 1,50 (m); Ponto 8 – 1,40 (m); Ponto 9 – 1,30 (m); Ponto 10 – 1,20 (m); Ponto 11 – 1,10 (m); Ponto 12 – 1,00 (m).....	144
Figura 81 - Perfil de <i>roll wave</i> , aferido pelo sistema ultrassônico. Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 225 rotações por minuto. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m), Ponto 2 – 2,00 (m) e Ponto 3 – 1,90 (m).....	145
Figura 82 - Perfil de <i>roll wave</i> , aferido pelo sistema ultrassônico. Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 275 rotações por minuto. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m), Ponto 2 – 2,00 (m) e Ponto 3 – 1,90 (m).....	146
Figura 83 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelo sistema ultrassônico. Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 325 rotações por minuto. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m), Ponto 2 – 2,00 (m) e Ponto 3 – 1,90 (m).....	147
Figura 84 - Perfil de <i>roll wave</i> aferido pelo sistema ultrassônico. Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 375 rotações por minuto. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m); Ponto 2 – 2,00 (m); Ponto 3 – 1,90 (m); Ponto 4 – 1,80 (m); Ponto 5 – 1,70 (m); Ponto 6 – 1,60 (m); Ponto 7 – 1,50 (m); Ponto 8 – 1,40 (m); Ponto 9 – 1,30 (m).	148
Figura 85 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelo sistema ultrassônico. Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 425 rotações por minuto. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m), Ponto 2 – 2,00 (m) e Ponto 3 – 1,90 (m).....	149
Figura 86 - Perfil de <i>roll waves</i> aferido pelo sistema ultrassônico. Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 475 rotações por minuto. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m), Ponto 2 – 2,00 (m) e Ponto 3 – 1,90 (m).....	150
Figura 87 - Amplitude de <i>Roll Waves</i> aferido pelo Sistemas Ultrassônico caracterizando diversas amplitudes em várias frequências do Sistema de Perturbação.	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores típicos da seção choque e absorbtividade molar.	49
Tabela 2 - Especificações técnicas do transdutor ultrassônico RPS – 401A.	73
Tabela 3 - Especificação técnica do fotodetector Newport, modelo 818-SL	77
Tabela 4 - Precisão dos instrumentos utilizados na caracterização da configuração do canal de ensaios. * Tempo de reação calculado para a pessoa encarregada de efetuar as medições com o cronômetro.	83
Tabela 5 - Detalhamento do protocolo de identificação dos ensaios e resultados.	87
Tabela 6 - Detalhamento do protocolo de identificação dos ensaios e resultados – velocidade média de superfície livre.	88
Tabela 7 - Detalhamento do protocolo de identificação dos ensaios e resultados - Vazão do escoamento laminar através da metodologia gravimétrica.	89
Tabela 8 - Identificação e realocação das ondas em uma base de tempo comum. Ponto – Identificação de cada ponto em função da base temporal. T(s) – Tempo em segundos. W(1 até 12) – Identificação das ondas.	91
Tabela 9 - – Identificação e realocação das ondas em uma base de tempo comum. Ponto – Identificação de cada ponto em função da base temporal. T(s) – Tempo em segundos. W(1 até 12 em milímetros) – Identificação das ondas. Média 12W (mm) – Média de 12 ondas em milímetros. Desvio padrão de 12 ondas em milímetros.	93
Tabela 10 - Parâmetros reológicos da primeira campanha.	95
Tabela 11 - Parâmetros reológicos da segunda campanha.	96
Tabela 12 - Parâmetros Hidráulicos da Primeira Campanha.	96
Tabela 13 - Parâmetros Hidráulicos da Segunda Campanha.	97
Tabela 14 - Parâmetros calculados a partir dos ensaios da primeira campanha.	97
Tabela 15 - Parâmetros calculados a partir dos ensaios da segunda campanha.	97
Tabela 16 - Parâmetros Gerais do Sistema da Calibração Ultrassônico.	98
Tabela 17 - Parâmetros finais do sistema de medição ultrassônico.	100
Tabela 18 - Parâmetros estatísticos do sistema de medição ultrassônico.	100
Tabela 19 - Nível de absorbância em função da relação do comprimento de onda, CC_{arb} e C_{AzM}	104
Tabela 20 - Relação dos parâmetros entre espectrofotômetro e canal de ensaios.	106
Tabela 21 - Aumento da tensão elétrica em milivolt, representando 1 milímetro, em função da adição do azul de metileno no canal de escoamento.	109
Tabela 22 - Estudo da precisão do sistema fotométrico através das diferentes tensões elétrica dos níveis da sonda, no tempo. Input no aparato experimental de 750 RPM de rotação da bomba hidráulica e 5 graus de inclinação do canal.	111

Tabela 23 - Estudo da precisão do sistema fotométrico através das diferentes tensões elétrica dos níveis da sonda, no tempo. Input no aparato experimental de 475 RPM de rotação da bomba hidráulica e 5 graus de inclinação do canal.	112
Tabela 24 - Parâmetros gerais do sistema de medição fotométrico.	115
Tabela 25 - Relação Comparativa entre Velocidade Média do Escoamento.	122
Tabela 26 - Perfil de caracterização quantitativa das roll waves do ensaio C2G5R225 – Comparativo sistema ultrassônico e modelo numérico 1D.	123
Tabela 27 - Perfil de Caracterização quantitativa das roll waves do ensaio C2G5R275 – Comparativo sistema ultrassônico e modelo numérico 1D.	124
Tabela 28 - Perfil de caracterização quantitativa das roll waves do ensaio C2G5R325 – Comparativo sistema ultrassônico e modelo numérico 1D.	125
Tabela 29 - Perfil de caracterização quantitativa das roll waves do ensaio C2G5R375 – Comparativo sistema ultrassônico e modelo numérico 1D.	126
Tabela 30 - Perfil de caracterização quantitativa das roll waves do ensaio C2G5R425 – Comparativo sistema ultrassônico e modelo numérico 1D.	127
Tabela 31 - Perfil de caracterização quantitativa das roll waves do ensaio C2G5R475 – Comparativo sistema ultrassônico e modelo numérico 1D.	128
Tabela 32 - Perfil de caracterização quantitativa das roll waves do ensaio C2G5R225 – Comparativo sistema fotométrico e modelo numérico 1D.	129
Tabela 33 - Perfil de caracterização quantitativa das roll waves do ensaio C2G5R275 – Comparativo sistema fotométrico e modelo numérico 1D.	130
Tabela 34 - Perfil de caracterização quantitativa das roll waves do ensaio C2G5R325 – Comparativo sistema fotométrico e modelo numérico 1D.	131
Tabela 35 - Perfil de Caracterização quantitativa das roll waves do ensaio C2G5R375 – Comparativo sistema fotométrico e modelo numérico 1D.	132
Tabela 36 - Perfil de Caracterização quantitativa das roll waves do ensaio C2G5R425 – Comparativo sistema fotométrico e modelo numérico 1D.	133
Tabela 37 - Perfil de caracterização quantitativa das roll waves do ensaio C2G5R475 – Comparativo sistema fotométrico e modelo numérico 1D.	134
Tabela 38 - Perfil de caracterização quantitativa das roll waves do ensaio C2G5R225 – Comparativo do sistema fotométrico e ultrassônico.	135
Tabela 39 - Perfil de caracterização quantitativa das roll waves do ensaio C2G5R275 – Comparativo do sistema fotométrico e ultrassônico.	136
Tabela 40 - Perfil de caracterização quantitativa das roll waves do ensaio C2G5R325 – Comparativo do sistema fotométrico e ultrassônico.	137
Tabela 41 - Perfil de caracterização quantitativa das roll waves do ensaio C2G5R375 – Comparativo do sistema fotométrico e ultrassônico.	138
Tabela 42 - Perfil de caracterização quantitativa das roll waves do ensaio C2G5R425 – Comparativo do sistema fotométrico e ultrassônico.	139
Tabela 43 - Perfil de caracterização quantitativa das roll waves do ensaio C2G5R475 – Comparativo do sistema fotométrico e ultrassônico.	140

Tabela 44 - Caracterização do perfil das <i>roll waves</i> no espaço – Apresentação dos segmentos de retas em milímetros e ângulos em graus decimais – Comparativo do sistema fotométrico e ultrassônico.....	141
Tabela 45 - Perfil de caracterização quantitativa das <i>roll waves</i> do ensaio C2G5R475 – Comparativo de valores de lâmina baixa e amplitude em milímetros. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m); Ponto 2 – 2,00 (m); Ponto 3 – 1,90 (m); Ponto 4 – 1,80 (m); Ponto 5 – 1,70 (m); Ponto 6 – 1,60 (m); Ponto 7 – 1,50 (m); Ponto 8 – 1,40 (m); Ponto 9 – 1,30 (m); Ponto 10 – 1,20 (m); Ponto 11 – 1,10 (m); Ponto 12 – 1,00 (m).	143
Tabela 46 - Perfil de caracterização quantitativa das <i>roll waves</i> do ensaio C1G14R420 – Comparativo de valores de lâmina baixa e amplitude em milímetros. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m); Ponto 2 – 2,00 (m); Ponto 3 – 1,90 (m); Ponto 4 – 1,80 (m); Ponto 5 – 1,70 (m); Ponto 6 – 1,60 (m); Ponto 7 – 1,50 (m); Ponto 8 – 1,40 (m); Ponto 9 – 1,30 (m); Ponto 10 – 1,20 (m); Ponto 11 – 1,10 (m); Ponto 12 – 1,00 (m).	144
Tabela 47 - Perfil de caracterização quantitativa das <i>roll waves</i> do ensaio C1G14R420 – Comparativo de valores de lâmina baixa e amplitude em milímetros. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m); Ponto 2 – 2,00 (m); Ponto 3 – 1,90 (m); Ponto 4 – 1,80 (m); Ponto 5 – 1,70 (m); Ponto 6 – 1,60 (m); Ponto 7 – 1,50 (m); Ponto 8 – 1,40 (m); Ponto 9 – 1,30 (m); Ponto 10 – 1,20 (m); Ponto 11 – 1,10 (m); Ponto 12 – 1,00 (m).	145
Tabela 48 - Perfil de caracterização quantitativa das <i>roll waves</i> do ensaio C2G5R225 – Comparativo de valores de lâmina baixa e amplitude em milímetros. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m), Ponto 2 – 2,00 (m) e Ponto 3 – 1,90 (m).	146
Tabela 49 - Perfil de Caracterização quantitativa das <i>roll waves</i> do ensaio C2G5R275 – Comparativo de valores de lâmina baixa e amplitude em milímetros. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m), Ponto 2 – 2,00 (m) e Ponto 3 – 1,90 (m).	147
Tabela 50 - Perfil de caracterização quantitativa das <i>roll waves</i> do ensaio C2G5R325 – Comparativo de valores de lâmina baixa e amplitude em milímetros. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m), Ponto 2 – 2,00 (m) e Ponto 3 – 1,90 (m).	148
Tabela 51 - Perfil de Caracterização quantitativa das <i>roll waves</i> do ensaio C2G5R375 – Comparativo de valores de lâmina baixa e amplitude em milímetros. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m); Ponto 2 – 2,00 (m); Ponto 3 – 1,90 (m); Ponto 4 – 1,80 (m); Ponto 5 – 1,70 (m); Ponto 6 – 1,60 (m); Ponto 7 – 1,50 (m); Ponto 8 – 1,40 (m); Ponto 9 – 1,30 (m).....	149
Tabela 52 - Perfil de caracterização quantitativa das <i>roll waves</i> do ensaio C2G5R425 – Comparativo de valores de lâmina baixa e amplitude em milímetros. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m), Ponto 2 – 2,00 (m) e Ponto 3 – 1,90 (m).	150
Tabela 53 - Perfil de caracterização quantitativa das <i>roll waves</i> do ensaio C2G5R475 – Comparativo de valores de lâmina baixa e amplitude em milímetros. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m), Ponto 2 – 2,00 (m) e Ponto 3 – 1,90 (m).	151

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVOS	23
1.2	JUSTIFICATIVA	24
1.3	ESTRUTURA DA TESE.....	24
2	ESTADO DA ARTE	26
2.1	TÉCNICAS DE MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS – MEDIÇÃO DE NÍVEL	26
2.2	TÉCNICAS DE MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS – FILMES FINOS.....	27
2.2.1	Métodos Intrusivos	28
2.2.2	Métodos não Intrusivos: Técnica Fotônica - Fotoelétrica	29
2.3	APLICAÇÕES DAS TÉCNICAS EXPERIMENTAIS NA MEDIÇÃO DE <i>ROLL WAVES</i>	32
2.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE TÉCNICAS DE MEDIÇÃO UTILIZADAS NESTA TESE.....	34
3	MODELO MATEMÁTICO DA <i>ROLL WAVES</i> EM ESCOAMENTO DE FLUIDO NÃO NEWTONIANOS	36
3.1	MODELAGEM MATEMÁTICA	36
3.1.1	Modelo Reológico	36
3.1.2	Hipóteses para o Modelo Matemático	36
3.1.3	Condições de Contorno para o Modelo Matemático	37
3.2	MODELO MATEMÁTICO	37
3.2.1	Equações Governantes	37
3.2.2	Primeiro Critério de Geração	40
3.2.3	Segundo Critério de Geração	41
4	IMPLEMENTAÇÃO MATEMÁTICA DO SISTEMA FOTOMÉTRICO	42
4.1	A LEI DE BEER-LAMBERT	42
4.1.1	A Lei de Beer – Lambert Clássica	42
4.2	A LEI DE BEER – LAMBERT QUÂNTICA.....	46
4.2.1	Absorbância (A)	48
4.3	MEDIDAS DE PERFIL DE <i>ROLL WAVES</i> ATRAVÉS DA TEORIA DE ABSORÇÃO ÓPTICA	52
4.3.1	Deflexão do Feixe de Laser	52
4.3.2	Medição do Perfil de <i>Roll Waves</i> através da Absorbância	54
4.4	MEDIÇÃO DO PERFIL DE <i>ROLL WAVES</i> ATRAVÉS DO USO DE FOTODIÓDOS	59
5	MATERIAIS E MÉTODOS	62
5.1	CONCEPÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE APARATO EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DE <i>ROLL WAVES</i> EM CANAL	65
5.1.1	Canal de Ensaios	65
5.1.2	Mesa Inercial	66

5.1.3	Produção do Fluido Teste – Gel de Carbopol 996	68
5.1.4	Sistema de Manejo do Fluido Teste - Circuito Fechado	69
5.1.5	Sistema de Perturbação	71
5.1.6	Sistema Ultrassônico	72
5.1.7	Sistema Fotométrico	75
5.1.8	Sistema de Medição	77
5.2	PROTOCOLO DE CALIBRAÇÃO E DESENVOLVIMENTO	79
5.2.1	Reologia	79
5.2.2	Ensaio no Canal	82
5.2.3	Sistema Ultrassônico	83
5.2.4	Sistema Fotométrico	84
5.3	PROTOCOLO DE IDENTIFICAÇÃO DOS ENSAIOS E RESULTADOS	87
5.4	TRATAMENTO DE DADOS	88
5.4.1	Velocidade na Superfície do Escoamento do Carbopol	88
5.4.2	Vazão Mássica – Metodologia Gravimétrica	88
5.4.3	Amplitude de Ondas	89
6	FASE DE TESTES COM VISTAS À DEFINIÇÃO DE METODOLOGIA DE ENSAIOS	95
6.1	REOMETRIA	95
6.1.1	Primeira Campanha de Ensaios	95
6.1.2	Segunda Campanha de Ensaios	95
6.2	AFERIÇÃO DOS PARÂMETROS NO CANAL DE ENSAIOS	96
6.2.1	Primeira Campanha de Ensaios	96
6.2.2	Segunda Campanha de Ensaios	96
6.3	PARÂMETROS CALCULADOS DO ESCOAMENTO NO CANAL DE ENSAIOS	97
6.3.1	Primeira Campanha de Ensaios	97
6.3.2	Segunda Campanha de Ensaios	97
6.4	CALIBRAÇÃO DO SISTEMA ULTRASSÔNICO	98
6.5	AMPLITUDE DAS <i>ROLL WAVES</i> – SISTEMA ULTRASSÔNICO	101
6.6	ESTUDO DO PERFIL DAS <i>ROLL WAVES</i> NO SISTEMA ULTRASSÔNICO	102
6.7	ENSAIO DE CALIBRAÇÃO DO SISTEMA FOTOMÉTRICO	103
6.7.1	Caracterização no Espectrofotômetro	103
6.7.2	Caracterização no Canal de Ensaios	106
6.8	AMPLITUDE DAS <i>ROLL WAVES</i> – SISTEMA FOTOMÉTRICO	116
6.9	ESTUDO DO PERFIL DAS <i>ROLL WAVES</i> NO SISTEMA FOTOMÉTRICO	117
6.10	SIMULAÇÃO NO MODELO NUMÉRICO 1D – IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA E PARÂMETROS DE ENTRADA	118
7	RESULTADOS DE <i>ROLL WAVES</i> E CONFRONTAÇÃO DE MEDIÇÃO POR MEIO DOS SISTEMAS ULTRASSÔNICO, FOTOMÉTRICO, E MODELO NUMÉRICO	119
7.1	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	119

7.1.1	Comparação entre Velocidades Médias de Escoamento – Sem Perturbação	119
7.1.2	Comparação entre os Sistemas de Medição Experimental e Modelo Numérico 1D - Escoamento com Perturbação	121
7.1.3	Comparação entre os Sistemas de Medição Experimental Fotométrico e Ultrassônico	121
7.2	COMPARAÇÃO ENTRE VELOCIDADES MÉDIAS DE ESCOAMENTO	122
7.3	COMPARAÇÃO DA <i>ROLL WAVE</i> ATRAVÉS DO SISTEMA ULTRASSÔNICO E O MODELO NUMÉRICO 1D	122
7.3.1	Ensaio C2G5R225	122
7.3.2	Ensaio C2G5R275	123
7.3.3	Ensaio C2G5R325	124
7.3.4	Ensaio C2G5R375	125
7.3.5	Ensaio C2G5R425	126
7.3.6	Ensaio C2G5R475	127
7.4	COMPARAÇÃO ENTRE O SISTEMA FOTOMÉTRICO E O MODELO NUMÉRICO 1D	128
7.4.1	Ensaio C2G5R225	128
7.4.2	Ensaio C2G5R275	129
7.4.3	Ensaio C2G5R325	130
7.4.4	Ensaio C2G5R375	131
7.4.5	Ensaio C2G5R425	132
7.4.6	Ensaio C2G5R475	133
7.5	COMPARAÇÃO ENTRE O SISTEMA FOTOMÉTRICO E O SISTEMA ULTRASSÔNICO	134
7.5.1	Ensaio C2G5R225	134
7.5.2	Ensaio C2G5R275	135
7.5.3	Ensaio C2G5R325	136
7.5.4	Ensaio C2G5R375	137
7.5.5	Ensaio C2G5R425	138
7.5.6	Ensaio C2G5R475	139
7.6	DETALHAMENTO COMPARATIVO DO PERFIL DA <i>ROLL WAVE</i> NO DOMÍNIO DO ESPAÇO, AFERIDO PELO SISTEMA DE MEDIÇÃO FOTOMÉTRICO E ULTRASSÔNICO	140
7.7	CARACTERIZAÇÃO DE <i>ROLL WAVES</i> EM DIVERSOS PONTOS DE MEDIÇÃO - SISTEMA ULTRASSÔNICO	142
7.8	CARACTERIZAÇÃO DA <i>ROLL WAVE</i> EM RELAÇÃO A FREQUÊNCIA DE CORTE - SISTEMA DE MEDIÇÃO ULTRASSÔNICO	151
8	DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS DA TESE	152
8.1	SISTEMA DE MANEJO DO FLUIDO TESTE E SUA CARACTERIZAÇÃO REOMÉTRICA	152
8.2	SISTEMA DE PERTURBAÇÃO	153
8.3	SISTEMA DE MEDIÇÃO DE EXPERIMENTAL	153
8.4	SISTEMA DE AQUISIÇÃO E DE TRATAMENTO DE DADOS	155

8.5	RESULTADOS DE PERFIS DE <i>ROLL WAVES</i> EXPERIMENTAIS VERSUS MODELO NUMÉRICO	156
8.6	INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE PERTURBAÇÃO NA AMPLITUDE DAS <i>ROLL WAVES</i>	156
9	CONCLUSÕES	158
10	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	160
	REFERÊNCIAS.....	162
	APÊNDICE A – DETALHAMENTO CONSTRUTIVO.....	168
	APÊNDICE B – TABELA E GRÁFICOS DE MÉDIA E DESVIO PADRÃO ..	177
	APÊNDICE C – FICHA TÉCNICA DOS ENSAIOS	198

1 INTRODUÇÃO

Eventos catastróficos, como rupturas de barragens, barragens de rejeitos, inundações, secas prolongadas, deslizamentos, corridas de lamas, terremotos e ações vulcânicas, têm sido noticiados e ocupado a mídia dos últimos anos, em diversas partes do mundo e notadamente no Brasil. Trata-se de eventos que vêm ocorrendo com mais frequência em tempos de mudanças climáticas globais e que, *a priori*, têm sido mais intensos pelas ações antrópicas em alguns casos e mais presentes no nosso dia a dia pela midiaticização do evento que passamos a conviver minutos seguintes ao ocorrido.

Hoje preocupação permanente dos Estados, o assunto Desastres “Naturais”, prevenção, mitigação, reconstrução, preconiza focar (Sendai 2015-2025) ações nos âmbitos intra e intersetorial, e que deverão ser promovidas pelos Estados nos níveis local, nacional, regional e global, em quatro áreas prioritárias, quais sejam: Compreensão do risco de desastres; Fortalecimento da governança para gerenciar o risco de desastres; Investir na redução do risco de desastres para a resiliência; aumentar a preparação para desastres para uma resposta eficaz e para “Reconstruir Melhor” em recuperação, reabilitação e reconstrução.

Em particular, acidentes “naturais” envolvendo corridas de detritos e lamas, com consequências danosas sobre as comunidades atingidas, têm sido bastante reportados na mídia nos últimos anos e registrados na literatura (WISNER et al., 2004; BURTON, 2005; VILIMEK; SPILKOVA, 2009). Se a quase totalidade dos trabalhos tem focado no aspecto devastador das frentes das corridas e no zoneamento das áreas potenciais a serem atingidas, raros são aqueles que relatam o surgimento de instabilidades na superfície livre destas corridas. Essas instabilidades podem se amplificar até atingir formas estáveis, vindo a se propagar como trem de ondas com velocidade característica, denominadas na literatura como *roll waves*, cujas propriedades estão intimamente atreladas à reologia do fluido escoante e à dinâmica do escoamento (NG; MEI, 1994; COUSSOT, 1994; BALMFORTH, 2004; MACIEL et al., 2013).

Roll waves em fluidos Newtonianos (como a água) se propagam com velocidades relativamente elevadas quando comparadas a fluidos não-newtonianos (lamas, p.e), sob as mesmas condições experimentais de vazão e inclinação. Em fluidos não-Newtonianos, as *roll waves* presentes em avalanchas, *debris-flows*, corridas de lamas, etc. tendem a ter comprimentos e amplitudes de ondas maiores, podendo potencializar os danos causados sobre bens e infraestrutura, até mesmo no número de vítimas.

De modo geral, a amplitude, comprimento e velocidade de propagação das *roll waves* em superfície livre de escoamentos de fluidos não-Newtonianos em regimes laminares têm sido frequentemente estimados através de modelos matemáticos e numéricos (DRESSLER, 1949; NEEDHAM; MERKIN, 1987; DI CRISTO; VACCA, 2005; FERREIRA, 2013), tendo ainda, em contrapartida poucos trabalhos de cunho experimental presentes na literatura (TAMBURRINO; LHLE, 2013; ARANDA et al., 2016; MACIEL et al., 2017).

Em termos de experimentação física, há de se registrar o aparato experimental clássico para se medir *roll waves* em água realizado por Brock (1969) e reportado por Balmforth (2004). No âmbito de fluidos newtonianos de elevada viscosidade (glicerina) reporta-se aos trabalhos de Kaptiza (1948), Liu & Gollub (1994) e Fiorot (2012), estes últimos com desenvolvimento de um aparato experimental peculiar e uso de técnica ótica de fluorescência para medidas de *roll waves*.

Em fluidos não-Newtonianos, Coussot (1994), observou *roll waves* em misturas argilosas (fluido de Herschel-Bulkley) evoluindo em canal inclinado com geometrias distintas, porém não mediu o perfil das ondas; Tamburrino e Lhle (2013) visualizaram e registraram *roll waves* em bentonita, cujo material, segundo os autores, se ajustava ao modelo reológico de Bingham. Os autores apresentam apenas medidas globais, sem detalhamento do aparato experimental utilizado, mecanismo de geração ou controle, tampouco o perfil da onda observada. Mais recentemente (2016), esses autores (ARANDA et al., 2016) voltam a medir e a detalhar o fenômeno *roll waves*, aplicando a técnica de correlação digital de imagens.

Assim posto, esta tese de doutorado foi desenvolvida no seio do Grupo de Pesquisa RMVP – Reologia de Materiais Viscosos e Viscoplasticos, que têm envidado esforços no desenvolvimento e operacionalização de aparato experimental capaz de gerar, controlar e medir *roll waves*, tanto em escoamentos com fluidos Newtonianos altamente viscosos (FIOROT et al., 2012), a título de exemplo de Liu & Gollub (1994), quanto em fluidos não-Newtonianos (CUNHA, 2013) e recentemente Maciel et al. (2017). O grupo de pesquisa vem realizando ensaios experimentais com fluidos representativos das lamas, qual seja, solução aquosa de carbopol 996, gel que uma vez bem estabilizado apresenta propriedades reométricas semelhantes às lamas presentes em pés de barragens e corridas.

O gel fabricado apresenta comportamento reológico de Herschel-Bulkley, é transparente, e confere boa visualização de fenômenos com superfície livre quando da adição de concentração ótima de azul de metileno. Tal procedimento tem facilitado a aplicação das técnicas de medição conforme detalhado no corpo desta tese.

Esta pesquisa de doutorado centrou esforços significativos no desempenho de todo aparato experimental concebido, construído e implementado para medir *roll waves*, assim como na medição do fenômeno, em condições controladas de laboratório.

No que tange às técnicas de medição de nível, em condições controladas de laboratório, a literatura tem citado basicamente as técnicas intrusivas (capacitivas, condutivas, agulha de contato) e não intrusivas (ultrassom, fotônica, fotoluminescência, correlação digital de imagens, etc).

Para medição de nível de escoamentos de fluidos não-Newtonianos em canais, são exploradas, nesta tese, duas técnicas não intrusivas: a medida de nível utilizando os sensores ultrassônicos (MACIEL et al., 2017) e concomitantemente a fotônica/absorbância.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desta tese foi implementar um aparato experimental completo, de baixo custo e elevada performance, que garantisse geração, controle e medição de *roll waves* em condições controladas de laboratório.

Dentre os objetivos específicos mais relevantes e que constituíram o núcleo central da tese, tem-se:

- implementação, otimização e operacionalização dos diversos subsistemas constituintes do aparato experimental: sistema de sucção-recalque do fluido teste, sistema de perturbação do escoamento em canal, e sistema de aquisição e tratamento de dados acerca dos parâmetros característicos das *roll waves* evoluindo em fluido não-Newtoniano;
- realização de ensaios físicos (experimentos) em canal com fluido teste – gel de carbopol produzido para aquele fim, para diversos cenários experimentais;
- medição do fenômeno através de sensores ultrassônicos e fotoelétricos por absorbância, adaptados para aquele fim, com identificação das vantagens e desvantagens de cada técnica e análise comparativa de resultados;
- comparação de resultados experimentais com modelo matemático e simulação numérica desenvolvidos pelo grupo, e já validados em estudo de caso real.

1.2 JUSTIFICATIVA

Este trabalho vem contribuir com o preenchimento de lacuna existente na literatura, no que tange a caracterização experimental de *roll waves*. Para tal, construíram-se aparatos de medição, através dos quais implementou-se a técnica ultrassônica e desenvolveu-se um sistema de medição fotométrico.

Assim posto, pode-se creditar o ineditismo deste trabalho em duas vertentes: a primeira consiste na medição de *roll waves* de forma experimental e em fluidos de reologia não Newtoniana com tensão limite; a segunda, no desenvolvimento detalhado de um sistema de medição fotométrico, através de caracterização da absorbância do fluido.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho apresenta toda implementação do aparato experimental desenvolvido para fins de medição das *roll waves*, detalhando cada componente do sistema que, no conjunto, nos permitirá controlar o processo de perturbação, geração e propagação das instabilidades e, após tratamento, comparar resultados experimentais com simulações numéricas.

A tese está estruturada em 10 Capítulos, a saber:

- **Capítulo 1 – Introdução** – Apresenta a abordagem geral da problemática *roll waves*, já evidenciando os objetivos da tese, justificativas, e sua estrutura.
- **Capítulo 2 – Estado da Arte** – Expõe técnicas de medição que norteiam a implementação e o desenvolvimento dos sistemas de medição escolhidos para este trabalho. Na parte final do Capítulo 2 são retomadas as técnicas de caracterização experimental já utilizadas em outros trabalhos e aquelas a serem aplicadas nesta tese.
- **Capítulo 3 – Modelo Matemático da *Roll Waves* em Escoamento de Fluidos Não Newtonianos** – Desenvolve-se, neste Capítulo, de forma objetiva, a modelagem numérica da fenomenologia *roll wave*, explicitando o modelo reológico mais adequado ao fluido escoante.
- **Capítulo 4 – Implementação Matemática do Sistema Fotométrico** – Neste Capítulo, estabelece-se o modelo matemático do sistema fotométrico,

caracterizando as condições de absorvência em um dado analito absorvedor de radiação eletromagnética.

- **Capítulo 5 – Materiais e Métodos** – Detalha-se, ao longo do Capítulo 5, todo aparato experimental, explicando a metodologia abordada. Ademais, detalha-se a caracterização construtiva do aparato experimental em função das condições necessárias para poder perturbar, deixar evoluir e estabilizar as *roll waves* ao longo do canal. Aborda-se também, neste Capítulo, o detalhamento da implementação do sistema ultrassônico e fotométrico, finalizando-o com a exposição da metodologia utilizada no tratamento dos dados aquistados.
- **Capítulo 6 – Fase de Testes com vistas à Definição de Metodologia de Ensaio** – Neste Capítulo, apresenta-se a caracterização dos resultados de reologia do fluido teste, os parâmetros de calibração dos sistemas de medição, parâmetros dinâmicos aquistados nos experimentos em canal, assim como os resultados numéricos de alguns cenários experimentais. Este conjunto de testes culminou com a definição de Metodologia de Ensaio perseguida nesta tese.
- **Capítulo 7 – Resultados de *Roll Waves* e Confrontação de Medição por meio dos Sistemas Ultrassônico, Fotométrico, e Modelo Numérico** – Expõe-se de forma sucinta, para cada método utilizado na medição, a comparação de resultados em um ponto do canal e o perfil da *roll wave* no domínio do espaço. Ademais, são apresentados resultados de estabilidade das *roll waves*, ao longo de diversos pontos de medição do canal de ensaios e para diversas frequências de perturbação.
- **Capítulo 8 – Discussão Geral dos Resultados da Tese** – Apresenta-se as discussões dos principais resultados, dividindo-se em seções conforme sistemas e metodologias construídas e desenvolvidas no decorrer deste trabalho de doutorado.
- **Capítulo 9 – Conclusões** – Neste Capítulo, conclui-se o estudo, elencando as grandes linhas desenvolvidas ao longo deste trabalho.
- **Capítulo 10 – Recomendações para Trabalhos Futuros** – Por fim, este Capítulo recomenda a continuação dos trabalhos por meio de uma abordagem experimental.

2 ESTADO DA ARTE

Definidos os objetivos do projeto e sabendo, *a priori*, estar diante de um sinal específico, ondas tipo “dente de serra”, característico de *roll waves*, passou-se a pesquisar, na literatura, técnica(s) específica(s) que aportassem medidas experimentais confiáveis de amplitude de *roll wave* evoluindo em escoamento laminar com superfície livre em canal inclinado. Para tal desafio, pautam-se na literatura, duas técnicas de maior interesse; a medição de nível e a técnica de filme fino. Segundo França (2007), as técnicas de medição de nível são compreendidas como medidas de distâncias da superfície de líquido em relação à uma referência base, podendo ser esta referência, uma base de tanque ou fundo de canal, por exemplo. Segundo Shedd and Newell (1997) as técnicas de filmes finos são compreendidas como técnicas de escoamentos que podem ter espessura menor que 10 microns e atingir até unidades de milímetros.

2.1 TÉCNICAS DE MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS – MEDIÇÃO DE NÍVEL

Dentre as técnicas de medição, pode-se citar as mais conhecidas, como empuxo (*displace*), pressão diferencial (diafragma), borbulhador, capacitância, eletrostática, ultrassônico, pesagem e raios gama. Destas, às técnicas ultrassônicas são conhecidas e difundidas comercialmente, com uma grande variedade de aplicações em medição de níveis.

Todos os tipos de medições ultrassônicas ocorrem por meio de transdutores, que são responsáveis pela geração da onda ultrassônica. Segundo (ANDREUCCI, 2014), a onda ultrassônica é gerada por cristais piezoelétricos, que convertem sinais elétricos em vibrações mecânicas, no modo de transmissão da onda acústica, e vibrações mecânicas em sinais elétricos, no modo recepção acústica.

Santos (2013) apresenta a classificação de três categorias de transdutores, sendo: transdutor normal – somente um elemento piezoelétrico funcionando como emissor e receptor, este é posicionado paralelo à superfície a ser examinada, possibilitando ondas sonoras perpendiculares; transdutor angular – possibilita o acoplamento da onda sonora em ângulo, onde o elemento piezoelétrico é montado inclinado; transdutor duplo – este é constituído por dois elementos piezoelétricos que têm atuação de forma independente, sendo um emissor e o outro receptor.

Ainda segundo Santos (2013), em cada categoria de transdutor pode-se ter transdutor de contato e sem contato. O transdutor de contato é separado do objeto a ser aferido somente

por uma camada fina de um fluido acoplante (gel ultrassônico, óleo, graxa, silicone líquido e água). Já os transdutores classificados como sem contato, também conhecidos como transdutores de imersão, trabalham dentro do acoplante, podendo, assim, trazer vantagens por eliminar a influência da variação do acoplamento.

Segundo Baroni (2008), em função da aplicação, pode-se adotar diferentes métodos e disposições dos transdutores, onde em geral são utilizados o método do pulso eco e transparência (conhecida também como transmissão total). O pulso eco utiliza-se de um transdutor único, responsável pela emissão e recepção do feixe ultrassônico. Este transdutor emite as ondas ultrassônicas em intervalos regulares e estas refletem ao atingir a superfície a ser aferida, retornando ao transdutor, que converte a energia mecânica em pulso elétrico. Já a técnica de transparência utiliza dois transdutores, um atua como transmissor e o outro como receptor, posicionados em lados opostos ao meio a ser aferido.

Pode-se definir eco como uma onda sonora refletida, pois, quando esta atinge um meio sólido, como uma parede ou uma superfície líquida, apenas uma pequena quantidade da energia sonora penetra na barreira, uma grande porcentagem da onda é refletida.

Assim posto, e segundo França (2007), o ultrassom operando no princípio do pulso eco é uma técnica adequada para medições de níveis de líquido. Kuphald (2009) informa que quando uma onda sonora encontra uma mudança súbita na impedância do material, parte da energia dessa onda é refletida na direção oposta.

2.2 TÉCNICAS DE MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS – FILMES FINOS

Os escoamentos em filmes finos ocorrem frequentemente em diversas aplicações de engenharia. Sua importância em processos industriais, assim como sua modelagem em processos de transferência de calor e massa, está sendo largamente empregado devido aprimoramentos de técnicas para ser utilizado em equipamentos como reatores, torres de resfriamento, evaporadores, condensadores, em processos de revestimento eletroquímico, crescimento de cristais, e muitos outros. Escoamento de filme fino são aqueles que ocorrem sobre um substrato sólido, onde sua superfície é livre e exposta a outro fluido, geralmente um gás. Segundo Wegener e Drallmeier (2010), à medida que os modelos computacionais emergem e evoluem para descrever o comportamento complexo de tais filmes, os experimentalistas buscam, cada vez mais, métodos robustos para validar esses modelos.

2.2.1 Métodos Intrusivos

2.2.1.1 *Agulha de Contato*

Um dos métodos mais antigos e usados na medição de filmes finos é o método de agulha de contato. Vários investigadores (DALLMAN; 1978; LAURINAT; 1982; HEWITT; 1982; SEKOGUCHI et al.; 1982; FUKANO; OUSAKA; 1989), têm empregado este método, que é baseado na condutividade da água. Embora com aplicabilidade limitada, a espessura do filme pode ser medida abaixo de 0,1 mm. Devido à estrutura ondulada da superfície do filme, métodos estatísticos devem ser aplicados para determinar a média da espessura do filme. Uma dessas análises é dada por Sekoguchi et al. (1975).

2.2.1.2 *Condutividade Elétrica*

Esse método se vale do fato que a água conduz eletricidade. Teoricamente, se dois fios paralelos e nus estão em contato com a água, a quantidade de corrente elétrica que flui entre eles será diretamente proporcional à profundidade do líquido que está em contato com os fios. Alguns dos primeiros investigadores desenvolveram a teoria eletromagnética necessária para obter ótimas configurações de sonda (MIYA; 1970; CONEY; 1973; BROWN et al.; 1978; DALLMAN; 1978; VILLENEUVE; OUELLET; 1978).

2.2.1.3 *Capacitância Elétrica*

Esse método é interessante devido ao fato de que a capacitância elétrica pode ser medida em fluidos não condutores, eliminando uma das restrições significativas dos métodos de agulha de contato e condutividade elétrica. Medições de capacitância elétrica têm atraído muito interesse ao longo do desenvolvimento dos métodos de medições em filmes finos (OZGII CHEN; 1973; SUN et al.; 1981; SUNDARAM et al.; 1981; TURKO et al.; 1981; HEWITT; 1982; CHUN; SUNG; 1986; KLUG; MAYINGER; 1994; CHEN et al.; 1996; THORNCROFT KLAUSNER; 1997).

2.2.2 Métodos não Intrusivos: Técnica Fotônica - Fotoelétrica

2.2.2.1 Fluorescência Foto Induzida

O método de fluorescência induzida por laser (LIF – *Laser Induced Fluorescence*) pode fornecer informações muito detalhadas e precisas sobre a camada de filme líquido. Em operação, a luz de uma fonte intensa, por exemplo, uma lâmpada de vapor de mercúrio (HEWITT; 1982) ou um laser de argônio (SCHMITT et al.; 1982; DRISCOLL et al.; 1992), é focada no filme líquido que carrega um corante fluorescente, de forma que uma porcentagem dessa luz interage com as moléculas do corante, proporcionando uma luminosidade em função do corante florescente. A potência desta emissão fluorescente pode ser teoricamente determinada através do número de moléculas com corante no trajeto da luz. Assim, para uma dada quantidade de corante, uma curva de calibração é obtida, relacionando a espessura do filme.

Driscoll e Schmitt et al. (1992) usou uma fonte de laser para estudar a espessura do filme em uma superfície. Eles melhoraram consideravelmente a técnica, levando em conta a inclinação da superfície do filme, entre outros efeitos, de forma que foram capazes de obter topologias de filmes com sensibilidades de espessura de filme na ordem de 0,01 mm e resoluções de 0,04 mm.

Além da espessura de filmes, esta técnica também tem sido usada em conjunto com velocímetro da imagem da partícula, também conhecida com PIV - *Particle Image Velocimetry*, conforme Carneiro et al. (2011).

2.2.2.2 Reflexão Externa da Luz

O reflexo da luz na superfície líquida tem sido usado para determinar não somente espessura do filme, mas também a inclinação da superfície do líquido. Coney et al. (1989) desenvolveram um método no qual dois feixes de laser são direcionados à superfície do líquido, uma normal à superfície livre do líquido e o outro em ângulo. Para isto, foi utilizado uma série de espelhos, no qual os reflexos desses feixes são trazidos para uma única tela, de forma que a superfície sem líquido é marcada como referência, e, no instante em que o fluido escoar, os dois pontos na tela irão se mover, onde são gravados por uma câmera. E por meio das imagens gravadas, pode-se analisar a espessura e a inclinação do filme através da

diferença dos pontos em relação ao ponto inicial, tido como referência. Encontra-se na literatura medições feitas em lâminas de filmes entre 0,5 a 2 milímetros

A Hurlburt e Newell (1995) implementou esta técnica para aferir alturas e velocidade das oscilações, ou seja, neste trabalho foi calibrado a distância do deslocamento do feixe e o tempo de recorrência do feixe ao mesmo ponto. A Shedd e Newell (1997) aferiu a espessura e o ângulo das oscilações de uma superfície livre, podendo determinar filmes de espessura de 0,03 e 0,01 milímetros. Eles efetuaram comparações entre as técnicas de reflexão externa da luz e agulha de contato, em líquido estático (sem escoamento).

A Oliveira, Yanagihara e Pacífico (2006) utilizou, não somente a reflexão como também a absorção da luz na superfície do escoamento, tendo sido comparado com modelos teóricos e fotos tiradas na parede (translúcida) do canal.

2.2.2.3 Reflexão Interna Total da Luz

Quando a luz atravessa de uma substância para outra, parte da luz é refletida na interface, enquanto o restante passa para uma segunda substância, com um ângulo de inclinação de acordo com a lei de Snell. Em um certo ângulo de inclinação (ângulo crítico), o feixe luminoso que atravessou é refletido de volta para primeira substância, isso é chamado reflexão interna total da luz (TIR - *Total Internal Reflection*). Devido ao desenvolvimento da tecnologia em torno da fibra ótica, esta técnica também tem sido implementada e largamente utilizada nas mais diversas aplicações no campo de medições de escoamentos de pequenas lâminas, conforme Than et al. (1993) e Yu et al. (1996) e semelhantemente por Evers e Jackson (1995).

2.2.2.4 Interferometria

A interferometria se baseia na interferência que ondas podem sofrer devido ao meio por onde atravessam. A sobreposição de duas ou mais ondas cria como resultado uma nova e diferente onda que pode ser usada para explorar as diferenças entre elas.

No trabalho de Nozhat (1997) foi caracterizado variações na superfície de fluxos com baixos valores de Reynolds. Ainda em fluidos newtonianos, foi relatado por Behroozi, Lambert e Buhrow (2001) perfil de ondas capilares de 10 nanômetros, através de um interferômetro laser em miniatura. Já Abdelsalam et al (2011) apresenta uma interferometria

automatizada (interferômetros de Fizeau-Tolanks) de múltiplos feixes, onde possibilitou ter aferições de 27 nanômetros, e incertezas de mais ou menos 3 nanômetros.

Uma das primeiras aplicações desta técnica em fluido não-newtoniano foi relatada por Michels, Lovato e Horowitz (2008). Além de medições de pequenas espessuras de filmes finos, em Campagnolo et al. (2012) ficou evidente a grande aplicabilidade desta técnica, através da caracterização de perfil de velocidade do fluxo em fluidos não-newtonianos e newtonianos em uma seção transversal de 320 micrômetros.

2.2.2.5 Absorção Luminosa

A luz que passa através de um líquido terá uma quantidade de luminosidade absorvida, esta absorção está em função das propriedades volumétricas do líquido. Se esta luz for dirigida através de um filme líquido e detectada por um sensor oposto à fonte, flutuações na intensidade da luz recebida pelo sensor podem ser correlacionadas com a espessura do filme, esta condição de relacionar a absorção da luz com as propriedades do material na qual a luz está transitando, é conhecida como Lei de Beer-Lambert-Bouguer (August Beer, Johann Heinrich Lambert e Pier Bouguer).

Koop, Rungaldier e Sherman (1978) utilizou a técnica de absorbância em oito canais (oito sondas), podendo obter sensibilidades de 1volt/centímetro, onde podem-se perceber caracterizações de 0,01 milímetros. Barter e Lee (1994) produziram informações sobre ondas de superfície livre em uma camada de fluido, na qual foi adicionado um corante verde para aumentar o coeficiente de absorção para a luz vermelha. Um diodo laser vermelho gera um feixe de luz uniforme que é espalhado por um sistema de lentes, iluminando assim uma região de aproximadamente 3 cm de largura. Após atravessar o filme líquido, o feixe é coletado por um sistema de lentes e focalizado para um arranjo de fotodiodos, amostrados a 37,5 kHz. Barter e Lee (1997) desenvolveram um perfilador de alturas de ondas (ar-líquido) bidirecional, por meio da técnica de absorbância e implementação da transformada de Fourier. Mouza et al. (2000) utilizou esta técnica para caracterizar pequenas espessuras de oscilações na superfície livre em valores médios e RMS (*root mean square*), e compará-los com sonda de condutância, tendo obtido resultados concordantes. Jana et al. (2007) utilizaram a técnica de absorbância para caracterizar padrões de fluxos bifásicos, comparando os resultados com sondas de condutividades.

2.3 APLICAÇÕES DAS TÉCNICAS EXPERIMENTAIS NA MEDIÇÃO DE *ROLL WAVES*

No âmbito experimental, o trabalho pioneiro foi o de Brock (1969), que propiciou um grande número de informações sobre a formação de *roll waves* em escoamentos turbulentos de fluido Newtoniano. Os experimentos de Brock foram realizados em um canal cujas dimensões eram: 0,11 m de largura e 40 m de comprimento, com a inclinação variando entre 5 e 10%. As profundidades dos escoamentos em regime uniforme se encontravam entre 5 e 8 milímetros, com números de Froude entre 3 e 6.

Ainda para fluidos de reologia Newtoniana, destaca-se o trabalho de Liu e Gollub (1994) como uma importante contribuição, pois seus experimentos foram realizados para escoamentos de fluido altamente viscoso (solução aquosa de glicerina), cuja viscosidade era aproximadamente cinco vezes maior que a da água. Como sistema de medição, foram utilizados sistemas óticos, assim como feito por Kapitza (1948) para a mesma reologia de fluido. O aparato experimental foi constituído de uma rampa, isolada de perturbações externas, com o fluido em recirculação. Para a obtenção das medidas de amplitude das ondas, foi utilizada a técnica de fotoluminescência e um sistema de aquisição computadorizado.

Já para fluidos não Newtonianos, Coussot (1994) observou o aparecimento de *roll waves* em algumas condições de inclinação e vazão, no entanto, ele não aferiu tais *roll waves*. Seu aparato experimental era constituído por um canal retangular com 8 m de comprimento e 0,6 m de largura e a inclinação variava entre 3 e 27%.

Seguindo a linha de Coussot, Wang (2000) realizou experimentos visando estudar o crescimento das instabilidades em escoamentos laminares de fluidos não-Newtonianos. O canal utilizado tinha 26 m de comprimento, 0,6 m de largura e 0,5 m de altura, com paredes de vidro e fundo com placa de aço liso. A inclinação do canal variava entre 2 e 8%.

Em escoamentos granulares, Forterre e Pouliquen (2003) analisaram também geração de ondas longas do tipo *roll waves*. O aparato experimental era composto por um canal de 2 m de comprimento e 0,35 m de largura. As placas laterais e a parte inferior do canal eram de paredes de vidro, já o fundo do canal tinha rugosidades feitas por meio de colagens de grânulos. A inclinação do canal variou entre 24 e 29 graus, para os escoamentos que continham grânulos de vidro, e entre 32 e 36 graus, para os escoamentos com partículas de areia. As *roll waves* deste experimento eram observadas a partir de uma frequência de perturbação de amplitude conhecida, aplicada sobre a superfície livre do escoamento, como no trabalho de Liu et al. (1993). Tal método consiste em incidir um fino jato de ar através de

alto-falante incorporado em um bocal, com uma fenda de 1 mm. A deformação da superfície livre era de aproximadamente 0,25 mm de altura.

Fiorot et al. (2013) apresentaram uma análise comparativa entre um sistema fotométrico de medição, utilizando a metodologia de absorbância, e uma modelagem numérica; como aparato experimental foi utilizado um canal inclinado com fluido Newtoniano (glicerina), na qual a perturbação foi imposta por meio de um pulso de ar sobre o escoamento.

Tamburrino e Ihle (2013), ensaiaram um fluido de Bingham, sendo este formado por água com bentonita. Neste experimento foram verificadas formações de *roll waves* em inclinações de 11 e 33 graus, com vazões de 0,02 até 0,14 litros por segundo. A metodologia de medição utilizada foi por meio de associação de laser com uma câmera ultra rápida, podendo obter precisão próxima de 0,5 milímetro para escoamentos sem oscilações e de 0,75 milímetros em escoamentos com oscilações.

Razis, Edward e Gray (2014) construíram um canal com 3,30 metros de comprimento e 0,078 metros de largura com inclinação de 35 graus em relação à horizontal, e observaram as *roll waves* por fotos em instantes definidos a cada 0,2 segundos, podendo assim verificar que as ondas maiores têm velocidades maiores que as demais.

Cunha (2014), em seu trabalho de mestrado, observou formações de *roll waves* em fluido não-Newtoniano (gel de carbopol), caracterizadas através de um sistema ultrassônico. Em seu estudo, os diferentes parâmetros geométricos e hidrodinâmicos (inclinação do canal, vazão e velocidade de escoamento, e altura de lâmina de escoamento), e juntamente com as variações de perturbação impostas no canal, possibilitaram diferentes configurações experimentais (ensaios), tornando possível aferir uma variedade de perfis de *roll waves*.

Huang e Lee (2015) verificaram evolução espacial de *roll waves* a partir das equações de Saint Venant, comparando com os resultados experimentais de Brock. Os autores observaram que os resultados de amplitude de *roll waves* superestimaram os resultados experimentais.

Zhao C. et al. (2015) construíram um canal com inclinação de 9 graus, para verificar o transporte de sedimentos em escoamentos com *roll waves*. Relataram a forte dependência da frequência das *roll waves* com o número de Froude e caracterizaram diferentes *roll waves* em várias concentrações de sedimentos.

Aranda et al. (2016) visualizaram *roll waves* através de uma correlação de imagem digital, posicionando uma câmera sobre o canal, de forma que o foco estivesse perpendicularmente sobre o fundo do canal inclinado. Os autores relataram diferenças

menores de 10% nas alturas médias, em relação a uma câmera digital posicionada com o foco perpendicular à lateral do canal.

Maciel et al. (2017) apresentaram uma metodologia de ensaio com abordagem comparativa entre um modelo numérico unidimensional e um sistema ultrassônico para *roll waves* em escoamentos com fluidos não-Newtonianos (Herschel–Bulkley), geradas a partir de perturbações de pulso de ar sobre o escoamento na frequência de 1,5 Hz.

2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE TÉCNICAS DE MEDIÇÃO UTILIZADAS NESTA TESE

Considerando os objetivos deste trabalho, optou-se por duas técnicas de medição: a medição de nível e a técnica de filmes finos. A técnica de medição de nível foi aplicada com base em uma metodologia já conhecida e difundida no meio científico e industrial, e a técnica de filmes finos foi desenvolvida e implementada, de forma que, no final deste trabalho, fosse possível confrontá-las e compará-las com um modelo numérico.

Dentre as várias técnicas de medição de nível consideradas, a escolhida foi a ultrassônica, através da configuração do transdutor ultrassônico operando no modo pulso-eco. Por ser uma técnica não intrusiva, bastante difundida no meio científico e comercial, com larga escala de aplicação e principalmente devido a experiência acumulada pelo grupo RMVP, em caracterizações de frentes de ondas acentuadas, como nos estudos de rompimento de barragem (Menussi, 2007 e Leite 2009), definiu-se como pertinente a utilização desta técnica, podendo assim, neste trabalho, definir os seus limites de atuação.

Assim como para a escolha da técnica de medições de nível, para medição de filmes finos também se buscou uma técnica não intrusiva, excluindo, portanto, grande variedade de outras técnicas, focando-se em técnicas fotométricas.

A partir desta consideração, buscou-se analisar as metodologias de interferometria, reflexão e absorvância da luz. Compreendendo que na metodologia de interferometria a forma de caracterização são alterações e comparações entre as fases da luz. Na reflexão (interna ou externa) da luz, a forma de quantificação é o deslocamento do feixe de luz em função do ângulo de incidência no fluido. Já em absorvância, o que é modificado é a potência luminosa em função das alterações no escoamento.

Por meio da interferometria é possível aferir oscilações capilares, com unidades de grandezas, bastante inferiores as que serão estudadas neste trabalho, além de ser uma técnica que deve ser implementada em um ambiente com controle de temperatura, fluxo de ar, umidade, dentre outros fatores externos, que têm grande influência nas medições.

Já as técnicas que utilizam das modificações (inclinação) do feixe da luz, têm como unidade de grandezas medições que concordam com este objeto de estudo, no entanto, a grande quantidade de instrumentos de alinhamento e caracterização do feixe (espelhos, telas de foco, câmeras ultrarrápidas, fotodiodos, etc.) foram fatores que inviabilizaram este projeto, devido ao ambiente em que o aparato experimental está instalado.

Portanto, somado à influência dos trabalhos de Liu e Gollub (1994) e Kapitza (1948), e, à experiência adquirida em Fiorot (2012) e Cunha (2013), aliados à possibilidade de calibração do método, de forma controlada e sistemática com o fluido em condições de escoamento, decidiu-se pela escolha da absorção luminosa como metodologia utilizada no sistema de medição implementado para este estudo.

3 MODELO MATEMÁTICO DA *ROLL WAVES* EM ESCOAMENTO DE FLUIDO NÃO NEWTONIANOS

3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

No processo de modelagem de *roll waves* devem-se estabelecer as hipóteses, explicitar o modelo reológico mais adequado ao fluido escoante, e as condições de contorno do modelo matemático.

3.1.1 Modelo Reológico

O modelo reológico representativo de fluidos lamosos é, segundo estudos de Coussot (1994), Huang e Garcia (1998) e Maciel *et al.* (2009), o modelo de Herschel-Bulkley a três parâmetros que, em condições permanentes e de cisalhamento simples, pode ser escrito como a Equação 1:

$$\tau_{xz} = \tau_c + K_n \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^n, \text{ se } \tau_{xz} > \tau_c \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0, \text{ se } \tau_{xz} < \tau_c$$

Em que τ_{xz} é a tensão de cisalhamento atuando na direção x devido a um gradiente em z , u é a componente da velocidade na direção, x , z a coordenada vertical, $\partial u / \partial z$ a taxa de deformação ou cisalhamento, τ_c a tensão limite de escoamento, K_n o índice de consistência do fluido e n é o índice de escoamento do fluido.

3.1.2 Hipóteses para o Modelo Matemático

Visando simplificar o problema real são estabelecidas hipóteses, quais sejam:

- Fluido lamoso homogêneo, de comportamento reológico de Herschel-Bulkley e incompressível, portanto, massa específica (ρ) é constante;
- Condições de águas rasas, isto é, profundidade do escoamento (h) é muito menor que o comprimento longitudinal característico (L), e que a largura do canal (l);

- Escoamento ocorre principalmente pela ação da gravidade, em regime laminar;
- Fundo do canal impermeável.

3.1.3 Condições de Contorno para o Modelo Matemático

As condições de contorno são dadas por:

- Condições cinemáticas na superfície livre,

$$w(x, z, t) = \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} \text{ para } z = h(x, t); \quad (2)$$

- Condições de impermeabilidade no fundo,

$$u(x, z, t) = w(x, z, t) = 0 \text{ para } z = 0; \quad (3)$$

- Tensões na superfície livre e no fundo do canal,

$$P(z) = 0 \text{ e } \tau_{xz}(z) = 0 \text{ para } z = h(x, t) \quad (4)$$

$$\tau_{xz}(z) = \tau_f, \text{ para } z = 0.$$

Sendo w a componente da velocidade na direção z , P a pressão, τ_f a tensão de cisalhamento no fundo do canal e t o tempo.

3.2 MODELO MATEMÁTICO

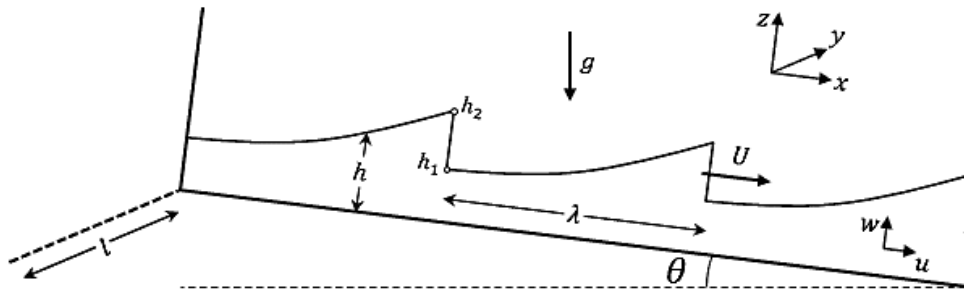
3.2.1 Equações Governantes

O modelo matemático clássico do fenômeno *roll waves* foi apresentado, pela primeira vez, por Dressler (1949), sob as hipóteses de águas rasas, fluido invíscido, e termos de fricção modelados pela relação de Chézy.

No contexto de escoamento de fluidos lamosos (fluidos não-Newtonianos), as equações motrizes do fenômeno são obtidas a partir do sistema de equações de Cauchy

(conservação da massa e balanço de quantidade de movimento), conforme os trabalhos de Liu e Mei (1994), Ng e Mei (1994), Balmforth e Liu (2004). Assim, com base na Figura 1, nas hipóteses supracitadas e seguindo o mesmo protocolo adotado por Dressler (1949), obtiveram-se as Equações 5, 6 e 7 (Ferreira, 2013; Maciel *et al.* 2013).

Figura 1- Esquema do problema das *roll waves*.



Fonte: Fiorot 2012

- Conservação da massa:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

- Balanço de quantidade de movimento na direção x :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g \sin \theta + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{xz}) \quad (6)$$

- Balanço de quantidade de movimento na direção z :

$$\frac{\partial P}{\partial z} = - \rho g \cos \theta \quad (7)$$

Sendo θ a inclinação do canal e g a aceleração da gravidade.

Após estabelecidas as equações, são realizados os processos de promediação das equações na vertical, e adimensionalizadas conforme (Maciel et al 2013, Ferreira, 2013), resultando as Equações 8 e 9 em variáveis adimensionais.

Conservação da massa:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}h)}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

Balanco de quantidade de movimento na direção x :

$$\begin{aligned} h \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \alpha \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{h}{Fr^2} \frac{\partial h}{\partial x} + (1-\alpha) \bar{u} \frac{\partial h}{\partial t} = \\ = h - C - (1-C) \left[\bar{u} h \frac{(1-C)(n+1+nC)}{(h-C)((n+1)h+nC)} \right]^n \end{aligned} \quad (9)$$

Resolvendo o sistema de Equações 8 e 9, obtém-se a equação da *roll wave* (Equação 10), que é reescrita em um sistema móvel de coordenadas, que se desloca com a velocidade de propagação da *roll wave* ou celeridade (onda permanente).

$$\frac{\partial h}{\partial x'} = \frac{h - C^* - (1 - C^*) \left\{ \left[\frac{(1 + U(h - 1))(1 - C^*)}{h - C^*} \right] \left[\frac{(n + 1) + nC^*}{(n + 1)h + nC^*} \right]^n \right\}}{\left((\alpha - 1)U^2 - \frac{\alpha(1 - U)^2}{h^2} + \frac{h}{Fr^2} \right)} \quad (10)$$

No qual: $x' = x - Ut$ é a abscissa do sistema móvel de coordenadas, x é a abscissa do sistema cartesiano, h é a profundidade total do escoamento, t é o tempo e U é a celeridade da *roll wave*, calculada através da Equação 11.

$$U = \alpha + \left[\alpha(\alpha - 1) + \frac{1}{Fr^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Vale ressaltar que o modelo de *roll waves* é estritamente hiperbólico e a solução numérica passa pela imposição das condições de choque de Hankine-Hugoniot.

Para a ocorrência de *roll waves* em fluidos não-Newtonianos, é necessário que dois critérios de geração estabelecidos matematicamente sejam verificados, os quais são expostos a seguir.

3.2.2 Primeiro Critério de Geração

A primeira condição necessária para formação de *roll waves* na superfície livre do escoamento, é determinada pela análise de estabilidade linear temporal das equações de águas rasas com o modelo reológico de Hershel Bulkley (Maciel et al, 2013), sendo tal condição representada pelo número de Froude do escoamento (Equações 12, 13 e 14).

$$Fr > Fr_{min} = \frac{\vartheta}{\sqrt{\varphi^2 - 2\alpha\varphi\vartheta + \alpha\vartheta^2}} \quad (12)$$

$$\varphi(n, C^*) = \frac{(n+1)(2n+1)}{(n+1+nC^*)} \quad (13)$$

$$\vartheta(n, C^*) = n(1 - C^*) \quad (14)$$

Sendo: $Fr = \bar{u}_0 / \sqrt{gh_o \cos\theta}$ o número de Froude do escoamento, $C^* = \tau_c / h_o \rho g \sin(\theta)$ o adimensional de tensão limite de escoamento (τ_c), h_o a profundidade do escoamento uniforme, g a aceleração da gravidade, n o índice de escoamento do fluido, θ a inclinação do canal, ρ a massa específica do fluido, \bar{u}_0 a velocidade média do escoamento e α o coeficiente de distribuição de velocidade (Equações 15 e 16).

$$\bar{u}_0 = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\rho g \sin(\theta) z_0^{(n+1)}}{k_n} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{n+1+nC^*}{2n+1} \right) \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{(2n+1)}{(3n+2)} \frac{[2(n+1)^2 h + C^*(4n+3)n]}{[(n+1)^2 h + 2(n+1)nC^* + n^2(C^*)^2]} \quad (16)$$

Pode-se também, calcular a velocidade média a partir da velocidade superficial (u_s) do escoamento em regime uniforme, o que é bastante útil, pois a velocidade superficial é aferida experimentalmente, com erros da ordem de 5%.

$$\bar{u}_0 = \left(\frac{2n+1}{n+1+nC^*} \right) u_s \quad (17)$$

Vale ressaltar que, a condição de $Fr > Fr_{min}$ é necessária para a geração de *roll waves*, mas não é suficiente (Ferreira, 2013).

3.2.3 Segundo Critério de Geração

A segunda condição é estabelecida a partir de análise de estabilidade linear espacial das equações de águas rasas com o modelo reológico de Herschel Bulkley (Ferreira, 2013). A condição estabelece um domínio de frequências de perturbação para geração e propagação de *roll waves* (Equações 18 e 19).

$$f < f_c = \frac{|\omega_c| \bar{u}}{2\pi h_o} \quad (18)$$

$$\omega_c = \frac{1}{2\alpha} \sqrt{\left(\alpha - \frac{1}{Fr^2}\right)\vartheta^2 - 2\alpha\vartheta\varphi} \quad (19)$$

Sendo: $z_0 = h_0 - \tau_c/h_0\rho g \sin(\theta)$

4 IMPLEMENTAÇÃO MATEMÁTICA DO SISTEMA FOTOMÉTRICO

Toda nomenclatura e simbologia apresentada neste Capítulo é pertinente às áreas de fotônica e fotometria, portanto a convenção utilizada é particular e somente deste Capítulo.

4.1 A LEI DE BEER-LAMBERT

Dependendo do autor a Lei de Beer-Lambert também pode ser citada como Lei de Beer–Lambert-Bouguer ou, simplesmente, Lei de Beer. Esta Lei é bastante usada em áreas como química, bioquímica, biologia molecular, microbiologia, dentre outras (Paris e Oldhan, 2013). Embora sua teoria já esteja consagrada em livros, neste Capítulo, será apresentado um resumo a fim de contextualizá-la ao objeto de estudo da tese e estabelecer uma uniformização de nomenclatura e símbolos, a partir das várias fontes disponíveis na literatura.

Conforme será discutido nos itens a seguir, essencialmente, a Lei de Beer–Lambert estabelece uma relação entre a absorvância e a concentração de um dado analito de um absorvedor de radiação eletromagnética.

4.1.1 A Lei de Beer – Lambert Clássica

A Lei de Beer–Lambert clássica pode ser obtida a partir das equações de Maxwell, na qual a origem da atenuação de uma onda eletromagnética propagando-se num meio material se deve às perdas ôhmicas (Collin, 2000). Originalmente, a análise se aplica a uma onda plana propagando-se em meio ilimitado, contudo, com as devidas adaptações, pode ser aplicada a feixes com secção transversal finita desde que efeitos como difração ou dispersão possam ser desconsiderados.

Considera-se, inicialmente, que a solução da equação de Helmholtz para meios opticamente lineares, homogêneos, isotrópicos e sem perdas ôhmicas, e, cujo campo elétrico $\vec{e}(z, t)$ da radiação varia harmonicamente no tempo, seja (Collin, 2000):

$$\vec{e}(z, t) = \text{Re}\{\vec{E}_0 e^{j(\omega t - kz)}\} \quad (20)$$

Sendo $\vec{E}_0(V/m)$ um vetor no plano (x, y) , em geral, complexo, a fim de permitir todas as polarizações e fases, ω é a frequência angular da radiação monocromática, z seja a

coordenada na direção de propagação (tal onda se propaga na direção $+z$) e t é o tempo. O parâmetro k é a constante de fase (ou número de onda) dado por:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (21)$$

na qual λ é o comprimento de onda da radiação no meio material.

Na ausência de atenuação, define-se o índice de refração do meio como:

$$n_r = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (22)$$

sendo λ_0 o comprimento de onda da radiação no vácuo.

Além disso,

$$\lambda_0 = \frac{2\pi c}{\omega} \quad (23)$$

sendo c a velocidade da luz no vácuo ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$). Como $\omega = 2\pi f$, obtém-se a relação conhecida como:

$$\lambda_0 = c/f, \quad \text{e também} \quad n_r = c/c_p \quad (24)$$

onde c_p é a velocidade da luz no meio. Portanto,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_r = \frac{\omega}{c} n_r = \frac{\omega}{c_p} \quad (25)$$

Por sua vez, define-se a intensidade óptica (ou irradiância, medida em W/m^2), como o valor médio temporal (*time-averaged*) do produto escalar

$$I(z) = \vec{e} \cdot \vec{e}^* \quad (26)$$

calculado ao longo de muitos ciclos de oscilação da onda, ou seja

$$I(z) = |\vec{E}_0 e^{j(\omega t - kz)}|^2 = |\vec{E}_0|^2 = I_0 \quad (27)$$

a qual não depende da localização z (a onda óptica não sofre atenuação na propagação).

Contudo, na prática, quando a luz atravessa um meio, parte de sua potência é atenuada. A forma encontrada por Maxwell para incorporar a atenuação na descrição matemática da onda foi usar um coeficiente de atenuação, α , e reescrever $\vec{e}(z, t)$ como (Collin, 2000):

$$\vec{e}(z, t) = e^{-\alpha z/2} \operatorname{Re}\{\vec{E}_0 e^{j(\omega t - kz)}\} \quad (28)$$

sendo α medido em N_p/m (neper por metro).

Com isso, a intensidade óptica passa a valer

$$I(z) = |e^{-\alpha z/2} \vec{E}_0 e^{j(\omega t - kz)}|^2 = |\vec{E}_0|^2 e^{-\alpha z} = I_0 e^{-\alpha z} \quad (29)$$

Alguns autores costumam denominar o coeficiente de atenuação de “opacidade”, em vista de estar relacionado com a profundidade de penetração δ , além da qual a radiação sofre atenuação aproximadamente total. Assim, define-se δ_{skin} (*penetration depth ou skin depth*) como a distância z na qual a onda pode se propagar no meio com perdas antes que sua intensidade se reduza a $1/e \approx 0,37$ do seu valor máximo:

$$I_0 e^{-\alpha \delta_{skin}} = I_0 e^{-1}; \quad \delta_{skin} = -1/\alpha \quad (30)$$

Na prática, verifica-se que após 3 ou 4 vezes δ_{skin} , a intensidade decai a valores desprezíveis, e o meio se torna opaco à radiação.

Uma forma mais usada na prática para se levar em conta o efeito de atenuação do meio material sobre a radiação, é definir uma constante de fase complexa

$$\bar{k} = \operatorname{Re}\{\bar{k}\} - j \operatorname{Im}\{\bar{k}\} \quad (31)$$

tal que

$$\begin{aligned}\vec{e}(z, t) &= \text{Re}\{\vec{E}_0 e^{j(\omega t - \bar{k}z)}\} = \text{Re}\{\vec{E}_0 e^{j[(\omega t - \text{Re}\{\bar{k}\}z) + j \text{Im}\{\bar{k}\}z]}\} \\ &= e^{-\text{Im}\{\bar{k}\}z} \text{Re}\{\vec{E}_0 e^{j[(\omega t - \text{Re}\{\bar{k}\}z)]}\}\end{aligned}\quad (32)$$

Comparando-se (Eq.32) com (Eq.28), verifica-se que

$$\text{Im}\{\bar{k}\} = \frac{\alpha}{2}; \quad \text{Re}\{\bar{k}\} = k \quad (33)$$

ou seja, $\bar{k} = k - j\frac{\alpha}{2}$.

Por sua vez, a intensidade óptica forma-se

$$I(z) = |\vec{E}_0 e^{j(\omega t - \bar{k}z)}|^2 = |\vec{E}_0 e^{j\omega t} e^{-j\text{Re}\{\bar{k}\}z} e^{-j[-j\text{Im}\{\bar{k}\}z]}|^2 = |\vec{E}_0|^2 e^{-2 \text{Im}\{\bar{k}\}z} \quad (34)$$

$$\text{Im}\{\bar{k}\} = \alpha/2 \quad (35)$$

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z}; \quad \alpha = 2 \text{Im}\{\bar{k}\} \quad (36)$$

ou seja, a Lei de Beer-Lambert.

Outros autores preferem usar o conceito de índice de refração complexo, \bar{n}_r , definido pela Equação 37.

$$\bar{n}_r = \frac{c\bar{k}}{\omega} = \text{Re}\{\bar{n}_r\} - j \text{Im}\{\bar{n}_r\} = \bar{n}_r - j \kappa \quad (37)$$

onde a parte real (\bar{n}_r) está relacionada com a velocidade de fase no meio, e, a imaginária (κ), com a quantidade de atenuação. Alguns autores denominam o parâmetro κ como “fator de extinção”, ou ainda, “coeficiente de atenuação de massa”.

Dessa maneira, o campo elétrico torna-se

$$\begin{aligned}\vec{e}(z, t) &= \text{Re}\{\vec{E}_0 e^{j(\omega t - \bar{k}z)}\} = \text{Re}\left\{\vec{E}_0 e^{j\left(\omega t - \frac{\omega \bar{n}_r z}{c}\right)}\right\} = \\ &= \text{Re}\left\{\vec{E}_0 e^{j\omega t} e^{-j\frac{\omega}{c}\bar{n}_r z} e^{-j\frac{\omega}{c}(-j\kappa)z}\right\} = e^{-\frac{\omega}{c}\kappa z} \text{Re}\left\{\vec{E}_0 e^{j\omega t} e^{-j\frac{\omega}{c}\bar{n}_r z}\right\}\end{aligned}\quad (38)$$

Comparando-se (Eq. 38) com (Eq. 28) verifica-se que

$$\alpha = \frac{2\omega}{c} \kappa = \frac{4\pi}{\lambda} \kappa; \quad k = \frac{\omega}{c} \bar{n}_r \quad (39)$$

A intensidade óptica é dada por

$$I(z) = e^{-2\frac{\omega}{c}\kappa z} \left| \vec{E}_0 e^{j\omega t} e^{-j\frac{\omega}{c}\bar{n}_r z} \right|^2 = |\vec{E}_0|^2 e^{-\left(\frac{2\omega}{c}\kappa\right)z} = I_0 e^{-\alpha z} \quad (40)$$

Novamente, a Lei de Beer-Lambert.

Antes de prosseguir, é conveniente registrar algumas observações:

- a) Na prática, tanto \bar{n}_r quanto κ dependem da frequência (ou do comprimento de onda λ_0) da luz. Este efeito não é previsto por Maxwell, mas sim pela física quântica, e é denominado dispersão cromática da luz.
- b) As grandezas \bar{n}_r e κ não podem ser medidas diretamente (por exemplo, pelo ângulo de Brewster (Collin, 2000)); devem ser determinadas indiretamente a partir de quantidades mensuráveis através delas, tais como a refletância (R) ou transmitância (T)(ou então, por parâmetros de elipsometria, ψ e δ).
 - Desenvolver expressões teóricas para R e T (ou, ψ e δ);
 - Ajustar o modelo teórico às medições de R e T (ou, ψ e δ) usando análise de regressão, e assim, deduzir \bar{n}_r e κ .

4.2 A LEI DE BEER – LAMBERT QUÂNTICA

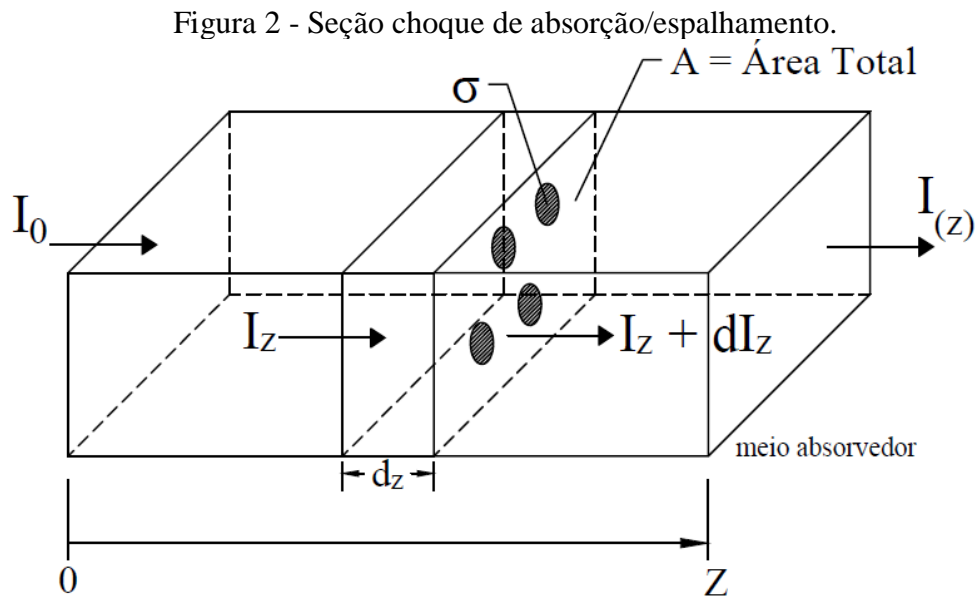
O conceito de coeficiente de atenuação desenvolvido por Maxwell contempla apenas as perdas ôhmicas como, por exemplo, as perdas ópticas devido à dissipação Joule em partículas metálicas suspensas numa concentração. Entretanto, na grande maioria dos meios materiais, a atenuação acontece devido ao fenômeno de absorbância óptica, o qual é descrito em termos quânticos.

Ao incidir luz num material, fótons de determinados comprimentos de onda serão absorvidos quando possuírem energia correspondente à diferença entre dois níveis energéticos dos átomos ou moléculas que estão atravessando. Trata-se de um processo ressonante de transferência de energia da luz para a rede atômica ou molecular.

A atenuação também pode envolver o espalhamento por partículas suspensas (como o espalhamento Rayleigh), também, governado por leis quânticas. Nos próximos parágrafos,

apresenta-se um modelo físico simplificado a partir do qual a Lei de Beer – Lambert pode ser deduzida em termos de absorção/espalhamento.

Nesse modelo, aproxima-se o átomo (ou molécula) absorvedor de fótons, por um disco opaco cuja área de seção transversal é σ (cm^2), como esquematizado na Figura 2. Ou seja, σ é a área efetiva (ou seção choque de absorção/espalhamento) percebido por um fóton na frequência ω . Mais especificamente, σ está relacionado à probabilidade de luz ser removida do feixe incidente.



Se a frequência da luz está longe da ressonância, então, $\sigma \cong 0$. Se ω está próxima da ressonância, σ é máxima.

Seja C a concentração, ou seja, a razão entre o número de átomo (ou molécula) absorvedores por unidade de volume (cm^3), então, a área efetiva total dos átomos (ou moléculas) é $C\sigma Adz$ (cm^2). Por sua vez, a fração de fótons absorvidos é $C\sigma Adz/A = C\sigma dz$ e, portanto, a probabilidade de a luz ser absorvida/espalhada é

$$\frac{dI_z}{I_z} = -C \sigma dz \quad (41)$$

Integrando de $z = 0$ ($I_z = I_0$) à z ($I_z = I(z)$) resulta

$$\ln I(z) - \ln I_0 = -\sigma C z = \ln \frac{I(z)}{I_0} \quad (42)$$

A partir daí se chega a Lei de Beer – Lambert:

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z} \quad (43)$$

Sendo $\alpha = \sigma C$ o coeficiente de atenuação (N_p/cm). Esta equação é idêntica a aquela obtida usando a abordagem determinista de Maxwell.

Deve ser destacado que, dado um meio material, o coeficiente de atenuação varia com o comprimento de onda da radiação, podendo ser maior ou menor dependendo de λ_0 , ou seja, $\alpha = \alpha(\lambda_0)$, tal que

$$I(z, \lambda_0) = I_0(\lambda_0) e^{-\alpha(\lambda_0)z} \quad (44)$$

Assim, um meio transparente para um determinado comprimento de onda pode ser opaco para outro comprimento de onda.

4.2.1 Absorbância (A)

Denomina-se transmitância T a razão:

$$T(\lambda_0) = \frac{I(z, \lambda_0)}{I_0} = e^{-\alpha z} \quad (45)$$

Por sua vez, define-se a absorbância de um meio material usando o logaritmo neperiano (Parnis e Oldham, 2013):

$$A = -\ln T = -\ln \frac{I}{I_0} = +\alpha z = +(\sigma C) z \quad (46)$$

a qual é medida em Au , ou seja, unidade de absorbância.

Alguns autores preferem calcular a absorbância através do logaritmo de base 10:

$$A = -\log \frac{I}{I_0} = -\log e^{-\alpha z} = -\log e^{-\sigma C z} \quad (47)$$

Observe que: $C \left(\frac{\text{molécula}}{\text{cm}^3} \right) \cdot \frac{1 \text{ mol}}{6,023 \cdot 10^{23} \text{ átomos}} \cdot \frac{1000 \text{ cm}^3}{L} \simeq C_m \left(\frac{\text{mol}}{L} \right)$ e, sabendo que $\ln x = 2,303 \log x$, obtém-se

$$\ln \frac{I}{I_0} = 2,303 \log \frac{I}{I_0} = -\sigma C z \quad (48)$$

sendo $C \cdot \frac{1000}{6,023 \cdot 10^{23}} = C_m$, ou, $C = 6,023 \cdot 10^{20} C_m$ ocorre

$$A = -\log \frac{I}{I_0} = \frac{\sigma C z}{2,303} = \frac{6,023 \cdot 10^{20}}{2,303} C_m \sigma z = \varepsilon C_m z \quad (49)$$

na qual $\varepsilon = \frac{6,023 \cdot 10^{20}}{2,303} \sigma$ é a absorbtividade molar ou coeficiente de extinção molar ($L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$).

Retornando com (Eq.49) em (Eq.47), rescreve-se a transmissão como

$$T = \frac{I}{I_0} = 10^{-\varepsilon C_m z} = 10^{-\alpha_m z} \quad (50)$$

sendo que este valor de $\alpha_m = \varepsilon C_m$ está em dB/cm .

Na área de química analítica (onde o interesse é medir cm a partir de A , α_m e z) existe a preferência em se trabalhar com base 10. Em outras áreas, é grande o uso de base e .

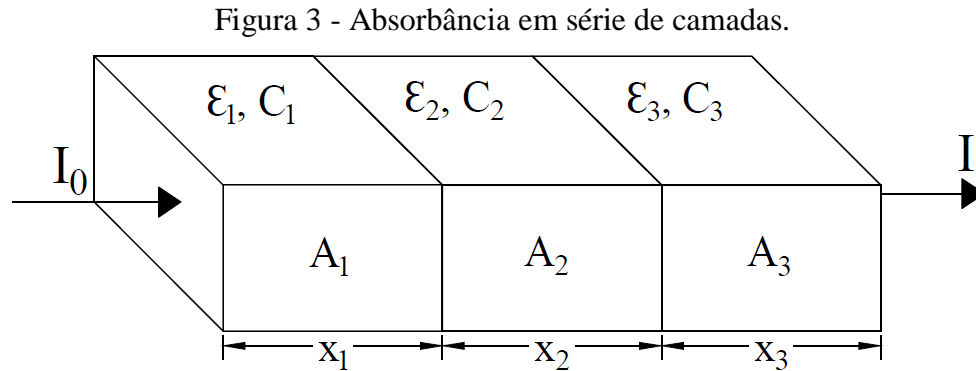
Na Tabela 1 estão apresentados valores típicos de seção choque (σ – *cross section*) e absorbtividade molar (ε – molar *absorptivity*) para alguns fenômenos.

Tabela 1 - Valores típicos da seção choque e absorbtividade molar.

	σ, cm^2	$\varepsilon, L/\text{mol cm}$
Absorção em Átomos	10^{-12}	$3 \cdot 10^8$
Absorção em Moléculas	10^{-16}	$3 \cdot 10^4$
Absorção em Infravermelho	10^{-19}	3.10
Espalhamento Raman	10^{-29}	$3 \cdot 10^{-9}$

Fonte: CHP – Beer-Lambert Law

Uma grande vantagem quando se trabalha com a absorvância refere-se ao caso da associação em série de camadas, como esquematizado na Figura 3.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Como o logaritmo de um produto é igual à soma de logaritmos, obtêm-se a absorvância total do sistema multicamadas como

$$A_{Total} = A_1 + A_2 + A_3 + \dots = \epsilon_1 c_1 x_1 + \epsilon_2 c_2 x_2 + \epsilon_3 c_3 x_3 \dots \quad (51)$$

Onde ϵ_i é a absorbtividade molar da camada i .

Neste estágio, cabe uma discussão sobre a aplicabilidade da Lei de Beer-Lambert. A rigor, a absorvância é definida para medição de absorção, contudo, também pode envolver efeitos espúrios como espalhamento por partículas suspensas e perdas ôhmicas. Quanto menor for a incidência desses efeitos indesejáveis, melhor será a medição da absorção através da absorvância.

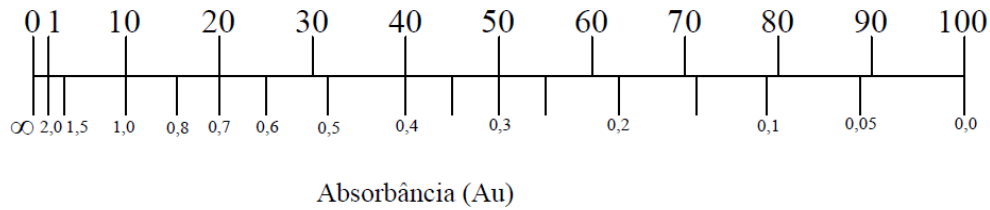
Por exemplo, o espalhamento diminui a transmissão da luz através da amostra e afeta a absorvância, mesmo se nenhuma absorção ocorrer.

Outro aspecto se refere à linearidade da Lei de Beer-Lambert, a qual gera melhores resultados quando as soluções estão mais diluídas. Isto pode ser verificado a partir das Equações 47 e 50, representando a transmissão $0 \leq T \leq 1$ em porcentagem, ou seja, $\%T = 100T$:

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \log \frac{1}{T} = \log \frac{100}{\%T} = \log 10^2 - \log \%T = 2 - \log \%T \quad (52)$$

cujos ábaco está ilustrado na Figura 4.

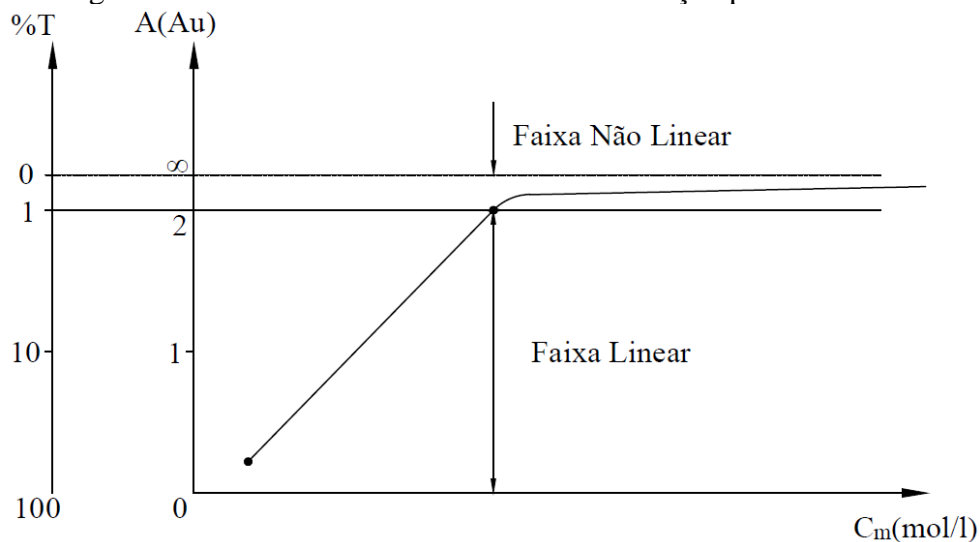
Figura 4 - Transmitância/Absorbância.
Transmitância (%)



Fonte: Beer's Law – Sheffield Hallam University

Segundo o ábaco, se $\%T = 100\%$ (nenhuma absorção), então, $A = 2 - \log 100 = 0$. Se $\%T = 0$ (absorção total), então, $A = 2 - \log 0 = \infty$. Para os valores intermediários, não existe uma linearidade perfeita ao longo de toda a faixa $0 < \%T < 100$. Para a faixa $0 < A < 2 Au$ observa-se uma boa linearidade entre A e $\%T$, porém, o mesmo não acontece na faixa $2 Au < A < \infty$. Devido a Equação 29, $A = \epsilon z C_m$, e assim, para (ϵz) constante, ou seja, para uma amostra com absorbtividade molar e comprimento fixados, o gráfico da absorbância, A , em função da concentração, $C_m (mol/L)$, só é linear para os menores valores de C_m , como esquematizado na Figura 5.

Figura 5 - Faixa linear e não linear da concentração pela absorbância.



Fonte: Beer's Law – Sheffield Hallam University

No entanto, quando C_m está muito próximo de zero, têm-se soluções claras (quase transparentes), sujeitas a erros de refração, reflexão ou espalhamento da luz. Em resumo, a

linearidade da Lei de Beer-Lambert é limitada por fatores químicos e instrumentais, sendo as principais causas de não linearidade:

- desvio do coeficiente de absorção em altas concentrações, devido às interações eletrostáticas entre moléculas nas proximidades;
- espalhamento da luz devido a particulados na amostra;
- fluorescência ou fosforescência da amostra;
- mudanças no índice de refração em altas concentrações do analito;
- deslocamento no equilíbrio químico em função da concentração;
- radiação não monocromática;
- raios dispersos e desalinhamento do sistema de fotodeteção.

4.3 MEDIDAS DE PERFIL DE *ROLL WAVES* ATRAVÉS DA TEORIA DE ABSORÇÃO ÓPTICA

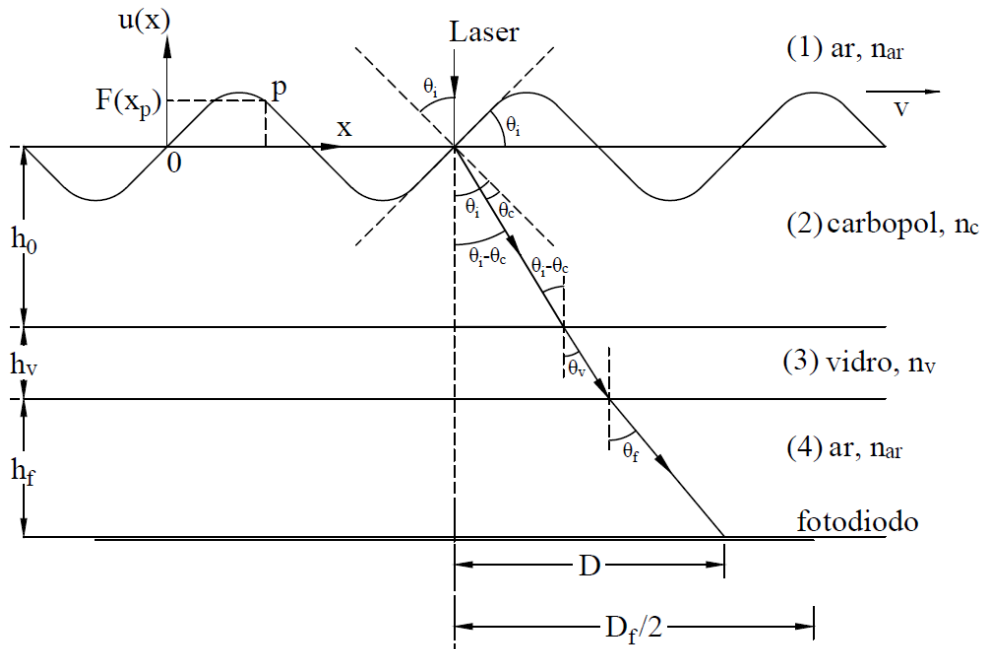
Nesta seção será descrita a técnica empregada para a medição dos perfis de *roll waves* usando o fenômeno de absorção óptica. Conforme será discutido em seções futuras, uma sonda laser percorrerá o meio estratificado composto pelo ar-líquido sob estudo vidro-ar, e incidirá sobre a área útil de um fotodiodo. Ao seguir este trajeto, o feixe de laser sofrerá perda de potência devido à absorção nas diversas camadas, e produzirá uma tensão DC na saída do fotodiodo. Quando for estabelecida uma onda progressiva no meio líquido, haverá modulação da potência óptica do feixe transmitido ao fotodiodo, devido ao efeito de absorção variável em decorrência do perfil da onda. Se existirem condições favoráveis, haverá uma proporcionalidade direta entre a distribuição do perfil da onda, a variação da absorção e a modulação da intensidade óptica do laser, fazendo com que a tensão fotodetectada seja uma versão temporal fiel ao perfil da *roll wave*. Nos próximos parágrafos, investiga-se a existência ou não dessas condições favoráveis.

4.3.1 Deflexão do Feixe de Laser

Representa-se na Figura 6 a estratificação de meios entre a saída da fonte laser e a superfície do fotodiodo. Por simplicidade, considerou-se que a onda progressiva $u(x, t) = F(x - vt)$, sendo v sua velocidade de propagação, possua uma superfície livre com formato

senoidal. A imagem da Figura 6, corresponde a um instante t qualquer como, por exemplo, $t = 0$, tal que $u(x, 0) = v(x) = F(x)$.

Figura 6 - Deflexão do feixe laser.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 6, a região (1), (2), (3) e (4) correspondem ao ar, fluido não-newtoniano translúcido, fundo de vidro do canal de escoamento e ar, respectivamente. O feixe de laser incidente será sempre mantido na direção vertical, atravessando as diversas camadas em direção à área ativa do fotodiodo. No entanto, como a superfície livre do líquido não é uniforme, efeitos de refração da luz ao cruzar cada interface entre meios, causará deflexão do feixe óptico (a não ser quando incide na crista da onda). A fim de contornar este empecilho, sugere-se utilizar um fotodiodo com área relativamente grande. No caso deste trabalho, foi empregado o fotodiodo Newport 818-SL, cuja área tem diâmetro igual a $D_f = 11,3 \text{ mm}$.

A maior deflexão do feixe de laser acontece quando incide sobre a frente de onda com maior declividade, ou seja, quando $dv(x)/dx$ é máxima. Neste caso, a deflexão D é obtida a partir da geometria da Figura 6, e vale

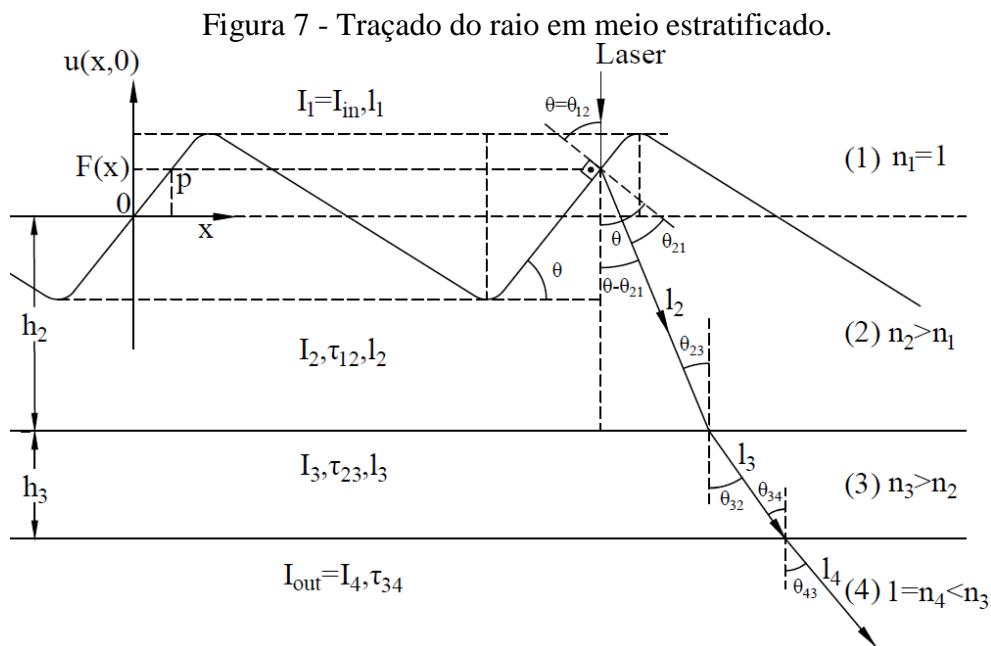
$$D = h_0 \operatorname{tg}(\theta_i - \theta_c) + h_v \operatorname{tg}\theta_v + h_f \operatorname{tg}\theta_f \quad (53)$$

sendo h_0 , h_v e h_f a altura média do fluido, a espessura da camada de vidro e a distância entre o fundo da placa de vidro e a superfície do fotodiodo, respectivamente. Por sua vez, os

ângulos θ_i , θ_r , θ_c , θ_v e θ_f correspondem ao ângulo de incidência na interface ar-fluido, ângulo de refração nesta interface, ângulo de refração na interface fluido-vidro e ângulo de refração na interface vidro-ar, respectivamente. Torna-se imperativo assegurar a condição $D < D_f/2$ para todos os instantes da propagação da *roll wave*. Ajuda a satisfazer esta condição, o estabelecimento de h_f pequeno. No caso deste trabalho, foram usados $h_0 \cong 5$ (mm), $h_v \cong 8$ (mm), $h_f \cong 10$ (mm). Têm-se também, $n_{ar} = 1$, $n_v = 1,2$, porém, o valor do índice de refração do carbopol é de difícil obtenção, principalmente, por apresentar forte absorção, e assim, será um índice de refração complexo. Contudo, para todos os regimes de rotação de bomba, velocidade de escoamento e comprimento de onda usado nos ensaios do experimento, o ângulo de incidência não superou $12,5^\circ$, e assim, a condição $D < D_f/2$ foi obedecida para todos os testes.

4.3.2 Medição do Perfil de *Roll Waves* através da Absorbância

A Figura 7 ilustra o traçado de raios no meio estratificado constituído por: (1) ar, (2) o escoamento da *roll wave* em fluido não Newtoniano, (3) a placa de vidro no fundo do canal, e (4) a camada de ar até o fotodiodo.



Fonte: Elaboração do próprio autor

A onda se propaga na direção $+x$ conforme $u(x, t) = F(x - vt)$, e, a Figura 7 corresponde a $t = 0$, onde $u(x, 0) = u(x) = F(x)$.

O laser incide verticalmente na superfície livre da onda com ângulo $\theta = \theta_{12}$ em relação a reta normal à interface entre os meios (1) e (2). Devido à refração, o feixe penetra no meio (2) com ângulo θ_{21} em relação à normal à interface, obedecendo a Lei de Snell:

$$n_1 \operatorname{sen}\theta_{12} = n_2 \operatorname{sen}\theta_{21} \rightarrow \operatorname{sen}\theta_{21} = \frac{\operatorname{sen}\theta}{n_2} \quad (54)$$

Sendo n_2 a parte real do índice de refração do meio (2), altamente absorvente. Como $n_2 > n_1 = 1$, o raio refratado está mais próximo da normal que o raio incidente, ou seja, $\theta > \theta_{21}$. O ângulo θ_{23} é igual a $(\theta - \theta_{21})$. Pela Lei de Snell,

$$\operatorname{sen}\theta_{32} = \frac{n_3}{n_2} \operatorname{sen}\theta_{23} = \frac{n_3}{n_2} \operatorname{sen}(\theta - \theta_{21}) \quad (55-a)$$

Na sequência, $\theta_{34} = \theta_{32}$, e, da Lei de Snell

$$\operatorname{sen}\theta_{43} = \frac{n_4}{n_3} \operatorname{sen}\theta_{34} = \frac{\operatorname{sen}\theta_{34}}{n_3} \quad (55-b)$$

Como $n_3 > n_4 = 1$, o raio refratado está mais ajustado da normal que o raio incidente, isto é, $\theta_{43} > \theta_{34}$.

Seja E_{in} a amplitude do campo elétrico na saída do laser. Ao atingir a superfície livre da onda, este campo se torna igual

$$E_1 = E_{in} e^{-\alpha_1 l_1} e^{-jk_1 l_1} \quad (56)$$

sendo α_1 o coeficiente de atenuação e k_1 a constante de fase do meio (1). Esta onda se propaga na direção do segmento l_1 e pode ter polarização perpendicular ou paralela ao plano da página. Observações similares se aplicam as demais grandezas α_i , k_i e l_i , para $i = 1, 2, 3$ e 4. A dependência temporal é harmônica, conforme $e^{j\omega t}$, mas ficará implícita por questões de simplicidade de notação.

Ao cruzar a interface (1)-(2), o campo elétrico transmitido será $E_2 = \tau_{12} E_1$, sendo τ_{12} o coeficiente de transmissão de Fresnell. Ao atingir a interface (2)-(3), tal campo torna-se

$$E_2 = \tau_{12} E_{in} e^{-\alpha_1 l_1} e^{-\alpha_2 l_2} e^{-jk_1 l_1} e^{-jk_2 l_2} \quad (57)$$

Ao cruzar a interface (2)-(3), o campo transmitido será $E_3 = \tau_{23} E_2$, sendo τ_{23} o coeficiente de Fresnell associado. Quando o campo atingi a interface (3)-(4), tem-se o campo

$$E_3 = \tau_{23} \tau_{12} E_{in} e^{-(\alpha_1 l_1 + \alpha_2 l_2 + \alpha_3 l_3)} e^{-j(k_1 l_1 + k_2 l_2 + k_3 l_3)} \quad (58)$$

Por fim, ao cruzar a interface (3)-(4), o campo transmitido será $E_4 = \tau_{34} E_3$, sendo τ_{34} o respectivo coeficiente de Fresnell. Quando este campo atingir a superfície do fotodiodo, torna-se

$$E_4 = \tau_{34} \tau_{23} \tau_{12} E_{in} e^{-(\alpha_1 l_1 + \alpha_2 l_2 + \alpha_3 l_3 + \alpha_4 l_4)} e^{-j(k_1 l_1 + k_2 l_2 + k_3 l_3 + k_4 l_4)} \quad (59)$$

Sobre o fotodiodo, a intensidade óptica será

$$\begin{aligned} I_{out} = E_4 E_4^* &= (\tau_{12} \tau_{23} \tau_{34})^2 E_{in}^2 e^{-2(\alpha_1 l_1 + \alpha_2 l_2 + \alpha_3 l_3 + \alpha_4 l_4)} \\ &= I_{in} T_{12} T_{23} T_{34} e^{-2(\alpha_1 l_1 + \alpha_2 l_2 + \alpha_3 l_3 + \alpha_4 l_4)} \end{aligned} \quad (60)$$

sendo $I_{in} = E_{in}^2$ a potência do laser, e, os fatores $T_{12} = \tau_{12} \tau_{12}^*$, $T_{23} = \tau_{23} \tau_{23}^*$, e $T_{34} = \tau_{34} \tau_{34}^*$ as transmitância entre os meios (1)-(2), (2)-(3) e (3)-(4), respectivamente.

Com isto, obtém-se

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = T_{12} T_{23} T_{34} e^{-2(\alpha_1 l_1 + \alpha_2 l_2 + \alpha_3 l_3 + \alpha_4 l_4)} \quad (61)$$

A relação (Eq.61) se aplica tanto para o caso de campo elétrico com polarização perpendicular (\vec{E}_\perp) ou com polarização paralela (\vec{E}_\parallel), conforme será visto adiante. Contudo, aproximações simplificadoras podem ser aplicadas a (Eq. 61).

Em primeiro lugar, como o ar não tem perdas, ocorre $\alpha_1 = \alpha_4 = 0$, e assim, $\alpha_1 l_1 = \alpha_4 l_4 = 0$. O mesmo se aplica ao vidro, cuja espessura é pequena: $\alpha_3 = 0$, e daí, $\alpha_3 l_3 \cong 0$.

Conseqüentemente, (Eq. 61) torna-se

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = T_{12} T_{23} T_{34} e^{-2\alpha_2 l_2} \quad (62)$$

Os coeficientes de transmissão τ_{jk} obedecem às relações de Fresnell, quais sejam (Hecht, 1987),

$$\tau_{\perp} = \frac{2 \operatorname{sen} \theta_t \cos \theta_i}{\operatorname{sen} (\theta_i + \theta_t)} \quad (63)$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{2 \operatorname{sen} \theta_t \cos \theta_i}{\operatorname{sen} (\theta_i + \theta_t) \cos (\theta_i - \theta_t)} \quad (64)$$

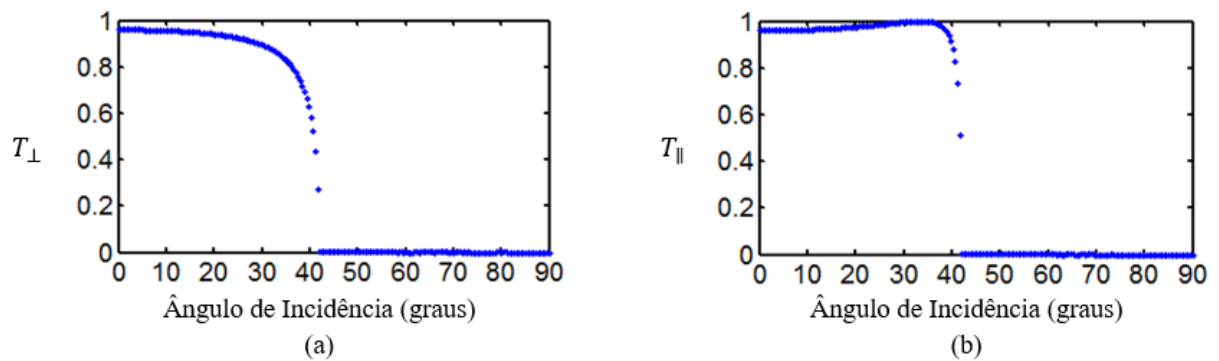
onde o sub-índice (\perp) se aplica a campo elétrico perpendicular, e, (\parallel), a campo elétrico paralelo ao plano da página. Por sua vez, o sub-índice (i) refere-se a raios incidentes e (t) a raios transmitidos.

Como visto anteriormente, as transmitâncias são dadas por

$$T_{\perp} = \tau_{\perp} \tau_{\perp}^* = |\tau_{\perp}|^2; \quad T_{\parallel} = \tau_{\parallel} \tau_{\parallel}^* = |\tau_{\parallel}|^2 \quad (65)$$

A rigor, seria necessário testar o comportamento de T_{12} , T_{23} e T_{34} , tanto para polarização perpendicular quanto paralela, para todos os ângulos de incidência, entre 0° e 90° . Contudo, será discutido apenas o caso mais crítico, que envolve os meios com maior discrepância entre índices de refração, ou seja, na interface (3)-(4), pois o vidro tem o maior índice e o ar o menor índice. Quando o ângulo de incidência entre o laser de entrada e a superfície livre da onda, θ_{12} , varia, todos os demais ângulos também variam. Nas Figuras 8(a) e 8(b) têm-se as transmitâncias T_{34} para polarização perpendicular e paralela, respectivamente.

Figura 8 - Transmitância em polarização perpendicular e paralela.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Como discutido, na Figura 6 verificou-se que a maior deflexão do feixe, D , ocorre quando o laser incide sobre o ponto da onda com maior derivada $dv(x)/dx$. A região com maior inclinação na Figura 7 é aquela onde o laser incidente está desenhado. A derivada $dv(x)/dx$ nesta região corresponde à reta tangente com inclinação θ_{12} , igual à do ângulo de incidência. Será verificado nos próximos Capítulos, que as *roll waves* estabelecidas experimentalmente no canal apresentam ângulos $\theta = \theta_{12}$, inferiores a $12,5^\circ$.

Ora, as Figuras 8(a) e 8(b) informam que a variação das transmitâncias T_{34} , para polarização perpendicular e paralela, e para ângulos de incidências menores que 20° , são inferiores a 3% e 1,5%, respectivamente. Ou seja, para os maiores ângulos θ na região crítica da onda, por causarem as maiores deflexões angulares nas demais interfaces, infere-se que as variações em T_{34} são muito pequenas, podendo aproximá-lo por uma constante. Se esta aproximação é boa para T_{34} , será ainda melhor para T_{12} e T_{23} .

Portanto, (Eq. 62) pode ser aproximada por

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = C_I e^{-2\alpha_2 l_2} \quad (66)$$

sendo $C_I = T_{12}T_{23}T_{34}$ constante.

No meio (2), tem-se α_2 constante e $l_2 = l_2(x)$, onde x é a coordenada associada ao ponto onde o laser (vertical) incide sobre a superfície livre da onda $v(x, t) = F(x - vt)$, para $t = 0$. Pela Figura 6, deduz-se que

$$\cos \theta_{23} = \cos (\theta - \theta_{21}) = \frac{h_2 + F(x)}{l_2(x)}, \quad l_2(x) = \frac{h_2 + F(x)}{\cos(\theta - \theta_{21})} \quad (67)$$

sendo h_2 a altura média do fluido.

Sendo os valores de θ nos experimentos inferiores a $12,5^\circ$, os ângulos $(\theta - \theta_{21})$ são ainda menores. Assim, na região mais crítica (de maior derivada), pode-se aproximar $\cos(\theta - \theta_{21}) \cong 1$ com erro inferior a 1,7%.

$$l_2(x) \cong h_2 + F(x) \quad (68)$$

Consequentemente, de (Eq.66) e (Eq. 68),

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = C_I e^{-2\alpha_2(h_2+F(x))} \quad (69)$$

a partir da qual se calcula a absorvância

$$A = -\ln \left(\frac{I_{out}}{I_{in}} \right) = \ln \{C_I e^{2\alpha_2(h_2+F(x))}\} = \ln C_I + 2\alpha_2(h_2 + F(x)) = D_c + 2\alpha_2 F(x) \quad (70)$$

sendo $D_c = \ln C_I + 2\alpha_2 h_2$.

Se for usado um medidor de absorvância, a tensão elétrica gerada será uma versão temporal de (Eq. 70).

$$v_{out}(t) = \mathfrak{R}_A [D_c + 2\alpha_2 F(-vt)] \quad (71)$$

obtida fazendo $x = 0$ em $v(x, t) = F(x - vt)$, ou seja, $v(t) = F(-vt)$, e, D_c é um *offset* de tensão. A constante \mathfrak{R}_A é a responsividade do medidor (medida em V/Au).

Extraindo o valor D_c dessa tensão, obtém-se

$$v_{out}(t) = 2\alpha_2 \mathfrak{R}_A F(-vt) = \hat{V}_0 F(-vt) \quad (72)$$

sendo $\hat{V}_0 = 2\alpha_2 \mathfrak{R}_A$.

Esta relação informa que o medidor de absorvância detecta a versão temporal do perfil da *roll wave* mostrada na Figura 6.

4.4 MEDIÇÃO DO PERFIL DE *ROLL WAVES* ATRAVÉS DO USO DE FOTODIÓDOS

No fotodiodo, ocorre a conversão da potência óptica (mW) em tensão elétrica (mV). Se A for a área de seção transversal do laser, a potência óptica que incide sobre o fotodiodo é

$$P_{out} = I_{out} A \quad (73)$$

A tensão fotodetectada é calculada a partir de (Eq. 66), ou seja

$$v_{out} = \mathfrak{R}_A P_{out} = \mathfrak{R}_A I_{out} A = \mathfrak{R}_A A I_{in} C_I e^{-2\alpha_2 l_2} = V_{pico} e^{-2\alpha_2 l_2} \quad (74)$$

sendo $V_{pico} = \Re_A A I_{in} C_I$.

Recomenda-se a (Eq. 68),

$$v_{out} = V_{pico} e^{-2\alpha_2 h_2} e^{-2\alpha_2 F(x)} \quad (75)$$

E, usando a série de Taylor

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots \quad (76)$$

obtém-se

$$v_{out} = V_{pico} e^{-2\alpha_2 h_2} (1 - 2\alpha_2 F(x)) \quad (77)$$

Extraindo-se p valor D_c usando um capacitor de passagem, v_{out} torna-se

$$v_{out}(x) = +V_0 F(x) \quad (78)$$

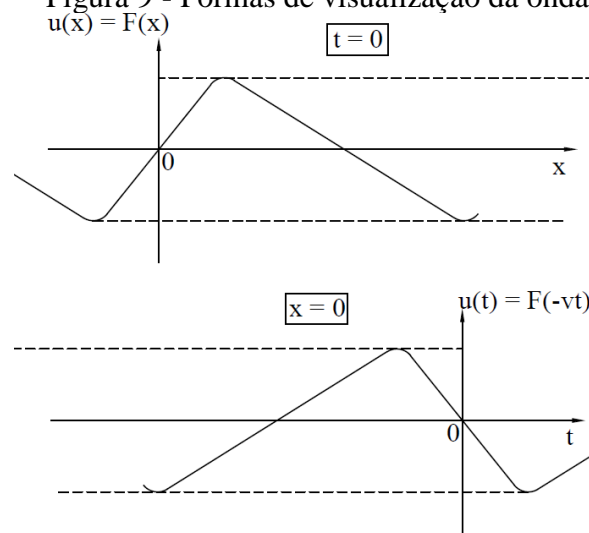
sendo $V_0 = -2\alpha_2 V_{pico} e^{-2\alpha_2 h_2}$.

Esta tensão corresponde ao valor medido em $t = 0$ quando o feixe incide na posição x do gráfico $v(x, 0)$ versus x da Figura 7. Se for permitido que o tempo varie, obtém-se a onda $F(x - vt)$, e, montando-se a sonda na posição x e deixando o tempo variar, v_{out} torna-se

$$v_{out}(t) = +V_0 F(-vt) \quad (79)$$

Na Figura 9 ilustram-se os dois pontos de vista: em (a) tem-se $V(x)$, e, em (b), $V(t)$.

Figura 9 - Formas de visualização da onda.



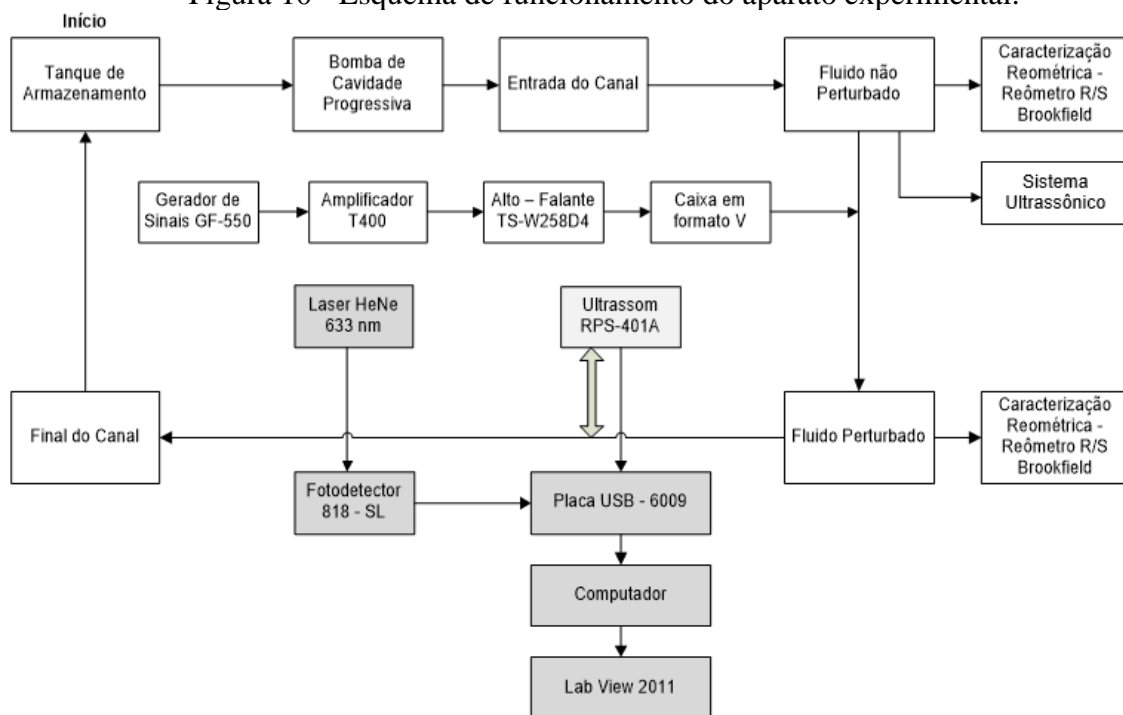
Fonte: Elaboração do próprio autor

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Este Capítulo apresenta as condições que devem ser impostas para que o aparato experimental propicie a geração, propagação e estabilização das *roll waves*. Para tanto, existe a necessidade que o escoamento ocorra sob condições favoráveis de geometria e dinâmica, e que ocorra uma perturbação, com frequência definida dentro do domínio específico de geração do fenômeno (Di Cristo, 2013; Ferreira, 2013). O aparato experimental é constituído de equipamentos necessários para garantir condições controladas de escoamento, caracterização reológica do fluido teste e medição das *roll waves* com precisão. Assim, o aparato é composto por diversos módulos, no qual cada um desempenha um papel sistemático, configurado por uma metodologia de trabalho específica e dedicada para cada função desempenhada.

O esquema de funcionamento e utilização de todo o aparato experimental, para fins de medição de *roll waves*, é mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Esquema de funcionamento do aparato experimental.



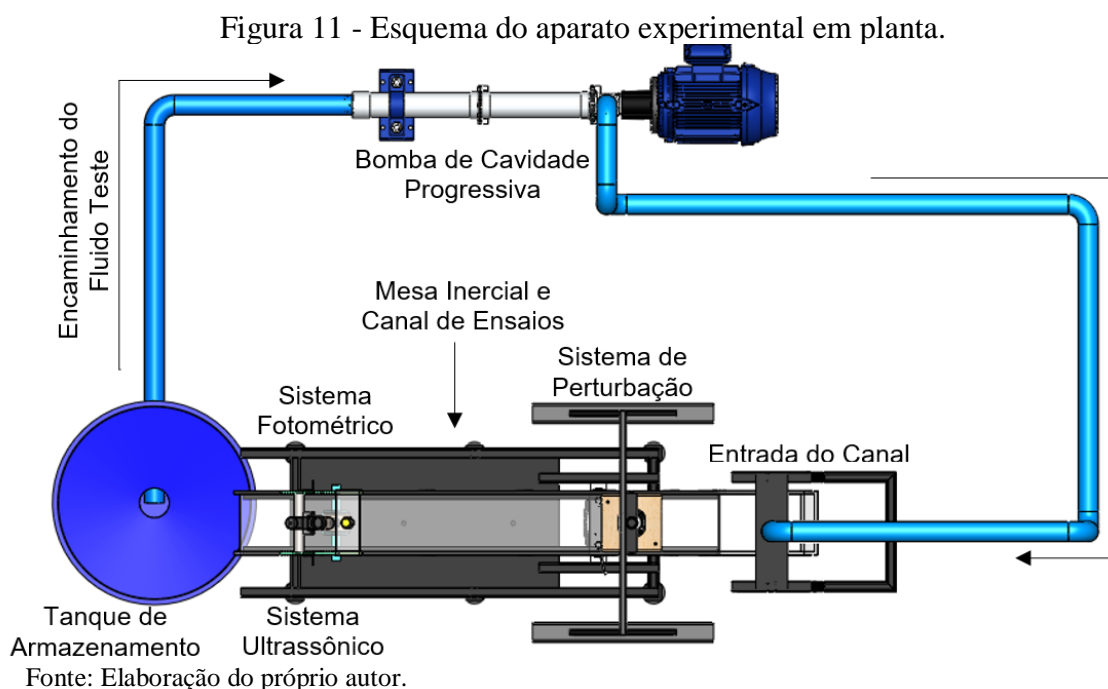
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nesta abordagem introdutória é importante fazer algumas definições, para melhor esclarecimento do leitor nos subitens que compõem este Capítulo.

Sendo assim, pode-se definir o canal de ensaio como uma estrutura formada por uma seção retangular, composta por um fundo de vidro e paredes de acrílico, posicionado sobre uma mesa inercial, projetada para isolar vibrações externas.

O canal de ensaios pode variar sua inclinação entre 0 e 25 graus. O escoamento do fluido teste ocorre por meio de uma bomba de cavidade progressiva e vazão constante, regulada por um inversor de frequências. O fluido teste utilizado é o gel de carbopol 996, confeccionado segundo metodologias estabelecidas anteriormente pela equipe (Leite, 2009; Minussi et al, 2013), respeitando as recomendações da Noveon, (2008), fabricante do carbopol. Para a caracterização reológica do fluido teste foi utilizado um reômetro de cilindros coaxiais (reômetro R/S Brookfield), controlando taxa de deformação. A vazão no canal é variada em função da rotação da bomba, e a aferição da vazão é feita pelo método gravimétrico, ao passo que a velocidade na superfície livre é aferida utilizando um flutuador de isopor expandido, sem qualquer efeito de arraste sobre o escoamento do carbopol.

Para as medições foi desenvolvido, inicialmente, um sistema de medição de nível constante (em escoamento laminar), com sensores ultrassônicos (Cunha, 2013) e (Maciel et al. 2017), e, na sequência, uma perturbação (jato de ar) de frequência conhecida é aplicada sobre o escoamento em um ponto fixo a montante do canal, que, após evolução, e estabilização (*roll waves*), é medida (adquirida), através de sistemas específicos (sensores ultrassônicos e fotométricos).



A Figura 11 apresenta o detalhamento do aparato experimental, em um desenho em planta, posicionando cada módulo que compõe o aparato experimental na mesma posição do esquema de funcionamento da Figura 10. Já a Figura 12 apresenta o aparato experimental em representação isométrica, posicionando todos os módulos que compõem a estrutura física no corpo do aparato.

Figura 12 - Aparato experimental em vista isométrica.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

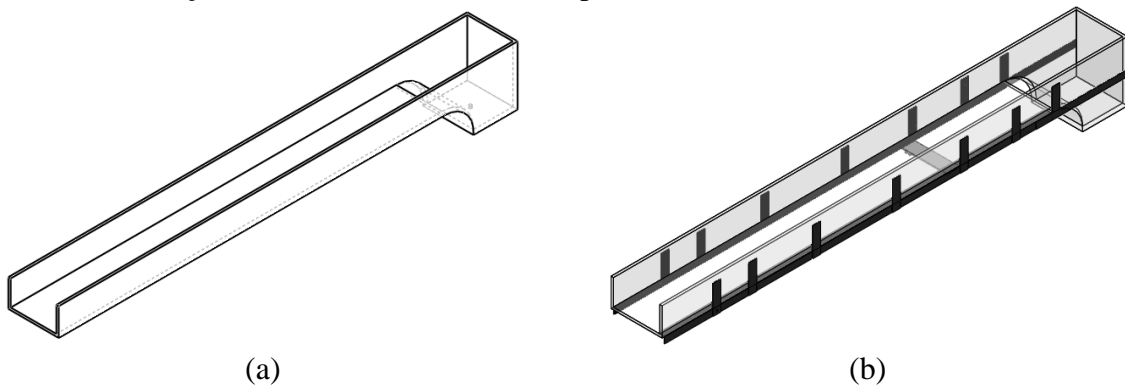
O aparato experimental será apresentado na sua totalidade, detalhando cada módulo de forma pontual, abordando toda metodologia empregada na concepção e desenvolvimento de cada parte em função do produto final – geração, propagação, estabilização e medição de *roll waves* na subseção 5.1. O detalhamento do projeto construtivo (vistas frontais, lateral, inferior, superior e isométrica) são apresentados no Apêndice A.

5.1 CONCEPÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE APARATO EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DE *ROLL WAVES* EM CANAL

5.1.1 Canal de Ensaio

O canal de ensaios, apresentado na Figura 13, é composto por paredes de acrílico (2,50 metros de comprimento, 0,15 metros de altura e 0,30 metros de largura) e fundo de vidro fixados através do ajuste de um esqueleto metálico.

Figura 13 - Canal de ensaios em vista isométrica. (a) Condição inicial do canal de ensaios. (b) Detalhe da armação metálica, fundo de vidro e paredes de acrílico do canal de ensaios.

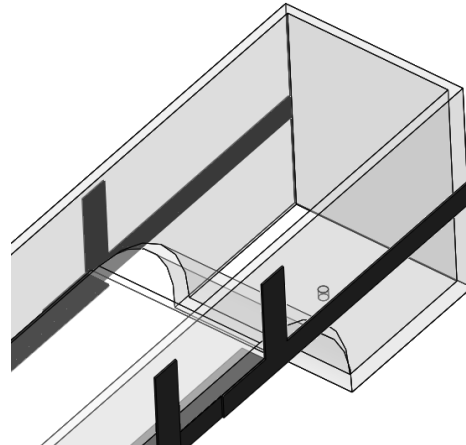


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na junção entre o vidro e o acrílico (fundo e paredes laterais), foi utilizado uma fina camada de cola plástica, para prevenir possíveis vazamentos. O vidro no fundo do canal de ensaios é justificado pelo envelhecimento acelerado do material acrílico, este apresenta degradação e surgimento de ranhuras no decorrer de um pequeno período de utilização, já o vidro não apresenta esta característica, proporcionando um maior tempo na utilização do canal de ensaios com aplicações de sistemas fotométricos.

A montante (entrada do canal), foi instalado uma caixa de estagnação, através de um rebaixamento do fundo do canal. A junção do nível rebaixado com o fundo normal do canal foi feita de forma suavizada, para que o fluido apresentasse regime laminar. A Figura 14 mostra o fundo da caixa de estagnação, detalhando o dreno para limpeza e manutenção.

Figura 14 - Detalhe da caixa de estagnação em vista isométrica.

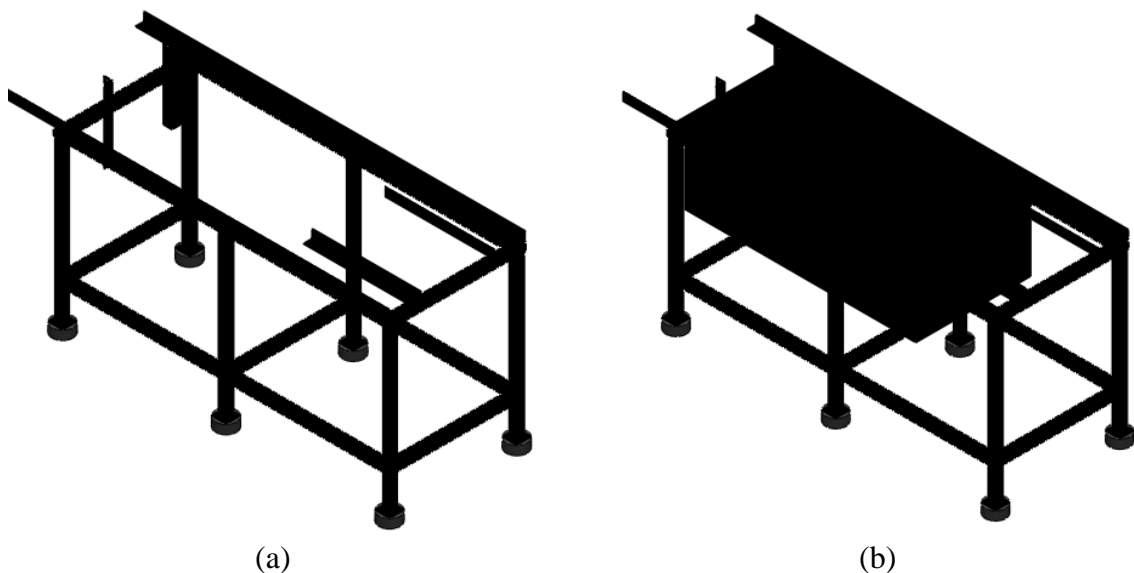


Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.1.2 Mesa Inercial

A mesa do canal de ensaios foi projetada para isolar toda vibração mecânica externa, sendo confeccionada a partir de barras de aço soldadas entre si, perfazendo as dimensões: 2,00 metros de comprimento, 0,85 metros de altura, 0,70 metros de largura e contendo 325 litros de concreto. O volume de concreto adicionou um peso de 1.000 quilogramas, garantindo a inércia ao corpo da mesa, evitando propagação de vibrações pelo corpo metálico. (Figura 15)

Figura 15 - Mesa inercial em vista isométrica. (a) Detalhe da armação metálica. (b) Detalhe do bloco de concreto incorporado à mesa.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Todos os encaixes entre a mesa inercial, o canal de ensaios, e o chão, foram feitos através de borrachas. O amortecimento das vibrações entre o canal de ensaios e a mesa inercial foram atenuados por placas de borrachas com espessura de 5 milímetros. Já as vibrações entre o chão e a mesa inercial foram atenuadas por um dispositivo chamado *vibra-stop*, que consiste em uma peça de borracha em formato circular. (Figura 16)

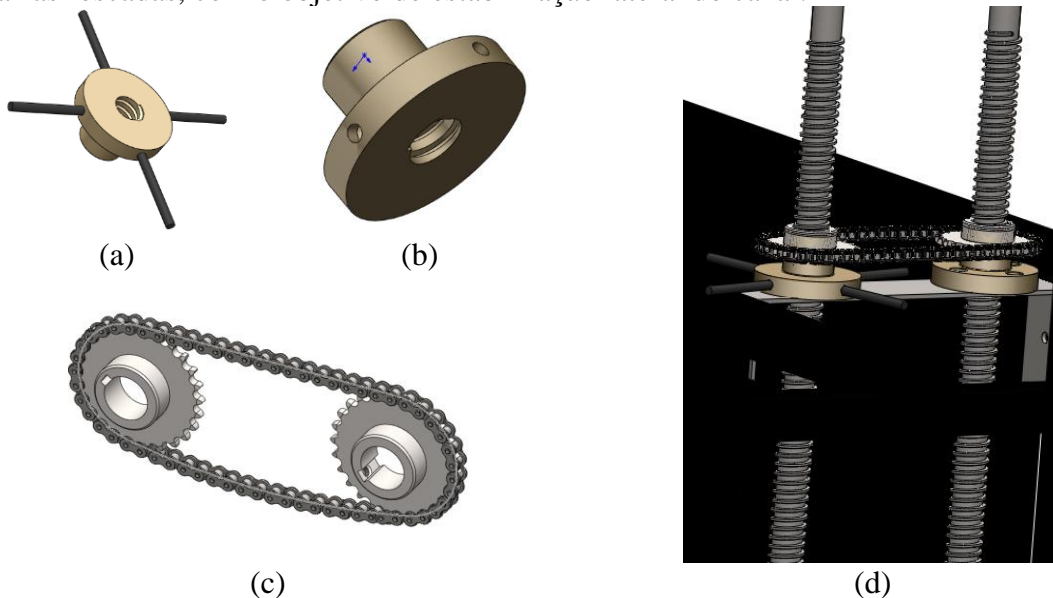
Figura 16 - Dispositivo anti-vibração em vista isométrica.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Um sistema de inclinação foi projetado, no início do canal (logo após a caixa de estagnação), e está fixado na estrutura da mesa inercial para possibilitar variar a inclinação do canal de 0 até 25 graus. Para tanto, duas engrenagens com duas barras roscadas, associadas por uma corrente, estão instaladas para possibilitar a elevação do canal em ambos os lados da seção retangular, impedindo o desnível transversal. (Figura 17)

Figura 17 - Esquema do sistema de inclinação. (a) Detalhe da empunhadura acoplado à porca da barra roscada. (b) Detalhe da porca da barra roscada sem empunhadura. (c) Detalhe do sistema de engrenagens e correntes. (d) Detalhe do sistema de inclinação, apresentando as barras roscadas, com o objetivo de estabilização lateral do canal.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.1.3 Produção do Fluido Teste – Gel de Carbopol 996

Dentre as matérias primas usadas na preparação de géis, tem-se destacado o ácido carboxivinílico “Carbopol”. Este é o nome comercial dado a uma família de polímeros, poliacrílicos e ácidos poliacrílicos, muito usados como espessantes. Polímero é uma palavra derivada da língua grega onde “polys” significa muitos e “meros” significa partes. Portanto, a definição de polímero é conhecida como sendo a formação de um produto através da junção de várias partes de macromoléculas.

De acordo com as características dos polímeros, os géis podem apresentar natureza iônica ou não-iônica. Os géis de natureza não-iônica possuem estabilidade em ampla faixa de pH, tornando-se possível a veiculação de substâncias de caráter ácido, como os alfa-hidroxiácidos. Já os de caráter aniônico são pH-dependentes, ou seja, apresentam-se estáveis em pH neutro ou próximo do neutro. Assim, este produto tem como características as mudanças nas propriedades reológicas por meio das variações no pH.

Portanto, para se obter o fluido teste (gel de carbopol), foi necessário confeccioná-lo, iniciando a produção através do carbopol na sua condição inicial. Nesta condição, o polímero apresenta as características de ser um pó branco extremamente fino, que é polvilhado em água deionizada. A deionização da água é um processo no qual é removido todos os íons presentes na água, através de resinas catiônicas e aniônicas, ou seja, através da adição e remoção de elétrons, removendo da água nitrato, cálcio, magnésio, cádmio, bário, chumbo e algumas outras formas de rádio.

Após ser polvilhado, o carbopol deve ser totalmente dissolvido na água deionizada, este processo deve ser auxiliado por um banho maria a 70 °C, para assim obter total dissolução. Após este processo, a solução deve ser tampada e deixada em descanso (*overnight*).

Após a *overnight* (período de repouso necessário para a polimerização), a solução deve ser neutralizada, para quebra dos grupos carboboxilas e assim obter o espessamento e transparência típica dos géis de carbopol. Para tanto, utilizou-se uma base inorgânica NaOH (hidróxido de sódio), cuja proporção mássica é obtida por meio de uma relação direta com a proporção da massa do carbopol. Após a neutralização, está finalizada a fase de preparação do fluido teste (gel bastante espesso e transparente).

No entanto, antes de preparar o fluido teste, foi necessário indicar as concentrações e a quantidade que seria produzido. Neste trabalho utilizaram-se concentrações de 0,08, 0,10 e

0,12%, para vários testes, que após análises de resultados obtidos predominou-se a concentração de 0,10%.

A Equação 80 permite calcular a concentração do gel de carbopol.

$$C = \frac{m_{Carb}}{m_{H_2O} + m_{Carb} + m_{NaOH}} \quad (80)$$

onde:

C : concentração em massa do carbopol;

m_{Carb} : massa do carbopol;

m_{H_2O} : massa de água deionizada utilizado na solução;

m_{NaOH} : massa de hidróxido de sódio.

Já a Equação 81 apresenta a relação de neutralização necessária, onde a massa do hidróxido de sódio é 3,2 vezes menor que a massa do carbopol, na sua condição inicial.

$$\frac{m_{Carb}}{m_{NaOH}} = 3,2 \quad (81)$$

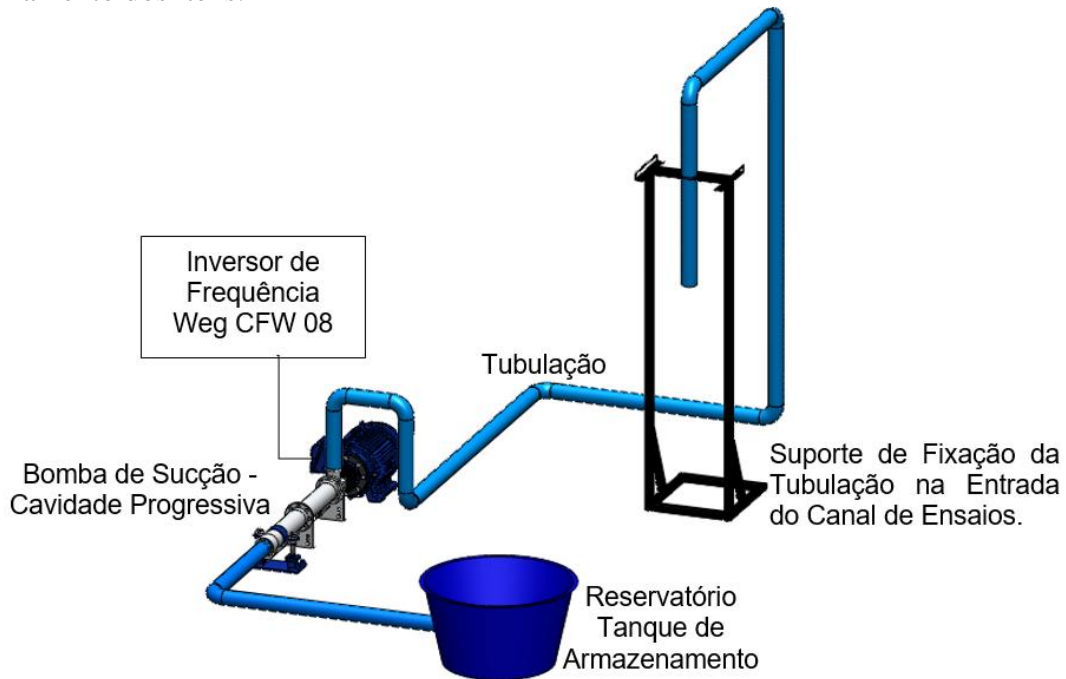
Para um dos sistemas de medição (sistema fotométrico) foi necessário utilizar o azul de metileno como corante no fluido teste, para poder aplicar a técnica de medição por absorvância.

O azul de metileno é um composto aromático heterocíclico, sólido (verde escuro), e quando solúvel em água, produz uma solução azul, inodoro com fórmula molecular: $C_{16}H_{18}ClN_3S$ e massa molar 319,85 g/mol.

5.1.4 Sistema de Manejo do Fluido Teste - Circuito Fechado

Este sistema é composto por quatro itens: reservatório, inversor de frequência (controle da bomba de sucção), bomba de cavidade progressiva e tubulação.

Figura 18 - Esquema do sistema de manejo de fluido teste em vista isométrica com detalhamento dos itens.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 18 mostra o tanque de armazenamento montado a partir de uma caixa d'água de 250 litros, interligada à bomba de sucção, esta é controlada pelo inversor de frequência (Weg CFW 08), que configura as rotações do motor da bomba, proporcionando alterações na velocidade e vazão do fluido no canal de ensaios. A bomba de sucção (marca Geremia, modelo WHT32F e potência 5 CV), é formada principalmente por um êmbolo com cavidades progressivas (forma helicoidal), encamisado por um cilindro, formando cavidades vedadas entre o bocal de sucção e o de descarga da bomba, onde a abertura e o fechamento destas cavidades, são processadas de forma alternada e em progressão ininterrupta, fazendo com que o fluido seja deslocado continuamente da sucção para a descarga da bomba. A tubulação é composta por mangueiras e bocais de engates rápidos de 2 polegadas, permitindo ligação entre os componentes deste sistema.

A Figura 19 mostra a implementação necessária para atenuar formações de bolhas. Este dispositivo tem por finalidade amortecer o impacto do fluido na entrada da caixa do reservatório, direcionando-o para a parte interior do tanque de armazenamento.

Figura 19 - Reservatório – tanque de armazenamento. (a) Detalhe do dispositivo de entrada no reservatório. (b) Tanque de armazenamento.

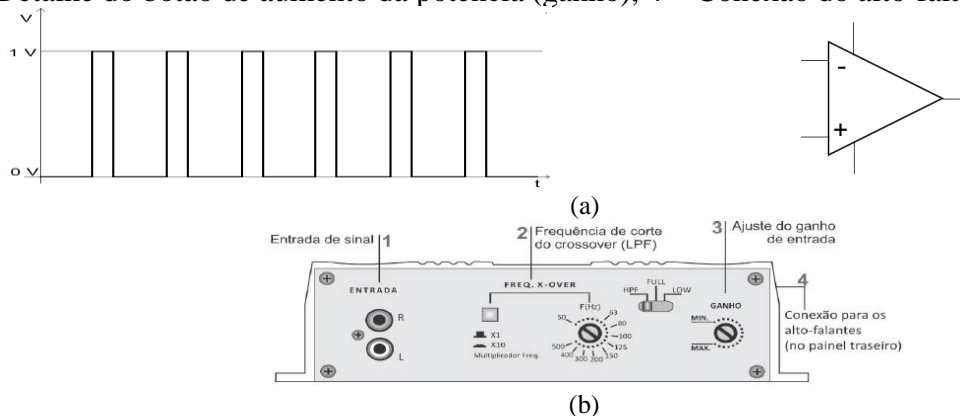


Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.1.5 Sistema de Perturbação

O sistema de perturbação do escoamento foi montado a partir da associação de um gerador de sinais (GF-550 da Instrutherm), acoplado a um amplificador de áudio (T 400, classe de operação D), ligado a um alto-falante (TS-W258D4 de 25 centímetros de diâmetro e potência de 1200 watts), específicos para baixa frequência.

Figura 20 - Representação do sistema de perturbação. (a) Onda quadrada do gerador de sinais e Amplificador. (b) Amplificador (T 400, classe de operação D), 1 – Detalhe da entrada do sinal (sinal advindo do gerador de sinais), 2 – Detalhe do ajuste da frequência de corte, 3 – Detalhe do botão de aumento da potência (ganho), 4 – Conexão do alto-falante.

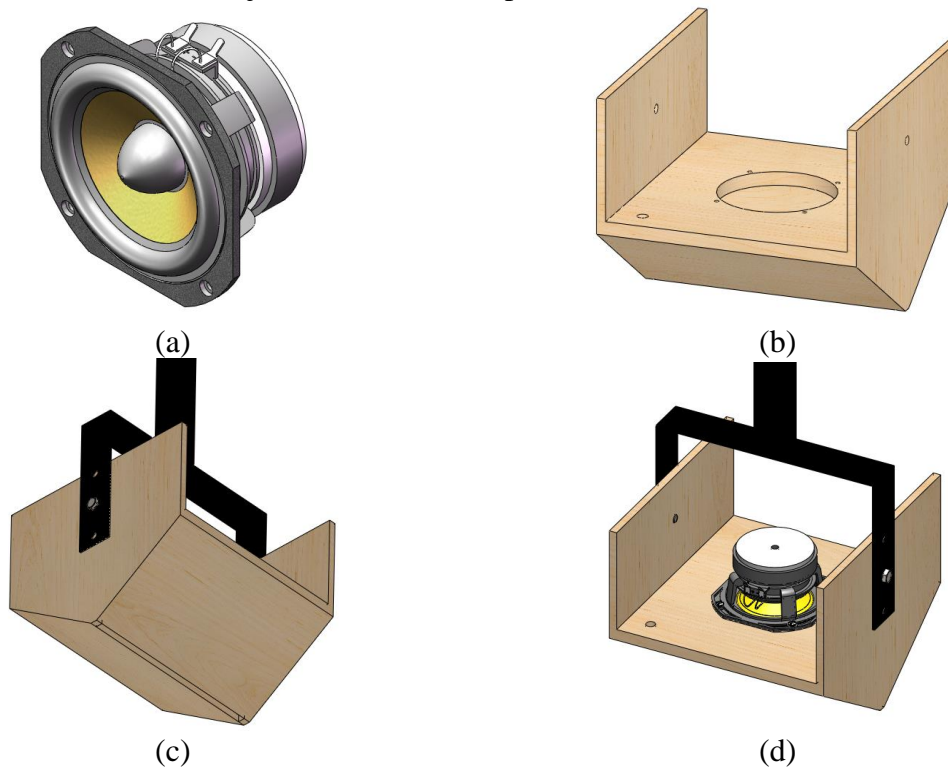


Fonte: Elaboração do próprio autor.

A perturbação é gerada através de um sinal no gerador de sinais (Instrutherm, GF-220), que é configurado para apresentar uma onda quadrada de 1 volt, com as características próximas de um pulso (pico de 1 volt estreito e o vale de 0 volt largo). Este controle é realizado no painel frontal do gerador de sinais, onde também é possível ajustar a frequência desejada. Após o sinal ser gerado ele é amplificado pelo amplificador de áudio. (Figura 20)

O alto falante foi instalado em uma caixa no formato de “V” com duas fendas: a primeira, posicionada na parte superior da caixa, tem a finalidade de introduzir o ar dentro da caixa, quando o diafragma do alto falante se desloca para cima; a segunda, posicionada na parte inferior (próximo a superfície do escoamento), tem por finalidade, injetar o fluxo de ar sobre a superfície livre do fluido, perturbando-o de forma controlada. (Figura 21)

Figura 21 - Representação do sistema de perturbação. (a) Alto Falante. (b) Caixa em “V” detalhe do furo de entrada de ar na parte superior. (c) Caixa em “V” detalhe do furo da parte inferior, saída de ar. (d) Conjunto do sistema de perturbação montado.

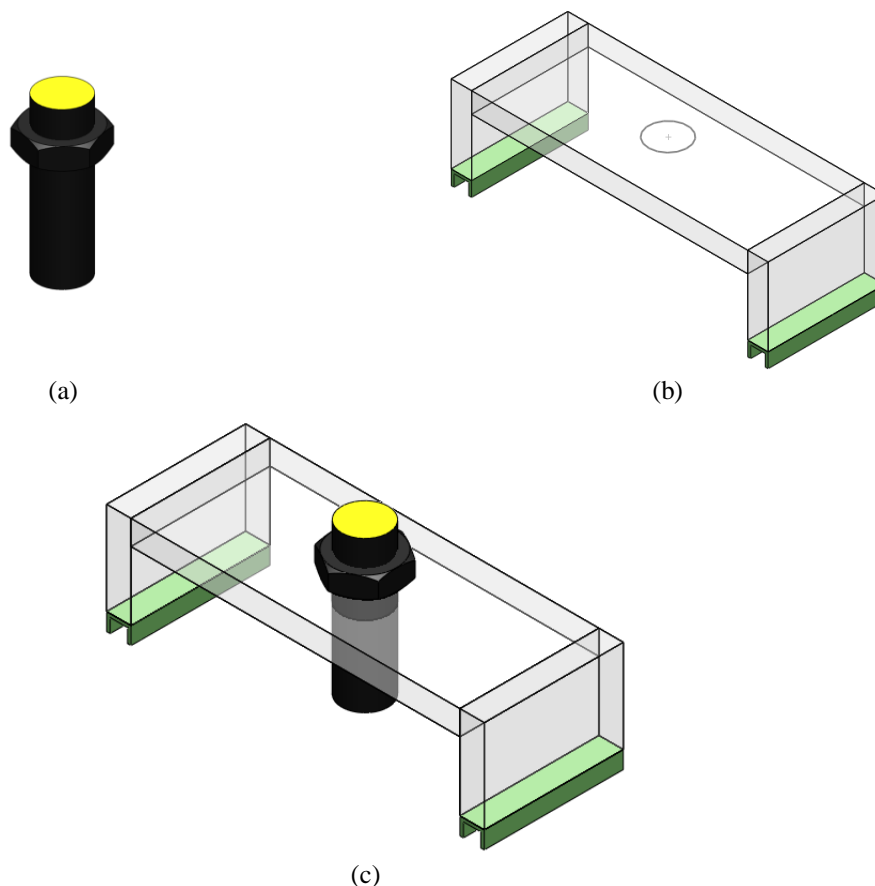


Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.1.6 Sistema Ultrassônico

O sistema ultrassônico é constituído por transdutor ultrassônico (RPS – 401A), fixado sobre um suporte de acrílico, que se encaixa sobre as paredes laterais do canal de ensaios. O ajuste da distância do transdutor até o fundo do canal é feito por meio de um parafuso, em torno do próprio transdutor, conforme apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Desenho do sistema ultrassônico. (a) Transdutor ultrassônico. (b) Suporte do transdutor ultrassônico. (c) Transdutor ultrassônico e suporte montados.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O transdutor ultrassônico RPS -401A é conhecido comercialmente como transdutor de medição de nível. A partir de suas especificações técnicas (Tabela 2), foi concluído que este conferia as especificações necessárias para ser utilizado nesta pesquisa.

Tabela 2 - Especificações técnicas do transdutor ultrassônico RPS – 401A.

Fabricante	Migatron Corp
Alcance de Medição	101,6 – 1016 (mm)
Tensão Elétrica de Entrada	20 – 30 (V)
Corrente Elétrica de Entrada	50 (mA)
Temperatura Ambiente	0 – 60 (°C)
Umidade Ambiental	0 – 95 %
Encapsulamento	PVC
Tensão Elétrica de Saída	0 – 130 (V)
Frequência do Transdutor	175 (kHz)
Tempo de Resposta	16 (ms)

Fonte: Migatron Corp

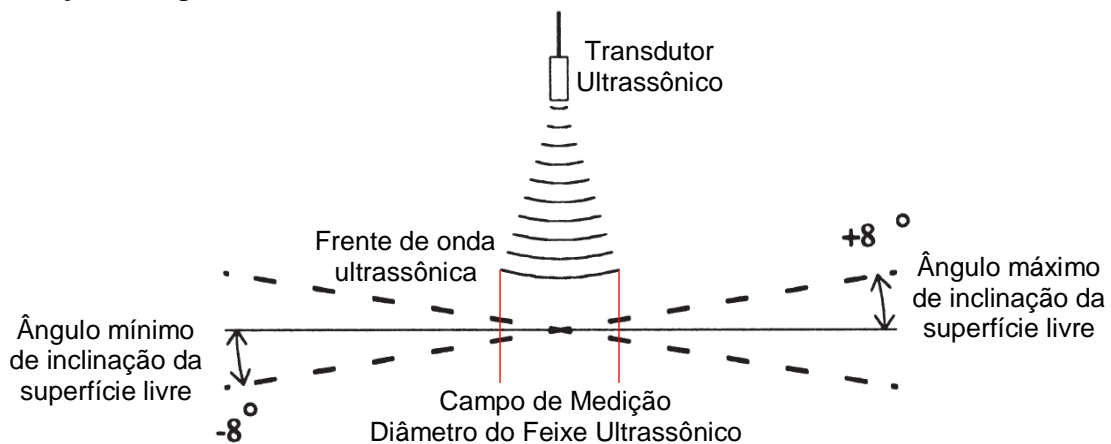
Após considerar os dados apresentados na Tabela 2, para este sistema de medição foi utilizado um tempo de aquisição de 10 milissegundos, garantindo ao menos 1 amostragem por janela de resposta do transdutor. A distância do transdutor ao espaço de medição esteve entre

150 – 165 milímetros, e no momento das medições a temperatura ambiente média era de 25 °C, com umidade média de 35 %. Para alimentação eletrônica do transdutor (tensão elétrica de entrada) foi utilizado uma fonte de tensão variável (Hikari HK-3003S), ajustado em 20 volts, e obteve-se de 5 – 8 volts de tensão elétrica na saída do transdutor.

Este sistema utiliza a metodologia de pulso eco, que consiste em uma frente de onda de velocidade constante e valor conhecido, emitida e recebida dentro de um intervalo de tempo, sabendo-se o tempo necessário para percorrer a distância entre o transdutor e o anteparo a ser medido, é possível determinar a distância deste até o transdutor.

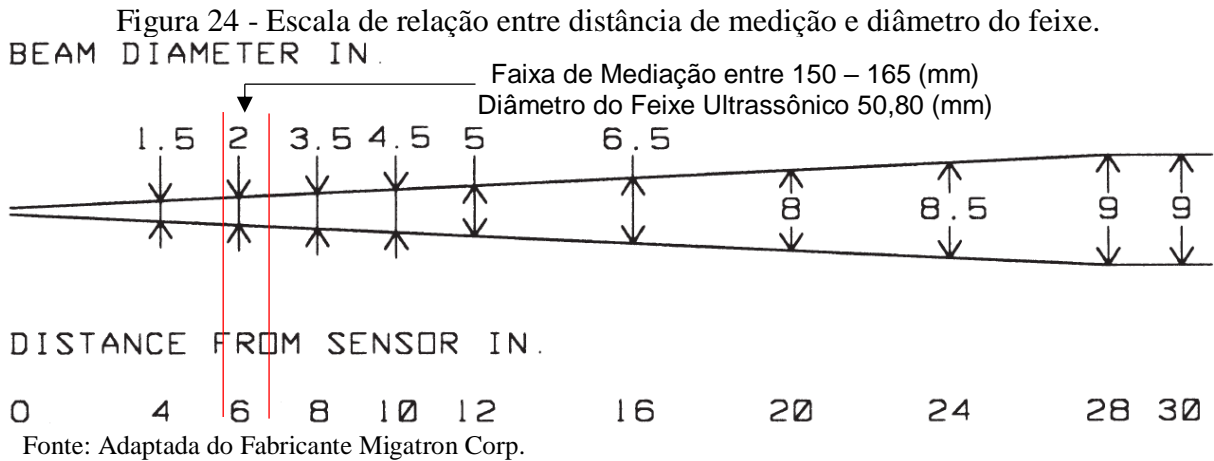
O transdutor ultrassônico RPS - 401A, tem limitações nas zonas de maiores inclinações. Segundo as especificações técnicas da Migatron Corp (2018), a superfície a ser aferida não pode ter um valor de inclinação maior que 8 graus em relação a linha horizontal (Figura 23).

Figura 23 - Esquema do campo de medição da frente de onda ultrassônica e o ângulo de inclinação da superfície livre.



Fonte: Adaptada do Fabricante Migatron Corp.

Outra abordagem considerada foi realizada por meio do estudo do diâmetro do campo de medição do feixe ultrassônico. Segundo Migatron Corp (2018), quando o transdutor estiver localizado a 101,60 milímetros do anteparo a ser aferido, o diâmetro do feixe do campo acústico será de 38,10 milímetros (distância mínima de medição) e quando o transdutor estiver localizado a 762,00 milímetros do anteparo a ser aferido, o diâmetro do feixe do campo acústico será de 228,60 milímetros (distância máxima de medição). (Figura 24)

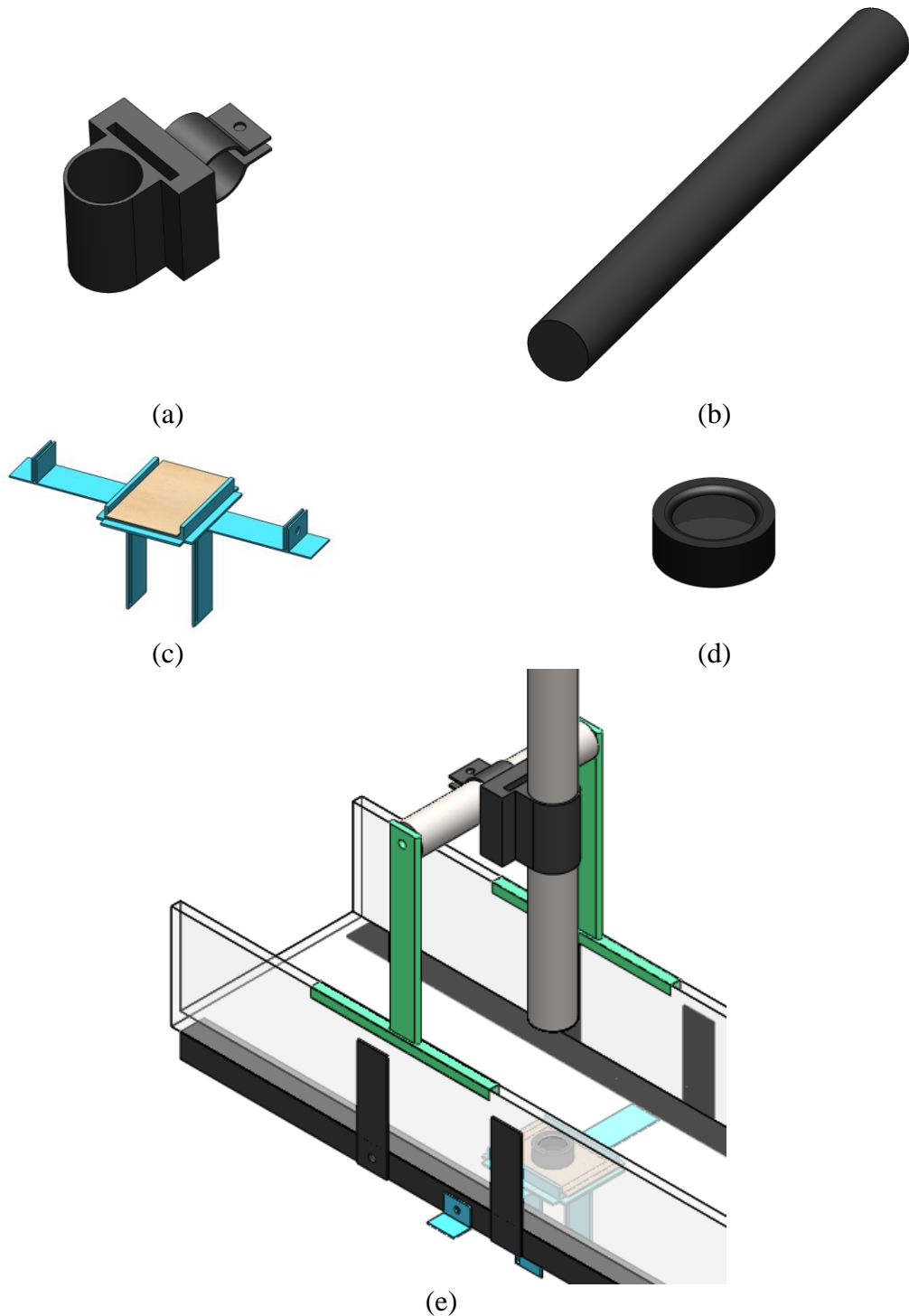


A configuração do sistema de medição ultrassônico adotada permitiu variações de 150 a 165 milímetros de distância do transdutor até a superfície livre, desta forma o diâmetro do feixe ultrassônico foi da ordem de 50 milímetros.

5.1.7 Sistema Fotométrico

O sistema de medição fotométrico deste trabalho é constituído pelo laser de HeNe (fonte luminosa), com comprimento de onda de 632,8 nanômetros e 12 miliwatts de potência. Em conjunto com o fotodetector (Newport, modelo 818-SL), que tem como característica principal uma janela de 1 centímetro quadrado de visualização, estes compõem a estrutura principal deste sistema medição. O laser (Figura 25 (b)), foi fixado no canal através de um conjunto de suporte fixado nas paredes do canal de ensaio. O suporte principal (Figura 25 (a)) possibilita o ajuste da inclinação com elevada precisão, posicionando o feixe de laser perpendicularmente ao canal de ensaios. O fotodetector (Figura 25 (d)) foi posicionado abaixo do fundo de vidro do canal, através de um suporte (Figura 25 (c)), fixado na estrutura metálica do canal de ensaios. Este suporte possibilitou aproximar o fotodetector e o fundo do canal através de ajustes em suas laterais. Desta forma o sistema fotométrico (Figura 25 (e)), foi montado e fixado junto do canal.

Figura 25 - Esquema do sistema fotométrico. (a) Suporte de fixação do laser. (b) Laser. (c) Suporte de fixação do fotodetector. (d) Fotodetector. (e) Sistema fotométrico montado e fixado no canal de ensaios.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

As principais especificações técnicas do fotodetector 818-SL, necessárias para este sistema de medição, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Especificação técnica do fotodetector Newport, modelo 818-SL

Tamanho do Sensor	Ø 11,3 (mm)
Faixa Espectral	400 – 1100 (nm)
Potência Máxima Mensurável	2,0 (W)
Incerteza de Calibração sem Atenuador	±1% - 400 – 940 (nm)
Incerteza de Calibração com Atenuador	±1% - 400 – 940 (nm)
Linearidade	±0,5%
Material	Silício
Tipo de Conector	DB15
Abertura	100 (mm ²)

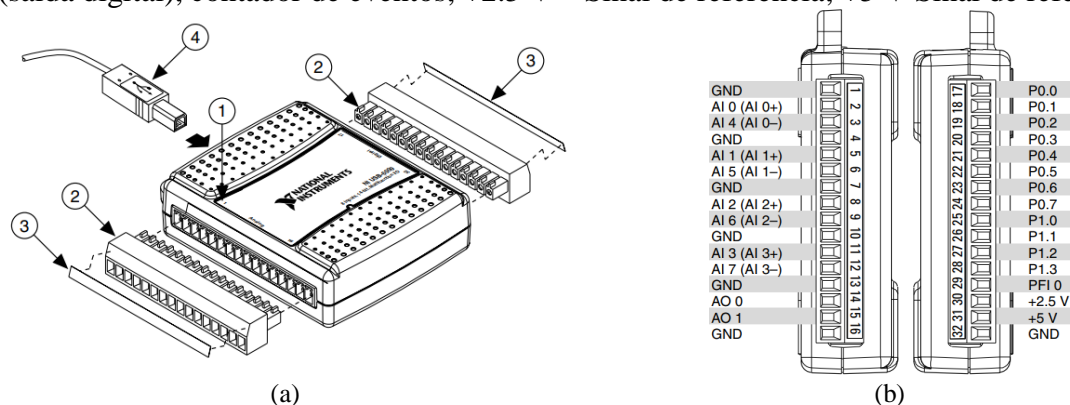
Fonte: Newport (2016)

Este sistema de medição utiliza a metodologia de absorvância, que consiste em percorrer o caminho óptico através da incidência do laser em meios translúcidos (ar - gel de carbopol - vidro - ar), vindo a incidir sobre um fotodetector. Vale ressaltar que o ar e o vidro são materiais cuja capacidade de absorver quantidades significativas de intensidades luminosas é bastante reduzida, assim a mudança de potência luminosa aferida pelo fotodetector estará em função de mudanças no fluido teste (gel de carbopol 996).

5.1.8 Sistema de Medição

Como já mencionado, o sistema de medição é constituído por outros dois sistemas (sistema ultrassônico e sistema fotométrico). Assim, o sistema de medição é complementado pela placa aquisição de dados (National Instruments, modelo USB-6009), configurada a partir do *software* LabView 2011, e que possibilita a caracterização da profundidade do escoamento. (Figura 26).

Figura 26 - Esquema representativo da placa de aquisição National Instruments, modelo USB-6009. (a) Apresentação dos componentes da placa de aquisição: 1 – Guia da etiqueta de orientação dos pinos; 2 – Terminal conector; 3 – Etiqueta da pinagem; 4 – Cabo USB. (b) Pinagem da placa de aquisição: GND – Ponto de referência para o sinal; AI (0 até 7) – Canal de entrada do sinal analógico; AO (0 e 1) Canal de saída do sinal analógico; PO (0 até 7) – Entrada e Saída do sinal digital; P1 (0 até 3) - Entrada e Saída do sinal digital; PFI 0 – Gatilho (saída digital), contador de eventos; +2.5 V – Sinal de referência; +5 V Sinal de referência.

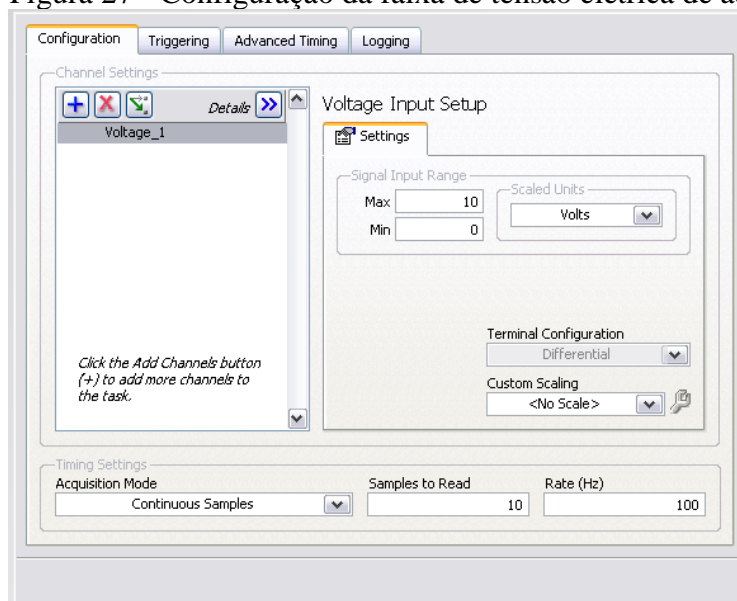


Fonte: User Guide NI USB-6008/6009 (2016)

O sistema de medição utilizou o conector USB (Figura 26 (a), 4 – Cabo USB), ligado diretamente ao *notebook* para configurações e aquisição do sinal advindo da placa de aquisição. Para ligar a placa de aquisição ao transdutor ultrassônico e o fotodetector, foram utilizadas as entradas de sinais analógicos (Figura 26 (b), AI – Canal de entrada do sinal analógico).

Através do *software* LabView 2011 foi possível configurar as entradas analógicas, para amplitudes de sinais na faixa 0 a 10 volts e uma taxa de aquisição de 100 Hertz, conforme mostrado na Figura 27.

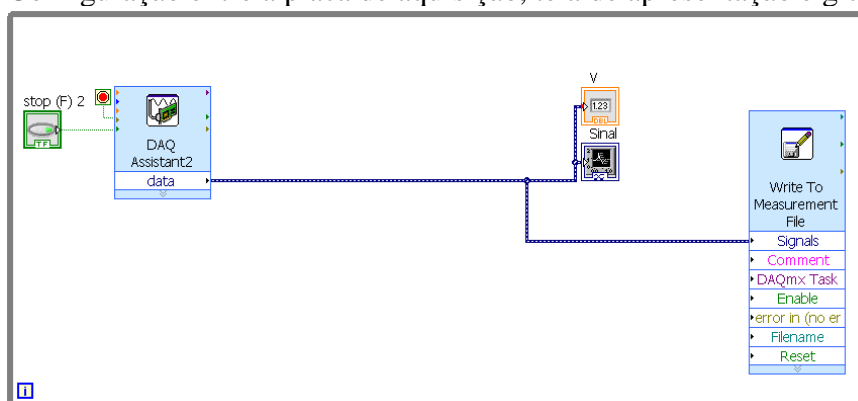
Figura 27 - Configuração da faixa de tensão elétrica de aquisição.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, utilizando o *software* LabView.

Por meio da tela (ambiente virtual, no LabView) mostrado na Figura 28 é configurada a placa de aquisição para apresentar uma interface e gravar o sinal advindo do sistema fotométrico ou ultrassônico.

Figura 28 - Configuração entre a placa de aquisição, tela de apresentação e gravação do sinal.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, utilizando o *software* LabView.

5.2 PROTOCOLO DE CALIBRAÇÃO E DESENVOLVIMENTO

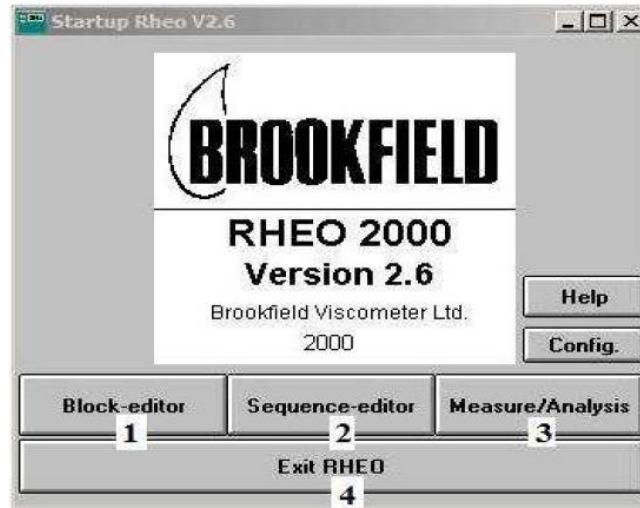
5.2.1 Reologia

Reologia (Rheo: fluxo, logia: estudo) é um ramo da ciência que estuda as deformações e escoamento da matéria. A reometria pode ser definida como um conjunto de técnicas experimentais que permitem medir as propriedades reológicas. Atualmente existem diversos equipamentos com capacidade para medir tais propriedades. Os mais simples fornecem somente a viscosidade, já os mais sofisticados, além da curva de escoamento, ou de fluxo, permitem ajustar o bom modelo reológico para o fluido em análise.

O reômetro utilizado neste trabalho é do modelo R/S Rheometer, acompanhado de quatro conjuntos de cilindros coaxiais para análise de diferentes tipos de materiais, além da geometria Vane. O conjunto de cilindro coaxial é diferenciado a partir de uma numeração que caracteriza seu formato em função da aplicação.

Este reômetro apresenta duas configurações de trabalho: controle de tensão de cisalhamento (CSS – *Controlled Shear Stress*) e controle da taxa de deformação (CSR – *Controlled Shear Rate*), tais configurações foram estabelecidas como *input* de operações, através do *software* RHEO 2000 do próprio equipamento.

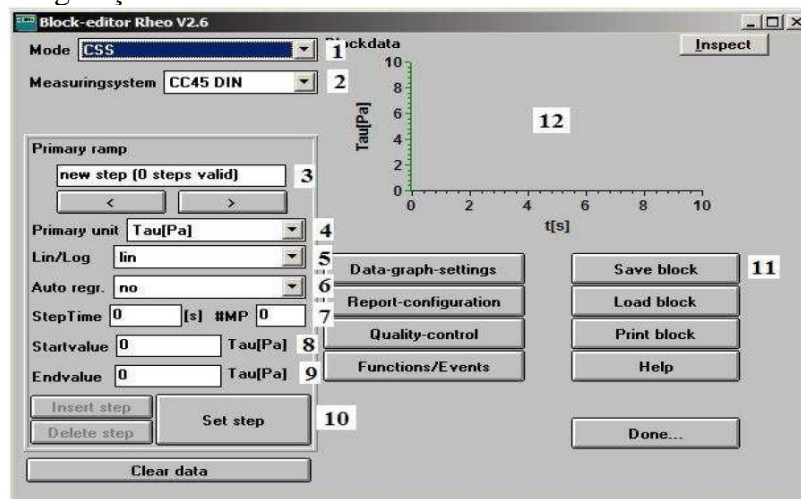
Figura 29 - Interface de apresentação software *Brookfield*, modelo Rheo 2000, versão 2.6. 1 – *Block-editor*: Bloco de edição da análise reométrica almejada; 2 – *Sequence-editor*: Edição para análise sequenciais de blocos distintos; 3 – *Measure/Analysis*: Carregamento de blocos editados; 4 – *Exit RHEO*: Sair do programa.



Fonte: Software *Brookfield*, Modelo Rheo 2000, Versão 2.6.

Através da Figura 29 (indicativo 1) é visualizado a interface de configuração que será utilizada para executar o ensaio no reômetro. Ao clicar no *Block-editor*, será apresentado a interface apresentada na Figura 30.

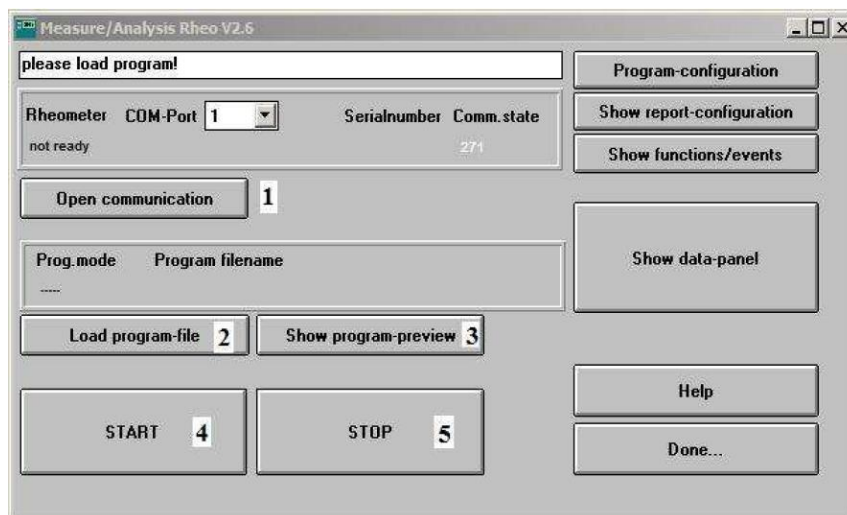
Figura 30 - Interface de configuração *software Brookfield*, Modelo Rheo 2000, Versão 2.6. 1 – *Mode*: Escolha do tipo de análise à ser utilizada (CSS ou CSR); 2 – *Measuringsystem*: Escolha do *spindle* utilizado na análise reométrica.; 3 – *Primary ramp- new step*: Escolha do passo (incremento de tempo); 4 – *Primary unit*: Escolha da unidade; 5 – *Lin/Log*: Escolha do reograma plotado (linear ou logaritmo); 6 – *Auto regr*: Escolha de auto-regressão para o modelo reológico que mais se aproxima da curva reológica obtida; 7 – *Step Time, #MP*: Escolha do tempo de análise reométrica e número de pontos do reograma; 8 – *Startvalue*: Escolha do valor final para a variável configurada; 10 – *Set step*: Finalização do passo; 11 – *Save Block*: Salvar as configuração para este bloco; 12 – Gráfico: Gráfico que possibilita visualizar as configurações estabelecidas no bloco editor.



Fonte: Software *Brookfield*, Modelo Rheo 2000, Versão 2.6.

Após estabelecidas as configurações através da Figura 30, faz-se necessário enviar este bloco de configurações para o reômetro. A configuração do canal de envio é feita através da interface apresentada na Figura 31.

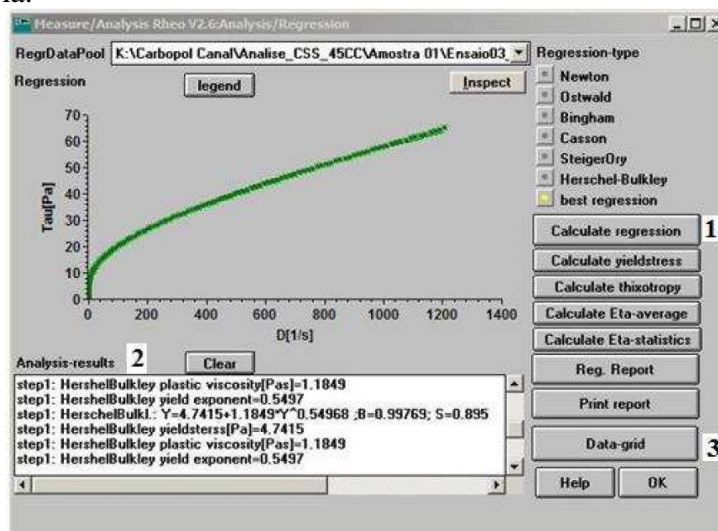
Figura 31 - Interface de configuração software *Brookfield*, Modelo Rheo 2000, Versão 2.6. 1 – *Open communication*: Comunicação com o reômetro; 2 – *Load program-file*: Efetua (carrega) as configurações para análise reométrica; 3 – *Show program-file*: mostra em tela as configurações que serão executadas; 4 – *Start*: Inicia a análise; 5 – *Stop*: Finaliza a análise em execução.



Fonte: *Software Brookfield*, Modelo Rheo 2000, Versão 2.6.

Após essas etapas executadas, são apresentados os resultados a serem analisados, através da interface da Figura 32.

Figura 32 - Interface de configuração software *Brookfield*, Modelo Rheo 2000, Versão 2.6. 1 – *Calculate regression*: Apresenta uma regressão numérica da curva reométrica para um modelo reológico com maior correlação estatística; 2 – *Analysis-results*: Apresenta uma interface que mostra os parâmetros reométrico da curva; 3 – *Data-grid*: Apresenta uma interface que mostra os valores obtidos ao longo do tempo para todas as variáveis analisadas em forma de tabela.



Fonte: *Software Brookfield*, Modelo Rheo 2000, Versão 2.6.

Assim, através deste software, foram executadas todas as análises reológicas do fluido teste, carbopol 996, utilizado neste trabalho.

5.2.2 Ensaio no Canal

Os parâmetros de entrada no canal de escoamento são: valor de rotação da bomba de cavidade progressiva e inclinação do canal. Para verificar a influência destes parâmetros no canal, foi necessário caracterizar os resultados efetuando ensaios para aferir a vazão, velocidade e lâmina do escoamento. Desta forma, em cada modificação na quantidade de rotação da bomba, foi efetuado um ensaio com o objetivo de caracterizar a vazão. Já quando ocorreram modificações na inclinação do canal, foram efetuados ensaios com o objetivo de verificar a velocidade de superfície e lâmina de escoamento.

A vazão foi determinada através do método gravimétrico clássico, que consiste em aferir o peso de um volume escoado em um certo instante de tempo.

Já a velocidade, na superfície do escoamento, foi aferida por meio de um traçador que percorre um espaço de um metro ao longo do canal de ensaios, em um intervalo de tempo. Cada medição foi efetuada dez vezes, para cada configuração do canal (mudanças na rotação da bomba e/ou inclinação), cujos resultados são apresentados pelo seu valor médio.

Por fim, foi aferida a profundidade do escoamento através do sistema ultrassônico, em escoamento sem perturbação.

A precisão dos equipamentos utilizados para estas medições é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Precisão dos instrumentos utilizados na caracterização da configuração do canal de ensaios. * Tempo de reação calculado para a pessoa encarregada de efetuar as medições com o cronômetro.

Instrumento	Grandeza Medida	Precisão
Balança	Massa (g)	$\pm 0,1$
Cronômetro	Tempo (s)	$\pm 0,16^*$

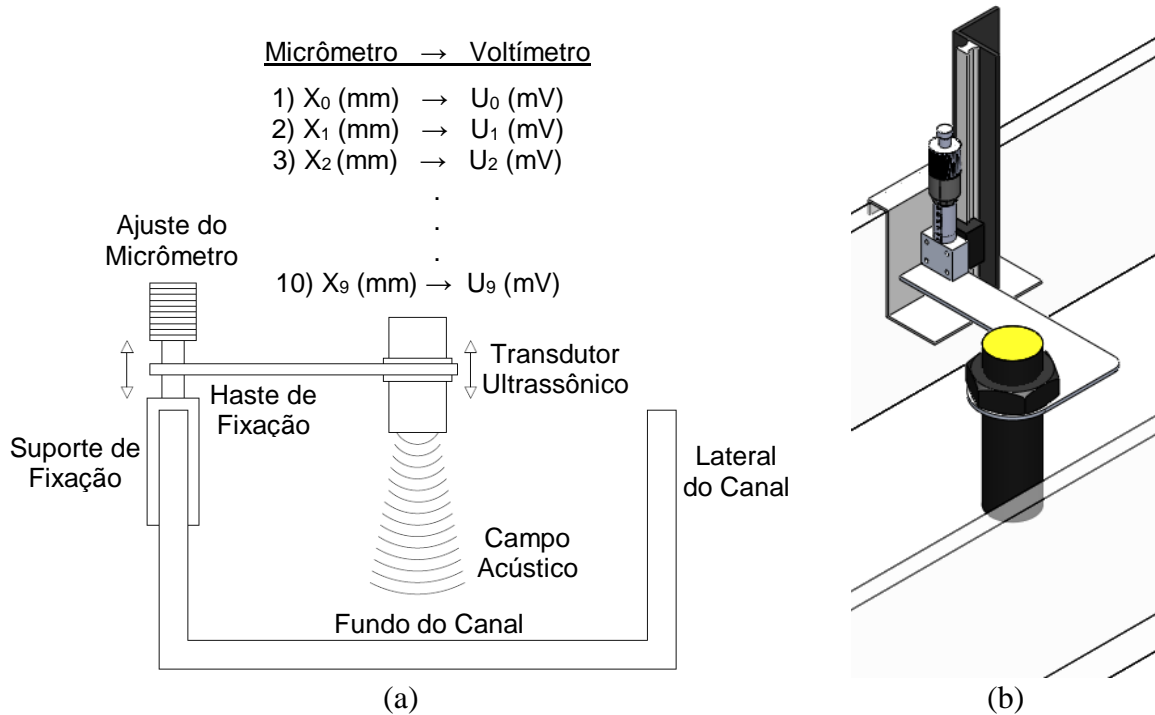
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A metodologia utilizada para aferir a lâmina do escoamento (profundidade) através do transdutor ultrassônico, é apresentada e detalhada na seção Sistema Ultrassônico.

5.2.3 Sistema Ultrassônico

A calibração desta técnica é executada através de um micrômetro, variando a distância do transdutor a um objeto (fundo do canal) e identificando o nível de tensão detectada. Após variar em milímetro e aferir cada tensão correspondente, foi construída uma curva de calibração, que possibilitou a transformação da tensão elétrica para milímetros, conforme apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Esquema representativo da calibração do ultrassom, observado na saída do canal.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

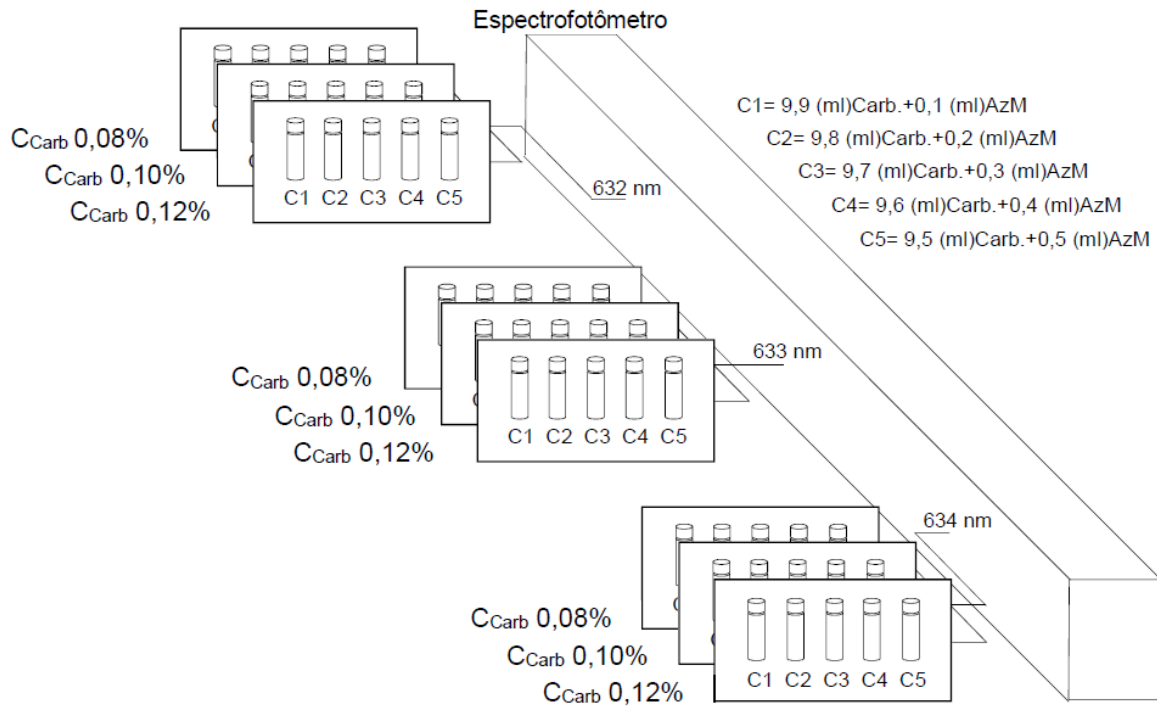
5.2.4 Sistema Fotométrico

5.2.4.1 Ensaio no Espectrofotômetro

A calibração do sistema fotométrico iniciou-se na fase de caracterização do fluido teste, visando verificar a influência das concentrações de carbopol (C_{Carb}) e a concentração do azul de metileno (C_{AzM}), (substância absorvente de luz) na detecção da luminosidade. Para isto, foram testados três C_{Carb} (0,08, 0,10 e 0,12%) e cinco C_{AzM} (C_{AzM1} , C_{AzM2} , C_{AzM3} , C_{AzM4} e C_{AzM5}) variando de 0,01 até 0,05 g/l, com incremento de 0,01 g/l, totalizando 15 amostras.

Para estas variações de C_{Carb} e C_{AzM} , verificou-se a absorbância em 3 comprimentos de onda (632, 633 e 634 nm), no espectrofotômetro (Hach, DR 5000), totalizando 45 aferições. A Figura 34 mostra a caracterização do fluido teste no espectrofotômetro, apresentando as variações e as sequências utilizadas nesta metodologia.

Figura 34 - Fluxograma de caracterização do fluido teste utilizando o espectrofotômetro.



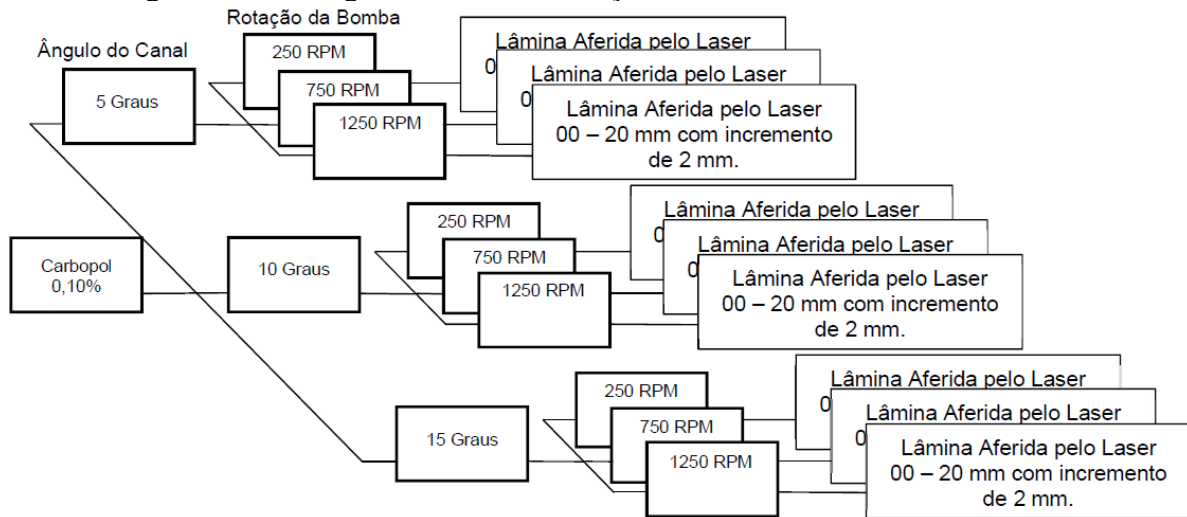
Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.2.4.2 Ensaios Fotométricos no Canal de Ensaios

Após a caracterização do fluido teste no espectrofotômetro, iniciaram-se os testes no canal de ensaios com o objetivo de verificar o comportamento do sinal luminoso aferido pelo fotodetector. Esta bateria de testes foi iniciada com o C_{Carb} de 0,10% (porcentagem favorável ao surgimento de onda), cujos parâmetros de variação são a C_{AzM} , velocidade e profundidade do escoamento no canal.

A Figura 35 mostra o procedimento experimental executado no canal de ensaios. Este procedimento foi repetido sete vezes, variando as C_{AzM} pela adição de 0,5 até 3,5 litros, com incremento de 0,5 litros de azul de metileno em um volume inicial de 88 litros de carbopol 996 com C_{Carb} de 0,10%. Na execução dos experimentos no canal, o único parâmetro que não sofreu nenhuma modificação foi a fonte luminosa - laser em 633 nm. Em contrapartida, a C_{Carb} sofreu diminuição em consequência da adição aquosa do azul de metileno.

Figura 35 - Fluxograma de caracterização do fluido teste no canal de ensaios.

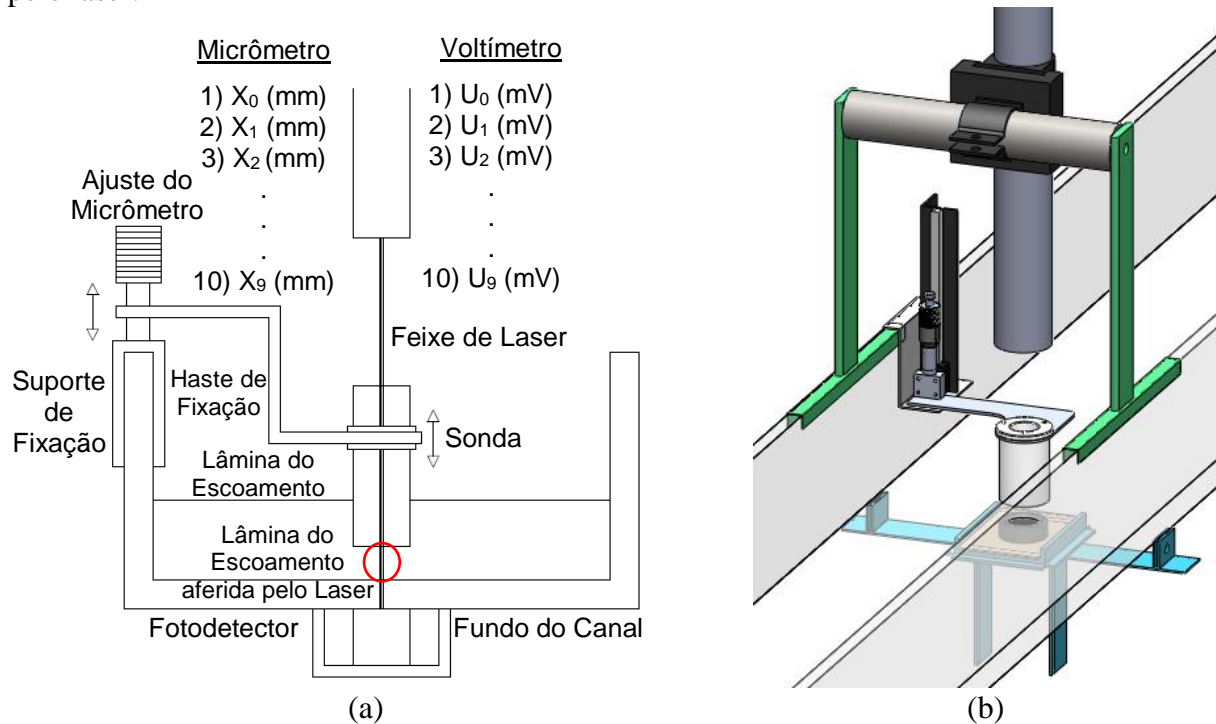


Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.2.4.3 Verificação da Influência na Profundidade do Escoamento no Sistema Fotométrico

No canal, a profundidade do escoamento laminar e uniforme é fixado por meio das configurações das rotações da bomba e inclinações do canal de ensaio. Para efetuar o estudo do sistema fotométrico, é necessário controlar a altura da lâmina aferida pelo laser, utilizando uma sonda, fechada na parte inferior por meio de um vidro translúcido. Ou seja, independente da profundidade do escoamento, o sinal percebido pelo fotodetector no fundo do canal é proporcional a profundidade do escoamento limitado e controlado pela sonda. Desta forma, para cada C_{AZM} houve variações na distância entre a sonda e o fundo do canal (caminho percorrido pelo laser), iniciando em 0 mm (sonda junto ao fundo do canal) até a sonda não ter mais contato com a lâmina do escoamento, distanciando esta do fundo sempre em acréscimo de 2 mm. Esta operação de movimentação vertical da sonda foi possível devido ao acoplamento de um micrômetro e uma haste de sustentação da sonda, junto da parede do canal de ensaios, como apresentado na Figura 36.

Figura 36 - Esquema representativo do aparato para variar a lâmina de fluido teste aferida pelo laser.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Através deste procedimento, investigou-se, inicialmente, a influência da vazão e velocidade do escoamento. No entanto, não foi observado influência destes dois parâmetros resultando em nenhuma variação na detecção da luminosidade do laser pelo fotodetector.

5.3 PROTOCOLO DE IDENTIFICAÇÃO DOS ENSAIOS E RESULTADOS

Cada ensaio foi identificado por meio de um código, composto do seguinte modo: campanha 1 ou campanha 2 (primeira ou segunda), em seguida a inclinação do canal e pôr fim a rotação da bomba, conforme consta na Tabela 5.

Tabela 5 - Detalhamento do protocolo de identificação dos ensaios e resultados.

Campanha	Inclinação do Canal	Rotação da Bomba
C	G	R
2	5 graus	225 RPM

C2G5R225

Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.4 TRATAMENTO DE DADOS

5.4.1 Velocidade na Superfície do Escoamento do Carbopol

Na aferição da velocidade média da superfície, utilizou-se a razão entre um valor de distância conhecida e o valor do tempo que um traçador percorre esta distância, como já apresentado na seção 5.2.2.

A Tabela 6 mostra como os dados da velocidade média da superfície livre foram tratados e calculados. O dado de entrada da Tabela 6 é a variável T , esta foi aferida dez vezes, resultando dez valores de velocidade de superfície. Nas duas linhas finais da Tabela 6, são apresentados as médias e os desvios padrões dos valores aferidos e calculados.

Tabela 6 - Detalhamento do protocolo de identificação dos ensaios e resultados – velocidade média de superfície livre.

	Tempo (s)	Velocidade da Superfície Livre (m/s)
Teste 1	$T1$	$V1 = 1/T1$
Teste 2	$T2$	$V2 = 1/T2$
Teste 3	$T3$	$V3 = 1/T3$
Teste 4	$T4$	$V4 = 1/T4$
Teste 5	$T5$	$V5 = 1/T5$
Teste 6	$T6$	$V6 = 1/T6$
Teste 7	$T7$	$V7 = 1/T7$
Teste 8	$T8$	$V8 = 1/T8$
Teste 9	$T9$	$V9 = 1/T9$
Teste 10	$T10$	$V10 = 1/T10$
Média	Média entre $T1$ e $T2$	Média entre $V1$ e $V10$
Desvio Padrão	Desvio Padrão entre $T1$ e $T2$	Desvio Padrão entre $V1$ e $V10$

Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.4.2 Vazão Mássica – Metodologia Gravimétrica

A vazão do escoamento em função do *input* no canal de ensaios (rotação da bomba), foi aferida por meio da metodologia gravimétrica. Neste aparato experimental, este ensaio foi executado com auxílio de um recipiente posicionado na saída do canal, sendo iniciado a medição do tempo no exato instante em que o recipiente é colocado na saída do canal, e após um certo tempo, foi finalizada esta contagem e retirado o recipiente, podendo assim verificar a indicação do peso em uma balança de precisão, naquele intervalo de tempo. Desta forma a

vazão foi expressa em grama por segundo e facilmente calculada em litros por segundo, por meio da massa específica do carbopol.

Garantindo o mesmo *setup* do canal de ensaios, a aferição do peso em um intervalo de tempo, ocorreu dez vezes.

Na Tabela 7 é mostrado como os dados da vazão foram tratados e calculados. Os dados de entrada são as variáveis M e T , aferidas por dez vezes e resultando em valores de massa em grama e tempo em segundos. Nas duas linhas finais da Tabela 7, são apresentados as médias e os desvios padrões dos valores aferidos e calculados.

Tabela 7 - Detalhamento do protocolo de identificação dos ensaios e resultados - Vazão do escoamento laminar através da metodologia gravimétrica.

	Peso - Massa (g)	Tempo (s)	Vazão (g/s)
Teste 1	$M1$	$T1$	$Q1 = M1/T1$
Teste 2	$M2$	$T2$	$Q2 = M2/T2$
Teste 3	$M3$	$T3$	$Q3 = M3/T3$
Teste 4	$M4$	$T4$	$Q4 = M4/T4$
Teste 5	$M5$	$T5$	$Q5 = M5/T5$
Teste 6	$M6$	$T6$	$Q6 = M6/T6$
Teste 7	$M7$	$T7$	$Q7 = M7/T7$
Teste 8	$M8$	$T8$	$Q8 = M8/T8$
Teste 9	$M9$	$T9$	$Q9 = M9/T9$
Teste 10	$M10$	$T10$	$Q10 = M10/T10$
Média	Média entre $M1$ e $M10$	Média entre $T1$ e $T10$	Média entre $Q1$ e $Q10$
Desvio Padrão	Desvio Padrão entre $M1$ e $M10$	Desvio Padrão entre $T1$ e $T2$	Desvio Padrão entre $Q1$ e $Q10$

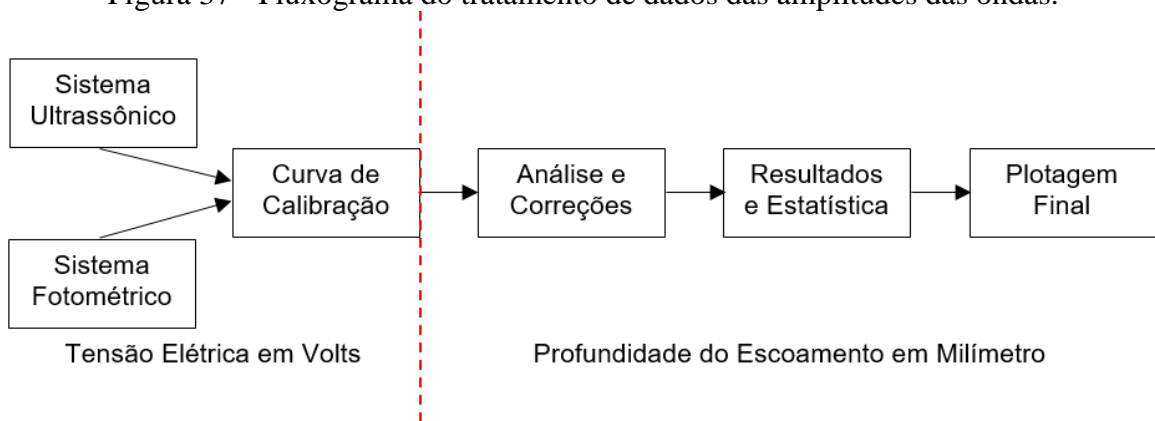
Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.4.3 Amplitude de Ondas

Após aferição da onda (*roll waves*) pelos sistemas de medição ultrassônico e fotométrico, iniciou-se o tratamento dos dados por meio da aplicação das equações resultantes das curvas de calibração, para assim, transformar o sinal (tensão elétrica), em profundidade do escoamento em unidade de medição (milímetro). Após este desenvolvimento, foram necessários mais três processos para que os dados obtidos pudessem ser comparados e estudados. Ou seja, após a primeira etapa do tratamento de dados (transformar tensão elétrica em milímetros), iniciou-se uma segunda etapa, através de análises e correções, seguido por verificações dos resultados através de média e desvio padrão, e por fim, plotagem dos dados. A Figura 37 apresenta a sistematização deste processo, por meio de um fluxograma que tem

como entrada os sistemas de medição (ultrassônico e fotométrico) e como saída a plotagem final.

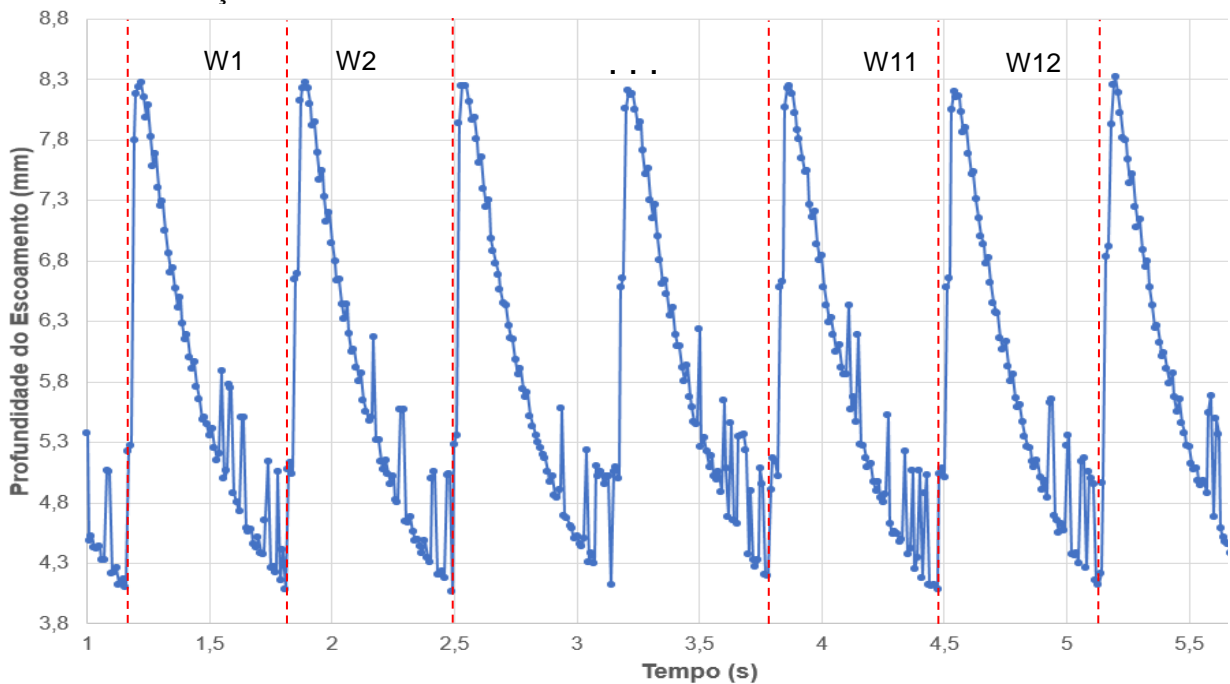
Figura 37 - Fluxograma do tratamento de dados das amplitudes das ondas.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na segunda etapa do processo de tratamento de dados ocorreu a análise e correção, pela identificação do primeiro e último ponto de um período de onda, conforme apresentado na Figura 38.

Figura 38 - Representação de W12 (12 ondas – *roll waves*). W1 – Onda 1. W2 – Onda 2. W11 – Onda 11. W12 – Onda 12. Input no canal – rotação 475 RPM e 5 graus de inclinação. Sistema de medição ultrassônico.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Após esta etapa, cada onda foi identificada e realocada em uma base de tempo comum, tendo como ponto de fixação o primeiro ponto da onda no instante de tempo zero (0 s).

Esta realocação foi tabulada, conforme apresentado na Tabela 8, para posteriormente identificar os pontos resultantes de erros de medição, o tempo padrão de ocorrência das ondas e calcular a estatística dos dados apresentados ponto por ponto.

Tabela 8 - Identificação e realocação das ondas em uma base de tempo comum. Ponto – Identificação de cada ponto em função da base temporal. T(s) – Tempo em segundos. W(1 até 12) – Identificação das ondas.

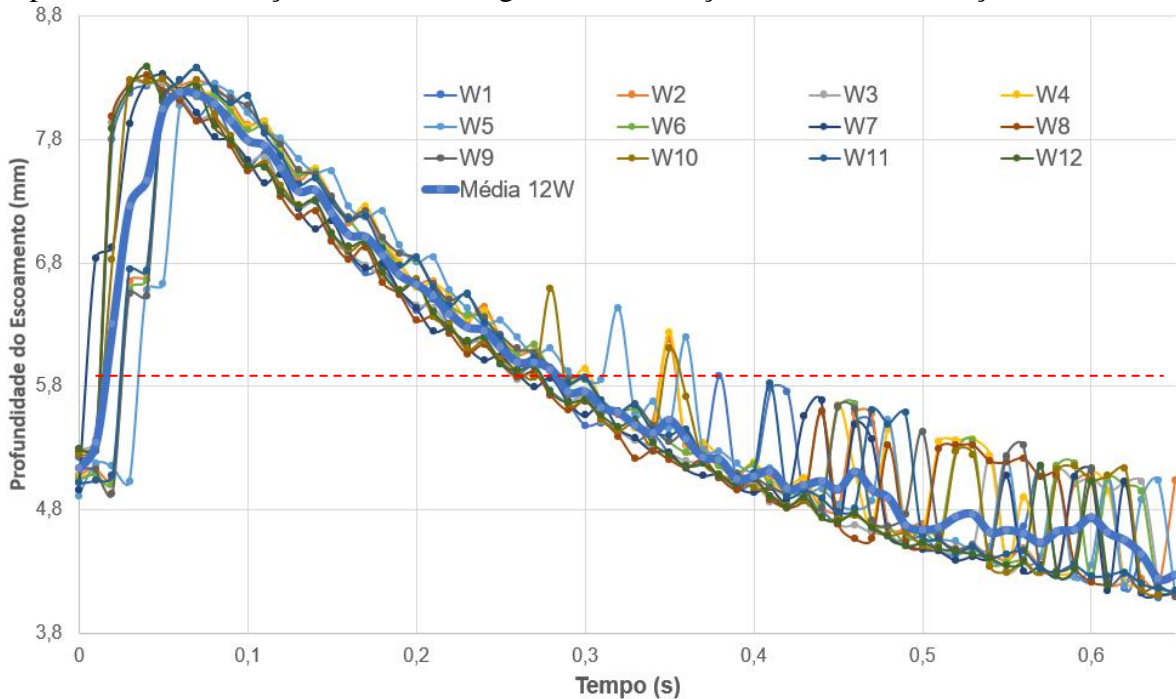
Ponto	T(s)	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12
1	0	W1(1)	W2(1)	W3(1)	W4(1)	W5(1)	W6(1)	W7(1)	W8(1)	W9(1)	W10(1)	W11(1)	W12(1)
2	0,01	W1(2)	W2(2)	W3(2)	W4(2)	W5(2)	W6(2)	W7(2)	W8(2)	W9(2)	W10(2)	W11(2)	W12(2)
3	0,02	W1(3)	W2(3)	W3(3)	W4(3)	W5(3)	W6(3)	W7(3)	W8(3)	W9(3)	W10(3)	W11(3)	W12(3)
4	0,03	W1(4)	W2(4)	W3(4)	W4(4)	W5(4)	W6(4)	W7(4)	W8(4)	W9(4)	W10(4)	W11(4)	W12(4)
5	0,04	W1(5)	W2(5)	W3(5)	W4(5)	W5(5)	W6(5)	W7(5)	W8(5)	W9(5)	W10(5)	W11(5)	W12(5)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
60	0,59	W1(60)	W2(60)	W3(60)	W4(60)	W5(60)	W6(60)	W7(60)	W8(60)	W9(60)	W10(60)	W11(60)	W12(60)
61	0,60	W1(61)	W2(61)		W4(61)	W5(61)	W6(61)	W7(61)		W9(61)	W10(61)	W11(61)	W12(61)
62	0,61	W1(62)	W2(62)		W4(62)	W5(62)	W6(62)	W7(62)		W9(62)	W10(62)	W11(62)	W12(62)
63	0,62	W1(63)	W2(63)		W4(63)	W5(63)	W6(63)	W7(63)		W9(63)	W10(63)	W11(63)	W12(63)
64	0,63	W1(64)	W2(64)		W4(64)	W5(64)	W6(64)	W7(64)		W9(64)	W10(64)	W11(64)	W12(64)
65	0,64	W1(65)	W2(65)		W4(65)		W6(65)	W7(65)		W9(65)	W10(65)	W11(65)	W12(65)
66	0,65	W1(66)	W2(66)		W4(66)		W6(66)	W7(66)		W9(66)	W10(66)	W11(66)	W12(66)
67	0,66		W2(67)		W4(67)							W11(67)	W12(67)
68	0,67		W2(68)		W4(68)							W11(68)	W12(68)
69	0,68		W2(69)		W4(69)							W11(69)	W12(69)
70	0,69		W2(70)		W4(70)							W11(70)	W12(70)
71	0,70		W2(71)									W11(71)	W12(71)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Desta forma, na coluna “Ponto” estão identificadas cada linha através de um valor numérico, onde cada linha desta coluna, também se identifica com outras colunas no mesmo nível. A segunda coluna denominada T(s), identifica o tempo em segundos no passo de 0,01 segundo, em seguida as colunas que identificam as ondas, de W1 até W12. A linha do ponto 1 (cor verde) identifica o início da onda (instante inicial) e a linha do ponto 66 (cor vermelha) identifica o final da maioria das ondas. Por se tratar de uma condição experimental, resultante de vários fatores, os quais são discutidos neste trabalho, os períodos de onda não são todos coincidentes, assim como apresentado nas linhas 60 a 71, da coluna Ponto da Tabela 8. No entanto, a média temporal sempre converge para o valor de 0,65 segundos, período característico da perturbação.

Através da Figura 39 pode-se identificar os pontos que ocorreram fora de um padrão resultante da média das 12 ondas.

Figura 39 – Exemplo de representação de W12 (1 onda – *roll waves*) com pontos de erros. Input no canal – rotação 475 RPM e 5 graus de inclinação. Sistema de medição – ultrassônico.

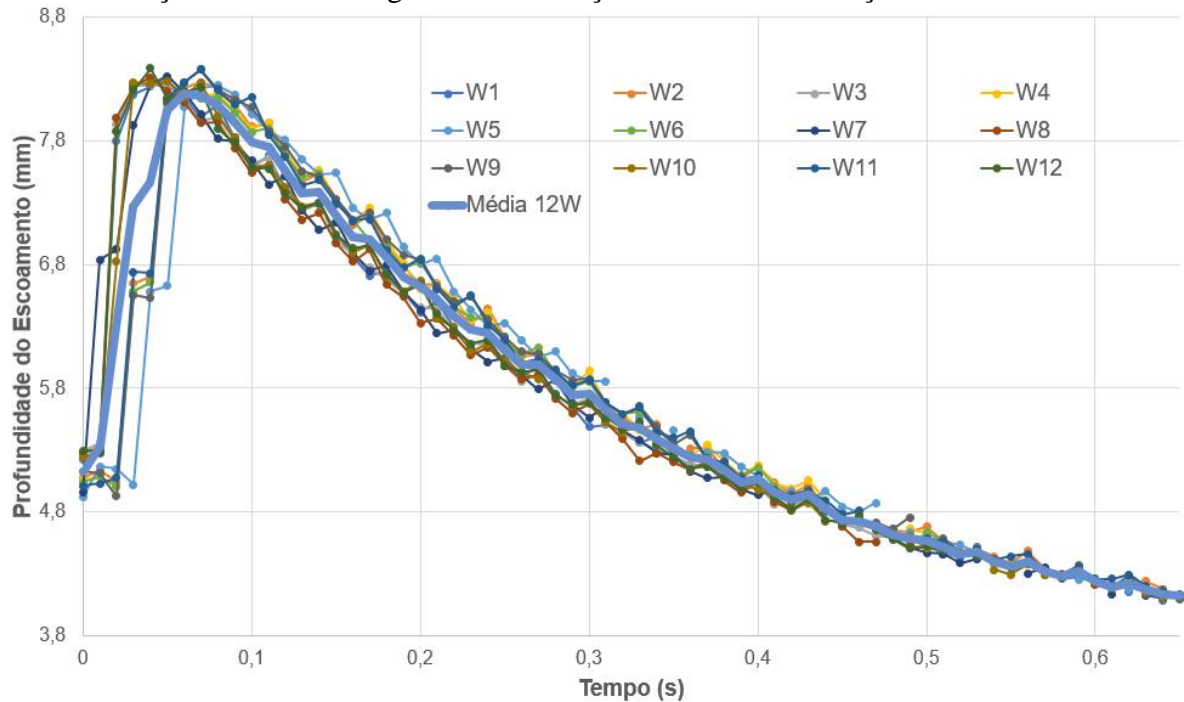


Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 39 apresenta 12 ondas na mesma base temporal (0 até 0,65 segundos). Estas ondas foram aferidas pelo sistema ultrassônico de medição, e mostra um caso de boa adaptação do campo acústico para alturas superiores a 5,8 milímetros, e má adaptação para alturas inferiores a 5,8 milímetros. Portanto abaixo de 5,8 milímetros ocorreram pontos contendo erros aleatórios, nas 12 ondas aferidas.

Após estas observações, retirou-se somente os pontos de instantes incoerentes, mantendo a curva da onda aferida. Este processo também resultou em modificações da onda média, a qual foi denominada como produto final (Figura 40).

Figura 40 - Representação de W12 (1 ondas – *roll waves*) sem pontos de erros. Input no canal – rotação 475 RPM e 5 graus de inclinação. Sistema de medição – ultrassônico.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Após estas análises e correções, foram analisados os resultados e cálculos da estatística do produto obtido anteriormente. Para tanto, foi necessário inserir mais duas colunas na Tabela 9, sendo elas a média e o desvio padrão das 12 ondas.

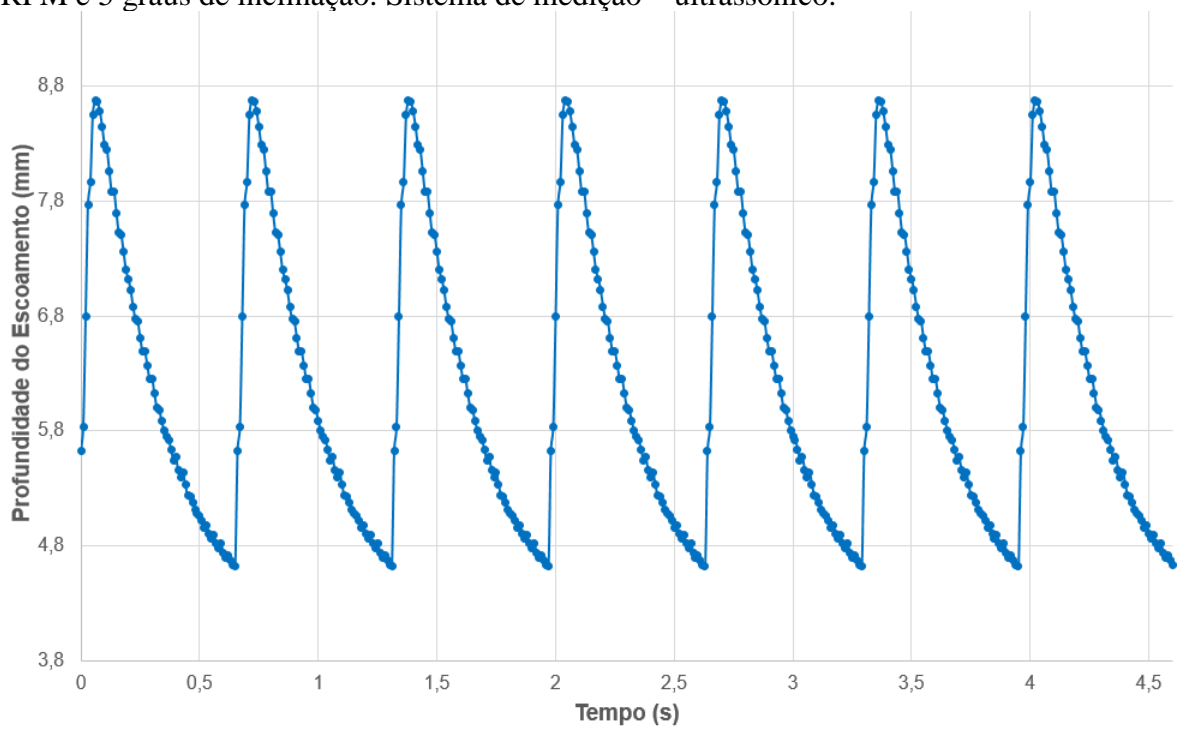
Tabela 9 - – Identificação e realocação das ondas em uma base de tempo comum. Ponto – Identificação de cada ponto em função da base temporal. T(s) – Tempo em segundos. W(1 até 12 em milímetros) – Identificação das ondas. Média 12W (mm) – Média de 12 ondas em milímetros. Desvio padrão de 12 ondas em milímetros.

Ponto	T(s)	W1 (mm)	W2 (mm)	W3 (mm)	W4 (mm)	...	W9 (mm)	W10 (mm)	W11 (mm)	W12 (mm)	Média 12W (mm)	Desvio Padrão (mm)
1	0	5,22	5,07	5,29	5,05	...	5,13	5,24	5,01	5,30	5,13	0,13
2	0,01	5,27	5,14	5,36	5,10	...	5,12	5,30	5,03	5,29	5,33	0,49
3	0,02	7,80	5,04	7,93	5,00	...	4,93	6,83	5,07	7,88	6,30	1,37
4	0,03	8,18	6,65	8,25	6,58	...	6,55	8,27	6,74	8,21	7,27	1,05
5	0,04	8,24	6,70	8,25	6,66	...	6,53	8,26	6,73	8,39	7,46	0,86
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
60	0,59	4,27			4,33	...	4,37		4,35	4,33	4,32	0,04
61	0,60	4,23				...			4,26		4,24	0,03
62	0,61		4,21			...	4,20		4,26	4,19	4,20	0,04
63	0,62	4,16	4,21		4,21	...	4,28		4,29		4,22	0,06
64	0,63		4,24		4,20	...	4,14	4,16	4,20		4,18	0,04
65	0,64	4,08	4,18	4,12		...	4,18	4,10	4,16		4,14	0,04
66	0,65					...	4,09		4,14		4,12	0,02

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As lacunas vazias da Tabela 9 mostram a locação dos pontos no instante em que foram retirados valores considerados incoerentes, apresentando assim a configuração final da tabela de realocação das ondas em uma base comum. Desta forma finalizou-se o tratamento dos dados através da plotagem final, conforme apresentado no fluxograma da Figura 37. Os dados, nas condições iniciais (antes do tratamento dos dados) tinham as características apresentadas na Figura 38, após o tratamento, adquiriram as características apresentadas pela Figura 41.

Figura 41 - Representação de W12 (12 ondas – *roll waves*). Input no canal – rotação 475 RPM e 5 graus de inclinação. Sistema de medição – ultrassônico.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

6 FASE DE TESTES COM VISTAS À DEFINIÇÃO DE METODOLOGIA DE ENSAIOS

Neste Capítulo são mostrados os desenvolvimentos e consecutivamente os resultados de reologia, parâmetros aferidos no canal de ensaios, sistemas de medição e modelo numérico

6.1 REOMETRIA

Os resultados das caracterizações reológica do fluido teste são apresentados nas Tabelas 10 e 11, relativos a primeira e segunda campanhas experimentais, respectivamente.

6.1.1 Primeira Campanha de Ensaios

No decorrer da primeira campanha no canal de ensaios foi efetuada uma aferição do fluido teste no reômetro, para determinar os parâmetros reológicos pertinentes aos ensaios daquela campanha experimental. Desta forma, o valor desta aferição reológica foi atribuído para todos os ensaios desta campanha, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros reológicos da primeira campanha.

Ensaio	τ_c (Pa)	n	K_n (Pa. s ⁿ)	ρ (kg/m ³)
C1G14R400	0,400	0,626	0,176	1000
C1G14R420	0,400	0,626	0,176	1000
C1G14R440	0,400	0,626	0,176	1000

Fonte: Elaboração do próprio autor.

τ_c : Tensão limite de escoamento

n : Índice de Escoamento

K_n : Índice de Consistência

ρ : Massa Específica

6.1.2 Segunda Campanha de Ensaios

Já no decorrer da segunda campanha, ocorreram várias aferições reométricas no fluido teste, sendo uma para cada ensaio. Desta maneira, cada ensaio tem um valor reológico atribuído, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros reológicos da segunda campanha.

Ensaio	τ_c (Pa)	n	K_n (Pa. s ⁿ)	ρ (kg/m ³)
C2G5R225	0,400	0,710	0,171	1035
C2G5R275	0,400	0,710	0,172	1035
C2G5R325	0,400	0,710	0,172	1035
C2G5R375	0,400	0,710	0,176	1035
C2G5R425	0,400	0,707	0,165	1035
C2G5R475	0,400	0,709	0,169	1035

Fonte: Elaboração do próprio autor.

6.2 AFERIÇÃO DOS PARÂMETROS NO CANAL DE ENSAIOS

Os parâmetros aferidos no canal de ensaios em função do *input* no aparato experimental, estão apresentados nas Tabelas 12 e Tabela 13. Os dados aqui apresentados foram aferidos conforme apresentado no Capítulo 5 – Materiais e Métodos, na seção Tratamento de Dados, e Velocidade de Superfície e Vazão Mássica – Metodologia Gravimétrica.

6.2.1 Primeira Campanha de Ensaio

Nestes ensaios, manteve-se a inclinação do canal em 14 graus e efetuaram-se modificações graduais na rotação da bomba, em 20 RPM, iniciando em 400 RPM e finalizando em 440 RPM.

Tabela 12 - Parâmetros Hidráulicos da Primeira Campanha.

Ensaio	Q (m ³ /s)	u_s (m/s)	h_0 (mm)
C1G14R400	0,00038	0,222	7,255
C1G14R420	0,00044	0,225	7,394
C1G14R440	0,00046	0,246	7,449

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Q : Vazão

u_s : Velocidade de Superfície

h_0 : Lâmina do Escoamento

6.2.2 Segunda Campanha de Ensaio

Na segunda campanha ocorreram seis ensaios, iniciando em 225 RPM, finalizando em 475 RPM com incrementos de 50 RPM em cada ensaios, conforme apresentado na Tabela 13. Nesta etapa a inclinação do canal em 5 graus, foi mantida constante.

Tabela 13 - Parâmetros Hidráulicos da Segunda Campanha.

Ensaio	Q (m^3/s)	u_s (m/s)	h_0 (mm)
C2G5R225	0,00022	0,176	5,490
C2G5R275	0,00027	0,206	5,660
C2G5R325	0,00032	0,232	5,757
C2G5R375	0,00036	0,263	6,061
C2G5R425	0,00041	0,287	6,253
C2G5R475	0,00046	0,319	6,554

Fonte: Elaboração do próprio autor.

6.3 PARÂMETROS CALCULADOS DO ESCOAMENTO NO CANAL DE ENSAIOS

Através de parâmetros aferidos e os dados reológicos foi possível calcular parâmetros como velocidade média, número de Froude e Reynolds, conforme apresentado nas Tabelas 14 e 15.

6.3.1 Primeira Campanha de Ensaio

Referente à primeira campanha, a Tabela 14 apresenta os seguintes dados calculados: velocidade de superfície, número de Froude e Reynolds.

Tabela 14 - Parâmetros calculados a partir dos ensaios da primeira campanha.

Ensaio	\bar{u}_0 (m/s)	Fr	Re
C1G14R400	0,171	0,646	22,632
C1G14R420	0,197	0,739	27,512
C1G14R440	0,211	0,804	29,851

Fonte: Elaboração do próprio autor.

\bar{u}_0 : Velocidade Média

Fr : Número de Froude

Re : Número de Reynolds

6.3.2 Segunda Campanha de Ensaio

De maneira análoga a Tabela 15 apresenta os dados calculados da segunda campanha: velocidade de superfície, número de Froude e Reynolds.

Tabela 15 - Parâmetros calculados a partir dos ensaios da segunda campanha.

Ensaio	\bar{u}_0 (m/s)	Fr	Re
C2G5R225	0,134	0,577	10,918
C2G5R275	0,159	0,676	13,878
C2G5R325	0,186	0,783	17,114
C2G5R375	0,198	0,814	18,859
C2G5R425	0,219	0,885	23,602
C2G5R475	0,234	0,924	25,783

Fonte: Elaboração do próprio autor.

6.4 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA ULTRASSÔNICO

Os resultados aqui apresentados têm como referência o Capítulo 5 – Materiais e Métodos, e as seções Sistema Ultrassônico, Sistema de Medição e Amplitude das Ondas.

Para tabular os resultados do sistema ultrassônico foram atribuídos números para os pontos de medição (Tabela 16 – Linha A), este, por sua vez, denomina os valores em milímetros apresentados nas linhas B e C e os valores em tensão elétrica apresentados nas linhas D e E da Tabela 16. A linha B apresenta a distância do fundo do canal em relação ao transdutor no momento da calibração. Os valores da linha C representam a profundidade do escoamento na efetiva medição do escoamento no canal. Ou seja, quando a distância do transdutor em relação ao fundo do canal for 15 milímetros, este representará uma profundidade ausente de escoamento - 0 milímetros (sem fluido, somente o fundo do canal), desta mesma forma quando a linha B marcar 16, a profundidade do escoamento será de 1 milímetro; procedendo assim, até a linha B atingir 30 mm, e a linha C apresentar uma profundidade de escoamento de 15 milímetros. Para cada nível apresentado pela linha B e C, foi calculado uma média e um desvio padrão de 500 amostras (4,99 segundo de aquisição de dados), portanto a linha D representa o valor médio e a linha E o desvio padrão da tensão elétrica em volts, de cada nível em milímetro, representado pelas linhas B e C e tabulados na linha A.

Tabela 16 - Parâmetros Gerais do Sistema da Calibração Ultrassônico.

A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
B	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165
C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
D	7,42	7,35	7,19	7,07	6,94	6,83	6,71	6,59	6,48	6,38	6,28	6,16	6,06	5,95	5,85	5,73
E	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A: Ponto.

B: Distância do fundo do canal em relação ao transdutor (mm).

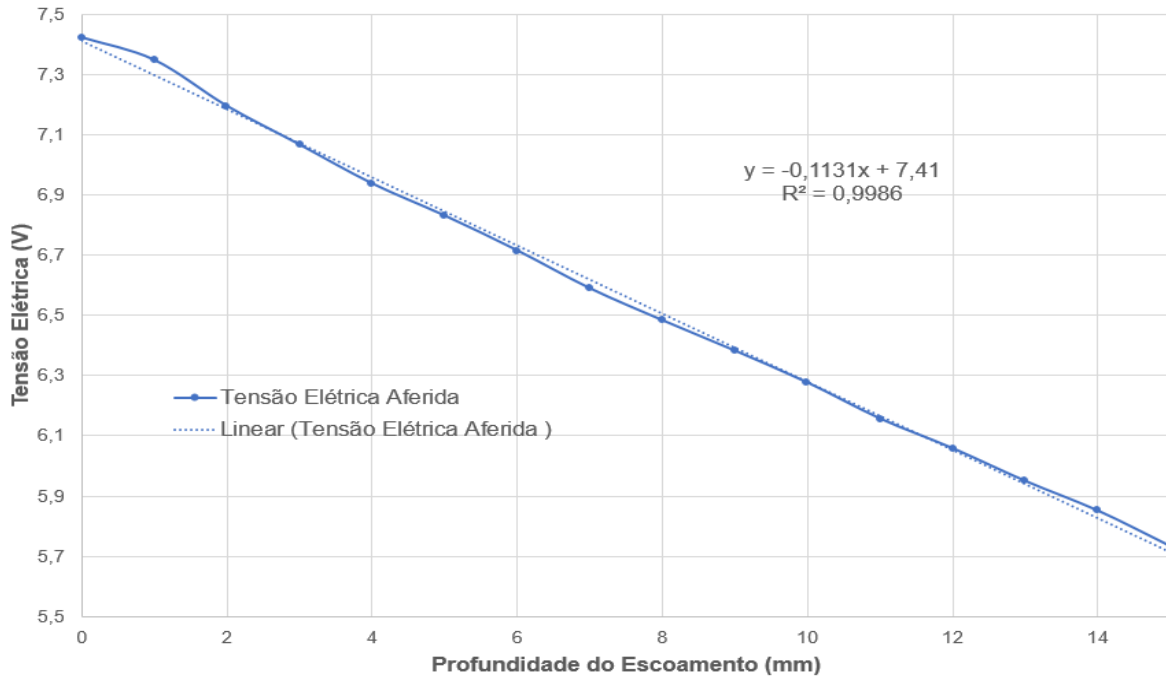
C: Profundidade representativa do escoamento (mm).

D: Média da tensão elétrica aferida (V).

E: Desvio padrão da tensão elétrica aferida (V).

Utilizando os valores representando a profundidade do escoamento (linha C, Tabela 16) e a média da tensão elétrica aferida em cada nível (linha D, Tabela 16), pode-se construir a curva de calibração do sistema ultrassônico (Figura 42), no qual a linha contínua da cor azul representa a tensão elétrica (V) em relação aos valores representando a profundidade do escoamento (mm). Já a linha pontilhada de cor azul representa a linearização (linha de tendência linear) da linha contínua.

Figura 42 - Curva de calibração do Sistema Ultrassônico.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Através desta linearização foi possível obter a Equação 82.

$$y = -0,1131x + 7,41 \quad (82)$$

Em que: y representa tensão elétrica (V) e x a profundidade do escoamento (mm).

Desta forma após a aferição do transdutor ultrassônico em tensão elétrica (V), pode-se inserir este valor na variável y , onde o resultado da Equação 82, fornece o valor da profundidade do escoamento em milímetros.

A Tabela 17 apresenta a profundidade do escoamento (linha C) e o valor em milímetros calculado através da Equação 82 (linha F). A linha G mostra a diferença entre o valor real e o valor calculado em milímetros. O valor apresentado na linha G também representa a distância entre a linha da tensão elétrica linearizada e a aferida da Figura 42. Portanto o erro médio nos diferentes níveis de medição (distância da onda ao transdutor) é de 0,001 mm.

Tabela 17 - Parâmetros finais do sistema de medição ultrassônico.

A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
F	-0,10	0,56	1,91	3,04	4,18	5,13	6,15	7,26	8,20	9,09	10,03	11,09	11,96	12,92	13,79	14,83
G	0,10	0,44	0,09	-0,04	-0,18	-0,13	-0,15	-0,26	-0,20	-0,09	-0,03	-0,09	0,04	0,08	0,21	0,17

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A: Ponto.

C: Profundidade do escoamento (mm).

F: Valor calculado pela Eq. (82) (mm), em função da tensão elétrica aferida (V).

G: Erro calculado entre (C - F).

Após ter os valores (média, desvio padrão e erros) resultantes da calibração de um ponto de medição no canal (diversos níveis), o procedimento foi modificado para somente um nível fixo (0 mm, fundo do canal), sendo assim, executando cinco medições com 1225 amostras, em 12,25 segundos de medição. Este novo procedimento foi repetido para 12 pontos ao longo do canal, sendo a distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m); Ponto 2 – 2,00 (m); Ponto 3 – 1,90 (m); Ponto 4 – 1,80 (m); Ponto 5 – 1,70 (m); Ponto 6 – 1,60 (m); Ponto 7 – 1,50 (m); Ponto 8 – 1,40 (m); Ponto 9 – 1,30 (m); Ponto 10 – 1,20 (m); Ponto 11 – 1,10 (m); Ponto 12 – 1,00 (m). O objetivo deste procedimento foi verificar o erro apresentado pelo transdutor devido ao suporte de fixação ao longo do canal, irregularidades no fundo do canal e o comportamento do transdutor em um maior tempo de aquisição.

Tabela 18 - Parâmetros estatísticos do sistema de medição ultrassônico.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
H	2,10	2,02	2,45	2,35	2,17	2,02	1,87	1,83	1,98	2,16	2,16	2,16
I	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Fonte: Elaboração do próprio autor.

H: Erro médio no ponto (mm).

I: Desvio padrão médio no ponto (mm).

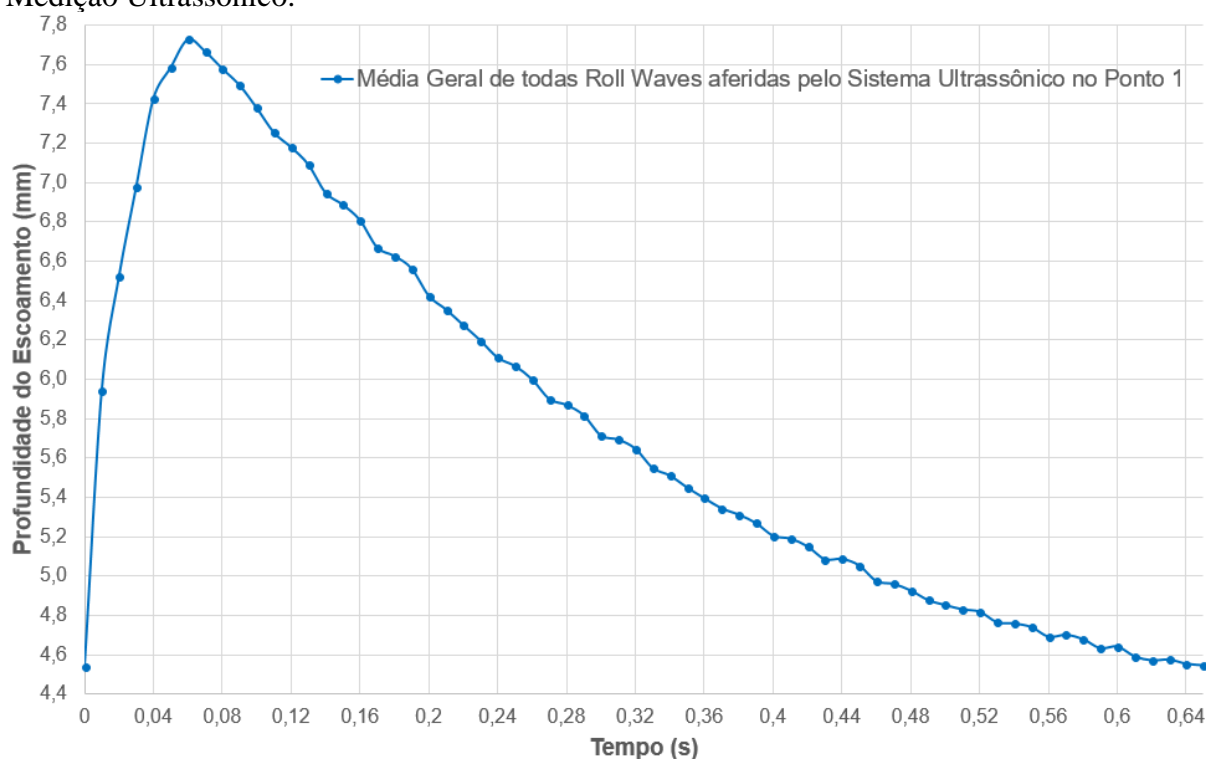
Assim, como apresentado na Tabela 18, o erro devido ao suporte do transdutor e as irregularidades no fundo do canal é de aproximadamente 2 milímetros (Tabela 18, Linha H – Erro médio em cada ponto) e o erro devido ao tempo de aquisição são de aproximadamente 0,05 milímetros. Desta forma, fez-se necessário excluir o valor H (Tabela 18) do seu respectivo ponto de medição.

Assim, a partir desta condição foi aplicado a metodologia de tratamento de dados como apresentado no Capítulo 5 – Materiais e Métodos, seção Tratamento de Dados e Amplitude das Ondas.

6.5 AMPLITUDE DAS *ROLL WAVES* – SISTEMA ULTRASSÔNICO

A amplitude da *roll wave* (Δh) é representada pela subtração do ponto de pico (h_s) a lâmina baixa (h_1) em milímetros. A *roll waves*, por sua vez, apresentam no seu perfil uma inclinação elevada na subida para o pico, e uma inclinação regular e longa na descida para lâmina baixa. A Figura 43, mostra uma *roll wave* do resultado da média de todas as *roll waves* aferidas pelo sistema ultrassônico, na segunda campanha, no ponto P1, como exemplo de *roll wave*, e apresentado assim somente para caracterização do sistema de medição, sem nenhuma abordagem hidráulica. A onda representada pela Figura 43 mostra a média de todos os resultados da segunda campanha experimental, ou seja, é uma representação global de medidas médias de uma *roll wave* característica de segunda campanha experimental.

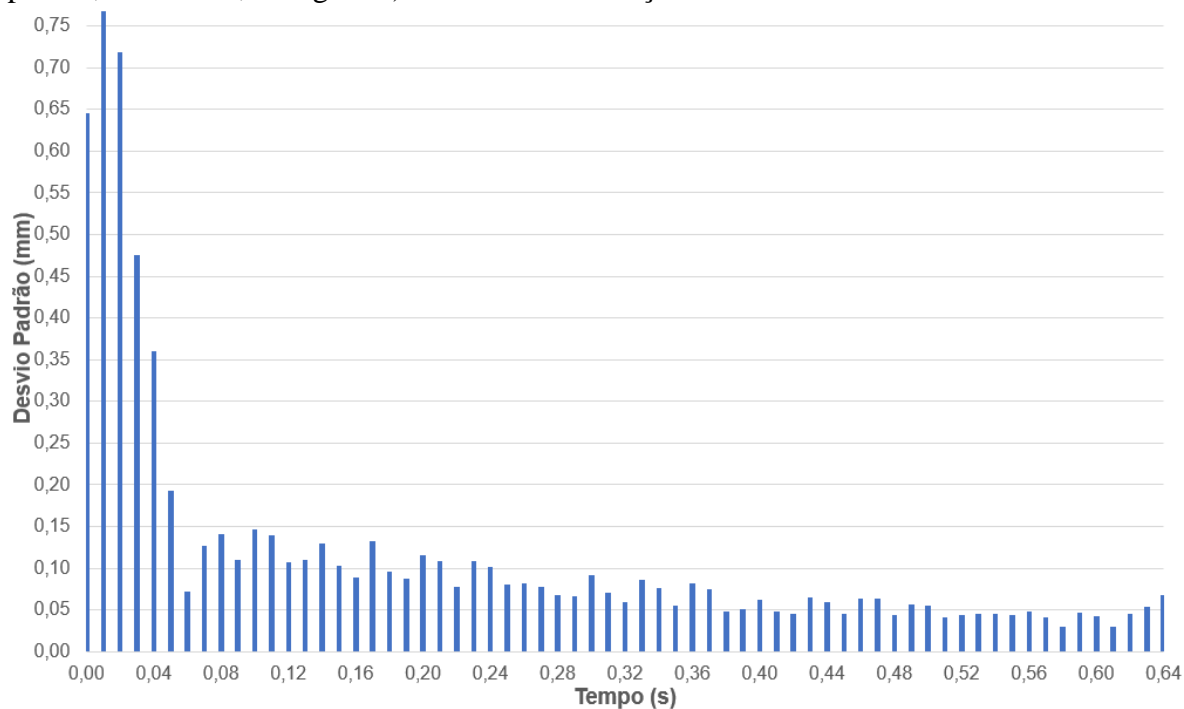
Figura 43 - Perfil Característico de *roll wave* média da segunda campanha experimental, apresentando cada instante de medição (66 pontos, 1 a cada 0,01 segundo) – Sistema de Medição Ultrassônico.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 44 mostra o desvio padrão médio desta *roll wave* em cada instante de tempo aferido, correlacionando a profundidade de escoamento em cada instante de tempo com seu desvio padrão (segunda campanha experimental).

Figura 44 - Caracterização do desvio padrão, apresentado em cada instante de medição (66 pontos, 1 a cada 0,01 segundo) – sistema de medição ultrassônico.

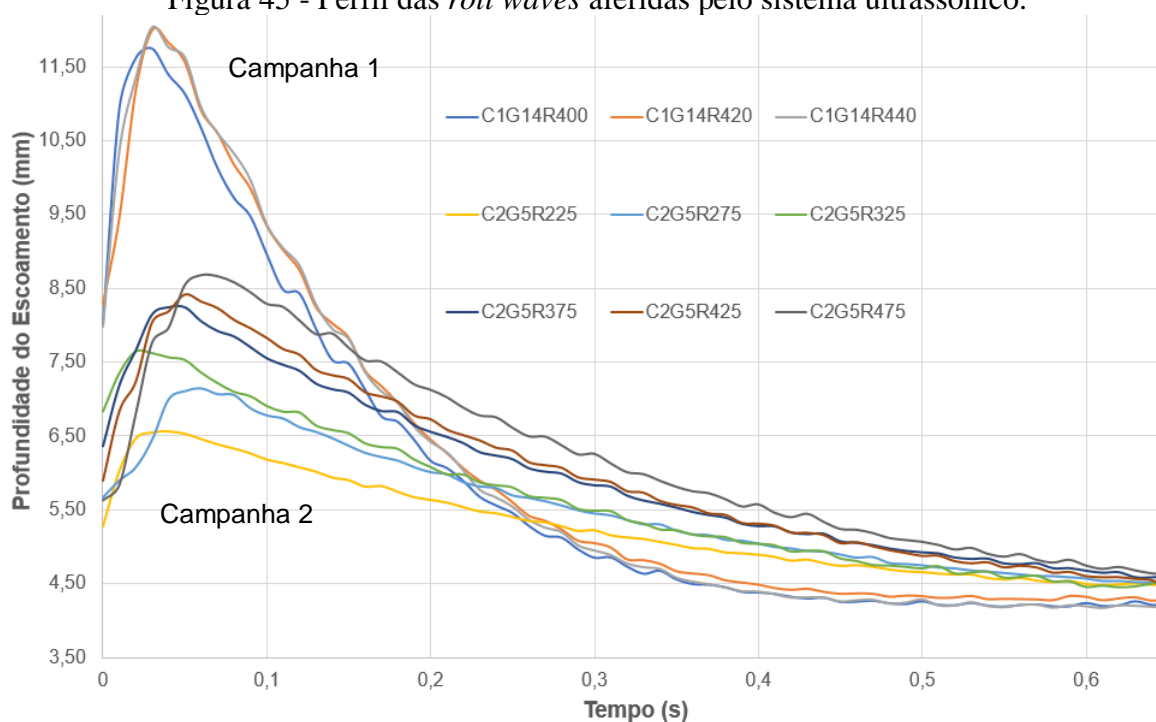


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Pela análise dos dados da Figura 44, é possível visualizar os maiores desvios padrões nos quatro primeiros centésimos de tempo da *roll wave*, onde acontece a subida mais inclinada, caracterizando a maior dificuldade de medição do sistema ultrassônico.

6.6 ESTUDO DO PERFIL DAS *ROLL WAVES* NO SISTEMA ULTRASSÔNICO

Através deste estudo foi possível aferir as *roll waves*, identificando os perfis, suas alturas, lâminas baixas, picos e, conseqüentemente, as amplitudes das *roll waves* aferidas. A Figura 45 mostra as amplitudes das *roll waves* nos diversos ensaios de cada campanha experimental (campanha 1 e campanha 2).

Figura 45 - Perfil das *roll waves* aferidas pelo sistema ultrassônico.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

6.7 ENSAIO DE CALIBRAÇÃO DO SISTEMA FOTOMÉTRICO

Os ensaios pertinentes ao sistema fotométrico foram realizados em dois momentos, no primeiro momento com o espectrofotômetro e, no segundo momento, no canal de ensaios, como apresentado no Capítulo 5 – Materiais e Métodos nos subitens Sistema Fotométrico e Amplitude das Ondas.

6.7.1 Caracterização no Espectrofotômetro

Nesta seção apresentam os resultados relacionados à caracterização do fluido teste no espectrofotômetro, sendo possível observar a influência da concentração do carbopol e do azul de metileno na quantidade de luminosidade aferida pelo fotodetector. A Tabela 19 apresenta as variações dos parâmetros medidos: C_{AzM} (concentração de azul de metileno, em g/l), C_{Carb} (concentração de carbopol, em porcentagem) e λ (comprimento de onda, em nm). Os valores apresentados são valores de absorvância (Abs): quanto mais este valor tender a 0, mais luminosidade é detectada. Portanto, se o valor atingir a absorvância de 3,5, a quantidade de luminosidade aferida é muito pequena, isto ocorreu, por exemplo, para

amostras nas quais C_{AzM} é igual a 0,05 g/l. Portanto, para valores de absorvância maiores ou igual a 3,5, a amostra se torna opaca, inviabilizando a exatidão das medidas.

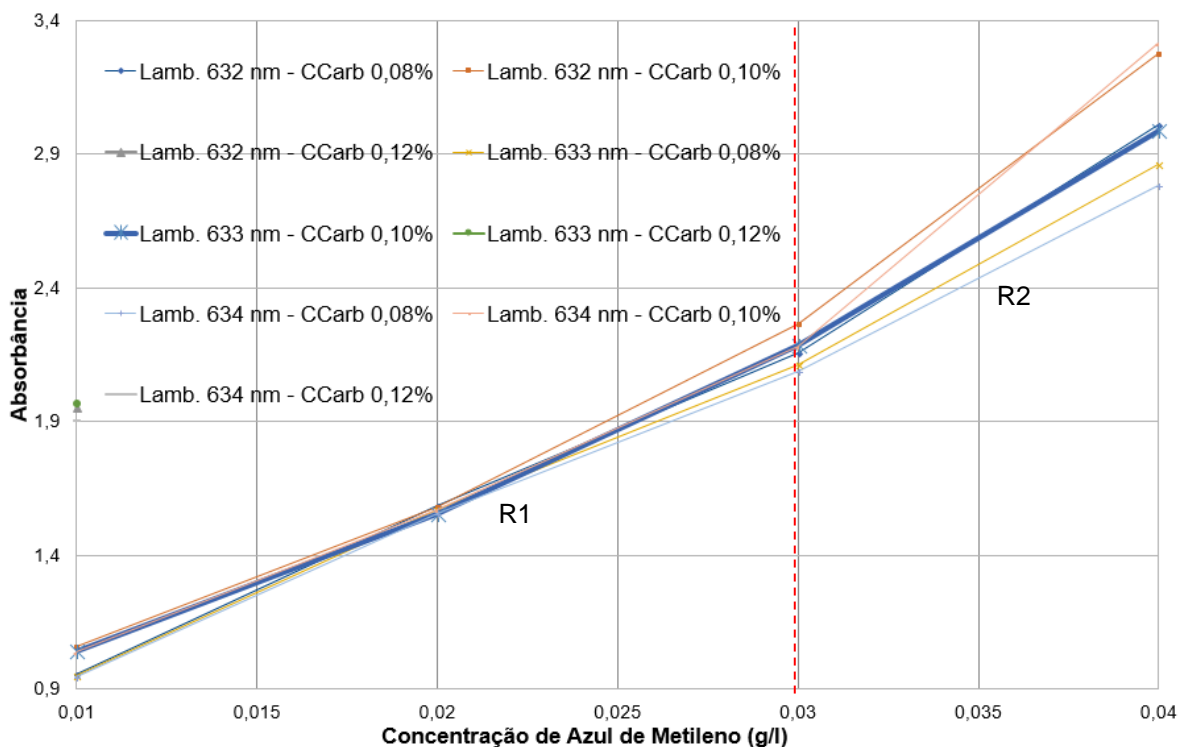
Tabela 19 - Nível de absorvância em função da relação do comprimento de onda, CC_{arb} e C_{AzM} .

	C_{Carb} em % em Massa	C_{AzM} em g/l				
		0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Lamb. 632 (nm)	0,08	0,959	1,587	2,157	3,008	>3,5
	0,10	1,061	1,583	2,266	3,274	>3,5
	0,12	1,957	>3,5	-	-	-
Lamb. 633 (nm)	0,08	0,953	1,573	2,112	2,864	>3,5
	0,10	1,045	1,55	2,187	2,988	>3,5
	0,12	1,973	>3,5	-	-	-
Lamb. 634 (nm)	0,08	0,948	1,555	2,087	2,786	>3,5
	0,10	1,041	1,572	2,184	3,315	>3,5
	0,12	1,909	>3,5	-	-	-

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observando a Tabela 19, nas concentrações de 0,12% de gel de carbopol, é possível perceber que o gel carbopol tem influência direta no sistema fotométrico. Portanto, independente do comprimento de onda, quanto maior for a concentração do gel de carbopol, maior será a dificuldade de detecção luminosa, sendo possível detectar luminosidade somente em concentrações de 0,01 g/l de AzM, nas concentrações de 0,12% de gel. Outra análise que também corrobora com esta condição é feita observando a diferença de aproximadamente 1 Abs, nas concentrações de gel de carbopol entre 0,08 e 0,12%, para todos os comprimentos de onda analisados. Ainda através da Tabela 19, pode-se observar a diminuição de luminosidade detectada, em decorrência do aumento das C_{AzM} , portanto, quanto maior a C_{AzM} , maior a absorvância.

Figura 46 - Variação da absorbância em função da concentração de azul de metileno.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 46 ilustra os dados apresentados na Tabela 19, onde pode-se observar as seguintes mudanças: inclinação e separação das retas próximo do ponto (0,03 g/l e 2,0 Abs), formando assim duas regiões de interesse. Na região R1, através da pequena distância de separação entre as retas, é possível observar a pouca influência das variações dos comprimentos de ondas testados em relação à região R2. Assim, em R2, além de apresentar uma maior dependência do comprimento de ondas aferidos (maior distância de separação entre as retas), apresenta-se também, uma alteração na absorbância, pois quando modificado a C_{AzM} , observam diferentes inclinações das retas, em comparação às inclinações das retas da região R1.

Por meio destas análises, tornou-se possível projetar os experimentos que foram executados no canal de ensaios. Pode-se assim, relacionar os dados apresentados no espectrofotômetro e os parâmetros que seriam utilizados nos experimentos do canal de ensaios. Entre tais parâmetros, os principais são: a C_{AzM} e caminho óptico (profundidade aferida pelo laser).

6.7.2 Caracterização no Canal de Ensaios

Na execução dos experimentos no canal de ensaios, o único parâmetro que não sofreu nenhuma modificação foi a fonte luminosa - laser em 633 nm. Ao contrário, a C_{Carb} sofreu diminuição, em consequência da adição de AzM estar em meio aquoso (1g AzM em pó diluído em 1 litro de água). A Tabela 20 mostra a correlação de parâmetros feita entre o espectrofotômetro e o canal de ensaios.

Tabela 20 - Relação dos parâmetros entre espectrofotômetro e canal de ensaios.

	Espectrofotômetro	Canal de ensaios
Fonte luminosa – Laser - nm	623	633
	633	
	634	
Caminho ótico ou lâmina aferida pelo laser - mm	5	0 – 20 mm
C_{Carb} - %	0,08	0,10 - Inicial
	0,10	
	0,12	
C_{AzM} - %	C1 = 0,01 g/l = 0,1 (ml) AzM = 1%	0,5 (I) AzM = 0,56%
		1 (I) AzM = 1,13%
	C2 = 0,02 g/l = 0,2 (ml) AzM = 2%	1,5 (I) AzM = 1,70%
		2,0 (I) AzM = 2,27%
	C3 = 0,03 g/l = 0,3 (ml) AzM = 3%	2,5 (I) AzM = 2,85%
	3,00 (I) AzM = 3,40%	
	C4 = 0,04 g/l = 0,4 (ml) AzM = 4%	3,5 (I) AzM = 3,97%

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na execução do experimento no canal, para cada C_{AzM} houve variações de distância entre sonda e fundo do canal (caminho ótico), iniciando em 0 mm (sonda encostada no fundo do canal) até a sonda não ter mais contato com a lâmina do escoamento, distanciando-se gradualmente e sempre em acréscimo de 2 mm (Tabela 20).

Através deste procedimento, investigou-se, inicialmente, a influência da vazão e velocidade do escoamento. No entanto, não se observou influência destes dois parâmetros, resultando em nenhuma variação na detecção da luminosidade do laser pelo fotodetector.

6.7.2.1 Construção da Identificação do Fluido Teste

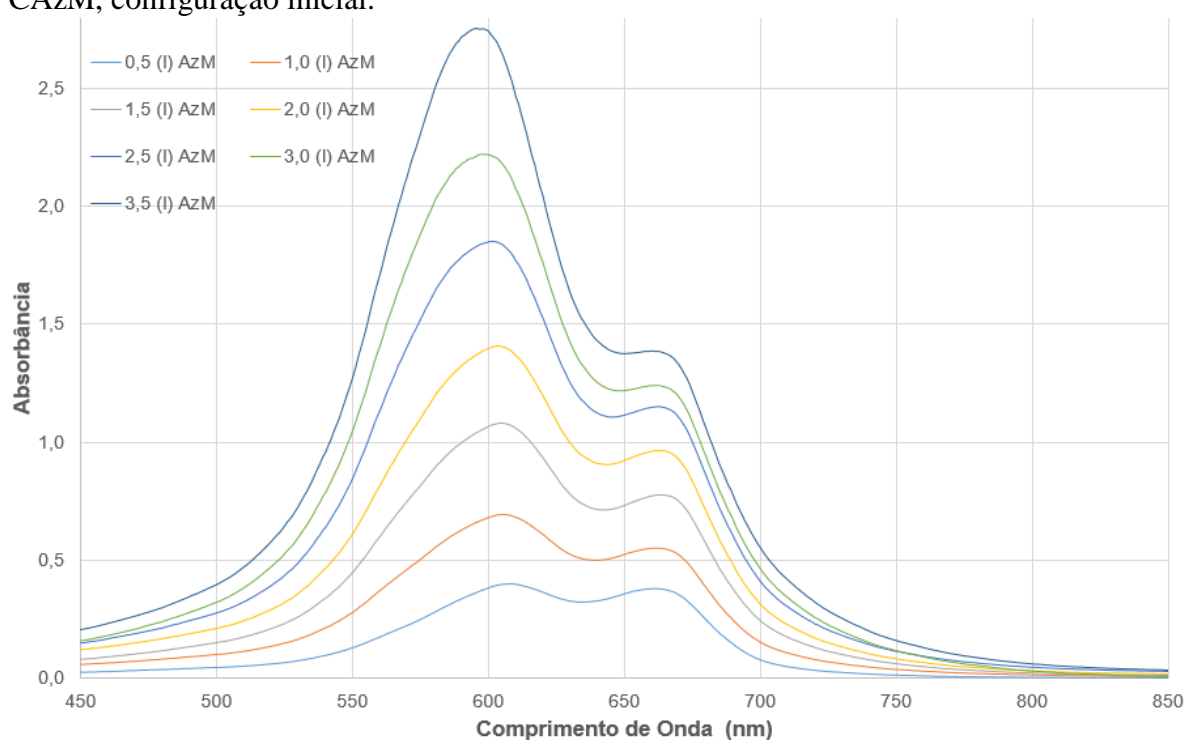
A cada adição de AzM no fluido teste em escoamento, foram retiradas amostras do fluido e executadas varreduras de vários comprimentos de onda (450 – 850 nm), no espectrofotômetro. Este procedimento teve três objetivos, a saber:

- 1º. caracterizar a C_{Carb} versus C_{AzM} , pois C_{Carb} foi alterada através da adição de C_{AzM} ;

- 2º. possibilitar a recriação do ponto de interesse (melhor resolução e precisão), através da identificação de cada fluido teste, com sua respectiva C_{AzM} e C_{Carb} ,
- 3º. identificar o melhor comprimento de onda, com o objetivo de atingir um valor de absorvância contido na região R2 da Figura 46.

A Figura 47 ilustra todo processo de caracterização, onde pode-se perceber o aumento da absorvância proporcional ao aumento da C_{AzM} , corroborando as informações já apresentadas.

Figura 47 - Curvas de absorvância em função do comprimento de onda para diversas C_{AzM} , configuração inicial.



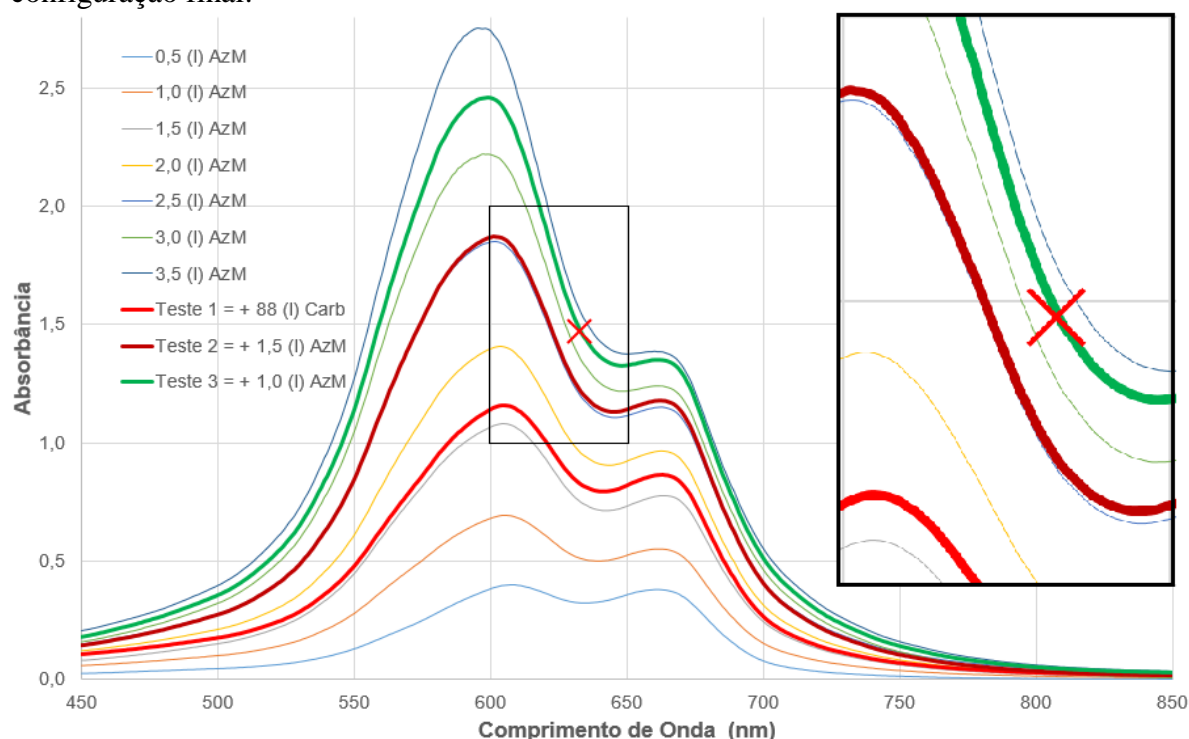
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Desta forma, foi observado que uma fonte de luz de 600 nm, seria a melhor opção. No entanto, a fonte de luz disponível (laser HeNe de 633 nm) não teve grandes alterações de absorvância nas três últimas adições de AzM (1,3 – 1,7 absorvância), confirmando que a melhor opção seria finalizar a adição de AzM no canal. Estes procedimentos foram finalizados, considerando que a curva de cor azul escuro (3,5 l de azul de metileno) representa uma condição onde é possível obter as melhores medições.

Após finalizar estes procedimentos, foi necessário aumentar o volume do fluido teste, para que os subsistemas experimentais (reservatório de gel de carbopol – bomba de cavidade progressiva – canal) pudessem proporcionar condições favoráveis de geração de *roll waves*, através de uma perturbação imposta.

Desta forma, na condição atual do gel de carbopol (88 l de gel carbopol em 0,10% de concentração + 3,5 l de AzM em meio aquoso) foram adicionados mais 88 l de gel de carbopol (sem AzM – cor translúcida), representado pela Figura 48, através da curva vermelha clara (Teste 1). Pode-se observar o posicionamento desta curva em relação à curva cor azul claro (condição mais favorável), identificando assim, a necessidade de acréscimos de AzM. Portanto, foram adicionados em dois momentos, mais 2,5 l de AzM. No primeiro momento 1,5 l, representado pela curva cor vermelha escura (Teste 2, Figura 48), e, na sequência, adição de 1,0 l, representado pela curva cor verde (Teste 3, Figura 48). Atingiu-se assim, um ponto mais próximo da condição de interesse (melhor resolução e precisão). O ponto “X”, em cor vermelha, representa exatamente as condições reais no canal de ensaios, onde o laser de HeNe tem comprimento de 633 nm.

Figura 48- Curvas de absorvância em função do comprimento de onda, para diversas CAzM, configuração final.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

6.7.2.2 Verificação da Influência da Profundidade do Escoamento no Sistema Fotométrico

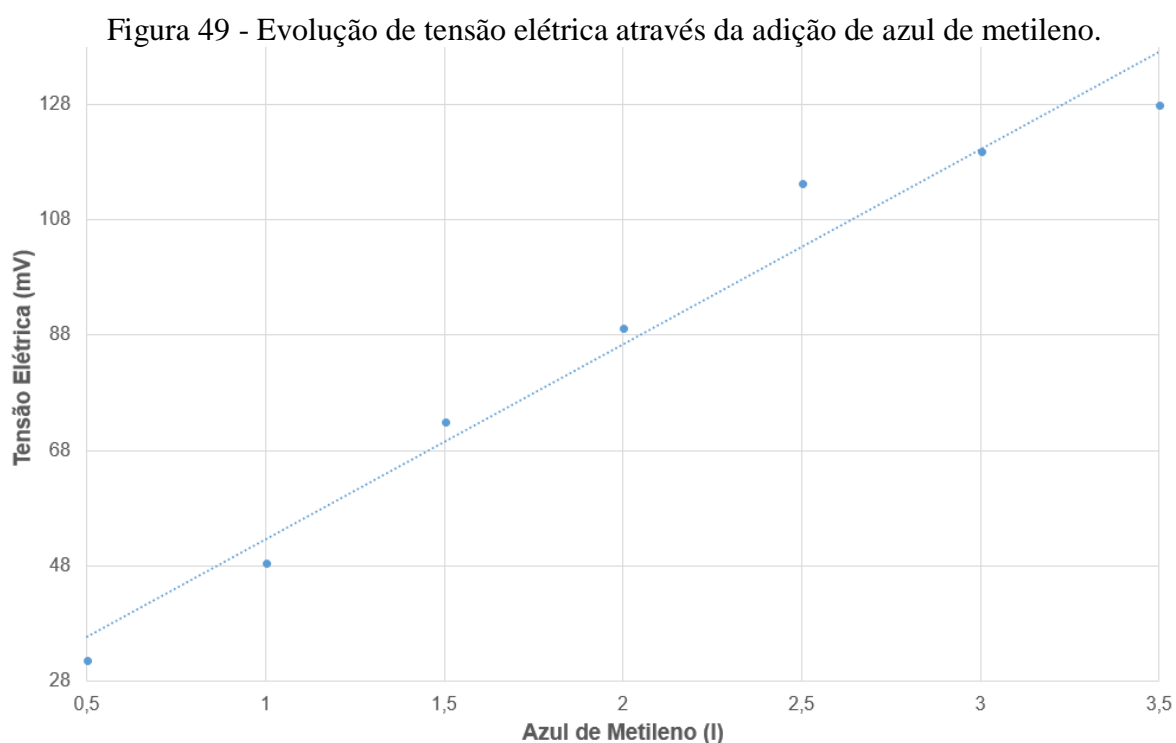
Ao aumentar ou diminuir a profundidade do escoamento sob a sonda e a C_{AzM} , observaram-se grande influência na resolução e precisão do sistema fotométrico. Para tanto, estudou-se a relação entre o valor da tensão quando a sonda estava em posição inicial e final.

Para obter boa sensibilidade, procurou-se o maior valor de tensão elétrica, dado pela Equação 83.

$$\text{Sensibilidade} = \frac{V_0 - V_{final}}{x} \quad (83)$$

com V_0 (sonda no fundo do canal) e V_{final} (sonda saindo do escoamento) dados em milivolts e x em milímetros.

A Figura 49 mostra os valores de variação de tensão para cada volume de AzM adicionado no canal, com destaque para a linearidade da relação.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Desta forma, foi possível observar que o aumento da C_{AZM} é diretamente proporcional à tensão elétrica, conforme Tabela 21.

Tabela 21 - Aumento da tensão elétrica em milivolt, representando 1 milímetro, em função da adição do azul de metileno no canal de escoamento.

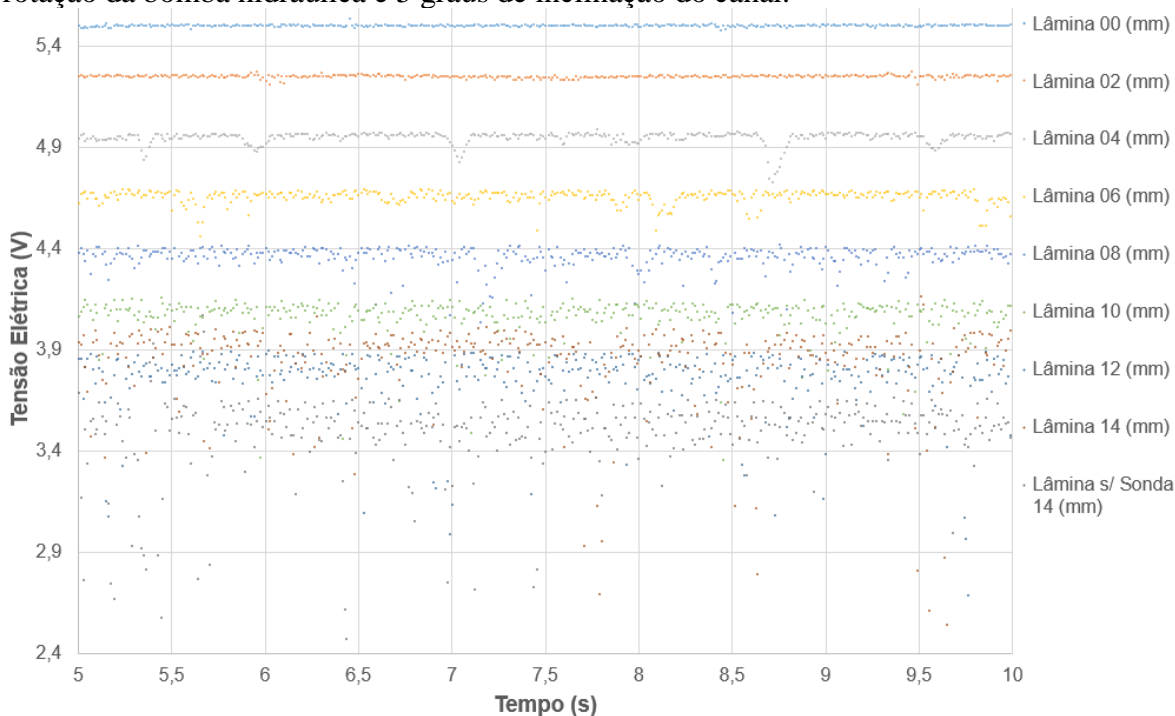
Adição de AzM em (l)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$X = 1 \text{ mm}$	31,79 (mV)	48,63 (mV)	72,95 (mV)	89,29 (mV)	114,29 (mV)	119,84 (mV)	127,98 (mV)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Após fazer o estudo da sensibilidade do sistema fotométrico, através do aumento da C_{AZM} , iniciou-se o estudo da precisão do sistema. Para isto, o canal foi inclinado em 5 graus e a vazão ficou condicionada a 750 RPM, o que produziu uma profundidade (lâmina de escoamento) de 14 mm. Nesta configuração, foi possível variar a sonda de medição de 2 em 2 mm, iniciando no fundo do canal até atingir 14 mm; permitindo assim, a aquisição da tensão elétrica proporcional à transmitância em cada nível da sonda (do fundo à superfície), durante 5 segundos a uma frequência de 100 Hz.

Por meio da Figura 50 e da Tabela 22, é possível visualizar coerência entre a distância nos valores dos sinais entre os níveis de 0 a 10 mm e uma linearidade nos pontos do mesmo nível, visualizados principalmente pelo desvio padrão da Tabela 22. No entanto, entre o nível 12 e 14 mm, observa-se uma diminuição desta coerência, não obedecendo à proporção apresentada nos outros níveis. Desta forma, com a diminuição da linearidade entre os pontos do mesmo nível, pode-se demonstrar a dificuldade da luz atingir o fotodetector, aumentando a imprecisão das medições do sistema fotométrico.

Figura 50 - Estudo da precisão do sistema fotométrico através das diferentes tensões elétricas dos níveis da sonda, no tempo. Input no aparato experimental de 750 RPM de rotação da bomba hidráulica e 5 graus de inclinação do canal.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 22 - Estudo da precisão do sistema fotométrico através das diferentes tensões elétrica dos níveis da sonda, no tempo. Input no aparato experimental de 750 RPM de rotação da bomba hidráulica e 5 graus de inclinação do canal.

Lâmina (mm)	0	2	4	6	8	10	12	14	14 (s/ sonda)
Média (V)	5,50	5,25	4,95	4,66	4,36	4,06	3,76	3,84	3,49
D. Padrão (V)	0,00	0,01	0,03	0,03	0,07	0,10	0,16	0,21	0,19

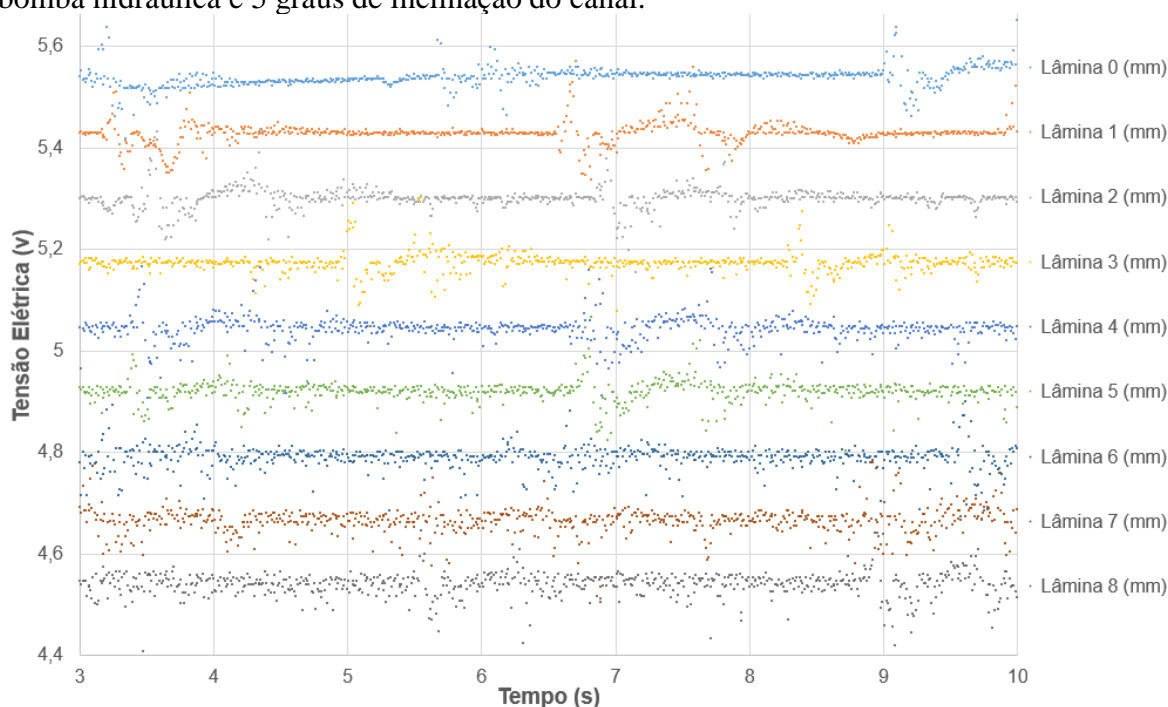
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Portanto, a superfície livre com a condição de 750 RPM com 5 graus de inclinação atingiu 14 milímetros, com dificuldades, e, conseqüentemente, pouca confiabilidade nas medições nos níveis superiores (12 e 14 milímetros). Esta condição apresenta uma limitação no aparato experimental quando estivermos com as condições de 176 litros de gel de carbopol (C_{Carb} 0,10% na condição inicial) e 6 litros de AzM (meio aquoso).

Portanto, através de análise da modelagem matemática (simulação modelo 1D), as ondas que seriam aferidas na segunda campanha experimental teriam picos de amplitudes máximas de 9 milímetros, tornando totalmente possível a aplicação desta metodologia com estas configurações (C_{Carb} e C_{AzM}).

Desta forma, o canal foi colocado em condições de geração de *roll waves*, com os seguintes parâmetros: 475 RPM de rotação na bomba e 5 graus de inclinação. E, a partir deste novo *input* no aparato experimental, foi executado novamente as verificações da precisão.

Figura 51 - Estudo da precisão do sistema fotométrico através das diferentes tensões elétrica dos níveis da sonda, no tempo. Input no aparato experimental de 475 RPM de rotação da bomba hidráulica e 5 graus de inclinação do canal.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 23 - Estudo da precisão do sistema fotométrico através das diferentes tensões elétrica dos níveis da sonda, no tempo. Input no aparato experimental de 475 RPM de rotação da bomba hidráulica e 5 graus de inclinação do canal.

Lâmina (mm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Média (V)	5,54	5,43	5,30	5,17	5,04	4,92	4,79	4,67	4,54
D. Padrão (V)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02

Fonte: Elaboração do próprio autor.

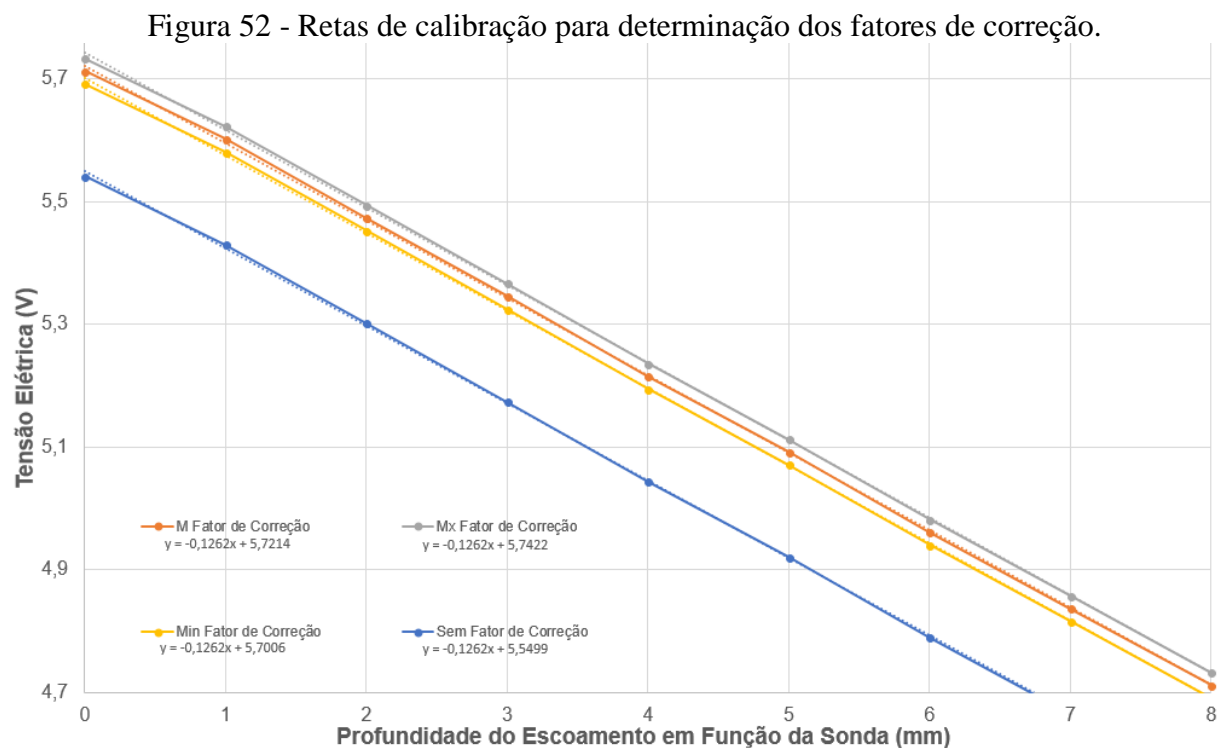
Assim, a Figura 51 e a Tabela 23 apresentaram coerência na distância entre os valores dos sinais nos respectivos níveis e, linearidade nos pontos de mesmo nível, representado pelo desvio padrão da Tabela 23. No entanto, observa-se uma diminuição desta linearidade dos pontos nos níveis mais elevados, sendo inversamente proporcional à linearidade entre os pontos e altura destes. Assim, como foi apresentado nos primeiros ensaios no canal, o aumento da lâmina de fluido teste (gel de carbopol) aumenta a absorbância, dificultando a transmitância para os níveis mais elevados, de forma que a dificuldade da luz atingir o fotodetector diminui a precisão das medidas nos níveis mais elevados.

Ainda, através da profundidade aferida pelo laser (variações no micrômetro) foi possível calibrar o sistema fotométrico, correlacionando via tensões elétrica no fotodetector com a quantidade de luminosidade percebida, possibilitando, assim, construir retas de calibração, transformando tensão elétrica em milímetros de coluna líquida.

A calibração foi feita através da variação do curso de uma sonda ao longo da profundidade em regime uniforme (sem *roll waves*), o que não ocorre durante a medição das *roll waves* no canal. Portanto, tornou-se necessário o estudo da influência desta sonda na precisão da medição, uma vez que, durante a medição das *roll waves* o que se encontra no caminho do laser é somente ar, gel de carbopol com azul de metileno, vidro, ar e fotodetector. Diferente do momento de calibração, onde se encontra ar, vidro (sonda), gel de carbopol com azul de metileno, vidro, ar e fotodetector. Desta forma, fez-se necessário saber qual a influência do vidro da sonda (Figura 36), determinando assim, um fator de correção, sendo este o valor a ser adicionado na tensão elétrica aferida pelo fotodetector quando estiver medindo efetivamente as *roll waves*.

A Figura 52 apresenta as curvas traçadas a partir de fatores de correção. O primeiro estudo apresenta o fator de correção com base no valor da tensão elétrica quando a sonda está no nível 0 mm (condição da tensão elétrica quando o canal está sem escoamento), com e sem sonda de calibração. Este primeiro estudo tem como resultado o fator “Max Fator de Correção” (fator de correção máximo), representado pela reta de cor cinza. O segundo estudo apresenta um fator de correção para o caso da sonda estar junto à superfície livre (maior

profundidade), com e sem sonda. Este valor é o “Min Fator de Correção” (fator de correção mínimo), apresentado na reta cor amarela. A reta cor laranja é formada pela média aritmética dos dois fatores de correção (M Fator de Correção). As equações apresentadas na Figura 52 são representativas da linearização dos valores das respectivas curvas de calibração.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A partir das curvas de calibração e o conhecimento de suas respectivas equações, pode-se transformar os valores de tensão elétrica em valores de amplitude em milímetros de coluna líquida, conforme as Equações 84 (a, b, c, d) onde: (84 – a) é a equação correspondente da curva de calibração “M Fator de Correção”; (84 – b) é a equação correspondente da curva de calibração “Mx Fator de Correção”; (84 – c) é a equação correspondente da curva de calibração “Min Fator de Correção” e (84 – d) é a equação correspondente da curva de calibração “Sem Fator de Correção”.

$$y = -0,1262x + 5,72 \quad (84-a)$$

$$y = -0,1262x + 5,74 \quad (84-b)$$

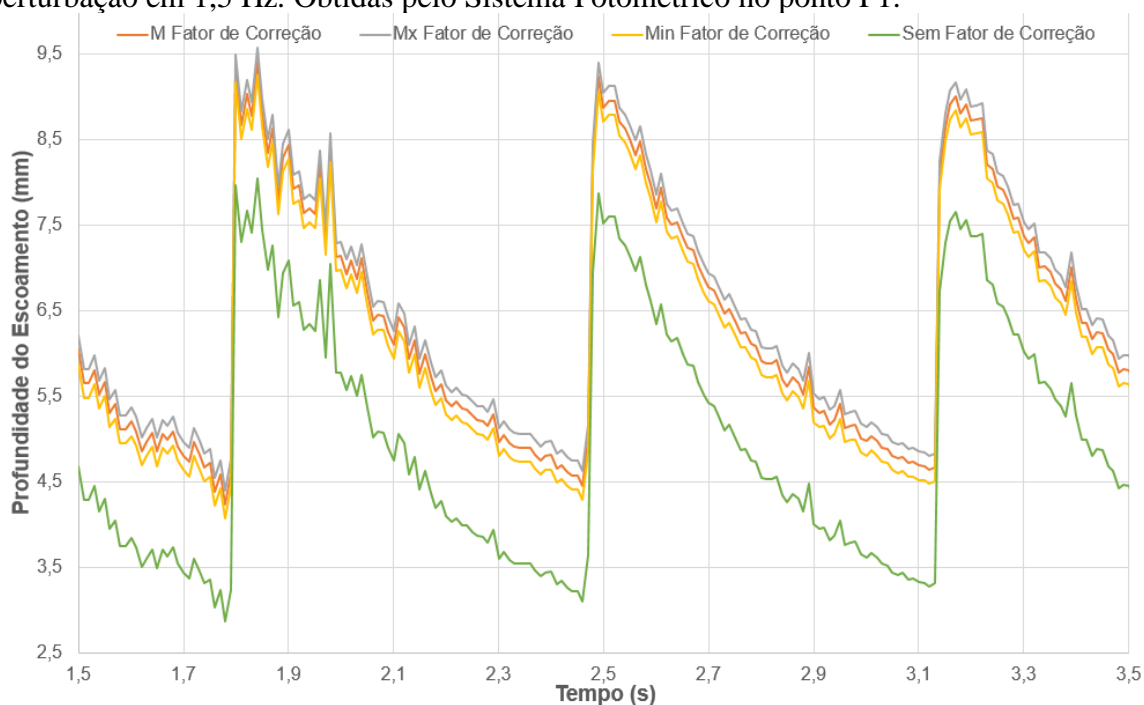
$$y = -0,1262x + 5,70 \quad (84-c)$$

$$y = -0,1262x + 5,54 \quad (84-d)$$

Sendo: y a tensão elétrica em volts e x a profundidade do escoamento em milímetros.

Desta forma, após a aferição da luminosidade pelo fotodetector, este envia um sinal em tensão elétrica (V), que após este ser inserido na variável y , da Equação 84, fornece o valor da profundidade do escoamento em milímetros. A Figura 53 representa estas ondas, diferenciando-se em cada fator de correção.

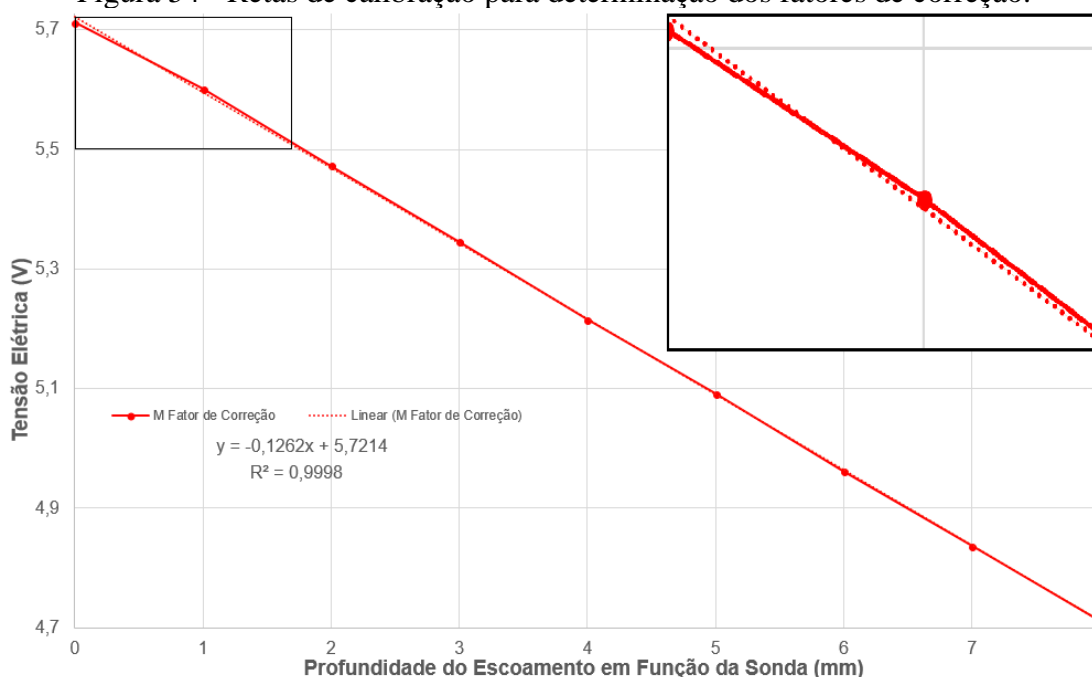
Figura 53 - *Roll waves* obtidas a partir dos fatores de correção. Input no aparato experimental de 475 RPM de rotação da bomba hidráulica e 5 graus de inclinação do canal. Sistema de perturbação em 1,5 Hz. Obtidas pelo Sistema Fotométrico no ponto P1.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Através deste estudo foi definida a utilização da curva de calibração “M Fator de Correção”, e assim a utilização da respectiva equação de transformação de tensão elétrica em volts para profundidade do escoamento em milímetros (Equação 84).

Figura 54 - Retas de calibração para determinação dos fatores de correção.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nas configurações impostas no canal, a superfície livre do escoamento laminar esteve a 0 milímetros com tensão elétrica de 5,71 e atingiu o nível máximo de 8 milímetros com tensão elétrica de 4,72 volts. A Tabela 24 apresenta a profundidade do escoamento (linha C) e o valor em milímetros calculado através da Equação 84 (linha F). A linha G mostra a diferença entre o valor real e o valor calculado em milímetros. O valor apresentado na linha G também representa a distância entre a linha da tensão elétrica linearizada e a aferida da Figura 54. Portanto o erro médio nos diferentes níveis de medição (distância da onda ao transdutor) é de 0,0005 mm.

Tabela 24 - Parâmetros gerais do sistema de medição fotométrico.

A	1	2	3	4	5	6	7	8	9
C	0	1	2	3	4	5	6	7	8
F	0,07	0,95	1,96	2,97	4,01	4,99	6,02	7,01	7,99
G	-0,07	0,05	0,03	0,02	-0,01	0,01	-0,02	-0,01	0,01

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A: Ponto.

C: Profundidade do escoamento (mm).

F: Valor calculado pela Eq. (84) (mm), em função da tensão elétrica aferida (V).

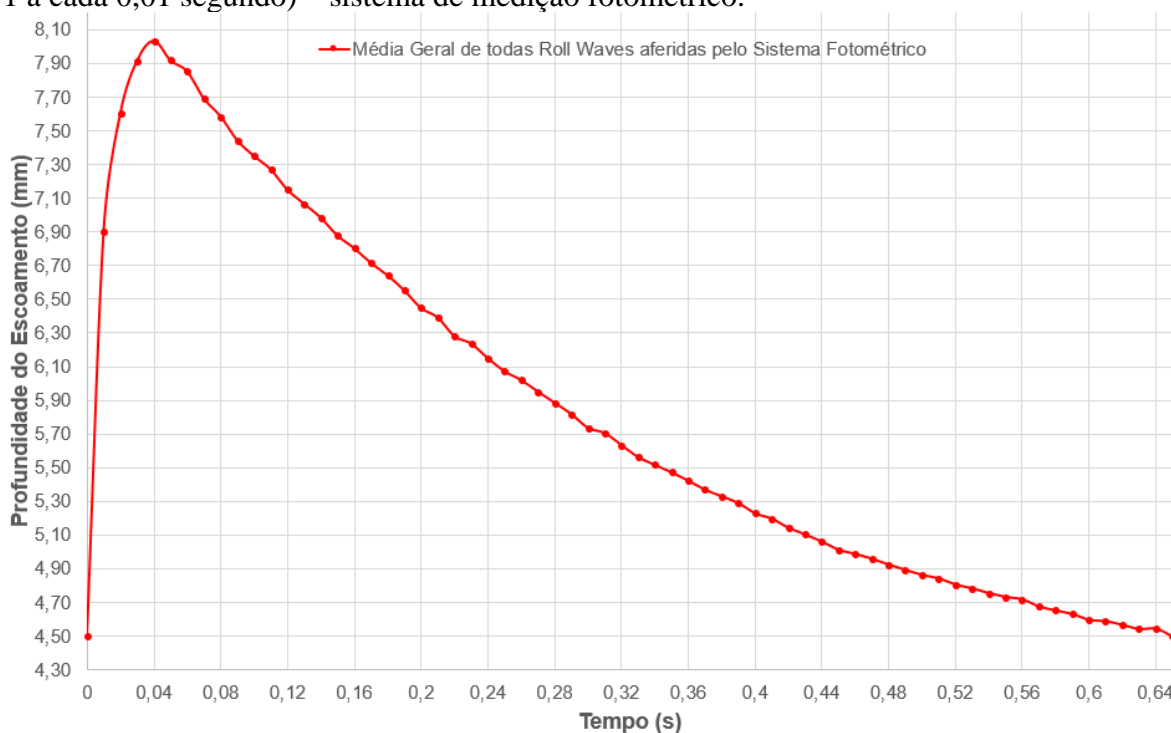
G: Erro calculado entre (C - F).

Assim, a partir desta condição foi aplicada a metodologia de tratamento de dados como apresentado no Capítulo 5 – Materiais e Métodos, seção Tratamento de Dados e Amplitude das Ondas.

6.8 AMPLITUDE DAS *ROLL WAVES* – SISTEMA FOTOMÉTRICO

A Figura 55 mostra uma *roll wave* representando o resultado da média de todas as *roll waves* aferidas pelo sistema fotométrico no ponto P1, durante a segunda campanha experimental.

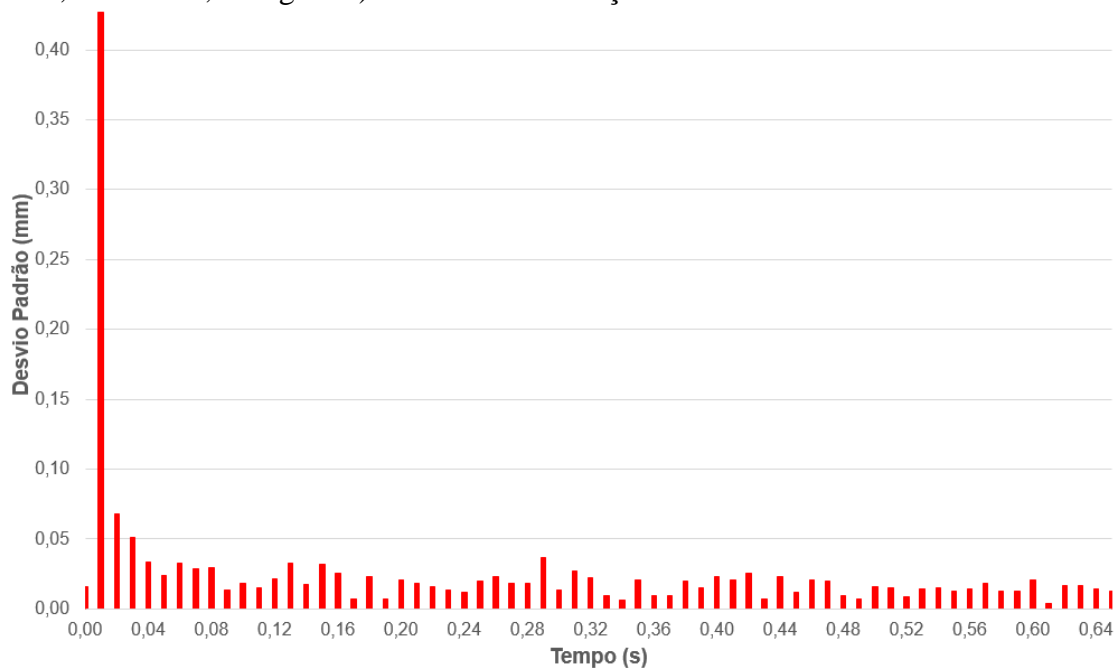
Figura 55 - Caracterização de 1 *roll wave* apresentando cada instante de medição (66 pontos, 1 a cada 0,01 segundo) – sistema de medição fotométrico.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 56 mostra o desvio padrão médio da *roll wave* representada na Figura 55 em cada instante de tempo aferido, qual seja, correlaciona a profundidade de escoamento em cada instante com seu desvio padrão, este mais significativo na vizinhança do pico, caracterizando, como já mencionado, a maior dificuldade de medição do sistema fotométrico.

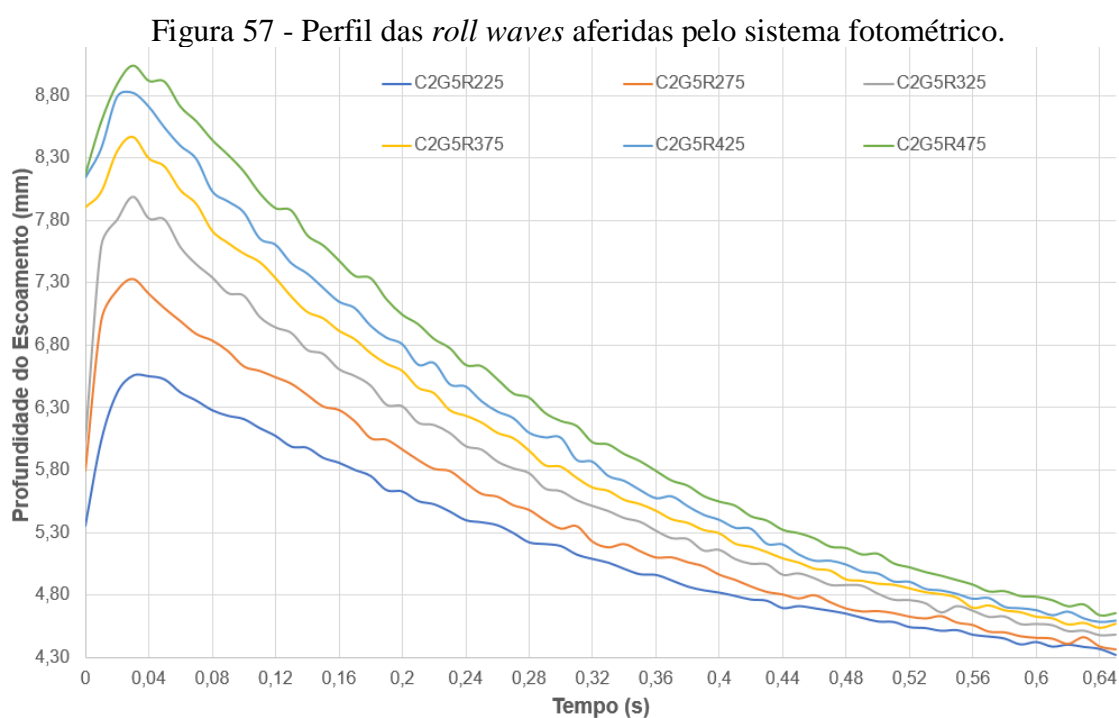
Figura 56 - Caracterização do desvio padrão apresentado em cada instante de medição (66 pontos, 1 a cada 0,01 segundo) – sistema de medição ultrassônico.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

6.9 ESTUDO DO PERFIL DAS *ROLL WAVES* NO SISTEMA FOTOMÉTRICO

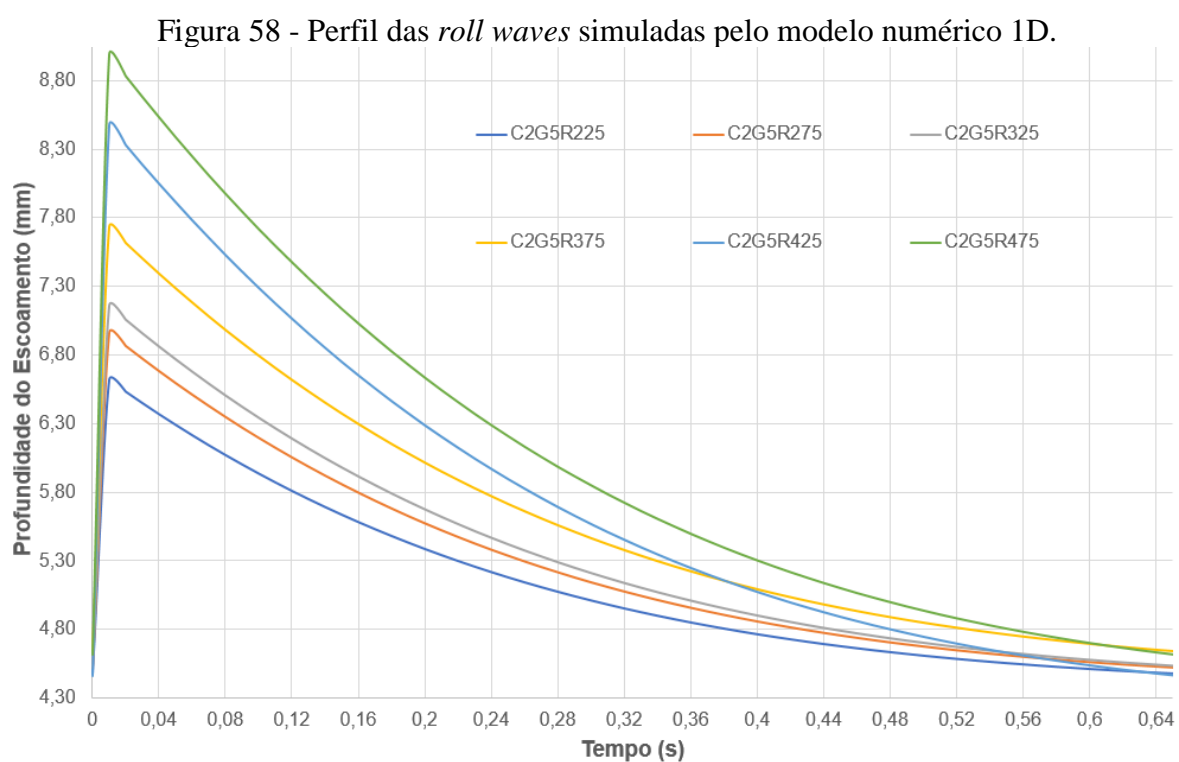
De maneira análoga ao sistema ultrassônico, foi possível aferir a *roll waves*, identificando os perfis, lâmina baixa, picos e alturas. (Figura 57)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

6.10 SIMULAÇÃO NO MODELO NUMÉRICO 1D – IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA E PARÂMETROS DE ENTRADA

Através da simulação numérica foi possível gerar a Figura 58, onde os parâmetros de entrada na simulação numérica foram: lâmina do escoamento, inclinação do canal, valor da aceleração gravitacional, massa específica, tensão limite, índice de consistência, índice de escoamento do fluido, e o adimensional composto por lâmina baixa experimental dividido pela lâmina do escoamento.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

7 RESULTADOS DE *ROLL WAVES* E CONFRONTAÇÃO DE MEDIÇÃO POR MEIO DOS SISTEMAS ULTRASSÔNICO, FOTOMÉTRICO, E MODELO NUMÉRICO

Neste Capítulo são consideradas as comparações entre os sistemas de medição e o modelo numérico utilizado.

7.1 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Entre as medidas feitas no canal de ensaios em condições de escoamento sem perturbação, a aferição da velocidade de superfície foi a que teve o menor desvio padrão em todos as campanhas, tendo como valor de desvio padrão máximo 0,007 metros por segundo, no ensaio C2G5R375, e valor de desvio padrão mínimo de 0,001 metros por segundo, no ensaio C2G5R275. Portanto, a velocidade de superfície medida experimentalmente foi utilizada como critério de avaliação dos parâmetros reológicos.

A comparação entre sistemas de medição experimental e modelo numérico, em escoamento perturbado, foi conduzida como se segue: sistemas de medição ultrassônico x modelo numérico 1D; sistema fotométrico x modelo numérico 1D; e sistemas de medição fotométrico x ultrassônico. A reologia dada como parâmetro de entrada no modelo numérico foi caracterizada e qualificada nas comparações do escoamento sem perturbação.

A relação entre a velocidade de superfície experimental e a calculada, em escoamento sem perturbação e a comparação feita entre os perfis de onda dos sistemas de medição e o modelo numérico, em escoamento perturbado, foram caracterizados através de diferença percentual ($\Delta\%$), onde 0% representa uma relação perfeita e 100% uma relação totalmente oposta, portanto, de 0 a 10%, foi considerado excelente, de 10,01 até 20% foi considerado bom e acima de 20% considerado ruim.

7.1.1 Comparação entre Velocidades Médias de Escoamento – Sem Perturbação

A comparação entre as velocidades médias de escoamento foi feita de duas formas: a primeira velocidade média leva em consideração a velocidade de superfície e parâmetros reológicos e a segunda, foi determinada matematicamente, a partir de parâmetros reológicos e da lâmina não perturbada. Assim, é possível fazer as seguintes definições:

- 1) Utilizando a velocidade de superfície experimental, a velocidade média calculada (\bar{u}_1) para um fluido não-newtoniano (Herschel Bulkley), é definida pela Equação 85:

$$\bar{u}_1 = u_s \left(\frac{n + 1 + nC^*}{2n + 1} \right); \quad C^* = \tau_c / \rho g h_0 \text{sen}\theta \quad (85)$$

No qual:

C^* : Adimensional de tensão limite de escoamento (τ_c)

u_s : Velocidade de Superfície

n : Índice de Escoamento

τ_c : Tensão limite de escoamento

ρ : Massa Específica

g : Aceleração da gravidade

h_0 : Lâmina do Escoamento

θ : Inclinação do canal

- 2) Utilizando a velocidade média do escoamento uniforme (\bar{u}_2), dada pela Equação 86, a partir da velocidade superficial determinada matematicamente, utilizando as propriedades do fluido e escoamento.

$$\bar{u}_2 = \frac{n}{n + 1} \left(\frac{\rho g \text{sen}(\theta) z_0^{(n+1)}}{k_n} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{n + 1 + nC^*}{2n + 1} \right) \quad (86)$$

Sendo:

z_0 : Altura da zona não cisalhada.

Em posse das velocidades médias (Equação 85 e 86), pôde-se estimar as diferenças percentuais, dada pela Equação 87

$$\left(\frac{\bar{u}_2 - \bar{u}_1}{\bar{u}_2} \right) \cdot 100 = \Delta\% \text{ das Velocidades Médias} \quad (87)$$

Em que:

$\Delta\%$: Diferença percentual;

Para calcular $\Delta\%$ foi criada uma programação no *software* Matlab, no qual os parâmetros de entrada são: lâmina do escoamento, velocidade na superfície e inclinação do canal; parâmetros físicos e reológicos: tensão limite de escoamento, índice de consistência de escoamento; a massa específica do fluido.

7.1.2 Comparação entre os Sistemas de Medição Experimental e Modelo Numérico 1D - Escoamento com Perturbação

A comparação entre os sistemas de medição experimental e o modelo numérico, em escoamento perturbado foi quantificada através da Equação 88.

$$\left(\frac{\text{Sist. Experimental} - \text{Numérico 1D}}{\text{Sist. Experimental}} \right) \cdot 100 = \Delta\% \text{ entre Sist. Experimental e Mod. Numérico} \quad (88)$$

onde: Sist. Experimental e Numérico 1D, apresentam valores de profundidade de escoamento em milímetros. Podendo assim, comparar a profundidade do escoamento ao longo de um intervalo de tempo, possibilitando observar as diferenças entre lâmina baixa e amplitude da *roll wave*.

7.1.3 Comparação entre os Sistemas de Medição Experimental Fotométrico e Ultrassônico.

A comparação entre os sistemas de medição fotométrico e ultrassônico, em escoamento perturbado, é dada pela Equação 89.

$$\left(\frac{\text{Sist. Fotométrico} - \text{Sist. Ultrassônico}}{\text{Sist. Fotométrico}} \right) \cdot 100 = \Delta\% \text{ Sist. Fotométrico e Ultrassônico} \quad (89)$$

onde: Sist. Experimental e Numérico 1D, apresentam valores de profundidade de escoamento em milímetros. Podendo assim, comparar a profundidade do escoamento ao longo de um intervalo de tempo, possibilitando observar as diferenças entre lâmina baixa e amplitude da *roll wave*.

7.2 COMPARAÇÃO ENTRE VELOCIDADES MÉDIAS DE ESCOAMENTO

Através da relação comparativa entre a velocidade média de escoamento (\bar{u}_1 e \bar{u}_2) da Equação 87, foi possível obter os resultados apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Relação Comparativa entre Velocidade Média do Escoamento.

Ensaio	$\Delta\%$ da Velocidade de Superfície	Caracterização
C2G5R225	14	Bom
C2G5R275	7	Excelente
C2G5R325	0,3	Excelente
C2G5R375	2	Excelente
C2G5R425	7	Excelente
C2G5R475	4	Excelente

Fonte: Elaboração do próprio autor.

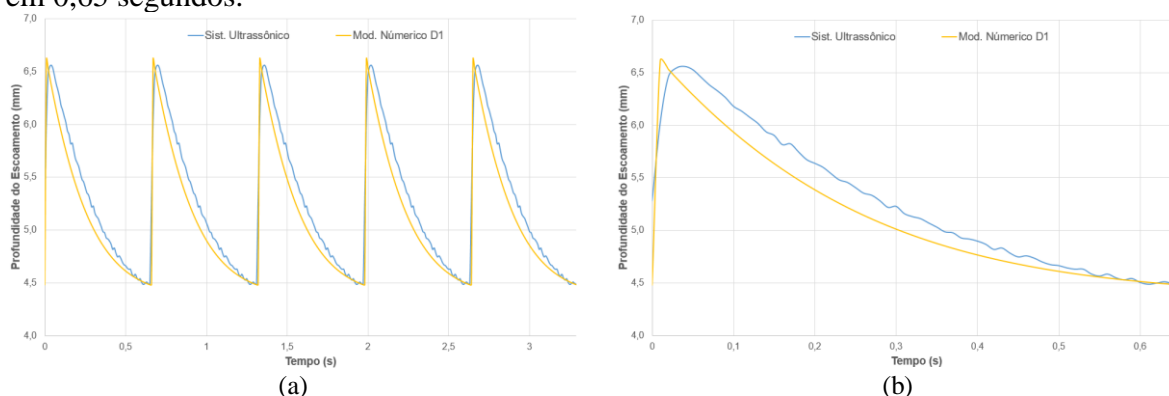
7.3 COMPARAÇÃO DA *ROLL WAVE* ATRAVÉS DO SISTEMA ULTRASSÔNICO E O MODELO NUMÉRICO 1D

7.3.1 Ensaio C2G5R225

Neste ensaio, a vazão estabelecida em função da inclinação do canal de ensaios e rotação da bomba hidráulica foi de 0,00022 metros cúbicos por segundo, com velocidade de superfície de 0,176 metros por segundo e lâmina de escoamento (sem perturbação) com 5,49 milímetros. A partir destas condições, o sistema de perturbação introduziu um pulso na superfície livre do escoamento na frequência de 1,5 hertz.

A Figura 59 apresenta a relação comparativa entre o sistema ultrassônico e o modelo numérico 1D. A Figura 59 (a) apresenta uma sequência de 5 ondas e a Figura 59 (b) uma vista em detalhe de somente uma onda, desta forma, estas duas figuras caracterizam a relação comparativa entre o sistema ultrassônico e o modelo numérico 1D. A diferença percentual calculada pela Equação 88, foi de 2,57%, ou seja, o sistema ultrassônico mostrou uma excelente relação comparativa com o modelo numérico 1D.

Figura 59 - Perfil de *roll waves* aferido pelo sistema ultrassônico (linha de cor azul) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 225 rotações por minuto. (a) *Roll waves* – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) *Roll wave* – 1 onda em 0,65 segundos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 26 apresenta a caracterização quantitativa deste ensaio após a aferição do sistema ultrassônico e os resultados do modelo numérico 1D.

Tabela 26 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R225 – Comparativo sistema ultrassônico e modelo numérico 1D.

	Sistema Ultrassônico (mm)	Modelo Numérico 1D (mm)
Lâmina Baixa (h_1)	4,49	4,48
Amplitude (Δh)	2,07	2,14

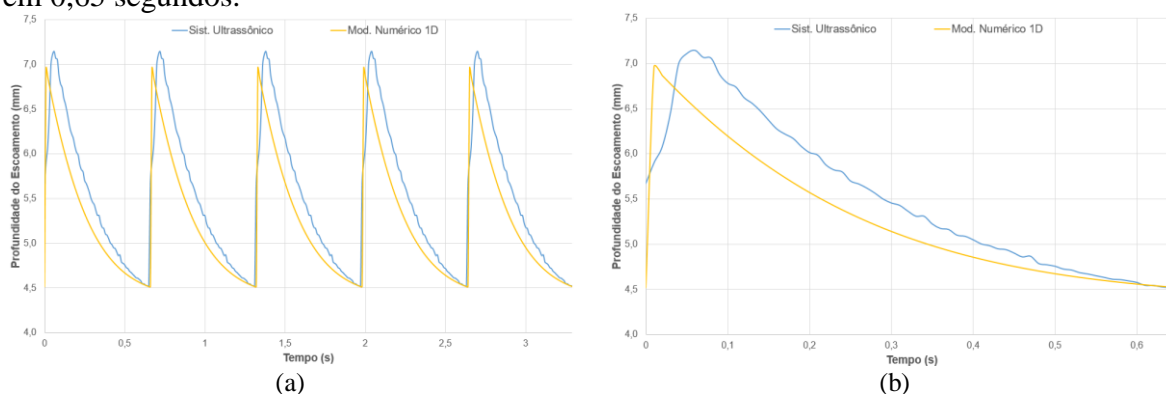
Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.3.2 Ensaio C2G5R275

Neste ensaio, a vazão estabelecida em função da inclinação do canal de ensaios e rotação da bomba hidráulica foi de 0,00027 metros cúbicos por segundo, com velocidade de superfície de 0,206 metros por segundo e lâmina de escoamento (sem perturbação) com 5,66 milímetros. A partir destas condições, o sistema de perturbação introduziu um pulso na superfície livre do escoamento na frequência de 1,5 hertz.

A Figura 60 apresenta a relação comparativa entre o sistema ultrassônico e o modelo numérico 1D. A Figura 60 (a) apresenta uma sequência de 5 ondas e a Figura 60 (b) apresenta uma vista em detalhamento de somente uma onda. A diferença percentual calculada pela Equação 88, foi de 4,16%, ou seja, o sistema ultrassônico mostrou uma excelente relação comparativa com o modelo numérico 1D.

Figura 60 - Perfil de *roll waves* aferido pelo sistema ultrassônico (linha de cor azul) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 275 rotações por minuto. (a) *Roll waves* – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) *Roll wave* – 1 onda em 0,65 segundos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 27 apresenta a caracterização quantitativa deste ensaio após a aferição do sistema ultrassônico e os resultados do modelo numérico 1D.

Tabela 27 - Perfil de Caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R275 – Comparativo sistema ultrassônico e modelo numérico 1D.

	Sistema Ultrassônico (mm)	Modelo Numérico 1D (mm)
Lâmina Baixa (h_1)	4,52	4,52
Amplitude (Δh)	2,62	2,44

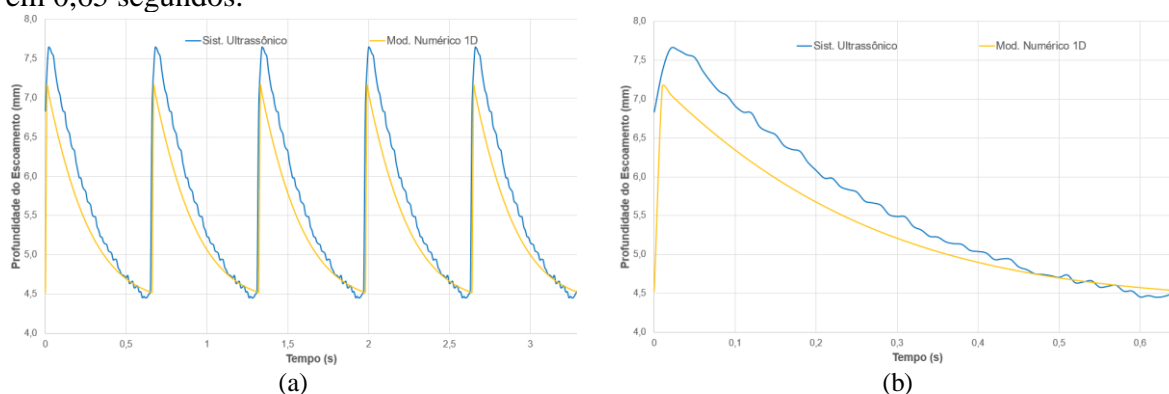
Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.3.3 Ensaio C2G5R325

Neste ensaio, a vazão estabelecida em função da inclinação do canal de ensaios e rotação da bomba hidráulica foi de 0,00032 metros cúbicos por segundo, com velocidade de superfície de 0,23 metros por segundo e lâmina de escoamento (sem perturbação) com 5,75 milímetros. A partir destas condições, o sistema de perturbação introduziu um pulso na superfície livre do escoamento na frequência de 1,50 hertz.

A Figura 61 apresenta a relação comparativa entre o sistema ultrassônico e o modelo numérico 1D. A Figura 61 (a) apresenta uma sequência de 5 ondas e a Figura 61 (b) apresenta uma vista em detalhamento de somente uma onda. A diferença percentual calculada pela Equação 88, foi de 4,40%, ou seja, o sistema ultrassônico mostrou uma excelente relação comparativa com o modelo numérico 1D.

Figura 61 - Perfil de *roll waves* aferido pelo sistema ultrassônico (linha de cor azul) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 325 rotações por minuto. (a) *Roll waves* – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) *Roll wave* – 1 onda em 0,65 segundos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 28 apresenta a caracterização quantitativa deste ensaio após a aferição do sistema ultrassônico e os resultados do modelo numérico 1D.

Tabela 28 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R325 – Comparativo sistema ultrassônico e modelo numérico 1D.

	Sistema Ultrassônico (mm)	Modelo Numérico 1D (mm)
Lâmina Baixa (h_1)	4,45	4,53
Amplitude (Δh)	3,20	2,63

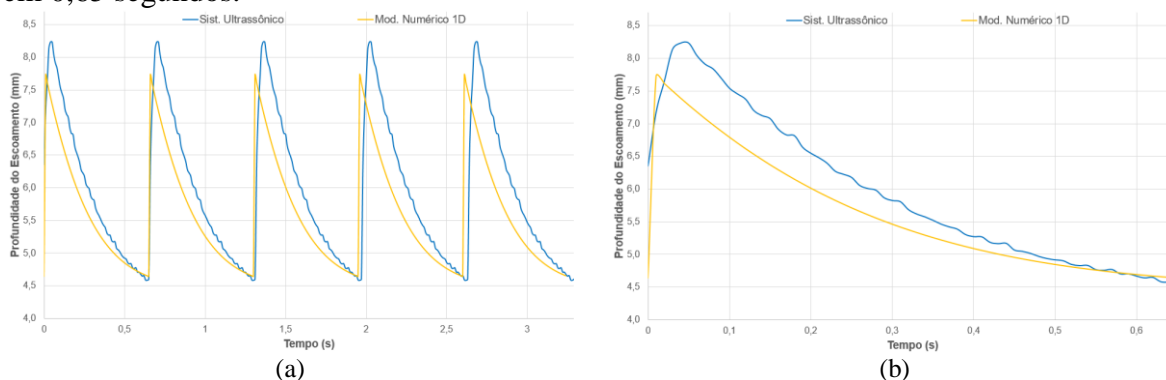
Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.3.4 Ensaio C2G5R375

Neste ensaio, a vazão estabelecida em função da inclinação do canal de ensaios e rotação da bomba hidráulica foi de 0,00036 metros cúbicos por segundo, com velocidade de superfície de 0,26 metros por segundo e lâmina de escoamento (sem perturbação) com 6,06 milímetros. A partir destas condições, o sistema de perturbação introduziu um pulso na superfície livre do escoamento na frequência de 1,5 hertz.

A Figura 62 apresenta a relação comparativa entre o sistema ultrassônico e o modelo numérico 1D. A Figura 62 (a) apresenta uma sequência de 5 ondas e a Figura 62 (b) apresenta uma vista em detalhamento de somente uma onda. A diferença percentual calculada pela Equação 88, foi de 5,14%, ou seja, o sistema ultrassônico mostrou uma excelente relação comparativa com o modelo numérico 1D.

Figura 62 - Perfil de *roll waves* aferido pelo sistema ultrassônico (linha de cor azul) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 375 rotações por minuto. (a) *Roll waves* – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) *Roll wave* – 1 onda em 0,65 segundos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 29 apresenta a caracterização quantitativa deste ensaio após a aferição do sistema ultrassônico e os resultados do modelo numérico 1D.

Tabela 29 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R375 – Comparativo sistema ultrassônico e modelo numérico 1D.

	Sistema Ultrassônico (mm)	Modelo Numérico 1D (mm)
Lâmina Baixa (h_1)	4,58	4,64
Amplitude (Δh)	3,66	3,09

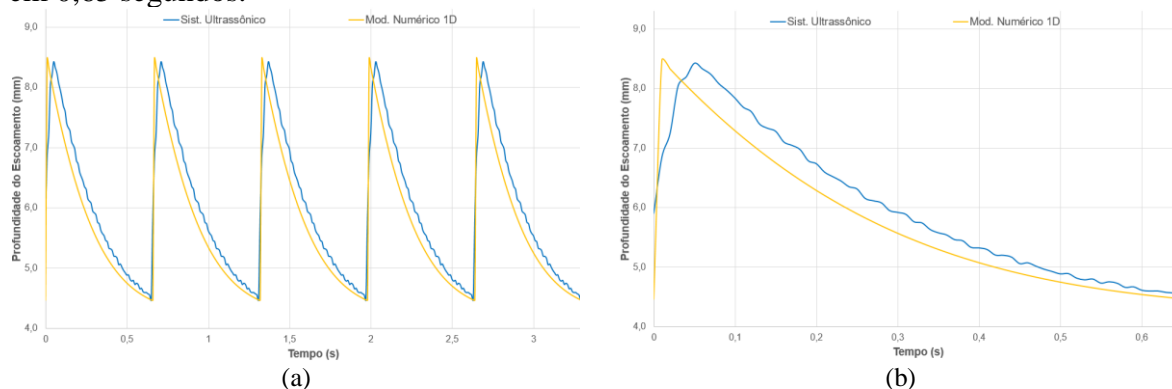
Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.3.5 Ensaio C2G5R425

Neste ensaio, a vazão estabelecida em função da inclinação do canal de ensaios e rotação da bomba hidráulica foi de 0,00041 metros cúbicos por segundo, com velocidade de superfície de 0,29 metros por segundo e lâmina de escoamento (sem perturbação) com 6,25 milímetros. A partir destas condições, o sistema de perturbação introduziu um pulso na superfície livre do escoamento na frequência de 1,50 hertz.

A Figura 63 apresenta a relação comparativa entre o sistema ultrassônico e o modelo numérico 1D. A Figura 63 (a) apresenta uma sequência de 5 ondas e a Figura 63 (b) apresenta uma vista em detalhamento de somente uma onda. A diferença percentual calculada pela Equação 88, foi de 4,09%, ou seja, o sistema ultrassônico mostrou uma excelente relação comparativa com o modelo numérico 1D.

Figura 63 - Perfil de *Roll waves* aferido pelo sistema ultrassônico (linha de cor azul) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 425 rotações por minuto. (a) *Roll waves* – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) *Roll wave* – 1 onda em 0,65 segundos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 30 apresenta a caracterização quantitativa deste ensaio após a aferição do sistema ultrassônico e os resultados do modelo numérico 1D.

Tabela 30 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R425 – Comparativo sistema ultrassônico e modelo numérico 1D.

	Sistema Ultrassônico (mm)	Modelo Numérico 1D (mm)
Lâmina Baixa (h_1)	4,47	4,46
Amplitude (Δh)	3,95	4,01

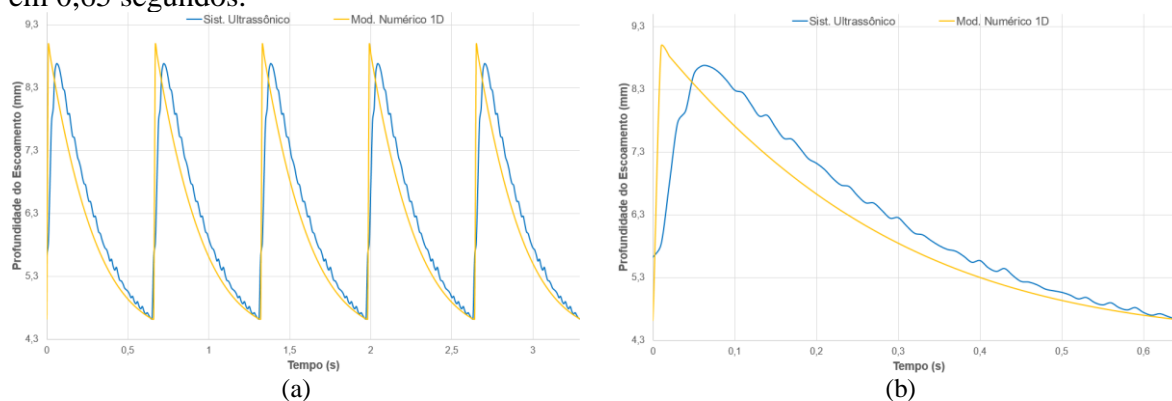
Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.3.6 Ensaio C2G5R475

Neste ensaio, a vazão estabelecida em função da inclinação do canal de ensaios e rotação da bomba hidráulica foi de 0,00046 metros cúbicos por segundo, com velocidade de superfície de 0,32 metros por segundo e lâmina de escoamento (sem perturbação) com 6,55 milímetros. A partir destas condições, o sistema de perturbação introduziu um pulso na superfície livre do escoamento na frequência de 1,50 hertz.

A Figura 64 apresenta a relação comparativa entre o sistema ultrassônico e o modelo numérico 1D. A Figura 64 (a) apresenta uma sequência de 5 ondas e a Figura 64 (b) apresenta uma vista em detalhamento de somente uma onda. A diferença percentual calculada pela Equação 88, foi de 2,72%, ou seja, o sistema ultrassônico mostrou uma excelente relação comparativa com o modelo numérico 1D.

Figura 64 - Perfil de *roll waves* aferido pelo sistema ultrassônico (linha de cor azul) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 475 rotações por minuto. (a) *Roll waves* – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) *Roll wave* – 1 onda em 0,65 segundos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 31 apresenta a caracterização quantitativa deste ensaio após a aferição do sistema ultrassônico e os resultados do modelo numérico 1D.

Tabela 31 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R475 – Comparativo sistema ultrassônico e modelo numérico 1D.

	Sistema Ultrassônico (mm)	Modelo Numérico 1D (mm)
Lâmina Baixa (h_1)	4,62	4,62
Amplitude (Δh)	4,06	4,37

Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.4 COMPARAÇÃO ENTRE O SISTEMA FOTOMÉTRICO E O MODELO NUMÉRICO 1D

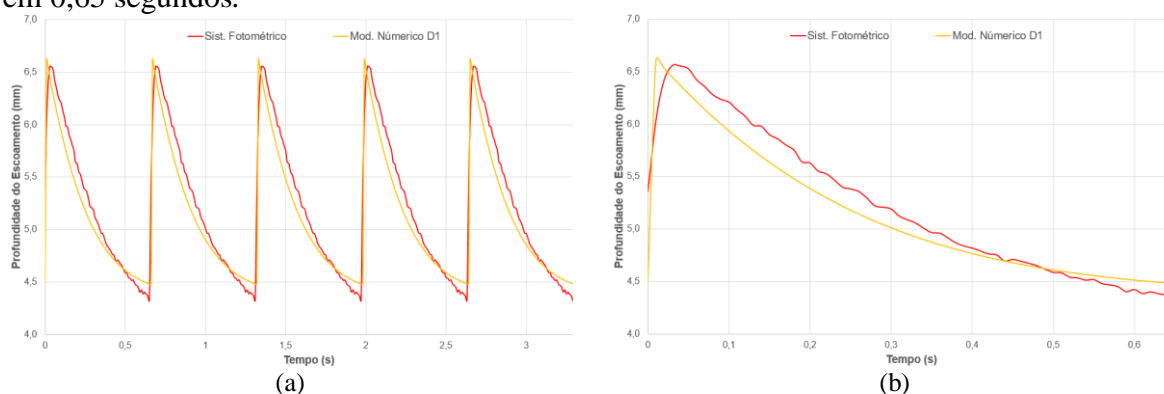
7.4.1 Ensaio C2G5R225

Neste ensaio, a vazão estabelecida em função da inclinação do canal de ensaios e rotação da bomba hidráulica foi de 0,00022 metros cúbicos por segundo, com velocidade de superfície de 0,176 metros por segundo e lâmina de escoamento (sem perturbação) com 5,49 milímetros. A partir destas condições, o sistema de perturbação introduziu um pulso na superfície livre do escoamento na frequência de 1,5 hertz.

A Figura 65 apresenta a relação comparativa entre o sistema fotométrico e o modelo numérico 1D. A Figura 65 (a) apresenta uma sequência de 5 ondas e a Figura 65 (b) apresenta uma vista em detalhamento de somente uma onda. A diferença percentual calculada pela

Equação 88, foi de 1,59%, ou seja, o sistema ultrassônico mostrou uma excelente relação comparativa com o modelo numérico 1D.

Figura 65 - Perfil de *roll waves* aferido pelo sistema fotométrico (linha de cor vermelha) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela) Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 225 rotações por minuto. (a) *Roll waves* – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) *Roll wave* – 1 onda em 0,65 segundos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 32 apresenta a caracterização quantitativa deste ensaio após a aferição do sistema fotométrico e os resultados do modelo numérico 1D.

Tabela 32 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R225 – Comparativo sistema fotométrico e modelo numérico 1D.

	Sistema Fotométrico (mm)	Modelo Numérico 1D (mm)
Lâmina Baixa (h_1)	4,32	4,48
Amplitude (Δh)	2,24	2,14

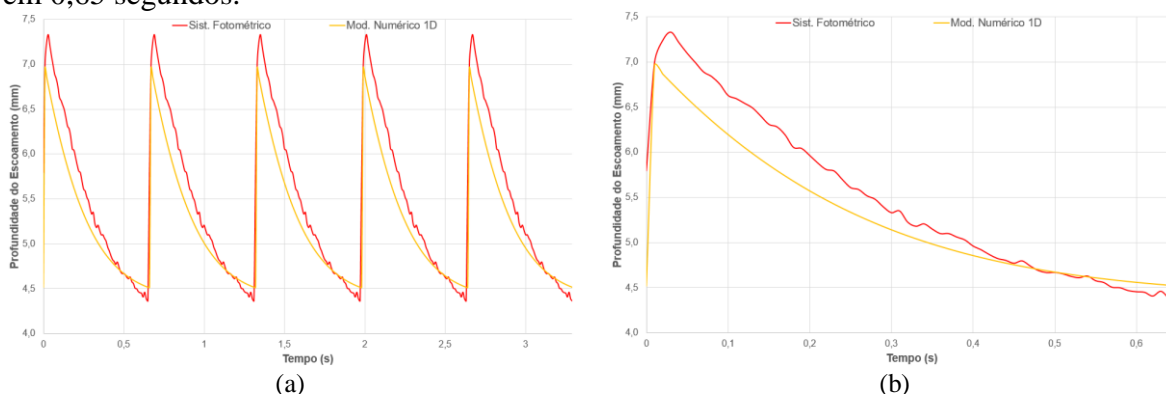
Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.4.2 Ensaio C2G5R275

Neste ensaio, a vazão estabelecida em função da inclinação do canal de ensaios e rotação da bomba hidráulica foi de 0,00027 metros cúbicos por segundo, com velocidade de superfície de 0,206 metros por segundo e lâmina de escoamento (sem perturbação) com 5,66 milímetros. A partir destas condições, o sistema de perturbação introduziu um pulso na superfície livre do escoamento na frequência de 1,5 hertz.

A Figura 66 apresenta a relação comparativa entre o sistema fotométrico e o modelo numérico 1D. A Figura 66 (a) apresenta uma sequência de 5 ondas e a Figura 66 (b) apresenta uma vista em detalhamento de somente uma onda. A diferença percentual calculada pela Equação 88, foi de 3,37%, ou seja, o sistema ultrassônico mostrou uma excelente relação comparativa com o modelo numérico 1D.

Figura 66 - Perfil de *roll waves* aferido pelo sistema fotométrico (linha de cor vermelha) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 275 rotações por minuto. (a) *Roll waves* – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) *Roll wave* – 1 onda em 0,65 segundos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 33 apresenta a caracterização quantitativa deste ensaio após a aferição do sistema fotométrico e os resultados do modelo numérico 1D.

Tabela 33 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R275 – Comparativo sistema fotométrico e modelo numérico 1D.

	Sistema Fotométrico (mm)	Modelo Numérico 1D (mm)
Lâmina Baixa (h_1)	4,36	4,52
Amplitude (Δh)	2,97	2,44

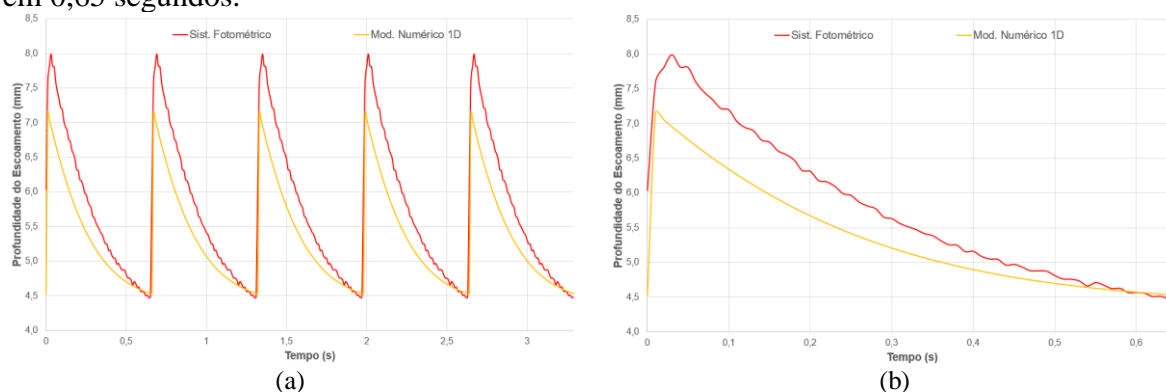
Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.4.3 Ensaio C2G5R325

Neste ensaio, a vazão estabelecida em função da inclinação do canal de ensaios e rotação da bomba hidráulica foi de 0,00032 metros cúbicos por segundo, com velocidade de superfície de 0,23 metros por segundo e lâmina de escoamento (sem perturbação) com 5,75 milímetros. A partir destas condições, o sistema de perturbação introduziu um pulso na superfície livre do escoamento na frequência de 1,50 hertz.

A Figura 67 apresenta a relação comparativa entre o sistema fotométrico e o modelo numérico 1D. A Figura 67 (a) apresenta uma sequência de 5 ondas e a Figura 67 (b) apresenta uma vista em detalhamento de somente uma onda. A diferença percentual calculada pela Equação 88, foi de 6,48%, ou seja, o sistema ultrassônico mostrou uma excelente relação comparativa com o modelo numérico 1D.

Figura 67 - Perfil de *roll waves* aferido pelo sistema fotométrico (linha de cor vermelha) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 325 rotações por minuto. (a) *Roll waves* – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) *Roll wave* – 1 onda em 0,65 segundos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 34 apresenta a caracterização quantitativa deste ensaio após a aferição do sistema fotométrico e os resultados do modelo numérico 1D.

Tabela 34 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R325 – Comparativo sistema fotométrico e modelo numérico 1D.

	Sistema Fotométrico (mm)	Modelo Numérico 1D (mm)
Lâmina Baixa (h_1)	4,48	4,53
Amplitude (Δh)	3,51	2,63

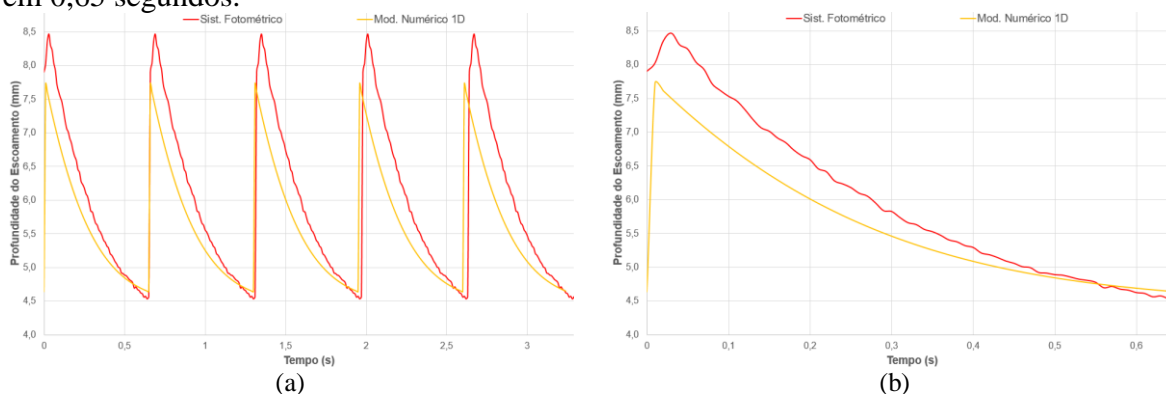
Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.4.4 Ensaio C2G5R375

Neste ensaio, a vazão estabelecida em função da inclinação do canal de ensaios e rotação da bomba hidráulica foi de 0,00036 metros cúbicos por segundo, com velocidade de superfície de 0,26 metros por segundo e uma lâmina de escoamento (sem perturbação) com 6,06 milímetros. A partir destas condições, o sistema de perturbação introduziu um pulso na superfície livre do escoamento na frequência de 1,5 hertz.

A Figura 68 apresenta a relação comparativa entre o sistema fotométrico e o modelo numérico 1D. A Figura 68 (a) apresenta uma sequência de 5 ondas e a Figura 68 (b) apresenta uma vista em detalhamento de somente uma onda. A diferença percentual calculada pela Equação 88, foi de 5,33%, ou seja, o sistema ultrassônico mostrou uma excelente relação comparativa com o modelo numérico 1D.

Figura 68 - Perfil de *roll waves* aferido pelo sistema fotométrico (linha de cor vermelha) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 375 rotações por minuto. (a) *Roll waves* – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) *Roll wave* – 1 onda em 0,65 segundos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 35 apresenta a caracterização quantitativa deste ensaio após a aferição do sistema fotométrico e os resultados do modelo numérico 1D.

Tabela 35 - Perfil de Caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R375 – Comparativo sistema fotométrico e modelo numérico 1D.

	Sistema Fotométrico (mm)	Modelo Numérico 1D (mm)
Lâmina Baixa (h_1)	4,53	4,64
Amplitude (Δh)	3,93	3,09

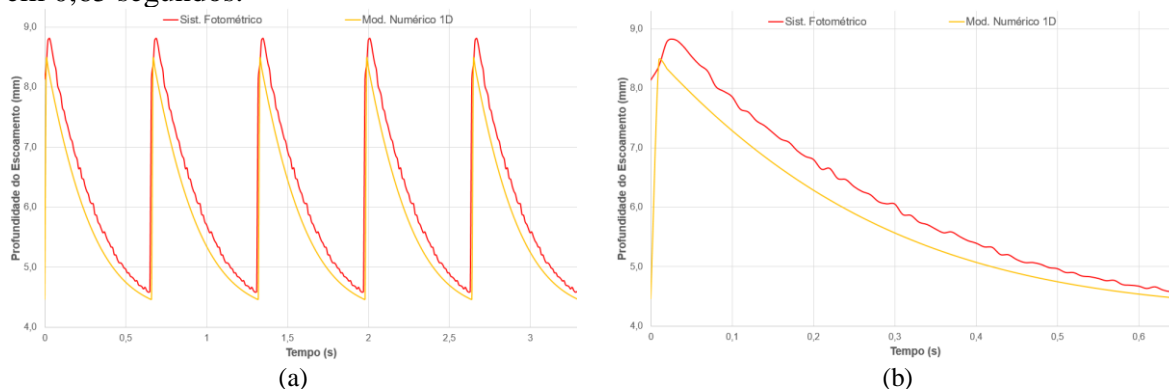
Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.4.5 Ensaio C2G5R425

Neste ensaio, a vazão estabelecida em função da inclinação do canal de ensaios e rotação da bomba hidráulica foi de 0,00041 metros cúbicos por segundo, com velocidade de superfície de 0,29 metros por segundo e lâmina de escoamento (sem perturbação) com 6,25 milímetros. A partir destas condições, o sistema de perturbação introduziu um pulso na superfície livre do escoamento na frequência de 1,50 hertz.

A Figura 69 apresenta a relação comparativa entre o sistema fotométrico e o modelo numérico 1D. A Figura 69 (a) apresenta uma sequência de 5 ondas e a Figura 69 (b) apresenta uma vista em detalhamento de somente uma onda. A diferença percentual calculada pela Equação 88, foi de 6,18%, ou seja, o sistema ultrassônico mostrou uma excelente relação comparativa com o modelo numérico 1D.

Figura 69 - Perfil de *roll waves* aferido pelo sistema fotométrico (linha de cor vermelha) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 425 rotações por minuto. (a) *Roll waves* – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) *Roll wave* – 1 onda em 0,65 segundos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 36 apresenta a caracterização quantitativa deste ensaio após a aferição do sistema fotométrico e os resultados do modelo numérico 1D.

Tabela 36 - Perfil de Caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R425 – Comparativo sistema fotométrico e modelo numérico 1D.

	Sistema Fotométrico (mm)	Modelo Numérico 1D (mm)
Lâmina Baixa (h_1)	4,58	4,46
Amplitude (Δh)	4,23	4,01

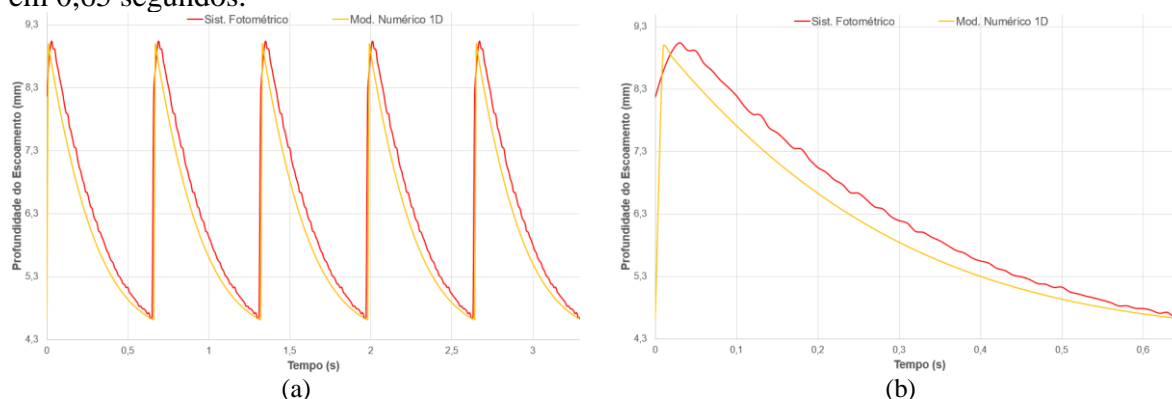
Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.4.6 Ensaio C2G5R475

Neste ensaio, a vazão estabelecida em função da inclinação do canal de ensaios e rotação da bomba hidráulica foi de 0,00046 metros cúbicos por segundo, com velocidade de superfície de 0,32 metros por segundo e lâmina de escoamento (sem perturbação) com 6,55 milímetros. A partir destas condições, o sistema de perturbação introduziu um pulso na superfície livre do escoamento na frequência de 1,50 hertz.

A Figura 70 apresenta a relação comparativa entre o sistema fotométrico e o modelo numérico 1D. A Figura 70 (a) apresenta uma sequência de 5 ondas e a Figura 70 (b) apresenta uma vista em detalhamento de somente uma onda. A diferença percentual calculada pela Equação 88, foi de 4,81%, ou seja, o sistema ultrassônico mostrou uma excelente relação comparativa com o modelo numérico 1D.

Figura 70 - Perfil de *roll waves* aferido pelo sistema fotométrico (linha de cor vermelha) e apresentado pelo modelo numérico 1D (linha de cor amarela). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 475 rotações por minuto. (a) *Roll waves* – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) *Roll wave* – 1 onda em 0,65 segundos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 37 apresenta a caracterização quantitativa deste ensaio após a aferição dos sistemas fotométrico e ultrassônico.

Tabela 37 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R475 – Comparativo sistema fotométrico e modelo numérico 1D.

	Sistema Fotométrico (mm)	Modelo Numérico 1D (mm)
Lâmina Baixa (h_1)	4,64	4,62
Amplitude (Δh)	4,40	4,37

Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.5 COMPARAÇÃO ENTRE O SISTEMA FOTOMÉTRICO E O SISTEMA ULTRASSÔNICO

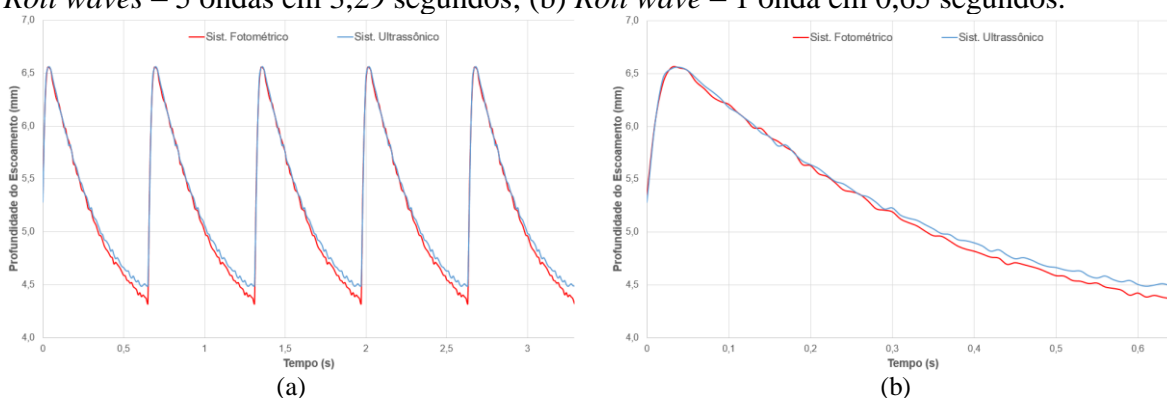
7.5.1 Ensaio C2G5R225

Neste ensaio, a vazão estabelecida em função da inclinação do canal de ensaios e rotação da bomba hidráulica foi de 0,00022 metros cúbicos por segundo, com velocidade de superfície de 0,176 metros por segundo e lâmina de escoamento (sem perturbação) com 5,49 milímetros. A partir destas condições, o sistema de perturbação introduziu um pulso na superfície livre do escoamento na frequência de 1,5 hertz.

A Figura 71 apresenta a relação comparativa entre os sistemas fotométrico e ultrassônico. A Figura 71 (a) apresenta uma sequência de 5 ondas e a Figura 71 (b) apresenta uma vista em detalhamento de somente uma onda. A diferença percentual calculada pela

Equação 89, foi de 0,99%, ou seja, o sistema fotométrico tem uma excelente relação com o sistema ultrassônico.

Figura 71 - Perfil de *roll waves* aferido pelos sistemas fotométrico (linha de cor vermelha) e ultrassônico (linha de cor azul). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 225 rotações por minuto. (a) *Roll waves* – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) *Roll wave* – 1 onda em 0,65 segundos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 38 apresenta a caracterização quantitativa deste ensaio, após a aferição dos sistemas fotométrico e ultrassônico.

Tabela 38 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R225 – Comparativo do sistema fotométrico e ultrassônico.

	Sistema Fotométrico (mm)	Sistema Ultrassônico (mm)
Lâmina Baixa (h_1)	4,32	4,49
Amplitude (Δh)	2,24	2,07

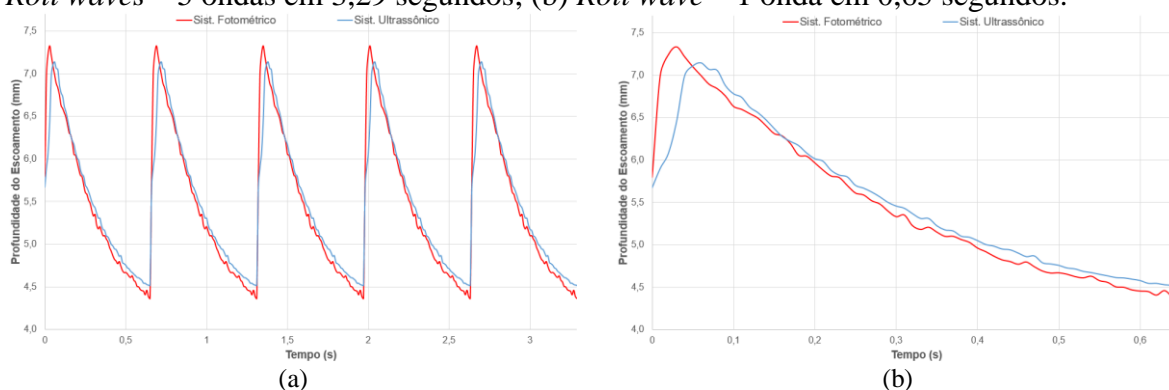
Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.5.2 Ensaio C2G5R275

Neste ensaio, a vazão estabelecida em função da inclinação do canal de ensaios e rotação da bomba hidráulica foi de 0,00027 metros cúbicos por segundo, com velocidade de superfície de 0,206 metros por segundo e lâmina de escoamento (sem perturbação) com 5,66 milímetros. A partir destas condições, o sistema de perturbação introduziu um pulso na superfície livre do escoamento na frequência de 1,50 hertz.

A Figura 72 apresenta a relação comparativa entre os sistemas fotométrico e ultrassônico. A Figura 72 (a) apresenta uma sequência de 5 ondas e a Figura 72 (b) apresenta uma vista em detalhamento de somente uma onda. A diferença percentual calculada pela Equação 89, foi de 0,93%, ou seja, o sistema fotométrico tem uma excelente relação com o sistema ultrassônico.

Figura 72 - Perfil de *roll waves* aferido pelos sistemas fotométrico (linha de cor vermelha) e ultrassônico (linha de cor azul). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 275 rotações por minuto. (a) *Roll waves* – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) *Roll wave* – 1 onda em 0,65 segundos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 39 apresenta a caracterização quantitativa deste ensaio, após a aferição dos sistemas fotométrico e ultrassônico.

Tabela 39 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R275 – Comparativo do sistema fotométrico e ultrassônico.

	Sistema Fotométrico (mm)	Sistema Ultrassônico (mm)
Lâmina Baixa (h_1)	4,36	4,52
Amplitude (Δh)	2,97	2,62

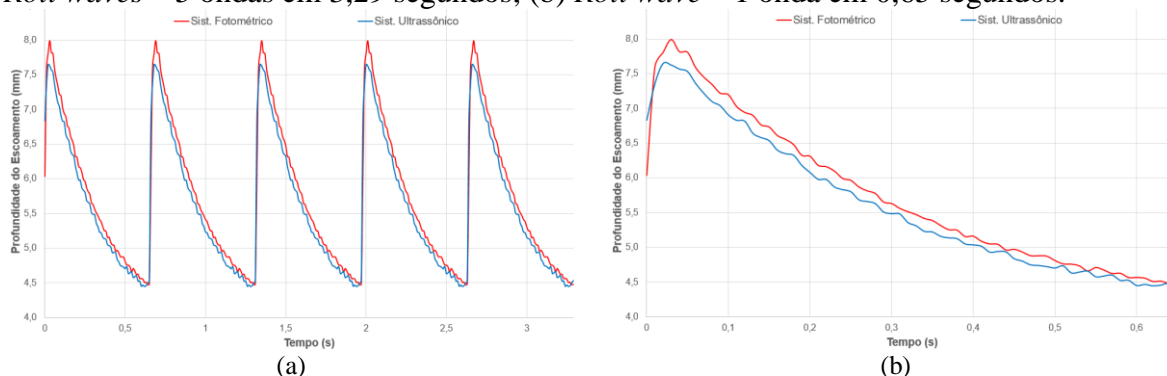
Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.5.3 Ensaio C2G5R325

Neste ensaio, a vazão estabelecida em função da inclinação do canal de ensaios e rotação da bomba hidráulica foi de 0,00032 metros cúbicos por segundo, com velocidade de superfície de 0,23 metros por segundo e lâmina de escoamento (sem perturbação) com 5,75 milímetros. A partir destas condições, o sistema de perturbação introduziu um pulso na superfície livre do escoamento na frequência de 1,50 hertz.

A Figura 73 apresenta a relação comparativa entre os sistemas fotométrico e ultrassônico. A Figura 73 (a) apresenta uma sequência de 5 ondas e a Figura 73 (b) apresenta uma vista em detalhamento de somente uma onda. A diferença percentual calculada pela Equação 89, foi de 2,13%, ou seja, o sistema fotométrico tem uma excelente relação com o sistema ultrassônico.

Figura 73 - Perfil de *roll waves* aferido pelos sistemas fotométrico (linha de cor vermelha) e ultrassônico (linha de cor azul). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 325 rotações por minuto. (a) *Roll waves* – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) *Roll wave* – 1 onda em 0,65 segundos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 40 apresenta a caracterização quantitativa deste ensaio, após a aferição dos sistemas fotométrico e ultrassônico.

Tabela 40 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R325 – Comparativo do sistema fotométrico e ultrassônico.

	Sistema Fotométrico (mm)	Sistema Ultrassônico (mm)
Lâmina Baixa (h_1)	4,48	4,45
Amplitude (Δh)	3,51	3,20

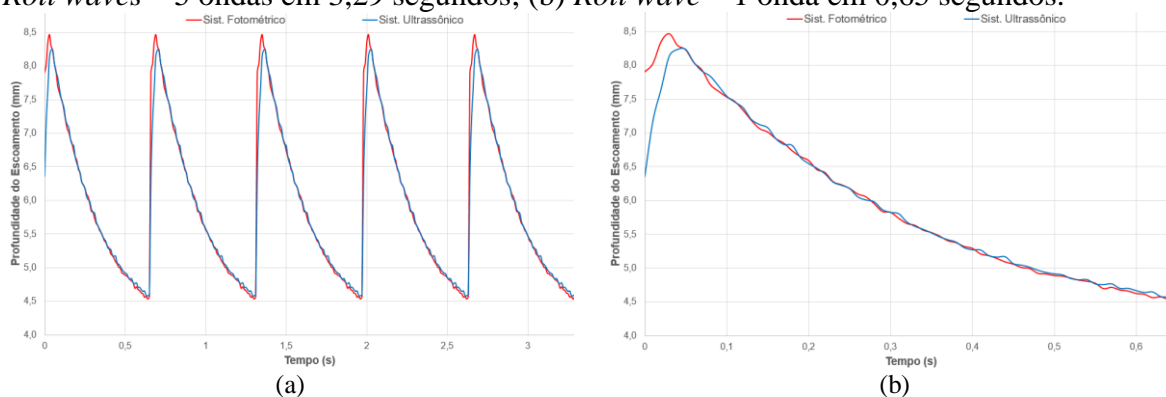
Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.5.4 Ensaio C2G5R375

Neste ensaio, a vazão estabelecida em função da inclinação do canal de ensaios e rotação da bomba hidráulica foi de 0,00036 metros cúbicos por segundo, com velocidade de superfície de 0,26 metros por segundo e lâmina de escoamento (sem perturbação) com 6,06 milímetros. A partir destas condições, o sistema de perturbação introduziu um pulso na superfície livre do escoamento na frequência de 1,50 hertz.

A Figura 74 apresenta a relação comparativa entre os sistemas fotométrico e ultrassônico. A Figura 74 (a) apresenta uma sequência de 5 ondas e a Figura 74 (b) apresenta uma vista em detalhamento de somente uma onda. A diferença percentual calculada pela Equação 89, foi de 0,25%, ou seja, o sistema fotométrico tem uma excelente relação com o sistema ultrassônico.

Figura 74 - Perfil de *roll waves* aferido pelos sistemas fotométrico (linha de cor vermelha) e ultrassônico (linha de cor azul). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 375 rotações por minuto. (a) *Roll waves* – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) *Roll wave* – 1 onda em 0,65 segundos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 41 apresenta a caracterização quantitativa deste ensaio, após a aferição dos sistemas fotométrico e ultrassônico.

Tabela 41 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R375 – Comparativo do sistema fotométrico e ultrassônico.

	Sistema Fotométrico (mm)	Sistema Ultrassônico (mm)
Lâmina Baixa (h_1)	4,53	4,58
Amplitude (Δh)	3,93	3,66

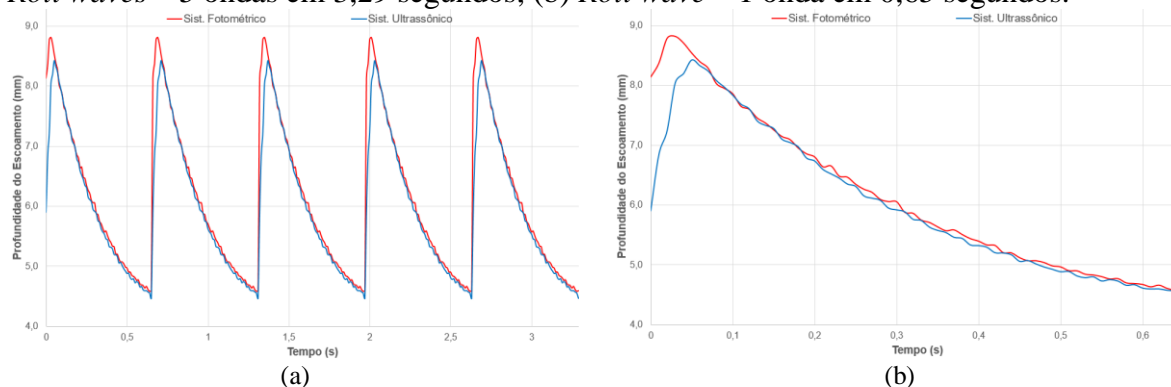
Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.5.5 Ensaio C2G5R425

Neste ensaio, a vazão estabelecida em função da inclinação do canal de ensaios e rotação da bomba hidráulica foi de 0,00041 metros cúbicos por segundo, com velocidade de superfície de 0,29 metros por segundo e lâmina de escoamento (sem perturbação) com 6,25 milímetros. A partir destas condições, o sistema de perturbação introduziu um pulso na superfície livre do escoamento na frequência de 1,50 hertz.

A Figura 75 apresenta a relação comparativa entre os sistemas fotométrico e ultrassônico. A Figura 75 (a) apresenta uma sequência de 5 ondas e a Figura 75 (b) apresenta uma vista em detalhamento de somente uma onda. A diferença percentual calculada pela Equação 89, foi de 2,12%, ou seja, o sistema fotométrico tem uma excelente relação com o sistema ultrassônico.

Figura 75 - Perfil de *roll waves* aferido pelos sistemas fotométrico (linha de cor vermelha) e ultrassônico (linha de cor azul). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 425 rotações por minuto. (a) *Roll waves* – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) *Roll wave* – 1 onda em 0,65 segundos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 42 apresenta a caracterização quantitativa deste ensaio, após a aferição dos sistemas fotométrico e ultrassônico.

Tabela 42 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R425 – Comparativo do sistema fotométrico e ultrassônico.

	Sistema Ultrassônico (mm)	Modelo Numérico 1D (mm)
Lâmina Baixa (h_1)	4,58	4,47
Amplitude (Δh)	4,23	3,95

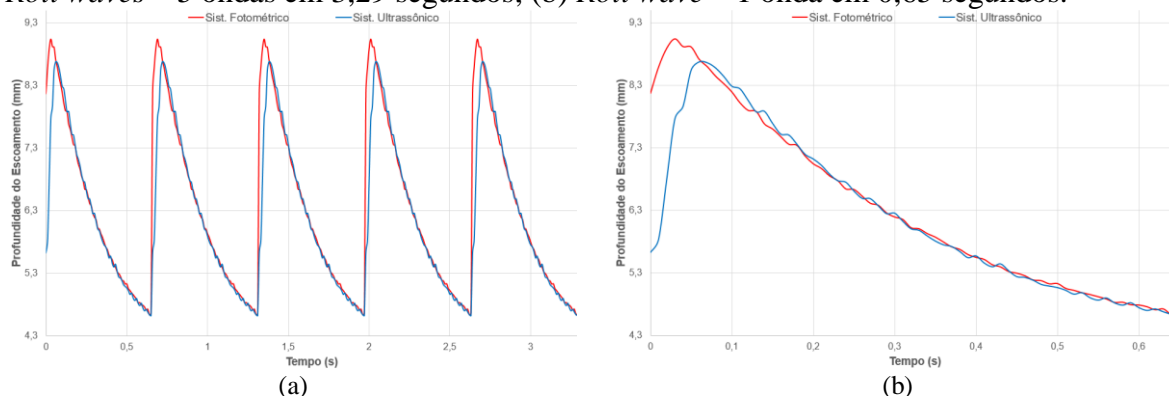
Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.5.6 Ensaio C2G5R475

Neste ensaio, a vazão estabelecida em função da inclinação do canal de ensaios e rotação da bomba hidráulica foi de 0,00046 metros cúbicos por segundo, com velocidade de superfície de 0,32 metros por segundo e uma lâmina de escoamento (sem perturbação) com 6,55 milímetros. A partir destas condições, o sistema de perturbação introduziu um pulso na superfície livre do escoamento na frequência de 1,50 hertz.

A Figura 76 apresenta a relação comparativa entre os sistemas fotométrico e ultrassônico. A Figura 76 (a) apresenta uma sequência de 5 ondas e a Figura 76 (b) apresenta uma vista em detalhamento de somente uma onda. A diferença percentual calculada pela Equação 89, foi de 1,75%, ou seja, o sistema fotométrico tem uma excelente relação com o sistema ultrassônico.

Figura 76 - Perfil de *roll waves* aferido pelos sistemas fotométrico (linha de cor vermelha) e ultrassônico (linha de cor azul). Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 475 rotações por minuto. (a) *Roll waves* – 5 ondas em 3,29 segundos; (b) *Roll wave* – 1 onda em 0,65 segundos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 43 apresenta a caracterização quantitativa deste ensaio, após a aferição dos sistemas fotométrico e ultrassônico.

Tabela 43 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R475 – Comparativo do sistema fotométrico e ultrassônico.

	Sistema Fotométrico (mm)	Sistema Ultrassônico (mm)
Lâmina Baixa (h_1)	4,64	4,62
Amplitude (Δh)	4,40	4,06

Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.6 DETALHAMENTO COMPARATIVO DO PERFIL DA *ROLL WAVE* NO DOMÍNIO DO ESPAÇO, AFERIDO PELO SISTEMA DE MEDIÇÃO FOTOMÉTRICO E ULTRASSÔNICO.

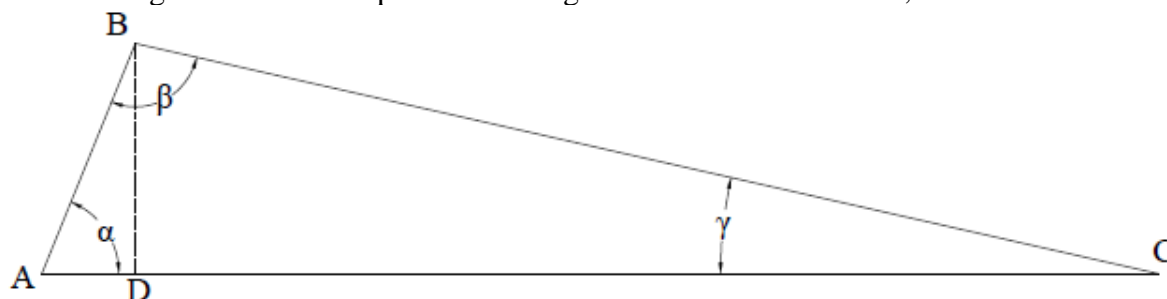
Após a apresentação dos resultados no domínio do tempo, teve-se interesse em apresentar as *roll waves* no domínio do espaço, no qual o eixo abscissa representa agora o tamanho da onda no perfil horizontal em milímetros, podendo assim observar principalmente, os ângulos (α , β , γ) formados ao longo do corpo da onda. A mudança do domínio do tempo para o domínio do espaço foi feita por meio da inserção dos dados aferidos pelos sistemas de medição em um programa de modelagem matemática no *software* Matlab, com base na Equação 11 (equação da celeridade da onda) na Equação 90.

$$L_x = U\bar{u}_0 t \quad (90)$$

onde: L_x : transformada do domínio do tempo para o espaço.

Para apresentar esta caracterização, fez-se necessário a construção da Figura 77, esta é uma figura genérica e sem escala, representativa de uma onda (*roll wave*), assim, os valores característicos de cada ensaio em cada sistema de medição (fotométrico e ultrassônico), são apresentados na Tabela 44.

Figura 77 - Perfil representativo e genérico de uma *roll wave*, sem escala.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 77 é formada por três segmentos de retas, sendo eles os segmentos AB, BC e AC, onde o segmento AC, é dividido nos segmentos AD e CD. Na Figura 70 também está apresentado um segmento tracejado (BD), este é a projeção ortogonal no segmento de reta AC, representando a altura da *roll wave* em milímetros. Os ângulos α , β e γ são formados respectivamente pelos segmentos de retas AD e AB, AB e BC, BC e CD.

Tabela 44 - Caracterização do perfil das *roll waves* no espaço – Apresentação dos segmentos de retas em milímetros e ângulos em graus decimais – Comparativo do sistema fotométrico e ultrassônico.

	Ensaio	Segmento de Reta (milímetros)						Ângulo em Graus (decimal)		
		AB	BC	AC	AD	CD	BD	α	β	γ
Sistema Fotométrico	C2G5R225	14,18	229,01	243	14	229	2,24	9,09	170,35	0,56
	C2G5R275	17,26	252,02	269	17	252	2,97	9,91	169,42	0,68
	C2G5R325	18,34	290,02	308	18	290	3,51	11,03	168,28	0,69
	C2G5R375	19,40	302,03	321	19	302	3,90	11,61	167,65	0,74
	C2G5R425	21,43	322,03	343	21	322	4,29	11,54	167,70	0,76
	C2G5R475	21,45	338,03	359	21	338	4,39	11,80	167,46	0,74
Sistema Ultrassônico	C2G5R225	20,11	241,01	261	20	241	2,07	5,91	173,60	0,49
	C2G5R275	30,11	253,01	283	30	253	2,62	5	174,41	0,59
	C2G5R325	14,34	294,02	308	14	294	3,10	12,50	166,89	0,61
	C2G5R375	29,23	292,02	321	29	292	3,64	7,15	172,13	0,71
	C2G5R425	31,25	312,03	343	31	312	3,95	7,27	172,01	0,73
	C2G5R475	38,22	321,03	359	38	321	4,06	6,10	173,18	0,72

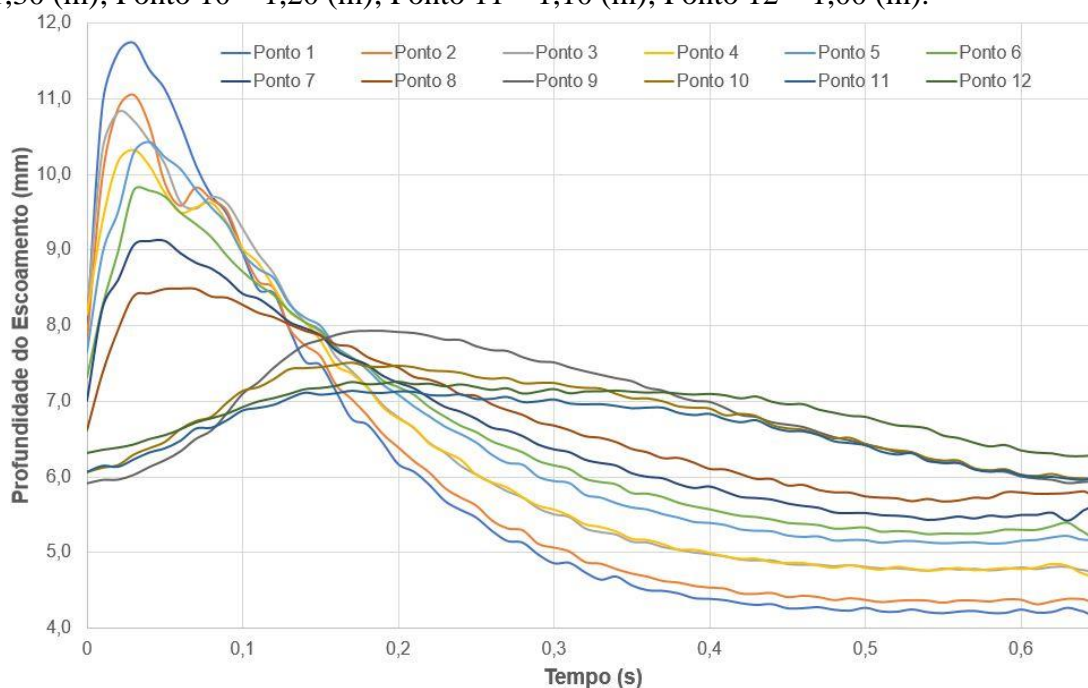
Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.7 CARACTERIZAÇÃO DE *ROLL WAVES* EM DIVERSOS PONTOS DE MEDIÇÃO - SISTEMA ULTRASSÔNICO

A primeira campanha de ensaios teve por principal característica a aferição de *roll waves* em diversos pontos do canal, podendo assim, observar o surgimento, evolução e estabilização das ondas a partir de ponto de perturbação ao longo do canal de ensaios.

A Figura 78 apresenta o ensaio C1G14R400, primeiro ensaio da primeira campanha de medição experimental, onde aferiu-se amplitude máxima de 7,55 milímetros e amplitude mínima de 0,97 milímetros.

Figura 78 - Perfil de *roll waves* aferido pelo sistema ultrassônico. Caracterização feita na primeira campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 14 graus e a bomba hidráulica a 400 rotações por minuto. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m); Ponto 2 – 2,00 (m); Ponto 3 – 1,90 (m); Ponto 4 – 1,80 (m); Ponto 5 – 1,70 (m); Ponto 6 – 1,60 (m); Ponto 7 – 1,50 (m); Ponto 8 – 1,40 (m); Ponto 9 – 1,30 (m); Ponto 10 – 1,20 (m); Ponto 11 – 1,10 (m); Ponto 12 – 1,00 (m).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 45 apresenta os valores característicos do perfil das *roll waves* medidas no canal de ensaios (C1G14R400), e mostrados na Figura 78.

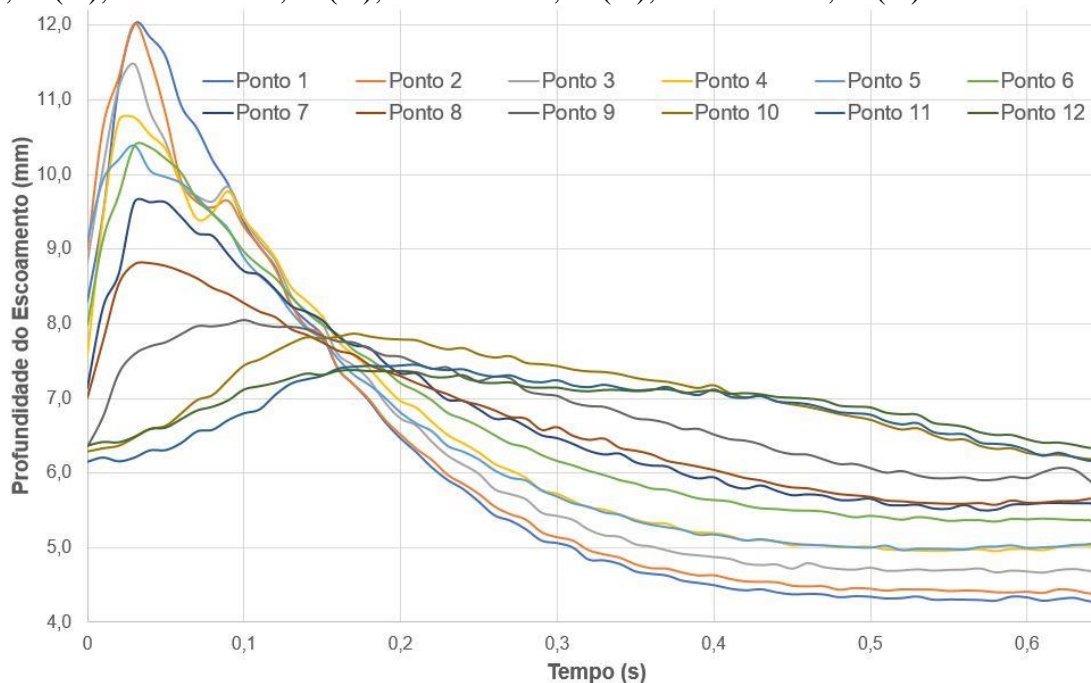
Tabela 45 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R475 – Comparativo de valores de lâmina baixa e amplitude em milímetros. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m); Ponto 2 – 2,00 (m); Ponto 3 – 1,90 (m); Ponto 4 – 1,80 (m); Ponto 5 – 1,70 (m); Ponto 6 – 1,60 (m); Ponto 7 – 1,50 (m); Ponto 8 – 1,40 (m); Ponto 9 – 1,30 (m); Ponto 10 – 1,20 (m); Ponto 11 – 1,10 (m); Ponto 12 – 1,00 (m).

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Lâmina Baixa (h_1) (mm)	4,20	4,31	4,75	4,72	5,11	5,24	5,43	5,68	5,92	5,98	5,97	6,28
Amplitude (Δh) (mm)	7,55	6,73	6,06	5,60	5,32	4,54	3,70	2,81	2,01	1,52	1,16	0,97

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 79 apresenta o ensaio C1G14R420, segundo ensaio da primeira campanha de medição experimental, onde aferiu-se amplitude máxima de 7,72 milímetros e amplitude mínima de 1,04 milímetros.

Figura 79 - Perfil de *roll waves* aferido pelo sistema ultrassônico. Caracterização feita na primeira campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 14 graus e a bomba hidráulica a 420 rotações por minuto. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m); Ponto 2 – 2,00 (m); Ponto 3 – 1,90 (m); Ponto 4 – 1,80 (m); Ponto 5 – 1,70 (m); Ponto 6 – 1,60 (m); Ponto 7 – 1,50 (m); Ponto 8 – 1,40 (m); Ponto 9 – 1,30 (m); Ponto 10 – 1,20 (m); Ponto 11 – 1,10 (m); Ponto 12 – 1,00 (m).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 46 apresenta os valores característicos do perfil das *roll waves* medidas no canal de ensaios (C1G14R420), mostradas na Figura 79.

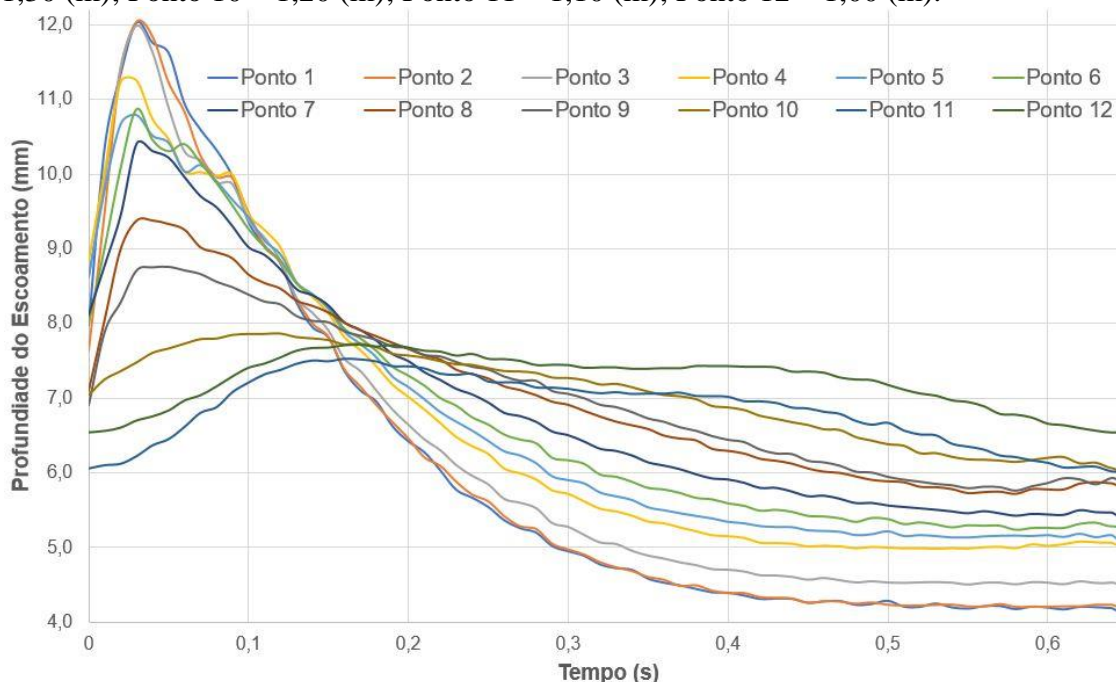
Tabela 46 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C1G14R420 – Comparativo de valores de lâmina baixa e amplitude em milímetros. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m); Ponto 2 – 2,00 (m); Ponto 3 – 1,90 (m); Ponto 4 – 1,80 (m); Ponto 5 – 1,70 (m); Ponto 6 – 1,60 (m); Ponto 7 – 1,50 (m); Ponto 8 – 1,40 (m); Ponto 9 – 1,30 (m); Ponto 10 – 1,20 (m); Ponto 11 – 1,10 (m); Ponto 12 – 1,00 (m).

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Lâmina Baixa (h_1) (mm)	4,28	4,40	4,66	4,95	4,96	5,34	5,50	5,57	5,73	6,20	6,14	6,33
Amplitude (Δh) (mm)	7,72	7,63	6,81	5,82	5,42	5,04	4,13	3,24	2,33	1,67	1,30	1,04

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 80 apresenta o ensaio C1G14R440, segundo ensaio da primeira campanha de medição experimental, onde aferiu-se amplitude máxima de 7,86 milímetros e amplitude mínima de 1,18 milímetros.

Figura 80 - Perfil de *roll waves* aferido pelo sistema ultrassônico. Caracterização feita na primeira campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 14 graus e a bomba hidráulica a 440 rotações por minuto. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m); Ponto 2 – 2,00 (m); Ponto 3 – 1,90 (m); Ponto 4 – 1,80 (m); Ponto 5 – 1,70 (m); Ponto 6 – 1,60 (m); Ponto 7 – 1,50 (m); Ponto 8 – 1,40 (m); Ponto 9 – 1,30 (m); Ponto 10 – 1,20 (m); Ponto 11 – 1,10 (m); Ponto 12 – 1,00 (m).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 47 apresenta os valores característicos do perfil das *roll waves* medidas no canal de ensaios (C1G14R440), mostradas na Figura 80.

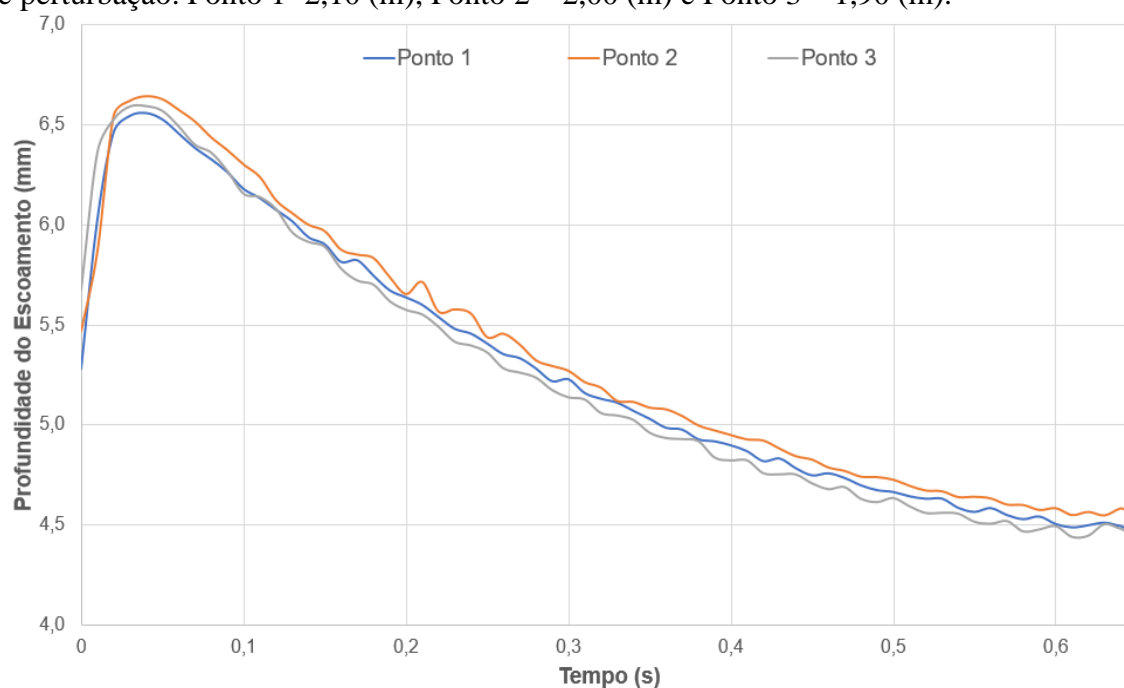
Tabela 47 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C1G14R420 – Comparativo de valores de lâmina baixa e amplitude em milímetros. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m); Ponto 2 – 2,00 (m); Ponto 3 – 1,90 (m); Ponto 4 – 1,80 (m); Ponto 5 – 1,70 (m); Ponto 6 – 1,60 (m); Ponto 7 – 1,50 (m); Ponto 8 – 1,40 (m); Ponto 9 – 1,30 (m); Ponto 10 – 1,20 (m); Ponto 11 – 1,10 (m); Ponto 12 – 1,00 (m).

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Lâmina Baixa (h_1) (mm)	4,17	4,20	4,50	4,97	5,11	5,23	5,42	5,71	5,76	6,06	6,02	6,54
Amplitude (Δh) (mm)	7,86	7,83	7,48	6,27	5,68	5,64	4,97	3,67	2,99	1,80	1,51	1,18

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 81 apresenta o ensaio C2G5R225, primeiro ensaio da segunda campanha de medição experimental, onde aferiu-se amplitude máxima de 2,15 milímetros e amplitude mínima de 2,07 milímetros.

Figura 81 - Perfil de *roll wave*, aferido pelo sistema ultrassônico. Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 225 rotações por minuto. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m), Ponto 2 – 2,00 (m) e Ponto 3 – 1,90 (m).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 48 apresenta os valores característicos do perfil das *roll waves* medidas no canal de ensaios (C2G5R225), mostradas na Figura 81.

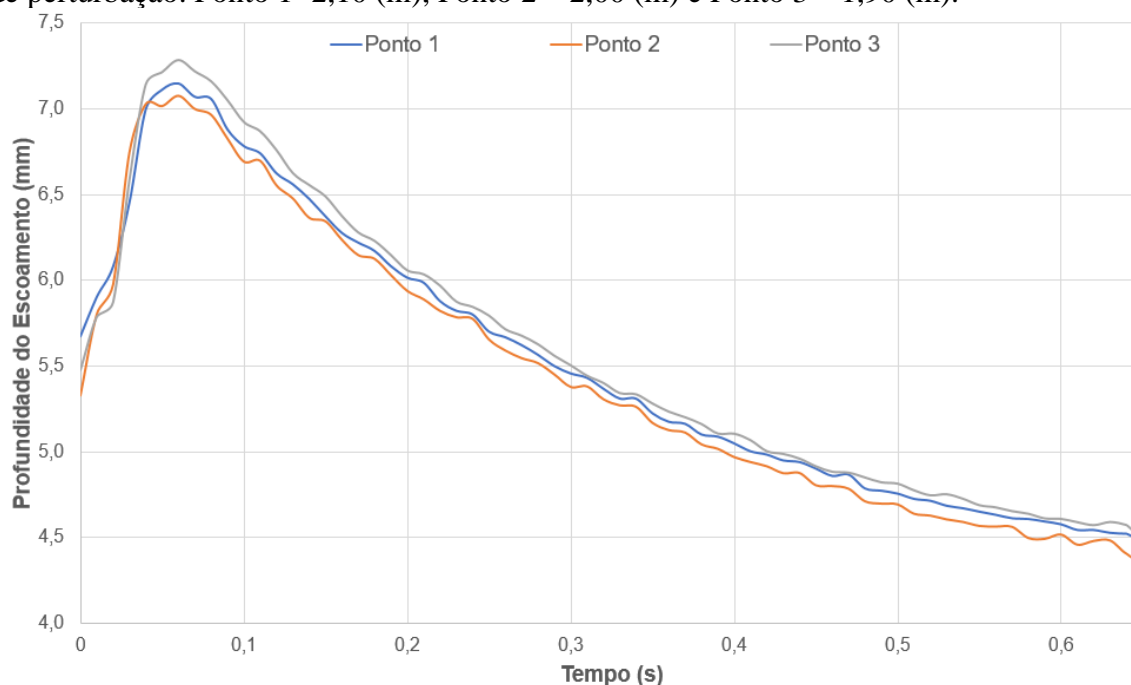
Tabela 48 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R225 – Comparativo de valores de lâmina baixa e amplitude em milímetros. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m), Ponto 2 – 2,00 (m) e Ponto 3 – 1,90 (m).

	P1	P2	P3
Lâmina Baixa (h_1) (mm)	4,49	4,55	4,44
Amplitude (Δh) (mm)	2,07	2,09	2,15

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 82 apresenta o ensaio C2G5R275, segundo ensaio da segunda campanha de medição experimental, onde aferiu-se amplitude máxima de 2,75 milímetros e amplitude mínima de 2,62 milímetros.

Figura 82 - Perfil de *roll wave*, aferido pelo sistema ultrassônico. Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 275 rotações por minuto. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m), Ponto 2 – 2,00 (m) e Ponto 3 – 1,90 (m).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 49 apresenta os valores característicos do perfil das *roll waves* medidas no canal de ensaios (C2G5R275), e mostradas na Figura 82.

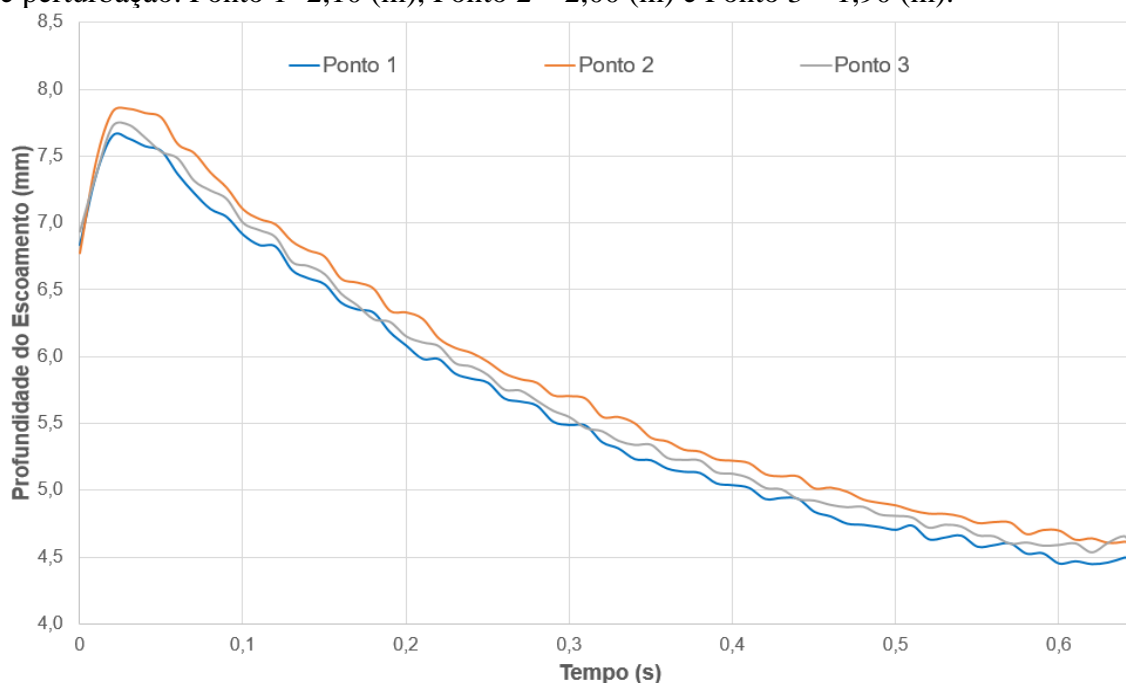
Tabela 49 - Perfil de Caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R275 – Comparativo de valores de lâmina baixa e amplitude em milímetros. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m), Ponto 2 – 2,00 (m) e Ponto 3 – 1,90 (m).

	P1	P2	P3
Lâmina Baixa (h_1) (mm)	4,52	4,38	4,54
Amplitude (Δh) (mm)	2,62	2,69	2,75

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 83 apresenta o ensaio C2G5R325, terceiro ensaio da segunda campanha de medição experimental, onde aferiu-se amplitude máxima de 3,25 milímetros e amplitude mínima de 3,19 milímetros.

Figura 83 - Perfil de *roll waves* aferido pelo sistema ultrassônico. Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 325 rotações por minuto. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m), Ponto 2 – 2,00 (m) e Ponto 3 – 1,90 (m).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 50 apresenta os valores característicos do perfil das *roll waves* medidas no canal de ensaios (C2G5R325), e mostradas na Figura 83.

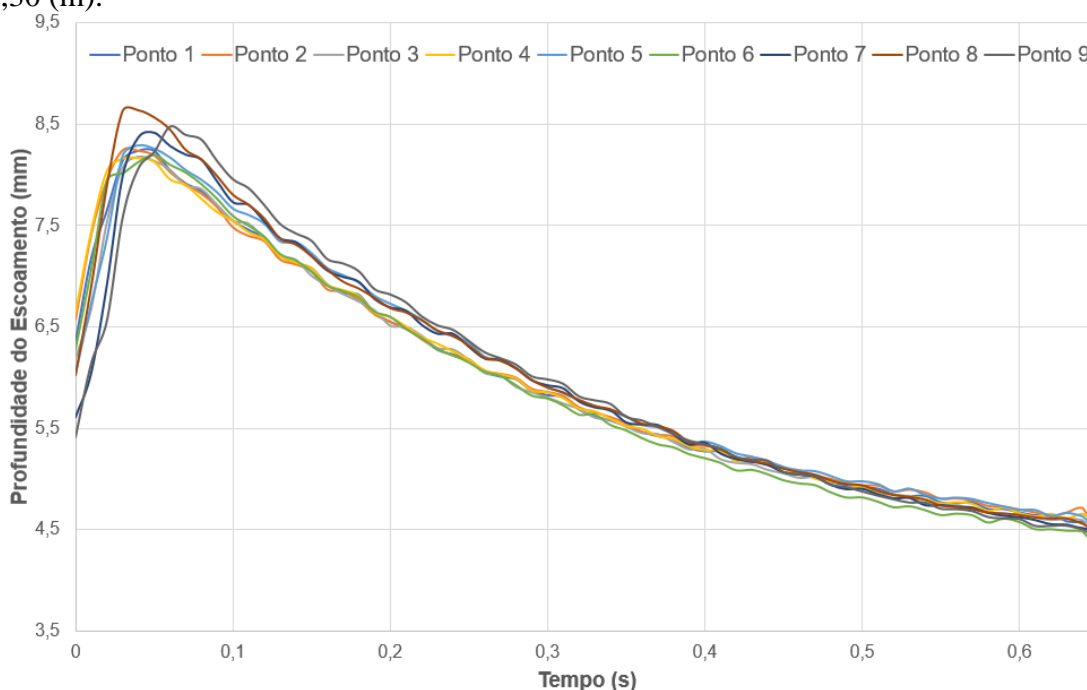
Tabela 50 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R325 – Comparativo de valores de lâmina baixa e amplitude em milímetros. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m), Ponto 2 – 2,00 (m) e Ponto 3 – 1,90 (m).

	P1	P2	P3
Lâmina Baixa (h_1) (mm)	4,45	4,60	4,54
Amplitude (Δh) (mm)	3,20	3,25	3,19

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 84 apresenta o ensaio C2G5R375, quarto ensaio da segunda campanha de medição experimental, onde aferiu-se amplitude máxima de 4,10 milímetros e amplitude mínima de 3,55 milímetros.

Figura 84 - Perfil de *roll wave* aferido pelo sistema ultrassônico. Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 375 rotações por minuto. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m); Ponto 2 – 2,00 (m); Ponto 3 – 1,90 (m); Ponto 4 – 1,80 (m); Ponto 5 – 1,70 (m); Ponto 6 – 1,60 (m); Ponto 7 – 1,50 (m); Ponto 8 – 1,40 (m); Ponto 9 – 1,30 (m).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 51 apresenta os valores característicos do perfil das *roll waves* medidas no canal de ensaios (C2G5R375), mostradas na Figura 84.

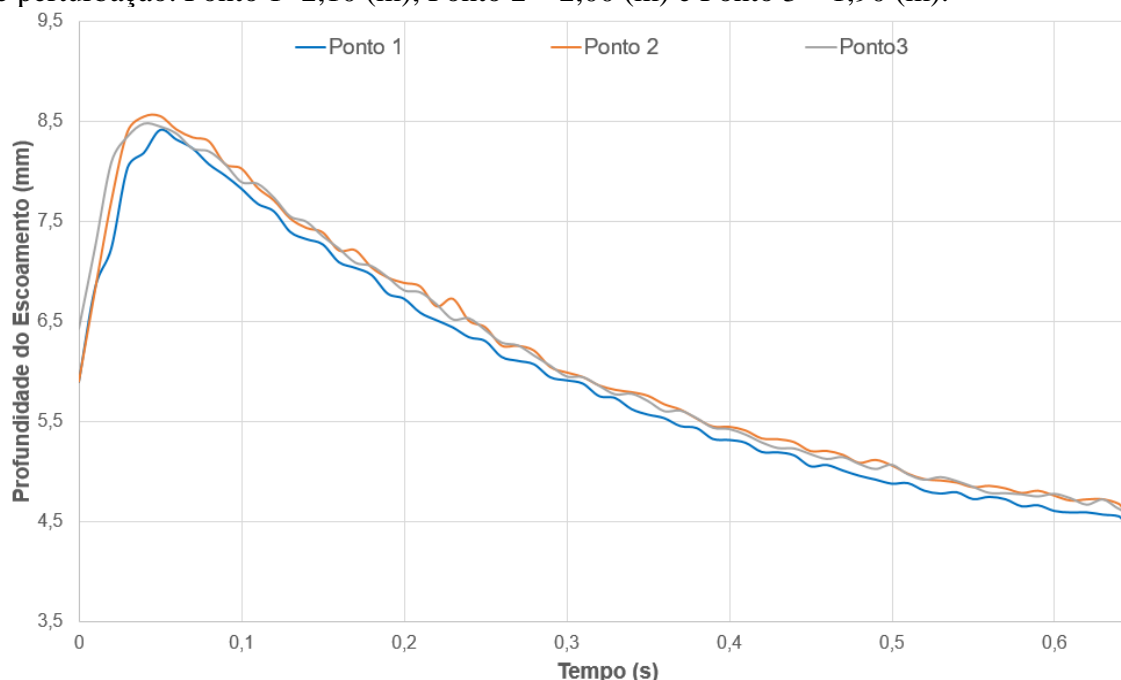
Tabela 51 - Perfil de Caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R375 – Comparativo de valores de lâmina baixa e amplitude em milímetros. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m); Ponto 2 – 2,00 (m); Ponto 3 – 1,90 (m); Ponto 4 – 1,80 (m); Ponto 5 – 1,70 (m); Ponto 6 – 1,60 (m); Ponto 7 – 1,50 (m); Ponto 8 – 1,40 (m); Ponto 9 – 1,30 (m).

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Lâmina Baixa (h_1) (mm)	4,58	4,58	4,55	4,61	4,58	4,40	4,52	4,53	4,47
Amplitude (Δh) (mm)	3,66	3,66	3,63	3,55	3,72	3,80	3,90	4,10	4,01

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 85 apresenta o ensaio C2G5R425, quinto ensaio da segunda campanha de medição experimental, onde aferiu-se amplitude máxima de 3,99 milímetros e amplitude mínima de 3,89 milímetros.

Figura 85 - Perfil de *roll waves* aferido pelo sistema ultrassônico. Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 425 rotações por minuto. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m), Ponto 2 – 2,00 (m) e Ponto 3 – 1,90 (m).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 52 apresenta os valores característicos do perfil das *roll waves* medidas no canal de ensaios (C2G5R425), mostradas na Figura 85.

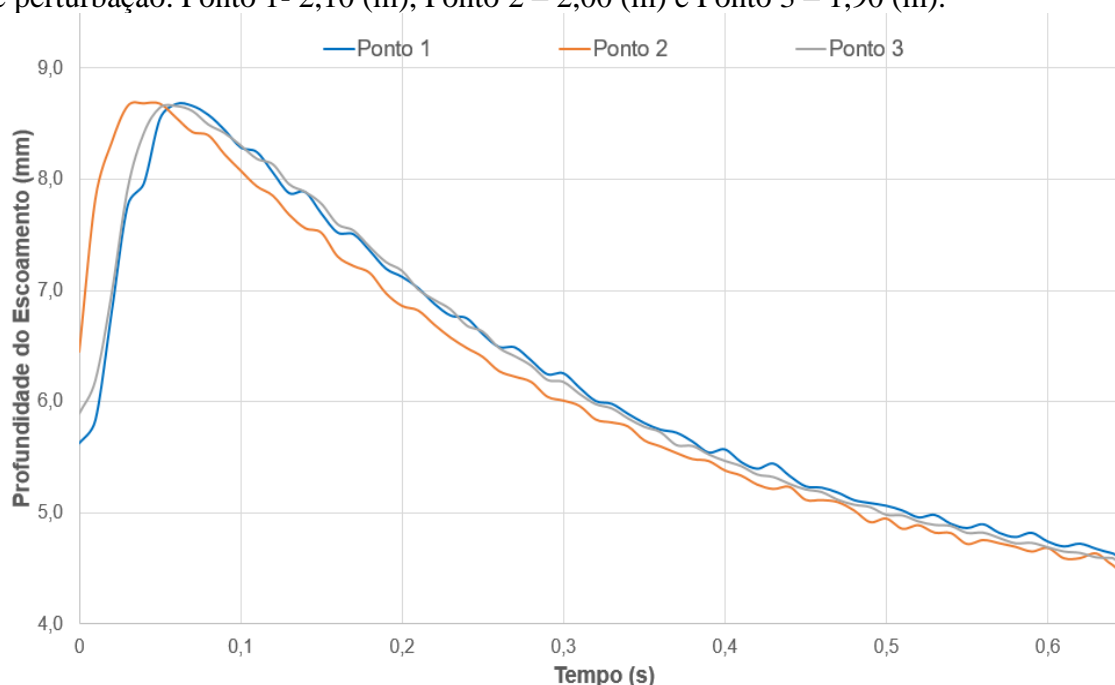
Tabela 52 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R425 – Comparativo de valores de lâmina baixa e amplitude em milímetros. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m), Ponto 2 – 2,00 (m) e Ponto 3 – 1,90 (m).

	P1	P2	P3
Lâmina Baixa (h_1) (mm)	4,47	4,56	4,59
Amplitude (Δh) (mm)	3,95	3,99	3,89

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 86 apresenta o ensaio C2G5R475, sexto ensaio da segunda campanha de medição experimental, onde aferiu-se amplitude máxima de 4,19 milímetros e amplitude mínima de 4,06 milímetros.

Figura 86 - Perfil de *roll waves* aferido pelo sistema ultrassônico. Caracterização feita na segunda campanha de medição, onde o canal de ensaio encontrava-se a 5 graus e a bomba hidráulica a 475 rotações por minuto. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m), Ponto 2 – 2,00 (m) e Ponto 3 – 1,90 (m).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 53 apresenta os valores característicos do perfil das *roll waves* medidas no canal de ensaios (C2G5R475), mostradas na Figura 86.

Tabela 53 - Perfil de caracterização quantitativa das *roll waves* do ensaio C2G5R475 – Comparativo de valores de lâmina baixa e amplitude em milímetros. Distância do ponto de medição em relação ao sistema de perturbação: Ponto 1- 2,10 (m), Ponto 2 – 2,00 (m) e Ponto 3 – 1,90 (m).

	P1	P2	P3
Lâmina Baixa (h_1) (mm)	4,62	4,49	4,57
Amplitude (Δh) (mm)	4,06	4,19	4,09

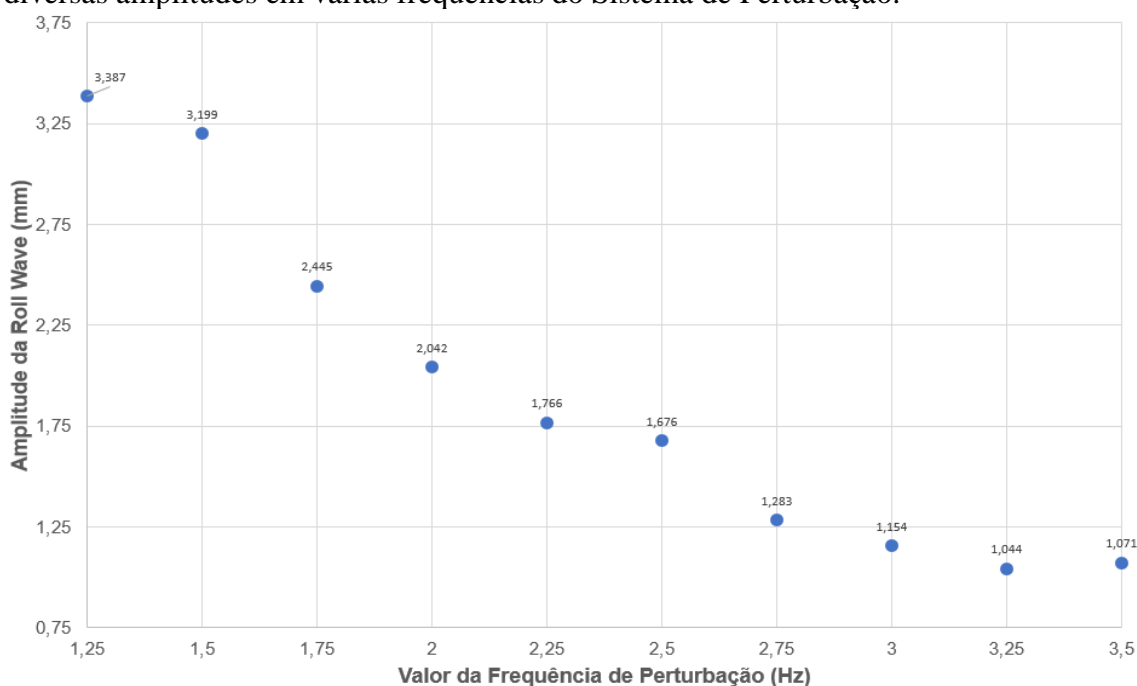
Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.8 CARACTERIZAÇÃO DA *ROLL WAVE* EM RELAÇÃO A FREQUÊNCIA DE CORTE - SISTEMA DE MEDIÇÃO ULTRASSÔNICO

A caracterização da frequência de corte da *roll wave* ocorreu com a fixação da configuração do canal em 5 graus de inclinação e rotação da bomba hidráulica em 325 rotações por minutos, e assim, obtiveram-se vazão de 0,00032 metros cúbicos por segundo, velocidade de superfície de 0,23 metros por segundo e uma lâmina de escoamento (sem perturbação) com 5,75 milímetros. Esta caracterização foi realizada pelo sistema de medição ultrassônico no ponto de medição P1, que dista 2,10 metros do ponto de perturbação.

A Figura 87 mostra a caracterização da amplitude da *roll wave* em milímetros em relação a frequência de perturbação em hertz.

Figura 87 - Amplitude de Roll Waves aferido pelo Sistemas Ultrassônico caracterizando diversas amplitudes em várias frequências do Sistema de Perturbação.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

8 DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS DA TESE

Conforme apresentado no início desta tese, este trabalho de doutorado pretendeu contribuir com o preenchimento de lacuna existente na literatura de dados experimentais de *roll waves*, mais propriamente evoluindo em fluidos não-Newtonianos. Para isto, todo trabalho foi desenvolvido em busca de conceber, construir e implementar um aparato experimental completo, de baixo custo e elevada performance, no qual fosse possível gerar, estabilizar e aferir *roll waves* em diversas condições controladas de laboratório.

Tal como apresentado no Capítulo 5, este trabalho implementou um aparato experimental que é constituído por diversos sistemas ou módulos, onde cada um desempenha uma função sistematicamente determinada.

Assim posto, são arrolados na sequência as principais conclusões/recomendações dessa tese, a saber:

8.1 SISTEMA DE MANEJO DO FLUIDO TESTE E SUA CARACTERIZAÇÃO REOMÉTRICA

Apresentado na seção 5.1.4, o sistema de sucção e recalque, pilotado por uma bomba hidráulica de cavidade progressiva (rotativa de deslocamento positivo), indicada para fluidos viscosos, mostrou-se adequado, sobretudo por gerar baixos níveis de ruído, o que concorreu ao sucesso das campanhas experimentais.

É importante registrar a evolução ocorrida durante as diversas campanhas experimentais, como alterações nas mangueiras de ligação, qual seja, passou-se a utilizar mangueiras soltas, somente apoiadas, e não travadas, e com maiores comprimentos, o que fez diminuir significativamente vibrações remanescentes advindas do sistema como um todo. Estas vibrações, ainda que pouco perceptíveis no escoamento perturbado, alteravam as medições de lâmina do escoamento uniforme. Outra consideração importante vem da necessidade de extinção de bolhas, geradas no momento da queda do fluido no retorno ao reservatório inferior (de armazenagem). A partir de um dispositivo para atenuar o impacto (chicanas), foi possível diminuir significativamente estas bolhas. Tal atenuação trouxe melhoria significativa no dado adquirido, principalmente quando utilizada medição fotoelétrica, já que a presença das bolhas induz pontos de medição errôneos, como consequência da mudança do ângulo do feixe transmitido no volume de medição (corte no sentido vertical).

O fluido teste – gel de carbopol, confeccionado com água deionizada, sob condições controladas de temperatura e recomendações do fabricante, apresentou uma vida útil mais longa que o mesmo gel de carbopol acrescentado de solução (em água deionizada) de azul de metileno, fato que pode ser justificado pela alteração de pH. O gel de carbopol apresentou boa trabalhabilidade e curvas de fluxo bem ajustadas ao modelo reológico de Herschel Bulkely. Uma sala de Reometria equipada deu suporte à caracterização físico-química e reométrica do gel, usado como fluido teste.

8.2 SISTEMA DE PERTURBAÇÃO

O sistema de perturbação, confeccionado a partir de um gerador de sinais, amplificador de áudio e alto falante (seção 5.1.5 da presente tese) possibilitou, com sucesso, gerar pulsos de ar (em diferentes níveis de intensidade e frequência) sobre a superfície livre do escoamento, com subsequente geração de *roll waves*, dentro de domínio explorável de frequências (f_{min} , f_{max}).

No entanto, para isto, o sistema foi sobremaneira requisitado, demandando constante manutenção, sendo um dos principais motivos a falência do capacitor de saída do amplificador de áudio, já que a frequência utilizada na perturbação (normalmente 1,5 hertz) era muito baixa para esta classe de amplificador, mantendo alta corrente na saída e, conseqüentemente, sobrecarregando a fonte interna do amplificador.

8.3 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE EXPERIMENTAL

Conforme apresentado nos Capítulos 5, seções 5.1.6 e 5.1.7 e no Capítulo 6, os sistemas de medição experimental ultrassônico e fotométrico pautaram as grandes discussões no desenvolvimento deste trabalho, principalmente a forma peculiar com que cada um trata a região de maior inclinação da *roll wave* (frente da onda).

Cada sistema desempenhou de forma eficiente a busca do objetivo proposto, cada um com sua metodologia específica, produzindo resultados distintos, quando se observa, por exemplo, o desvio padrão das medidas iniciais da *roll wave* (Figuras 44, 56 e Apêndice B). Estas diferenças são pertinentes a cada sistema de medição, pois o ultrassônico faz suas medições aferindo uma área circular, enquanto que o fotométrico tem aferição pontual (pequeníssima área circular), sendo este aceito como aferição mais precisa. Esta caracterização pôde também ser observada na pequena diferença entre as inclinações das

linhas nos gráficos comparativos entre os dois sistemas, conforme ilustrado pelas figuras do Capítulo 7.

Ainda acerca das particularidades de cada sistema, pode-se concluir que, ao passo que o ultrassônico afere através do pulso retornando da superfície livre do escoamento, o sistema fotométrico afere após o feixe de laser percorrer toda uma parcela do volume do escoamento. Ademais, verifica-se que no fotométrico, sem processamento ou tratamento do sinal, já é possível visualizar várias irregularidades advindas das interferências contidas no volume do escoamento, entre a superfície livre e o fundo do canal.

Uma das principais contribuições deste trabalho é a diferenciação da aplicabilidade dos sistemas de medição utilizados, caracterizando a técnica de pulso-eco do sistema ultrassônico e a técnica de absorbância do sistema fotométrico. O pulso-eco é caracterizado pelo ângulo de retorno do pulso de ultrassom, que retorna ao transdutor após atingir um material mais denso (ar – gel de carbopol). Assim, devido à inclinação da onda e a altura média do escoamento perturbado, é necessário ajustar a altura do transdutor em relação ao material a ser aferido, fazendo com que o pulso de ultrassom, ao retornar, após atingir a superfície inclinada da *roll wave*, possa encontrar novamente o transdutor ultrassônico. Esta adequação foi feita tendo como base as especificações do transdutor pelo fabricante, conforme apresentado no Capítulo 5. Já o sistema fotométrico, necessitou de uma caracterização matemática, conforme apresentado no Capítulo 4 – Desenvolvimento Matemático do Sistema Fotométrico (com informações dos segmentos de retas e ângulos internos das *roll waves*), cujos resultados endossam a aplicação da metodologia desenvolvida. Pôde-se concluir que, se o ângulo de maior inclinação da frente da *roll wave* atingisse 20 graus, a aplicação do sistema fotométrico estaria comprometida, efetuando uma medição errônea naquele ponto.

O sistema fotométrico teve toda sua metodologia arquitetada e implementada no decorrer desta tese, podendo deixar como contribuição a concentração ótima de carbopol e de azul de metileno, condição está atingida por meio do estudo da correlação entre os ensaios no espectrofotômetro e no canal de ensaios; de forma que, após este estudo, apenas uma amostra do fluido teste (acrescido das concentrações do corante) se fez necessária para caracterizar a qualidade da medição. Além disto, a aferição do carbopol pelo espectrofotômetro em vários comprimentos de onda permitiu identificar características pertinentes de cada amostra, com diferentes concentrações de gel de carbopol e azul de metileno, possibilitando criar uma identidade para cada uma e, assim, proporcionar uma elevada taxa de sucesso na repetibilidade dos ensaios de medição de *roll waves* pelo sistema fotométrico.

Ainda concluindo esta abordagem, é importante ressaltar que, mesmo após os diversos resultados satisfatórios dos estudos com o laser vermelho (HeNe – 633 nm), existe ainda a possibilidade de melhorar a eficiência da aplicação desta metodologia, pois, mediante às apresentações das curvas de absorvância em função do comprimento de onda (Figuras 47 e 48), é possível afirmar que a melhor fonte de luz seria da cor laranja (devido ao comprimento de onda de 600 nm), o que trará ainda mais melhorias na aferição das *roll waves* através da técnica de absorvância com o corante azul de metileno.

8.4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO E DE TRATAMENTO DE DADOS

O sistema de aquisição, apresentado na Seção 5.4, desempenhou seu papel como canal de entrada de dados tanto do transdutor (sistema ultrassônico) como do fotodiodo (sistema fotométrico). A placa de aquisição, configurada a partir de um computador, através do supervisor de aquisição de dados, possibilitou tanto a visualização como a aquisição e armazenamento (gravação) no momento dos ensaios, de todos os dados aferidos. O sistema de aquisição, a princípio, recebia toda informação do processo de calibração (para cada cenário ensaiado), de maneira que todos os dados de saída do sistema já estavam calculados em milímetros, no caso a lâmina uniforme ou a perturbada. Contudo, esta configuração foi alterada, possibilitando também que os dados de entrada (transdutor ultrassônico e fotodiodo) fossem entregues diretamente na saída do sistema de aquisição em volts, permitindo pós-processar, caso necessário, já que estavam sendo adquiridos na forma bruta. Assim, foi possível adequar, neste trabalho, a melhor metodologia, tratando os dados a instante, para cada onda aquisitada.

Como justificativa para os procedimentos do sistema de aquisição, acrescenta-se que o grupo de pesquisa RMVP desenvolveu um algoritmo com o objetivo de tratar os dados, identificando a frequência predominante apresentada pela *roll wave* em função da frequência de perturbação imposta, particionando cada pico juntamente com seu vale (uma *roll wave*) atribuindo uma identificação, para assim, caracterizar a *roll wave* média e seu desvio padrão, procedimento este adotado neste trabalho. Ademais, esta caracterização pontual (instante a instante) proporcionou conhecimento e experiência a ponto de se poder identificar as causas de cada ruído ou dado errôneo.

8.5 RESULTADOS DE PERFIS DE *ROLL WAVES* EXPERIMENTAIS VERSUS MODELO NUMÉRICO

Na comparação de resultados usou-se como base inicial a velocidade média de escoamento, comparando uma velocidade média calculada por meio de parâmetros exclusivamente experimentais (vazão, lâmina, velocidade superficial) e uma velocidade média calculada em função de parâmetros reológicos, conforme apresentado no Capítulo 7. A pequena variação percentual encontrada entre esses dois métodos certificou a utilização destes parâmetros reológicos como entrada no modelo numérico 1D, podendo assim realizar a comparação entre os experimentos e modelo. A comparação de resultados obtidos pelo sistema de medição ultrassônico e fotométrico com relação ao modelo numérico 1D teve como desvios valores da ordem de 4%, ao passo que a comparação entre os sistemas de medição ultrassônico e fotométrico registraram desvios da ordem de 1%.

Assim posto, devido à boa aderência entre os sistemas de medição experimental e modelo numérico e, sobretudo, entre os sistemas de medição, pode-se confirmar a confiabilidade dos dados apresentados em conformidade com as metodologias propostas, possibilitando, assim, vislumbrar a aplicação de tais opções de sistema de medição em casos reais, o que vai exigir estudos mais sistemáticos entre condições controladas de laboratório (modelo) e natureza (protótipo).

8.6 INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE PERTURBAÇÃO NA AMPLITUDE DAS *ROLL WAVES*

Acerca das *roll waves*, traçou-se como um dos objetivos iniciais da tese verificar suas evoluções espaço-temporais no canal, até o atingimento da *roll wave* dita estabilizada (com invariabilidade têmporo-espacial). Os resultados apresentados no Capítulos 7, atestam o cumprimento deste objetivo experimental. Outrossim, vale ressaltar que as expectativas numéricas testadas pelo Grupo de Pesquisa sobre o assunto (Ferreira 2013) e por outros pesquisadores (Dressler, 1949; Needham & Merkin, 2004; Di Cristo & Vaca, 2005) foram corroboradas pelos experimentos em canal, qual seja, a condição de Fr mínimo à geração de *roll wave* se apresenta como necessária, porém não suficiente. A geração de *roll waves* estabilizadas passa também a depender, forte provavelmente, da “boa” faixa de frequências (f_{mim} , f_{max}) da perturbação inicial que, à priori, parece estar compreendida entre um valor máximo (frequência de corte - f_{max}) e valor mínimo (f_{mim}). Tais resultados são ilustrados na

seção 7.8 que apontam uma diminuição da amplitude da onda com o aumento da frequência de perturbação.

9 CONCLUSÕES

Em função das diversas tratativas desenvolvidas ao longo deste trabalho, e com base no Capítulo 8, as conclusões desta tese, em grandes linhas, podem ser elencadas como se segue:

1. A Metodologia de medidas de superfície livre perseguida nesta tese foi bem-sucedida, para qual vale ressaltar os seguintes pontos:

- a) A **Metodologia fotométrica implementada** e testada no aparato experimental desenvolvido mostrou-se adequada e operacional para se medir, com precisão, amplitudes de *roll waves*, e demais características.
- b) A técnica ultrassônica, também utilizada na medição, com base em **Metodologia já conhecida**, se mostrou de fácil implementação, boa precisão, e compatível com as medidas da fotometria por absorbância.

2. **No que tange à técnica fotométrica por absorbância luminosa:** a partir da construção de aparatos de fixação do sensor laser, sua devida instalação, estudo da técnica de absorbância no espectrofotômetros, estudo da técnica de absorbância no canal, comparação dos parâmetros observados no espectrofotômetro e no canal de ensaios, definição de curvas de calibração, medições, tratamento dos dados, estudo estatístico e resultados comparativos entre técnicas experimentais e modelo numérico, a **técnica fotométrica** se mostrou exequível, com diferenças percentuais limitadas em 6,48%, no que se refere à amplitude das *roll waves* observadas no canal.

3. **No que tange à técnica ultrassônica:** com base no estudo da técnica de pulso-eco, construção de aparatos de fixação do sensor no canal, sua instalação, definição de curva de calibração, medições, tratamento dos dados, estudo estatístico e resultados comparativos entre técnicas experimentais e modelo numérico, a **técnica ultrassônica** se mostrou exequível, com diferenças percentuais limitadas em 5,14%, no que se refere à amplitude das *roll waves* observadas no canal.

4. As perturbações aplicadas ao escoamento base (regime uniforme) podem ou não evoluir para *roll waves*, isto é, ondas estáveis com amplitudes e celeridades bem definidas, atreladas às condições de geometria do canal, vazão e reologia do fluido escoante. Na natureza, as *roll waves* podem surgir em corridas de lamas e detritos, vindo, quase sempre, potencializar os danos causados sobre bens de infraestrutura e pessoas.

5. Há de se observar a necessidade, para bem caracterizar o fenômeno, estarmos em zona (local de medição), com presença de *roll waves* ditas estabilizadas. Tais *roll waves*

deverão aumentar de amplitude, comprimento e celeridade para números de Froude crescentes; não obstante, a geração ou não do fenômeno está também atrelada, além das condicionantes supracitadas, à aplicação de uma perturbação infinitesimal no intervalo de frequências (f_{min} , f_{max}) sobre o escoamento base, intervalo este ainda a ser melhor investigado. Por fim, vale observar que as amplitudes das *roll waves* medidas nas diversas campanhas experimentais, apresentadas nesta tese, demonstraram diminuir com o aumento da frequência de perturbação, ficando as *roll waves* limitadas à aplicação de uma frequência de corte da ordem de 3,5 Hz.

10 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se a continuação deste trabalho, através de uma abordagem experimental e comparativa como nos moldes desta tese, sobretudo, em função do conhecimento e tecnologia adquiridos pelo Grupo de Pesquisa RMVP.

São recomendadas as seguintes ações:

- 1º. Automatização do canal e bomba – devido à sensibilidade dinâmica do aparato experimental, o controle automatizado da inclinação do canal e das rotações da bomba proporcionarão uma melhor interação e controle dos ensaios experimentais.
- 2º. Canalização à saída do canal – as formações de bolhas e a contaminação do fluido teste por sujeiras advindas do ambiente têm influência direta nos sistemas de medição experimentais. Desta forma, a canalização no final do canal, ligando-se ao reservatório inferior (de armazenamento e fechado) possibilitaria o acoplamento de um filtro de limpeza (na entrada do reservatório) do sistema de recirculação, o que traria, de imediato, melhoria no sistema de medição, principalmente o fotoelétrico.
- 3º. Modificação do sistema de perturbação – recomenda-se projetar um amplificador de sinal dedicado e específico para movimentar a bobina do alto-falante, afim de se obter um comportamento mais próximo possível de um sinal impulso, haja vista que recentemente o Grupo adquiriu um osciloscópio/gerador de sinal de alta performance, o que possibilitará melhor controle das frequências de perturbação impostas.
- 4º. Nova versão do sistema de medição fotométrico – laser de cor laranja – a metodologia de aplicação do sistema fotoelétrico deste trabalho deixou como contribuição a possibilidade de melhoria, utilizando as mesmas condições de concentração (gel de carbopol e azul de metileno) com fonte luminosa da cor laranja.
- 5º. Distintos pontos de medição de *roll wave* no canal (um ponto fixo e outro móvel) – outra possibilidade com equipamentos já adquiridos pelo Grupo, qual seja, dividindo-se o feixe laser através de um semi-espelho e direcioná-lo a dois pontos de medição, possibilitando, após devidas calibrações, aferir, pelo sistema fotométrico, pontos distintos no canal e também medir a velocidade de propagação da *roll wave* (celeridade) em condições estritamente experimentais.

- 6°. Implementação de uma nova versão para o sistema de tratamento de dados – mediante o aprendizado adquirido, é possível projetar um sistema de aquisição de dados que trabalhe de forma recorrente (realimentação de malha fechada), ou seja, cada dado aferido é alocado em um certo instante (conforme metodologia empregada neste trabalho) e esta inserção de dado aferido somente finalizaria quando atingisse um parâmetro de confiabilidade (desvio padrão menor que 0,05 milímetros p.e.).
- 7°. Medição do perfil de velocidade longitudinal ao longo da profundidade (e velocidade média), em situação de regime uniforme (não perturbado) e perturbado (presença de *roll waves*), ambos por meio do sistema de medição ultrassônico e/ou fotométrico.

REFERÊNCIAS

- ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultra-som**. [S. l.: s. n.], 2014.
- ABDELSALAM, D. G.; BAEK, B. J.; AZIZ, F. A.; CHEGAL, W.; KIM, D. Highly accurate film thickness measurement based on automatic fringe analysis. **Optik: international journal for light and electron**, Munchen, v. 123, n. 16, p. 1444-1449, 2011.
- ARANDA, A.; AMIGO, N.; IHLE, C.; TAMBURRINO, A. Digital image correlation applied to the calculation of the out-of-plane deformation induced by the formation of roll waves in a non-Newtonian fluid. **Optical Engineering**, Redondo Beach, v. 55, n. 6, p. 064101, 2016.
- BALMFORTH, N. J.; MANDRE, C. Dynamics of roll waves. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v. 514, p. 1-33, 2004.
- BARTER, J. D.; LEE, P. H. Y. Real-time wave-amplitude spectrum analyzer for air-liquid interfaces. **Applied Physics Letters**, New York, v. 64, n. 15, p. 1896, 1994.
- BARTER, J. D.; LEE P. H. Y. Imaging surface-wave analyzer for liquid surfaces. **Optical Society of America**, Washington, v. 36, n. 12, p. 2630-2635, 1997.
- BARONI, D. B. **Desenvolvimento de técnica ultra-sônica para medida de porosidade em pastilhas de CO₂**. 2008. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Reatores) – Instituto de Engenharia Nuclear, Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, 2008.
- BEHROOZI, F.; LAMBERT, B.; BUHROW, B. Direct measurement of the attenuation of capillary waves by laser interferometry: noncontact determination of viscosity. **American Institute of Physics**, Melville, v. 78, n. 16, p. 2399-2401, 2001.
- BROCK, R. R. Development of roll-wave trains in open channels. **Journal Hydraulics Division**, New York, v. 95, p. 1401–1427, 1969.
- BROWN, R. C.; ANDRUESSI, P.; ZANELLI, S. The use of wire probes for the measurement of liquid film thickness in annular gas-liquid flows. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, Ottawa, v. 56, p. 754-757, 1978.
- BURTON, I. The social construction of natural disasters: an evolutionary perspective. In: JEGGLE, T. (Ed.). **United Nations publication**. Geneva: Tudor Rose Publishing, 2005. p. 35-36.
- CAMPAGNOLO, L.; NIKOLIC, M.; PERCHOUX, J.; LIM, Y. L.; BERTLING, K.; LOUBIERE, K.; PRAT, L.; RAKIC, A. D.; BOSCH, T. **Flow profile measurement in microchannel using the optical feedback interferometry sensing technique**. [S. l.]: Microfluidics and Nano fluidics, 2012.
- CARNEIRO, J. N. E.; FONSECA JÚNIOR, R.; ORTEGA, A. J.; CHUCUYA, R. C.; NIECKELE, A. O.; AZEVEDO, L. F. A. Statística characterization of tow-phase slug flow in a horizontal pipe. **Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, [S. l.], v. 33, p. 251-258, 2011.

CHUN, M.-H.; SUNG, C.-K. Parametric effects on the void fraction measurement by capacitance transducers. **International Journal of Multiphase Flow**, Elmsford, v. 12, n. 4, p. 627-640. 1986.

CONEY, J. E. R.; EI-SHAFEI, E. A. M.; SHEPPARD, C. G. W. A dual laser beam method for wavy film thickness measurement. **Optics and Lasers in Engineering**, London, v. 11, p. 1–14, 1989.

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

CHEN, X.; BUTLER, T.; BRILL, J. P. Capacitance probes for measurement of liquid film thickness, HTD- Vol 334. In: ASME HEAT TRANSFER DIVISION AT THE INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, 3., Atlanta. **Proceedings...** Atlanta: [s. n.], 1996. p. 201-208.

COMBS, C.; GOODWIN, P. **Adjustable ultrasonic level measurement device**. 4.211.004. [S.l.: s. n.], 1980. 16 p. n. 930.667
COLLIN, R. E. Foundation for microwave engineering. 2nd ed. Piscataway: IEEE Press, 2000. 994 p.

CONEY, M. W. E. The theory and application of conductance probes for the measurement of liquid film thickness in two phase flow. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, London, v. 6, p. 903-910, 1973.

CUNHA, E. F. **Implementação de aparato experimental para medição de instabilidades tipo roll waves em fluidos não-newtonianos**. 2013. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Ilha Solteira, 2013.

DALLMAN, J. C. **Investigation of separated flow model in annular gas-liquid two-phase flows**. 1978. PhD (Thesis) - University of Illinois at UrbanaChampaign, Urbana, 1978.

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

DI CRISTO, C.; VACCA, A. 2005. On the convective nature of *roll waves* instability. **Journal Applied Mathematics**, London, v. 3, p. 259-271.

DI CRISTO, C.; IERVOLINO, M.; VACCA, A. On the applicability of minimum channel length criterion for roll-waves in mud-flows. **J. Hydrol.Hydromech.**, Roma, v. 61, 4, p. 286–292, 2013.

DRISCOLL, D. I.; SCHMITT, R. L.; STEVENSON, W. H. Thin flowing liquid film thickness measurement by laser induced fluorescence. **Transactions of the ASME: Journal of Fluids Engineering**, [S. l.], v. 114, n. 1, p. 107-112, 1992.

EVERS, L. W.; JACKSON, K. J. Liquid film thickness measurements by means of internally reflected light. **Electronic Engine Controls**, [S. l.], 1995, v. SP-I082 p. 1-7, 1995.

FIOROT, G. H. **Mitigação de riscos e catástrofes naturais: análise numérico-experimental de roll waves evoluindo em canais inclinados.** 2012. 187 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, 2012.

FIOROT, G. H.; MACIEL, G. F.; CUNHA, E. F.; KITANO, C. Experimental setup for measuring roll waves on laminar open channel flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 41, p. 149 – 157, 2015.

FERREIRA, F. O. **Estabilidade e controle dinâmico de roll waves.** 2013. 204 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2013.

FERREIRA, F. O.; MACIEL, G. F.; FIOROT, G. H.; CUNHA, E. F. Numerical analysis of roll waves generation on non-Newtonian fluids flowing down an inclined plane. **Advanced Materials Research**, v. 1006-1007, p. 160-170, 2014.

FRANÇA, F. **Instrumentação e medidas: grandezas mecânicas.** [S.l.: s.n.], 2007. 249 p. v. 1.

FUKANO, T.; OUSAKA, A. Prediction of the circumferential distribution of film thickness in horizontal and near-horizontal gas-liquid annular flows. **International Journal of Multiphase Flow**, Elmsford, v. 15, n. 3, p. 403-419, 1989.

HEWITT, G. F. Measurement of liquid-film thickness. In: HETSRONI, G. (Ed.). **Handbook of multiphase systems.** New York: McGraw-Hill, 192. p. 10-67.

KAPITZA, P. L. **Wave flow of thin layers of a viscous fluid:** collected Papers of P.L. Kapitza: Pergamon, 1948. p. 662-709.

KLUG, F.; MAYINGER, F. Impedance based flow reconstruction-a novel flow composition measuring technique for multi-phase-flows, *Nuclear Engineering Design* 146: 35 - 42. (1994).

KOOP, C. G.; RUNGALDIER, H.; SHERMAN, J. D. Infrared optical sensor for measuring internal interfacial wave motions, defense and space systems group.

KUPHALDT, T. **Lessons in industrial instrumentation.** 4. ed. San Francisco: [s.n.], 2009. 1063 p.

LEITE, L. O. B. **Determinação física e numérica de corridas de lama em escoamentos resultantes de ruptura de barreira retendo material viscoplástico.** 2009. 185 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

LAURINAT, J. E. **Studies on the effects of pipe size on horizontal annular two-phase flows.** 1982. PhD (thesis) - University of Illinois at UrbanaChampaign, Urbana, 1982.

FORTERRE, Y.; POULIQUEN O. Long: surface: wave instability in dense granular flows. **J. Fluid. Mech.**, Cambridge, v.486, p. 21-50, 2003.

HUANG, X.; GARCIA, M. H. A Herschel-Bulkley model for mud flow down a slope. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v. 374, p. 305-333, 1998.

HURLBURT, E. T.; NEWELL, T. A. **Optical measurement of liquid film thickness and wave velocity in liquid film flows**. Illinois: Mechanical & Industrial Engineering Dept., University of Illinois, 1995.

JANA, A. K.; MANDAL, T. K.; CHAKRABARTI, D. P. G.; DAS, P. K. An optical probes for liquid-liquid tow-phase flows. **Measurement Science and Technology**, Bristol, v. 18, p. 1563 – 1575, 2007.

LIU, J.; GOLLUB, J. P. Solitary wave dynamics of film flows. **Physics of Fluids**, New York, v. 6, p. 1702–1712, 1994.

LIU, K.; MEI, C.C. Roll waves on a layer of a muddy fluid flowing down a gentle slope: a bingham model. **Phys Fluids**, New York, v. 6, p. 2577-2590, 1994.

MACIEL, G. F.; FERREIRA F. O.; FIOROT, G. H. Control of instabilities in non-Newtonian free surface fluid flows. **J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.**, Rio de Janeiro, v. 35, n. 3, p. 217 – 229, 2013.

MACIEL, G. F.; FERREIRA F. O.; CUNHA E. O.; FIOROT, G. H. Experimental apparatus for roll-waves measurements and comparison with a 1 d mathematical model. **Jornal of Hydraulic Engineering**, (2017).

MACIEL, G. F.; FIOROT, G. H.; FERREIRA, F. O. Riscos e catástrofes no meio ambiente: confrontação numérico-experimental de instabilidades presentes em corridas de lama. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2009, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: [s.n.], 2009. v. 18.

MACIEL G. F.; SANTOS, H. K.; FERREIRA, F. O. Rheological analysis of water clay compositions in order to investigate mudflows developing in canals. **J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 1, p. 64-74, 2009.

MICHELS, A. F.; LOVATO P. E HOROWITZ F. Optical monitoring of dip coating: non-newtonian liquids. **American Institute of Physics**, Melville, p. 1289-1293, 2008.

MINUSSI, R. B.; MACIEL, G. F. Numerical experimental comparison of dam break flows with non-Newtonian fluids. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 34, p. 167-178, 2012.

MINUSSI, R. B. **Rompimento de barreiras: análise experimental e numérica na previsão de velocidades de propagação de frentes de material hiperconcentrado**. 2007. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. 2007.

MIYA, M. **Properties of roll waves**. 1970. PhD (Thesis) - University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, 1970.

MOUZA, A. A.; VLACHOS, N. A.; PARAS, S. V.; KARABELAS, A. J. Measurement of liquid film thickness using a laser light absorption method. **Experiments in Fluids**, Berlin, v. 28, n. 4, p. 355-359, 2000.

NG, C. O.; MEI C. C. Roll waves on a layer of fluid mud modelled as a power law fluid. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v. 263, p. 151-184, 1994.

NOVEONTM. **Advances in polymer technology**. Ohio: Noveon Corporation, 2002. Disponível em: <<http://www.noveon.com>>. Acesso em: 10 jan. 2008.

NOZHAT W. M. Measurement of liquid-film thickness by laser interferometry. **Optical Society of America**, Rochester, p. 7864-7869, 1997.

OLIVEIRA, F. S.; YANAGIHARA, J. I.; PACÍFICO, A. L. Film thickness and wave velocity measurement using reflected laser intensity. **Jornal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 1, p. 30-36, 2006.

OZGII, M. R. AND CHEN, J. C. A capacitance method of measurement of film thickness in two-phase flow. **Review of Scientific Instruments**, Rochester, v. 44, n. 12, 1973.

PARNIS, J. M.; OLDHAM, K. B. Beyond the beer-lambert law: the dependence of absorbance on time in photochemistry. **Jornal of photochemistry and photobiology: Chemistry**, Hoboken, v 267, p. 6-10, 2013.

ROGERS, E. K; BRIMELOW, C. Instrumentation and sensor for the food industry. 2. ed. [S.I.]: CRC, 2001. 836 p.

SANTOS, C. S. **Proposta de sistema automatizado para medição de tensão utilizando o efeito acustoelástico**. 2013. 220 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

SCHMITT, R. L.; STEVENSON, W. H.; STEVENSON, H. C. Optical measurement of liquid film thickness. In: INSPECTIONS, MEASUREMENT AND CONTROL SYMPOSIUM, INTERNATIONAL CONGRESS OF APPLICATIONS OF LASERS AND ELECTRO-OPTICS, 33., 1982. **Proceedings ...** Boston: Laser Institute of America (LIA), 1982. p. 31-35.

SEKOGUCHI, K.; OUSAKA, A.; FUKANO, T.; MORIMOTO, T. Airwater annular two-phase flow in a horizontal tube. **Bulletin of the JSME**, v. 25, n. 208, p. 1559-1566, 1982.

SEKOGUCHI, K.; FUKUI, H.; MATSUOKA, T.; NISHIKAWA, K. Investigation into the statistical characteristics of bubbles in two-phase flow. **Bulletin of the JSME**, Tokyo, v. 18, n. 118, p. 391-396, 1975.

SHEDD, T. A.; NEWELL, T. A. An automated optical liquid film thickness measurement method. Illinois: Mechanical & Industrial Engineering Dept., University of., 1997.

SOLTZ, D. **Parasitic echo pulse rejector for ultrasonic liquid level Meter**. 4.821.569. 18 de abr. de 1989. [S.l.], n. 114.857, p. 6.

SUN, R. K., KOLBE, W. F., LESKOVAR, B. AND TURKO, B. T. Measurement of thickness of thin water film in two-phase flow by capacitance method. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, Piscataway, v. 29, n. 1, p. 688-694, 1981.

SUNDARAM, R. K., CHEN, J. C., LONDON, E. J. AND EBERHARDT, N. Measurement of thin film thicknesses in two-phase flow. In: INTERNATIONAL INSTRUMENTATION SYMPOSIUM, 27th., 1981, [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.]: ISA Aerospace Industry Division and ISA Test Measurement Division, pp. 299-312, 1981.

TAMBURRINO, A.; IHLE, C. F. Roll wave appearance in bentonite suspensions flowing down inclined planes. **Journal of Hydraulic Research**, London, v. 51, n. 3 p. 330–335, 2013.

THAN, C. F.; TEE, K. C.; LOW, K. S.; TSO, C. P. Optical measurement of slope, thickness and velocity in liquid film flow, *Smart Material Structures* 2(1): 13-21.

THORNCROFT, G. E. AND KLAUSNER, J. F. A capacitance sensor for twophase liquid film thickness measurements in a square duct. **Transactions of the ASME: Journal of Fluids Engineering**, [S. l.], v. 119, n. 1, p. 164-169, 1997.

TURKO, B. T.; KOLBE, W. F.; LESKOVAR, B.; SUN, R. K. Development of electro-optical instrumentation for reactor safety studies. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, Piscataway, v. NS-28, n. 1, p. 728-739, 1981.

VILIMEK, V.; SPILKOVA, J. Natural hazards and risks: the view from the junction of natural and social sciences. **Geografie–Sbornik ČGS**, [S. l.], v. 114, 4, p. 332–349, 2009.

VILLENEUVE, J. P.; OUELLET, Y. Laboratory systems for measuring short-term changes in water levels. **Review of Scientific Instruments**, Rochester, v. 49, n. 10, p. 1425-1431, 1978.

WEGNER, J. L.; DRELLMEIER, J. A. **Annual conference on liquid atomization and spray systems**. 22nd. Cincinnati: ILASS-Americas, 2010. 14 p.

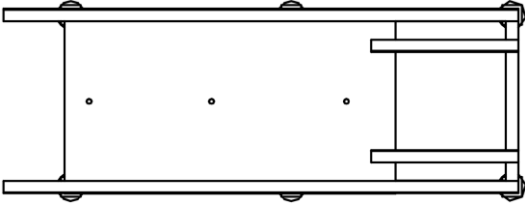
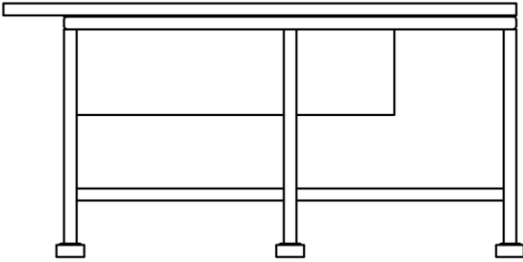
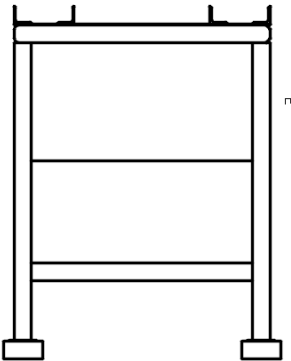
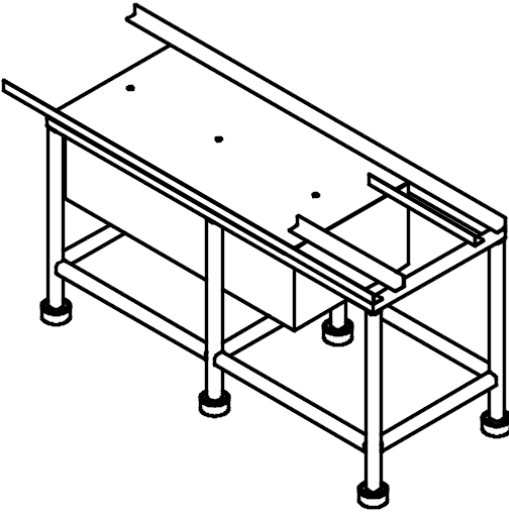
WISNER, B.; BLAKIE, P.; CANNON, T.; DAVIS, I. **At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters**. London: Routledge, 2004. 496 p.


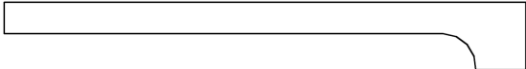
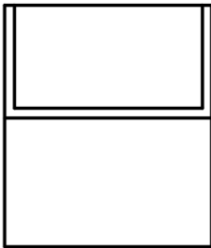
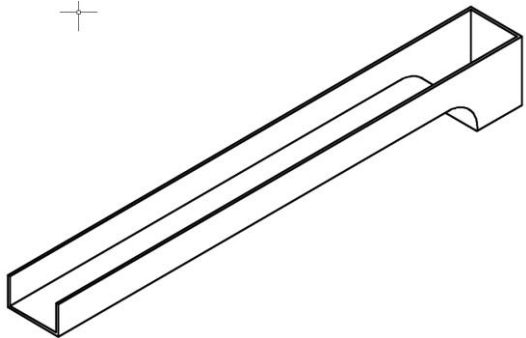
YU, S. C. M.; TSO, C. P.; LIEW, R. Analysis of thin film thickness determination in two-phase flow using a multifiber optical sensor. **Applied Mathematical Modelling**, Guildford, v. 20, n. 7, p. 540-548, 1996.

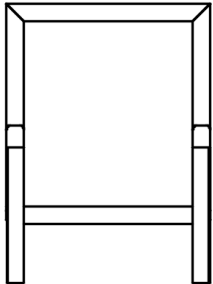
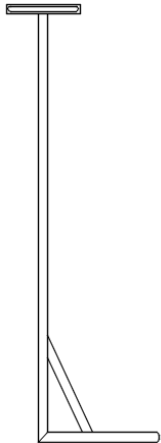
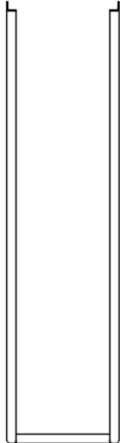
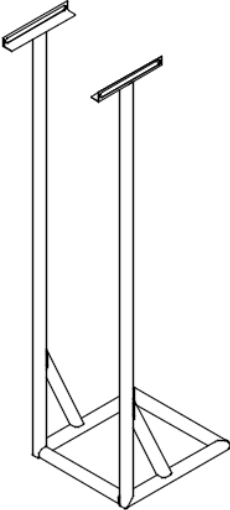
ZHAO, C.; GAO, J.; ZHANG, M.; ZHANG, T.; WANG, F. **Response of roll wave to suspended load and hydraulics of Overland flow on steep slope**. [S. l.]: Cetena, 2015. p. 394-402.

APÊNDICE A – DETALHAMENTO CONSTRUTIVO

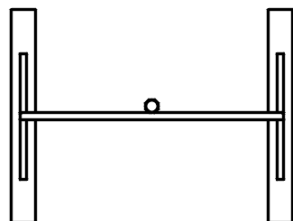
Mesa Inercial - Canal de Ensaio - Suporte Mangueira - Suporte Soprador 1 - Suporte Soprador 2 - Caixa em Formato V - Suporte do Transdutor Ultrassônico - Suporte do Fotodetector.

Vista Superior		Vista Lateral	
			
Vista Frontal		Isométrico	
			
Título: Mesa Inercial	Apêndice: A	Folha: 1/8	
Faculdade: Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - PPGEM			
Título da Tese: Implementação de um Aparato Experimental para Medição de Instabilidades em Superfície com Fluido Não-Newtoniano			
Discente: Evandro Fernandes da Cunha	Orientador: Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel		
Coorientador: Prof. Dr. Cláudio Kitano			Mar./2015

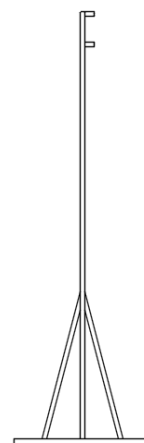
Vista Superior		Vista Lateral	
			
Vista Frontal		Isométrico	
			
Título: Canal de Ensaios	Apêndice: A	Folha: 2/8	
Faculdade: Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - PPGEM			
Título da Tese: Implementação de um Aparato Experimental para Medição de Instabilidades em Superfície com Fluido Não-Newtoniano			
Discente: Evandro Fernandes da Cunha	Orientador: Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel		
Coorientador: Prof. Dr. Cláudio Kitano			Mar./2015

Vista Superior		Vista Lateral	
			
Vista Frontal		Isométrico	
			
Título: Suporte da Mangueira	Apêndice: A	Folha: 3/8	
Faculdade: Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - PPGEM			
Título da Tese: Implementação de um Aparato Experimental para Medição de Instabilidades em Superfície com Fluido Não-Newtoniano			
Discente: Evandro Fernandes da Cunha	Orientador: Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel		
Coorientador: Prof. Dr. Cláudio Kitano			Mar./2015

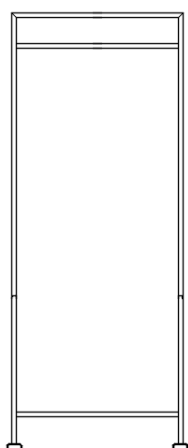
Vista Superior



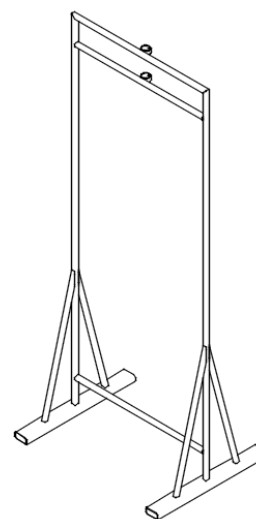
Vista Lateral






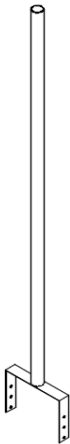
Vista Frontal

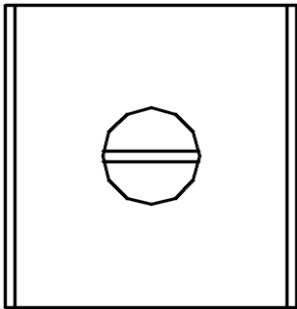
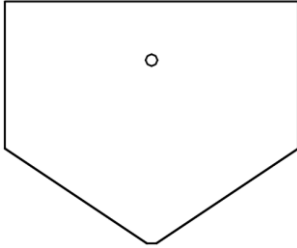
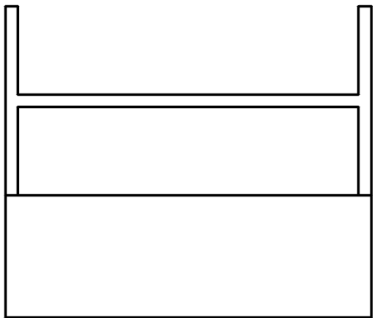
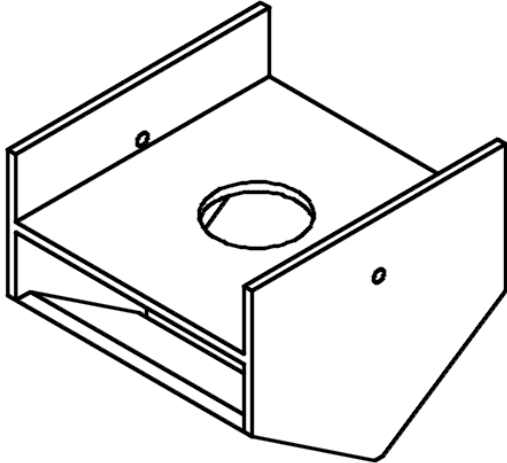


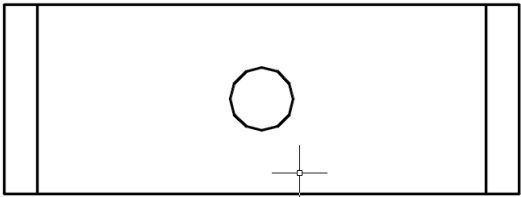
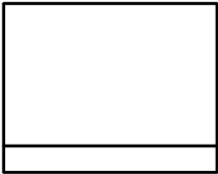
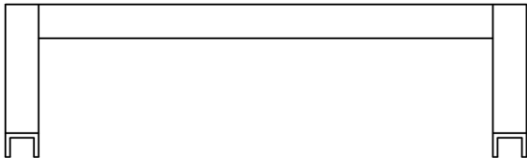
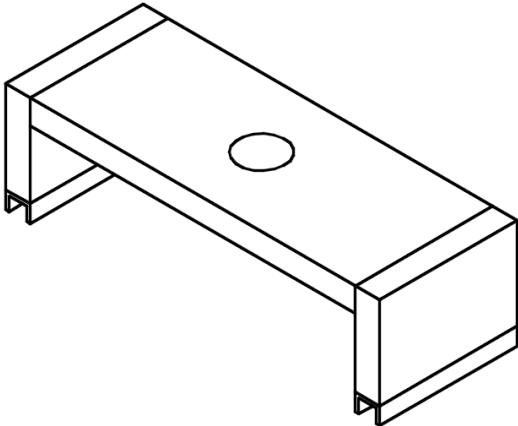
Isométrico

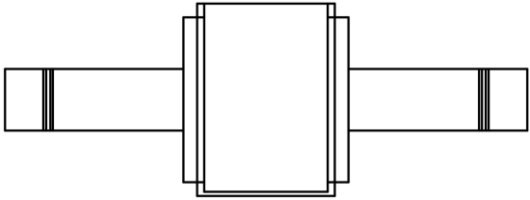
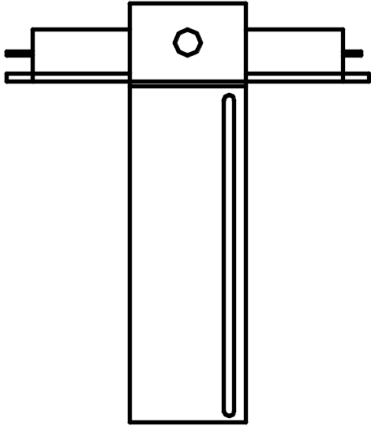
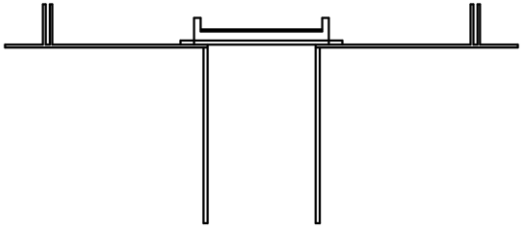
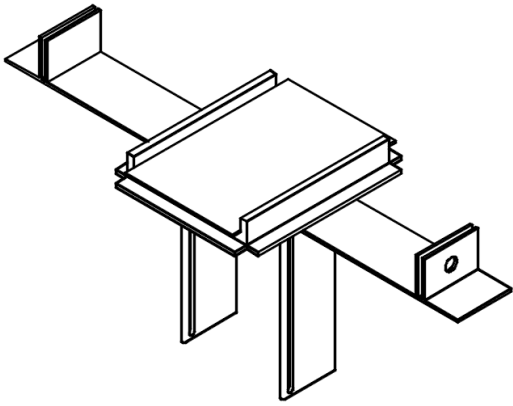


Título: Suporte do Sistema de Perturbação 1	Apêndice: A	Folha: 4/8
Faculdade: Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - PPGEM		
Título da Tese: Implementação de um Aparato Experimental para Medição de Instabilidades em Superfície com Fluido Não-Newtoniano		
Discente: Evandro Fernandes da Cunha	Orientador: Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel	
Coorientador: Prof. Dr. Cláudio Kitano		Mar./2015

Vista Superior		Vista Lateral	
			
Vista Frontal		Isométrico	
			
Título: Suporte do Sistema de Perturbação 2	Apêndice: A	Folha: 5/8	
Faculdade: Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - PPGEM			
Título da Tese: Implementação de um Aparato Experimental para Medição de Instabilidades em Superfície com Fluido Não-Newtoniano			
Discente: Evandro Fernandes da Cunha		Orientador: Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel	
Coorientador: Prof. Dr. Cláudio Kitano			Mar./2015

Vista Superior		Vista Lateral	
			
Vista Frontal		Isométrico	
			
Título: Caixa em Formato V	Apêndice: A	Folha: 6/8	
Faculdade: Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - PPGEM			
Título da Tese: Implementação de um Aparato Experimental para Medição de Instabilidades em Superfície com Fluido Não-Newtoniano			
Discente: Evandro Fernandes da Cunha	Orientador: Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel		
Coorientador: Prof. Dr. Cláudio Kitano		Mar./2015	

Vista Superior		Vista Lateral	
			
Vista Frontal		Isométrico	
			
Título: Suporte do Transdutor Ultrassônico	Apêndice: A	Folha: 7/8	
Faculdade: Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - PPGEM			
Título da Tese: Implementação de um Aparato Experimental para Medição de Instabilidades em Superfície com Fluido Não-Newtoniano			
Discente: Evandro Fernandes da Cunha	Orientador: Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel		
Coorientador: Prof. Dr. Cláudio Kitano			Mar./2015

Vista Superior		Vista Lateral	
			
Vista Frontal		Isométrico	
			
Título: Suporte do Fotodetector	Apêndice: A	Folha: 8/8	
Faculdade: Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - PPGEM			
Título da Tese: Implementação de um Aparato Experimental para Medição de Instabilidades em Superfície com Fluido Não-Newtoniano			
Discente: Evandro Fernandes da Cunha	Orientador: Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel		
Coorientador: Prof. Dr. Cláudio Kitano			Mar./2015

APÊNDICE B – TABELA E GRÁFICOS DE MÉDIA E DESVIO PADRÃO

Campanha I – Sistema Ultrassônico (P1) – Tempo (s), Média (mm) e Desvio Padrão (mm).

Campanha II – Sistema Ultrassônico e Sistema Fotométrico (P1) - Tempo (s), Média (mm) e Desvio Padrão (mm).

Campanha I – Sistema Ultrassônico em P1

Tempo	C1G14R400		C1G14R420		C1G14R440	
	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão
0	8,03	1,67	8,29	1,52	7,98	1,75
0,01	10,94	0,43	9,46	2,22	10,36	1,93
0,02	11,62	0,41	11,19	0,45	11,34	0,56
0,03	11,75	0,10	12,00	0,15	12,03	0,12
0,04	11,39	0,16	11,83	0,27	11,76	0,45
0,05	11,13	0,36	11,57	0,31	11,63	0,45
0,06	10,67	0,23	10,91	0,53	10,94	0,67
0,07	10,12	0,18	10,61	0,43	10,60	0,44
0,08	9,72	0,32	10,18	0,41	10,32	0,40
0,09	9,47	0,20	9,86	0,24	9,96	0,34
0,10	8,96	0,17	9,35	0,31	9,36	0,31
0,11	8,48	0,16	9,02	0,42	9,04	0,44
0,12	8,43	0,17	8,75	0,20	8,80	0,26
0,13	7,95	0,15	8,25	0,19	8,28	0,25
0,14	7,53	0,13	8,03	0,36	7,95	0,34
0,15	7,48	0,24	7,84	0,18	7,81	0,28
0,16	7,13	0,12	7,39	0,19	7,36	0,22
0,17	6,77	0,14	7,18	0,28	7,10	0,28
0,18	6,69	0,22	6,96	0,25	6,95	0,27
0,19	6,45	0,10	6,68	0,19	6,62	0,19
0,2	6,17	0,10	6,46	0,28	6,42	0,24
0,21	6,07	0,20	6,28	0,22	6,27	0,21
0,22	5,89	0,10	6,07	0,12	6,03	0,15
0,23	5,68	0,07	5,90	0,20	5,77	0,14
0,24	5,56	0,15	5,78	0,20	5,66	0,18
0,25	5,46	0,08	5,61	0,10	5,54	0,14
0,26	5,29	0,09	5,43	0,12	5,36	0,13
0,27	5,15	0,07	5,36	0,17	5,26	0,19
0,28	5,13	0,08	5,24	0,09	5,20	0,13
0,29	4,97	0,07	5,09	0,09	5,02	0,12
0,3	4,86	0,06	5,06	0,15	4,95	0,13
0,31	4,86	0,09	5,00	0,08	4,89	0,14
0,32	4,74	0,07	4,84	0,08	4,77	0,09
0,33	4,64	0,05	4,83	0,12	4,72	0,11
0,34	4,68	0,08	4,78	0,10	4,70	0,13
0,35	4,56	0,05	4,68	0,08	4,58	0,09
0,36	4,50	0,05	4,65	0,13	4,53	0,10
0,37	4,49	0,09	4,62	0,10	4,49	0,09
0,38	4,46	0,06	4,55	0,08	4,44	0,06
0,39	4,39	0,06	4,52	0,10	4,40	0,08
0,4	4,38	0,06	4,50	0,09	4,39	0,07
0,41	4,37	0,06	4,45	0,09	4,36	0,08
0,42	4,33	0,05	4,43	0,09	4,31	0,07
0,43	4,30	0,04	4,44	0,11	4,31	0,06
0,44	4,31	0,06	4,40	0,08	4,31	0,08
0,45	4,26	0,05	4,37	0,09	4,26	0,06
0,46	4,26	0,03	4,38	0,09	4,28	0,06
0,47	4,27	0,07	4,37	0,09	4,28	0,08
0,48	4,24	0,03	4,33	0,08	4,23	0,05
0,49	4,23	0,04	4,35	0,07	4,24	0,07
0,5	4,27	0,05	4,34	0,08	4,28	0,17
0,51	4,22	0,04	4,32	0,08	4,21	0,05
0,52	4,21	0,03	4,32	0,10	4,20	0,05
0,53	4,24	0,07	4,34	0,10	4,25	0,13
0,54	4,21	0,05	4,30	0,08	4,20	0,05
0,55	4,19	0,04	4,30	0,08	4,18	0,07
0,56	4,22	0,03	4,30	0,08	4,21	0,09
0,57	4,22	0,09	4,30	0,09	4,21	0,08
0,58	4,20	0,04	4,29	0,08	4,17	0,06
0,59	4,20	0,05	4,34	0,08	4,21	0,06
0,6	4,24	0,07	4,33	0,09	4,19	0,08
0,61	4,20	0,05	4,29	0,12	4,17	0,05
0,62	4,21	0,04	4,31	0,09	4,20	0,05
0,63	4,27	0,04	4,32	0,11	4,20	0,07
0,64	4,22	0,05	4,28	0,08	4,19	0,05
0,65	4,21	0,06	4,30	0,05	4,17	0,11

Campanha II – Sistema Ultrassônico em P1

Tempo	C2G5R225		C2G5R275		C2G5R325	
	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão
0	5,28	1,00	5,67	0,96	6,83	0,61
0,01	6,03	0,59	5,90	0,82	7,36	0,53
0,02	6,46	0,05	6,08	0,74	7,65	0,06
0,03	6,55	0,03	6,45	0,68	7,63	0,04
0,04	6,56	0,05	6,99	0,53	7,57	0,09
0,05	6,53	0,06	7,11	0,40	7,53	0,08
0,06	6,46	0,03	7,14	0,15	7,36	0,05
0,07	6,39	0,07	7,07	0,17	7,22	0,08
0,08	6,33	0,07	7,05	0,18	7,10	0,09
0,09	6,26	0,04	6,88	0,17	7,04	0,05
0,10	6,18	0,07	6,78	0,20	6,91	0,05
0,11	6,13	0,09	6,74	0,16	6,83	0,09
0,12	6,08	0,05	6,62	0,17	6,82	0,07
0,13	6,02	0,06	6,56	0,19	6,65	0,05
0,14	5,94	0,09	6,47	0,15	6,58	0,12
0,15	5,90	0,04	6,37	0,14	6,54	0,08
0,16	5,82	0,04	6,27	0,14	6,40	0,04
0,17	5,82	0,08	6,22	0,12	6,35	0,13
0,18	5,75	0,06	6,17	0,13	6,33	0,05
0,19	5,67	0,05	6,08	0,12	6,18	0,04
0,2	5,64	0,06	6,01	0,13	6,08	0,07
0,21	5,60	0,06	5,98	0,12	5,98	0,06
0,22	5,54	0,05	5,88	0,11	5,98	0,04
0,23	5,48	0,05	5,82	0,13	5,87	0,06
0,24	5,46	0,06	5,80	0,10	5,83	0,08
0,25	5,41	0,06	5,70	0,11	5,80	0,06
0,26	5,35	0,05	5,67	0,14	5,69	0,04
0,27	5,33	0,04	5,62	0,09	5,66	0,07
0,28	5,28	0,02	5,56	0,10	5,63	0,05
0,29	5,22	0,03	5,50	0,11	5,51	0,03
0,3	5,23	0,07	5,46	0,09	5,49	0,07
0,31	5,16	0,05	5,43	0,09	5,48	0,05
0,32	5,13	0,03	5,37	0,10	5,36	0,04
0,33	5,11	0,06	5,31	0,09	5,31	0,06
0,34	5,07	0,04	5,31	0,09	5,23	0,05
0,35	5,03	0,02	5,22	0,09	5,22	0,02
0,36	4,99	0,03	5,18	0,12	5,16	0,04
0,37	4,98	0,06	5,16	0,08	5,14	0,04
0,38	4,93	0,03	5,10	0,06	5,13	0,03
0,39	4,92	0,05	5,09	0,08	5,05	0,02
0,4	4,90	0,06	5,05	0,06	5,04	0,06
0,41	4,87	0,03	5,00	0,07	5,02	0,04
0,42	4,82	0,03	4,98	0,08	4,94	0,02
0,43	4,83	0,05	4,95	0,06	4,94	0,08
0,44	4,78	0,05	4,94	0,07	4,94	0,06
0,45	4,75	0,03	4,90	0,07	4,84	0,03
0,46	4,76	0,04	4,86	0,05	4,80	0,07
0,47	4,73	0,05	4,87	0,06	4,75	0,04
0,48	4,70	0,04	4,79	0,05	4,74	0,03
0,49	4,67	0,03	4,77	0,08	4,73	0,03
0,5	4,66	0,05	4,76	0,07	4,71	0,03
0,51	4,64	0,05	4,73	0,05	4,74	0,03
0,52	4,63	0,04	4,72	0,08	4,64	0,03
0,53	4,63	0,04	4,69	0,05	4,65	0,04
0,54	4,58	0,04	4,67	0,07	4,66	0,05
0,55	4,56	0,04	4,65	0,07	4,58	0,03
0,56	4,58	0,05	4,63	0,05	4,59	0,05
0,57	4,55	0,03	4,61	0,06	4,60	0,05
0,58	4,53	0,03	4,61	0,05	4,53	0,03
0,59	4,54	0,05	4,60	0,04	4,53	0,06
0,6	4,50	0,04	4,58	0,05	4,45	0,04
0,61	4,49	0,03	4,55	0,03	4,47	0,02
0,62	4,50	0,06	4,55	0,03	4,45	0,02
0,63	4,51	0,04	4,53	0,05	4,46	0,04
0,64	4,49	0,09	4,52	0,05	4,50	0,11
0,65	4,49	0,10	4,52	0,06	4,54	0,12

Campanha II – Sistema Ultrassônico em P1

Tempo	C2G5R375		C2G5R425		C2G5R475	
	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão
0	6,36	0,61	5,90	0,56	5,63	0,13
0,01	7,18	1,15	6,84	1,03	5,83	0,49
0,02	7,65	0,89	7,24	1,20	6,80	1,37
0,03	8,14	0,38	8,04	0,67	7,77	1,05
0,04	8,24	0,06	8,19	0,57	7,96	0,86
0,05	8,24	0,07	8,42	0,09	8,55	0,46
0,06	8,05	0,09	8,32	0,05	8,68	0,06
0,07	7,92	0,14	8,24	0,13	8,66	0,15
0,08	7,84	0,17	8,08	0,18	8,58	0,15
0,09	7,70	0,12	7,96	0,12	8,45	0,16
0,10	7,55	0,14	7,83	0,20	8,29	0,22
0,11	7,46	0,19	7,68	0,15	8,25	0,17
0,12	7,38	0,09	7,61	0,09	8,06	0,17
0,13	7,20	0,10	7,40	0,10	7,88	0,16
0,14	7,13	0,12	7,33	0,15	7,89	0,16
0,15	7,08	0,08	7,28	0,09	7,69	0,18
0,16	6,92	0,08	7,10	0,09	7,52	0,15
0,17	6,83	0,11	7,04	0,16	7,51	0,20
0,18	6,82	0,09	6,97	0,08	7,36	0,17
0,19	6,64	0,08	6,78	0,08	7,20	0,14
0,2	6,55	0,12	6,73	0,14	7,12	0,18
0,21	6,48	0,13	6,59	0,11	7,02	0,17
0,22	6,40	0,07	6,52	0,07	6,88	0,13
0,23	6,28	0,09	6,45	0,15	6,78	0,17
0,24	6,23	0,13	6,35	0,11	6,75	0,13
0,25	6,18	0,07	6,31	0,07	6,61	0,12
0,26	6,06	0,06	6,15	0,09	6,49	0,11
0,27	6,01	0,08	6,11	0,09	6,49	0,10
0,28	5,99	0,06	6,07	0,07	6,37	0,12
0,29	5,87	0,05	5,95	0,06	6,25	0,10
0,3	5,83	0,08	5,91	0,10	6,26	0,14
0,31	5,81	0,07	5,88	0,06	6,13	0,10
0,32	5,69	0,06	5,76	0,05	6,01	0,08
0,33	5,62	0,08	5,74	0,10	5,98	0,13
0,34	5,58	0,10	5,63	0,09	5,89	0,09
0,35	5,53	0,05	5,57	0,06	5,81	0,09
0,36	5,47	0,07	5,54	0,11	5,75	0,12
0,37	5,42	0,12	5,46	0,09	5,72	0,07
0,38	5,39	0,05	5,44	0,05	5,64	0,08
0,39	5,31	0,04	5,33	0,04	5,54	0,06
0,4	5,28	0,06	5,32	0,05	5,57	0,07
0,41	5,27	0,04	5,29	0,04	5,46	0,06
0,42	5,19	0,04	5,20	0,03	5,40	0,06
0,43	5,17	0,06	5,19	0,08	5,44	0,06
0,44	5,17	0,05	5,16	0,06	5,33	0,08
0,45	5,07	0,05	5,06	0,04	5,24	0,06
0,46	5,05	0,06	5,07	0,07	5,23	0,10
0,47	5,02	0,08	5,01	0,06	5,18	0,09
0,48	4,97	0,05	4,96	0,05	5,11	0,04
0,49	4,94	0,06	4,92	0,07	5,09	0,08
0,5	4,92	0,06	4,88	0,05	5,06	0,06
0,51	4,91	0,04	4,89	0,03	5,02	0,05
0,52	4,85	0,03	4,81	0,04	4,96	0,04
0,53	4,83	0,05	4,78	0,05	4,98	0,03
0,54	4,84	0,04	4,80	0,04	4,90	0,03
0,55	4,77	0,03	4,73	0,04	4,86	0,05
0,56	4,76	0,04	4,75	0,04	4,90	0,06
0,57	4,77	0,03	4,72	0,05	4,82	0,02
0,58	4,71	0,02	4,65	0,03	4,78	0,02
0,59	4,71	0,04	4,66	0,05	4,82	0,04
0,6	4,67	0,06	4,61	0,05	4,74	0,03
0,61	4,64	0,02	4,59	0,03	4,70	0,04
0,62	4,65	0,05	4,59	0,05	4,72	0,06
0,63	4,58	0,11	4,57	0,04	4,68	0,04
0,64	4,58	0,07	4,55	0,05	4,64	0,04
0,65	4,60	0,04	4,47	0,06	4,62	0,02

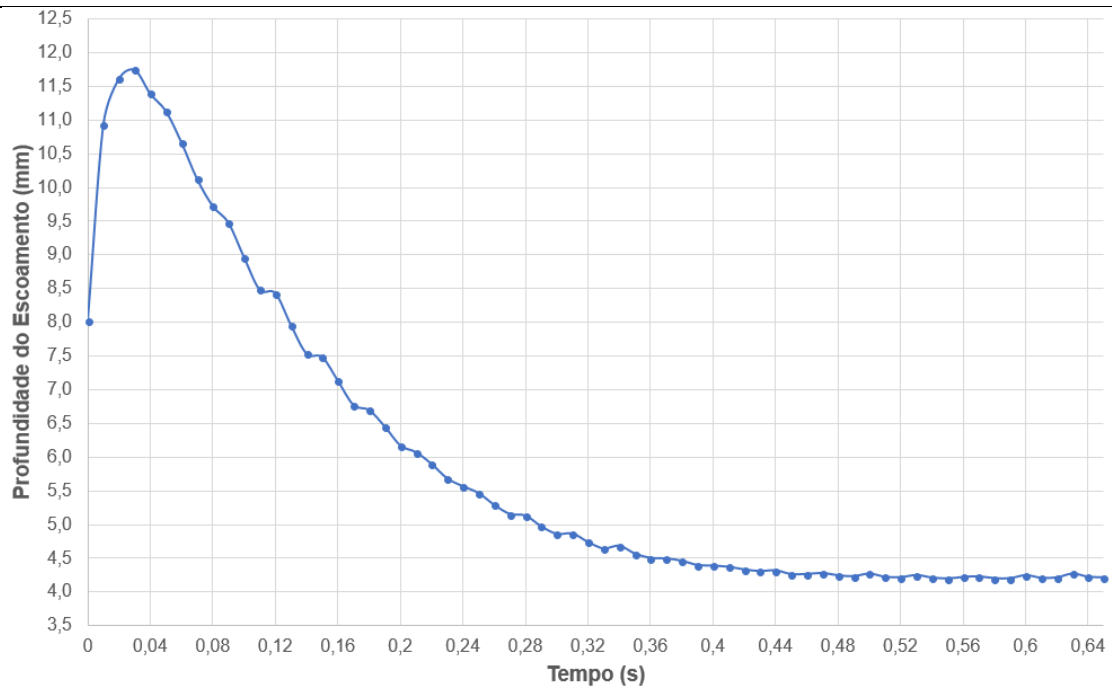
Campanha II – Sistema Fotométrico em P1

Tempo	C2G5R225		C2G5R275		C2G5R325	
	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão
0	5,35	0,46	5,80	0,77	6,04	1,13
0,01	6,03	0,21	7,00	0,11	7,59	0,19
0,02	6,42	0,11	7,24	0,10	7,80	0,22
0,03	6,56	0,08	7,33	0,10	7,99	0,05
0,04	6,55	0,06	7,21	0,09	7,82	0,06
0,05	6,53	0,04	7,10	0,13	7,81	0,09
0,06	6,42	0,06	6,99	0,11	7,59	0,11
0,07	6,36	0,03	6,89	0,09	7,45	0,10
0,08	6,28	0,08	6,84	0,07	7,34	0,08
0,09	6,24	0,07	6,75	0,09	7,22	0,09
0,10	6,21	0,06	6,63	0,09	7,20	0,09
0,11	6,14	0,06	6,60	0,11	7,03	0,11
0,12	6,07	0,03	6,54	0,09	6,94	0,12
0,13	5,99	0,06	6,49	0,06	6,90	0,11
0,14	5,98	0,05	6,40	0,06	6,76	0,12
0,15	5,90	0,06	6,31	0,11	6,73	0,13
0,16	5,86	0,08	6,28	0,09	6,61	0,08
0,17	5,80	0,07	6,19	0,08	6,55	0,12
0,18	5,75	0,07	6,06	0,09	6,48	0,09
0,19	5,64	0,05	6,04	0,08	6,32	0,09
0,2	5,63	0,04	5,97	0,07	6,31	0,08
0,21	5,55	0,05	5,88	0,08	6,18	0,05
0,22	5,53	0,06	5,81	0,06	6,16	0,09
0,23	5,47	0,07	5,79	0,07	6,10	0,04
0,24	5,40	0,05	5,70	0,07	5,99	0,06
0,25	5,38	0,05	5,61	0,10	5,96	0,10
0,26	5,36	0,07	5,59	0,07	5,87	0,06
0,27	5,30	0,02	5,52	0,04	5,81	0,07
0,28	5,22	0,04	5,48	0,14	5,77	0,08
0,29	5,21	0,06	5,40	0,04	5,65	0,06
0,3	5,19	0,06	5,33	0,04	5,63	0,04
0,31	5,12	0,05	5,35	0,07	5,56	0,05
0,32	5,09	0,05	5,23	0,07	5,51	0,05
0,33	5,06	0,06	5,18	0,06	5,47	0,07
0,34	5,01	0,06	5,21	0,07	5,42	0,06
0,35	4,96	0,05	5,15	0,06	5,39	0,07
0,36	4,96	0,06	5,10	0,07	5,31	0,06
0,37	4,92	0,05	5,10	0,08	5,25	0,04
0,38	4,87	0,04	5,06	0,08	5,25	0,05
0,39	4,84	0,06	5,03	0,04	5,16	0,05
0,4	4,82	0,05	4,96	0,10	5,16	0,05
0,41	4,79	0,06	4,92	0,07	5,09	0,03
0,42	4,76	0,05	4,87	0,06	5,05	0,05
0,43	4,75	0,04	4,82	0,09	5,04	0,02
0,44	4,69	0,06	4,80	0,03	4,96	0,05
0,45	4,71	0,04	4,77	0,06	4,97	0,05
0,46	4,69	0,04	4,80	0,09	4,93	0,06
0,47	4,67	0,04	4,74	0,06	4,88	0,05
0,48	4,65	0,06	4,69	0,05	4,88	0,06
0,49	4,62	0,05	4,67	0,05	4,87	0,08
0,5	4,59	0,08	4,67	0,05	4,81	0,05
0,51	4,58	0,06	4,65	0,05	4,76	0,04
0,52	4,54	0,05	4,63	0,05	4,76	0,05
0,53	4,53	0,03	4,61	0,04	4,73	0,04
0,54	4,51	0,04	4,63	0,05	4,66	0,04
0,55	4,52	0,05	4,58	0,06	4,71	0,07
0,56	4,48	0,04	4,56	0,08	4,67	0,06
0,57	4,47	0,05	4,51	0,07	4,62	0,03
0,58	4,45	0,03	4,50	0,04	4,63	0,05
0,59	4,40	0,04	4,47	0,04	4,57	0,07
0,6	4,42	0,05	4,46	0,05	4,57	0,06
0,61	4,39	0,03	4,45	0,02	4,56	0,06
0,62	4,40	0,04	4,41	0,06	4,51	0,05
0,63	4,38	0,05	4,46	0,05	4,51	0,04
0,64	4,37	0,03	4,39	0,04	4,48	0,06
0,65	4,32	0,06	4,36	0,03	4,48	0,07

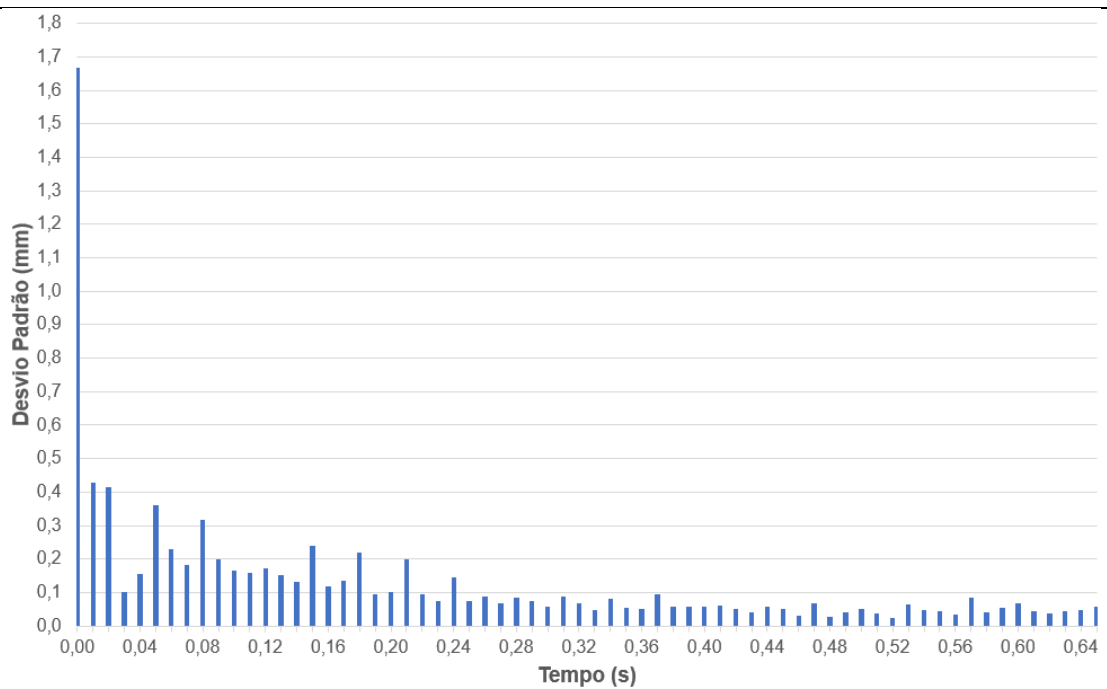
Campanha II – Sistema Fotométrico em P1

Tempo	C2G5R375		C2G5R425		C2G5R475	
	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão
0	7,90	0,16	8,14	0,07	8,17	0,11
0,01	8,03	0,27	8,37	0,14	8,59	0,09
0,02	8,35	0,17	8,79	0,09	8,89	0,09
0,03	8,47	0,14	8,82	0,08	9,04	0,06
0,04	8,30	0,12	8,71	0,08	8,92	0,11
0,05	8,23	0,11	8,54	0,06	8,91	0,10
0,06	8,04	0,12	8,39	0,07	8,71	0,13
0,07	7,93	0,09	8,29	0,12	8,60	0,10
0,08	7,72	0,10	8,03	0,08	8,45	0,11
0,09	7,62	0,07	7,95	0,08	8,33	0,12
0,10	7,53	0,07	7,86	0,10	8,20	0,09
0,11	7,47	0,12	7,65	0,10	8,02	0,09
0,12	7,34	0,08	7,60	0,08	7,90	0,12
0,13	7,19	0,09	7,45	0,08	7,88	0,08
0,14	7,07	0,07	7,37	0,07	7,68	0,13
0,15	7,01	0,07	7,26	0,08	7,60	0,08
0,16	6,91	0,10	7,15	0,08	7,48	0,08
0,17	6,85	0,07	7,09	0,11	7,36	0,07
0,18	6,73	0,08	6,95	0,07	7,34	0,08
0,19	6,65	0,09	6,86	0,05	7,17	0,09
0,2	6,59	0,09	6,81	0,06	7,05	0,06
0,21	6,46	0,07	6,64	0,06	6,97	0,08
0,22	6,41	0,08	6,66	0,06	6,85	0,06
0,23	6,28	0,06	6,48	0,06	6,78	0,08
0,24	6,23	0,10	6,47	0,08	6,65	0,10
0,25	6,18	0,11	6,35	0,07	6,64	0,09
0,26	6,10	0,10	6,27	0,05	6,53	0,09
0,27	6,05	0,07	6,21	0,05	6,42	0,05
0,28	5,95	0,06	6,10	0,06	6,38	0,08
0,29	5,84	0,05	6,06	0,08	6,26	0,06
0,3	5,82	0,07	6,06	0,11	6,20	0,04
0,31	5,74	0,11	5,88	0,09	6,16	0,07
0,32	5,66	0,07	5,86	0,08	6,03	0,06
0,33	5,63	0,07	5,75	0,05	6,01	0,07
0,34	5,56	0,03	5,71	0,05	5,93	0,09
0,35	5,53	0,06	5,64	0,06	5,87	0,05
0,36	5,47	0,07	5,57	0,05	5,80	0,05
0,37	5,40	0,07	5,59	0,09	5,72	0,09
0,38	5,37	0,07	5,51	0,07	5,68	0,06
0,39	5,32	0,07	5,44	0,10	5,60	0,07
0,4	5,29	0,05	5,40	0,06	5,55	0,08
0,41	5,21	0,06	5,34	0,11	5,52	0,05
0,42	5,18	0,06	5,33	0,05	5,43	0,05
0,43	5,14	0,07	5,21	0,05	5,40	0,05
0,44	5,09	0,07	5,20	0,05	5,32	0,05
0,45	5,06	0,06	5,12	0,08	5,30	0,10
0,46	5,01	0,06	5,07	0,05	5,26	0,08
0,47	4,99	0,07	5,07	0,07	5,19	0,06
0,48	4,92	0,06	5,04	0,05	5,18	0,07
0,49	4,91	0,07	4,99	0,08	5,13	0,05
0,5	4,89	0,07	4,97	0,06	5,13	0,04
0,51	4,88	0,05	4,91	0,03	5,06	0,05
0,52	4,85	0,08	4,90	0,06	5,02	0,07
0,53	4,82	0,06	4,85	0,03	4,99	0,06
0,54	4,80	0,07	4,83	0,07	4,96	0,06
0,55	4,77	0,07	4,81	0,03	4,92	0,04
0,56	4,69	0,04	4,77	0,07	4,89	0,03
0,57	4,71	0,05	4,77	0,04	4,83	0,06
0,58	4,67	0,05	4,70	0,03	4,83	0,07
0,59	4,66	0,06	4,69	0,09	4,79	0,06
0,6	4,62	0,07	4,68	0,06	4,79	0,06
0,61	4,61	0,05	4,64	0,06	4,76	0,05
0,62	4,56	0,05	4,67	0,07	4,71	0,08
0,63	4,57	0,08	4,61	0,05	4,73	0,03
0,64	4,53	0,04	4,58	0,06	4,64	0,04
0,65	4,57	0,07	4,59	0,06	4,66	0,07

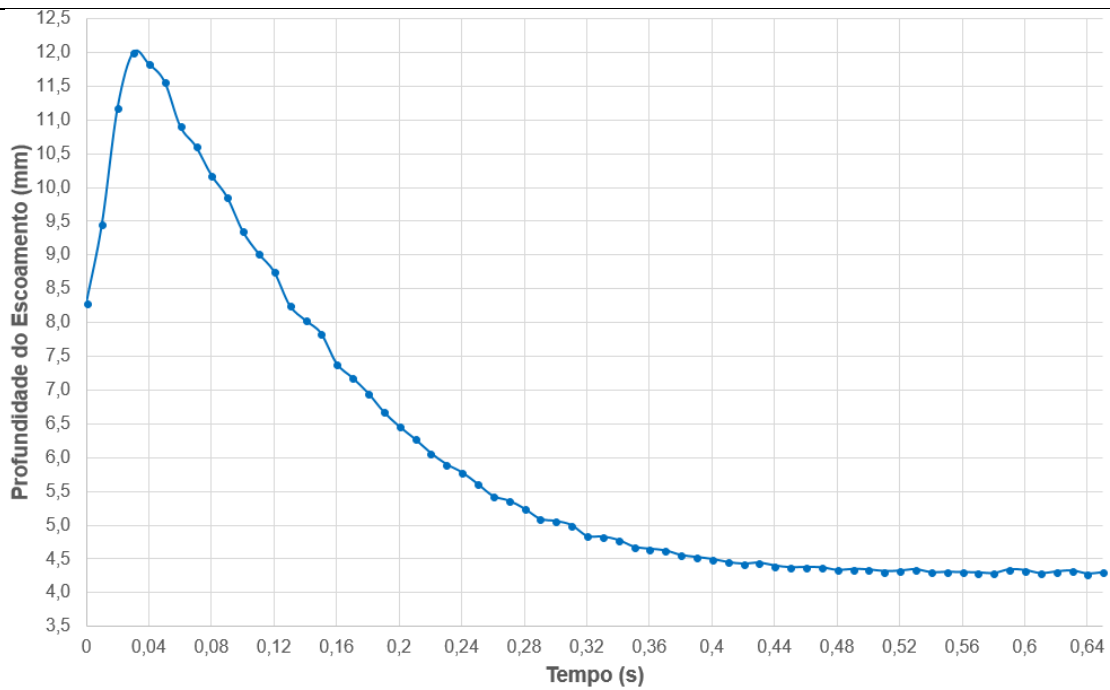
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Ultrassônico em P1 - C1G14R400
Profundidade de Escoamento (mm) X Tempo (s)



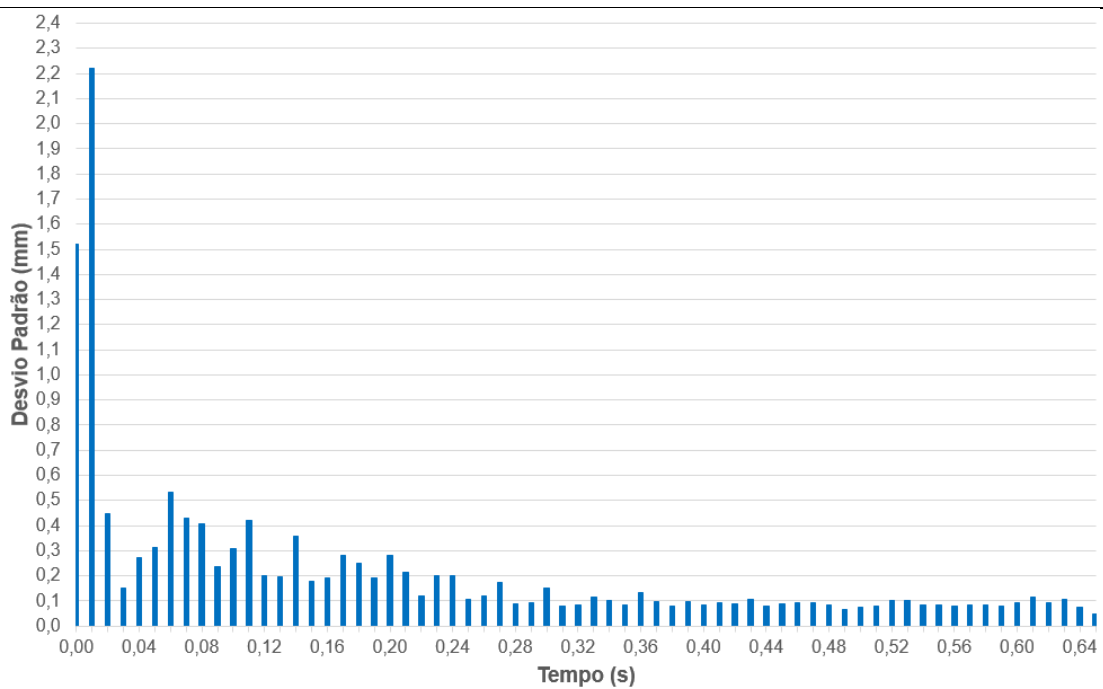
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Ultrassônico em P1 - C1G14R400
Desvio Padrão (mm) X Tempo (s)



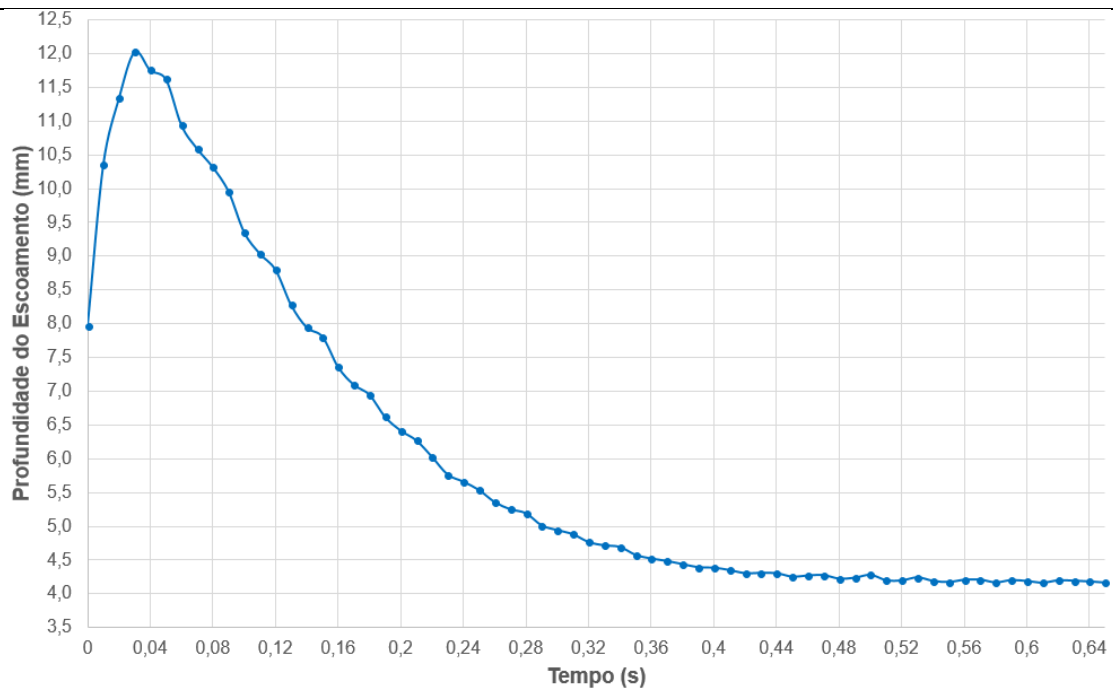
Perfil da Roll Wave - Sistema Ultrassônico em P1 - C1G14R420
Profundidade de Escoamento (mm) X Tempo (s)



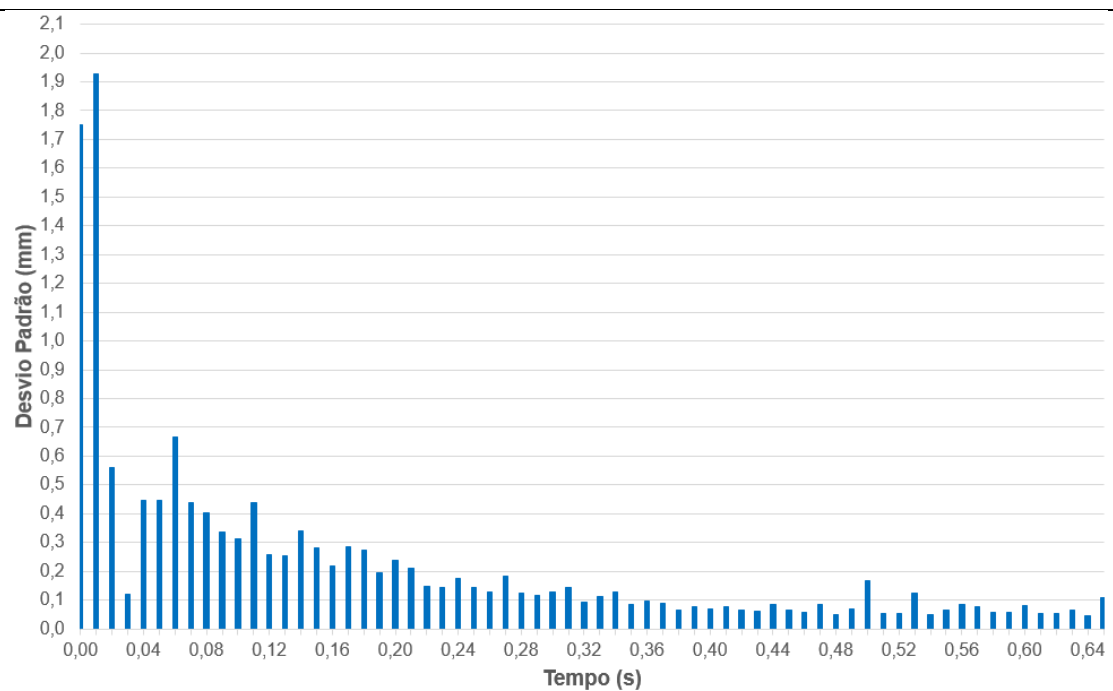
Perfil da Roll Wave - Sistema Ultrassônico em P1 - C1G14R420
Desvio Padrão (mm) X Tempo (s)



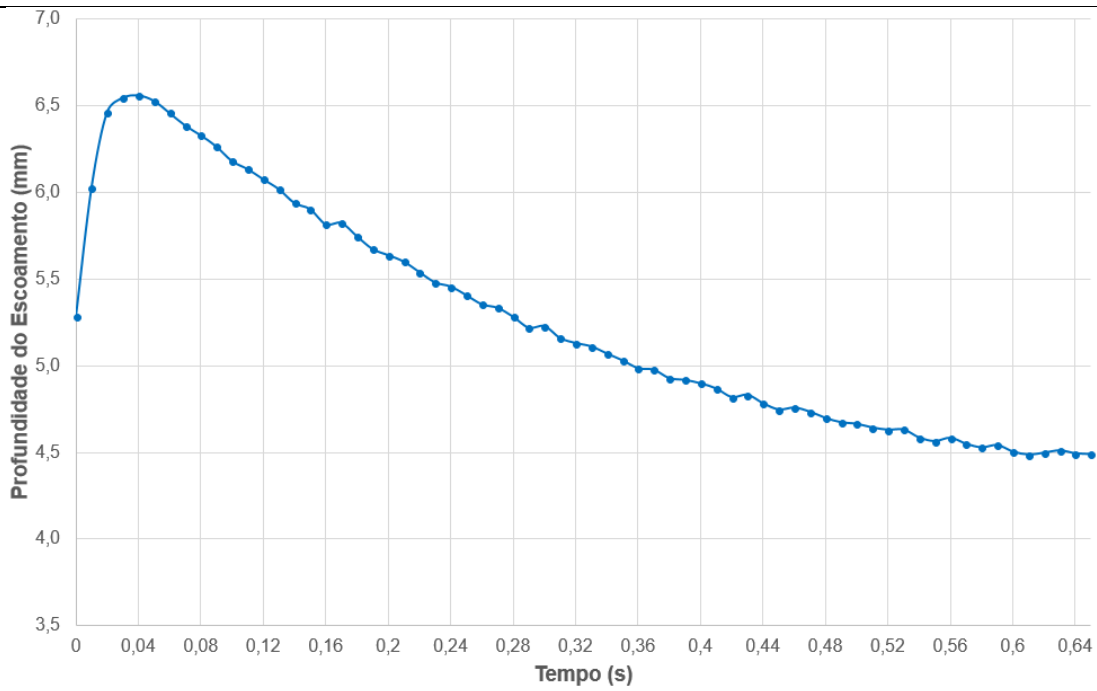
Perfil da Roll Wave - Sistema Ultrassônico em P1 - C1G14R440
Profundidade de Escoamento (mm) X Tempo (s)



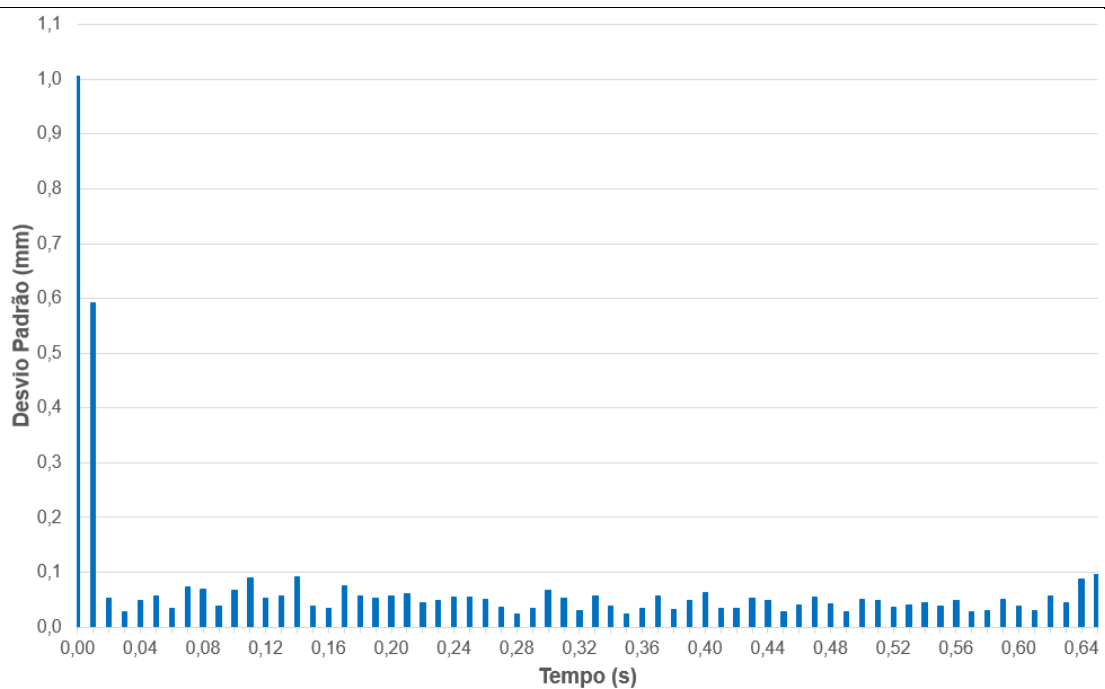
Perfil da Roll Wave - Sistema Ultrassônico em P1 - C1G14R440
Desvio Padrão (mm) X Tempo (s)



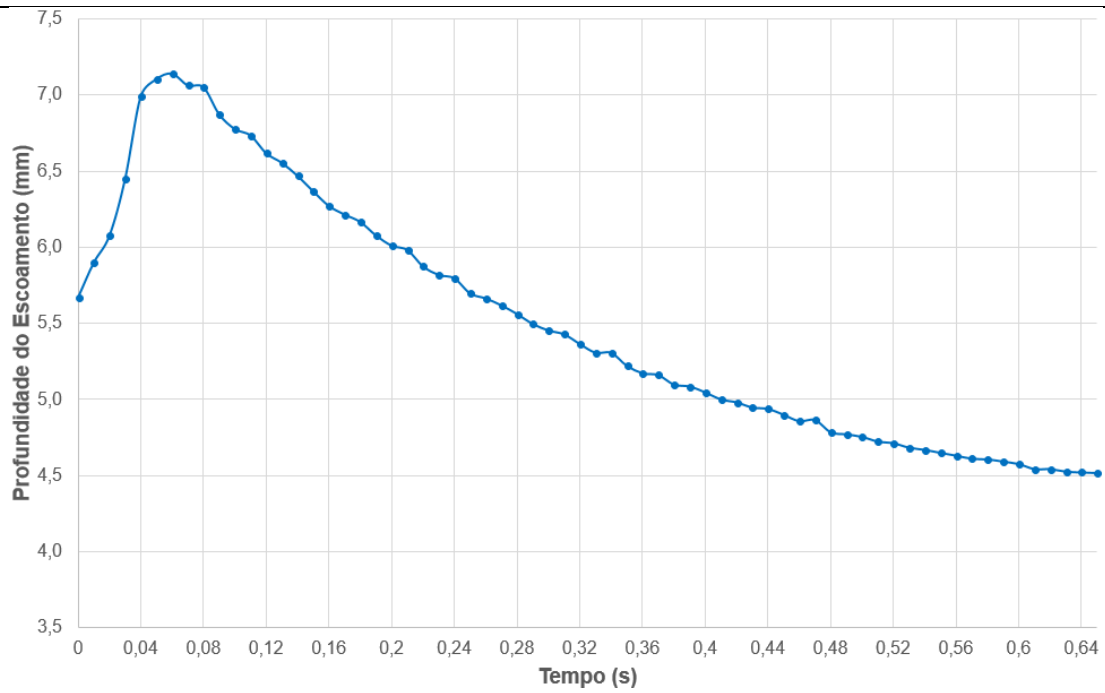
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Ultrassônico em P1 – C2G5R225
Profundidade de Escoamento (mm) X Tempo (s)



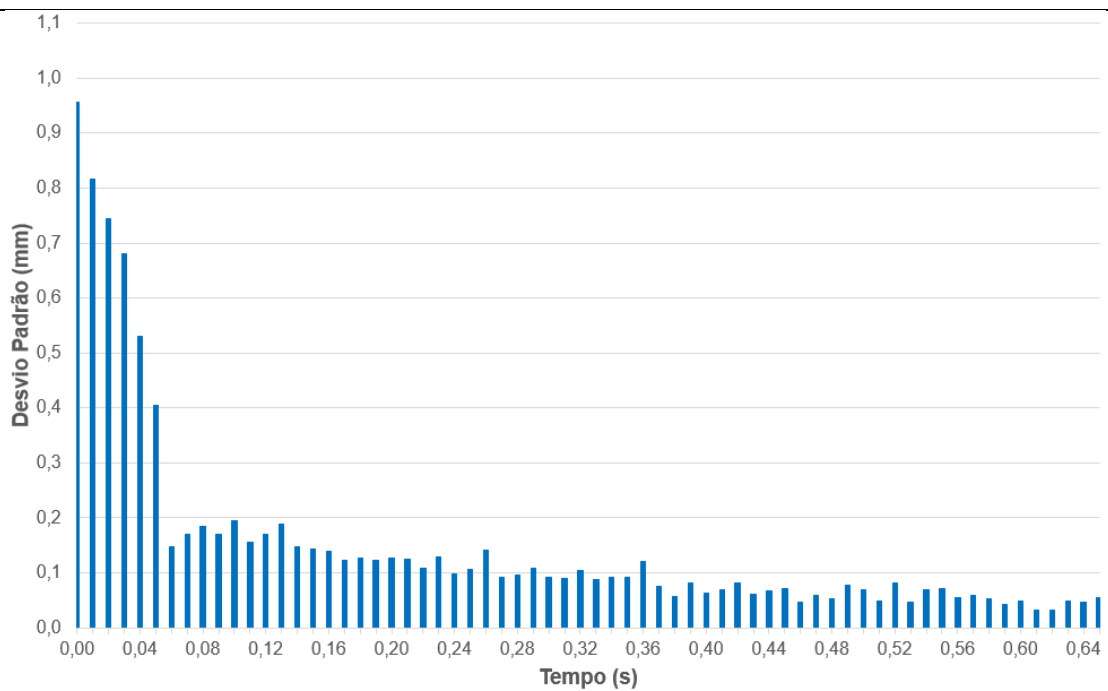
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Ultrassônico em P1 - C2G5R225
Desvio Padrão (mm) X Tempo (s)



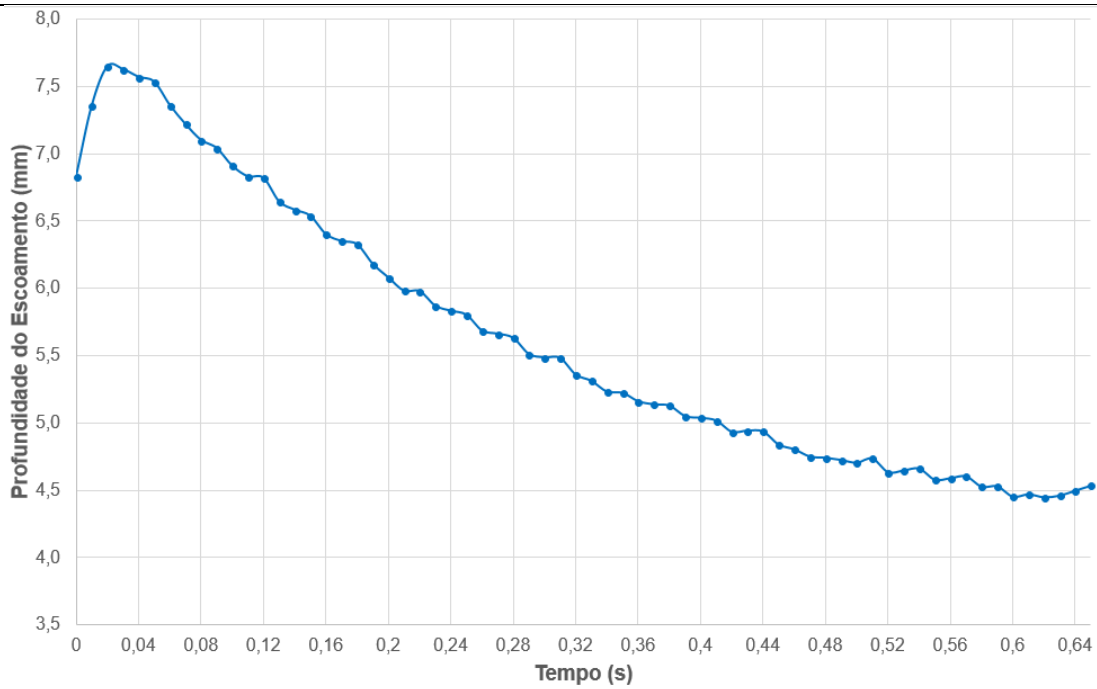
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Ultrassônico em P1 – C2G5R275
Profundidade de Escoamento (mm) X Tempo (s)



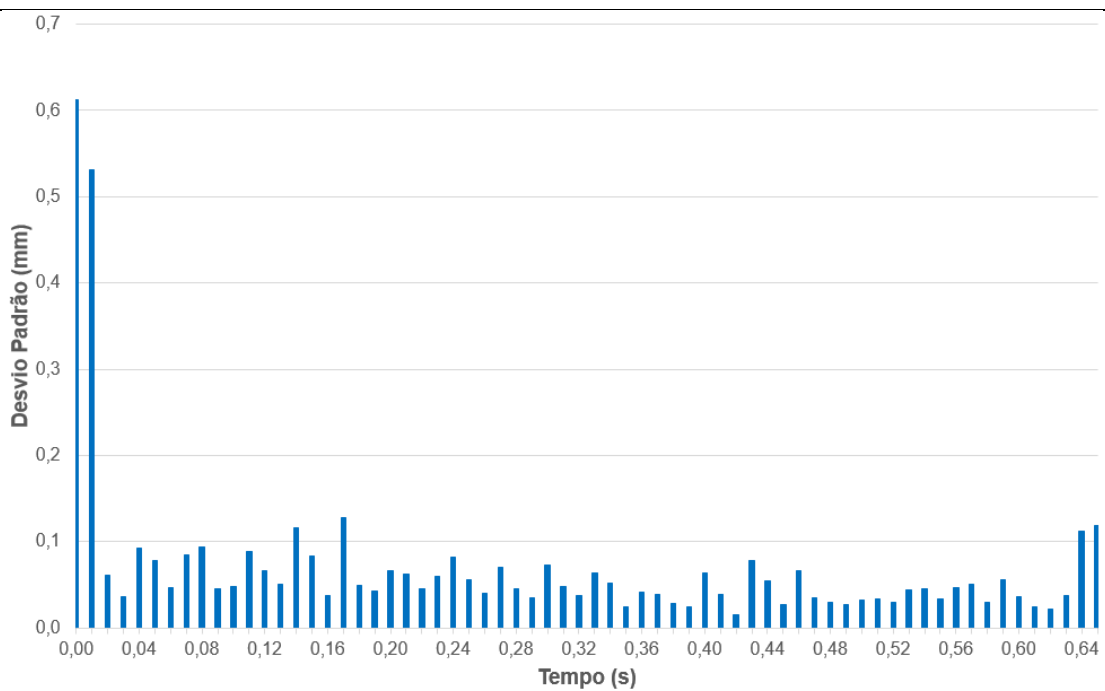
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Ultrassônico em P1 - C2G5R275
Desvio Padrão (mm) X Tempo (s)



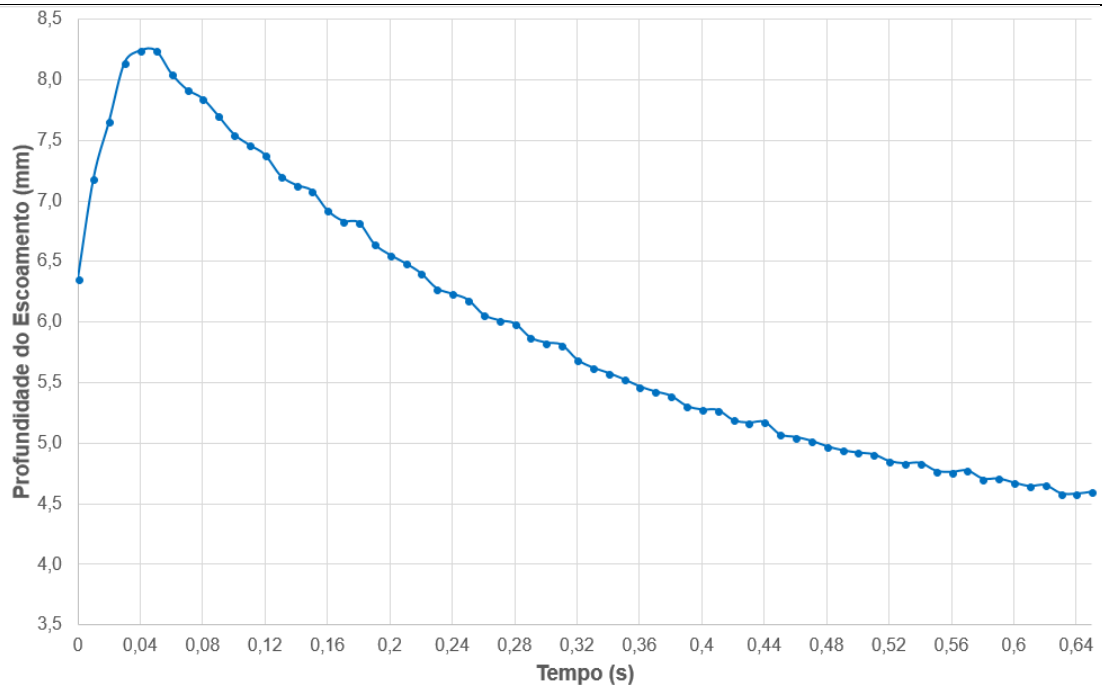
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Ultrassônico em P1 – C2G5R325
Profundidade de Escoamento (mm) X Tempo (s)



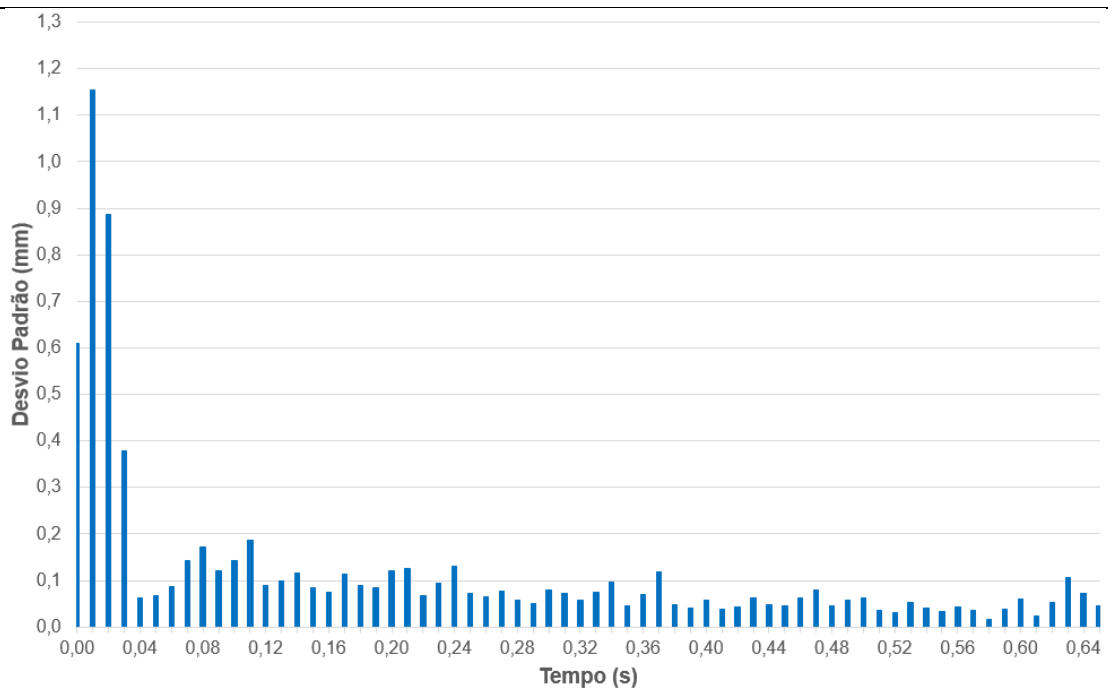
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Ultrassônico em P1 - C2G5R325
Desvio Padrão (mm) X Tempo (s)



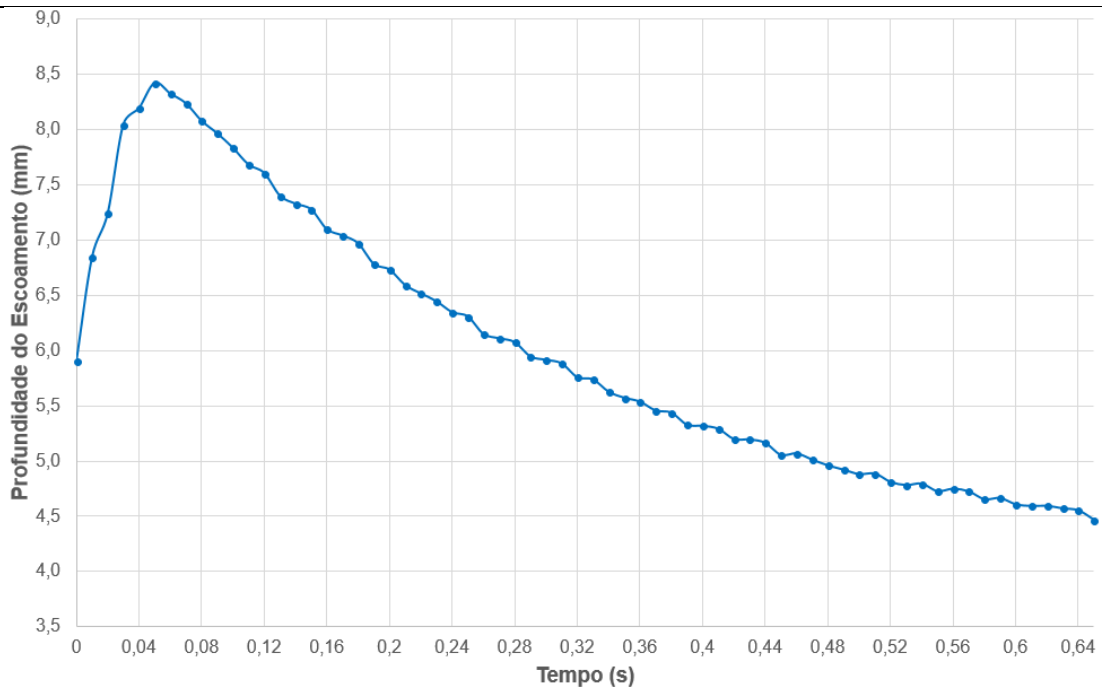
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Ultrassônico em P1 – C2G5R375
Profundidade de Escoamento (mm) X Tempo (s)



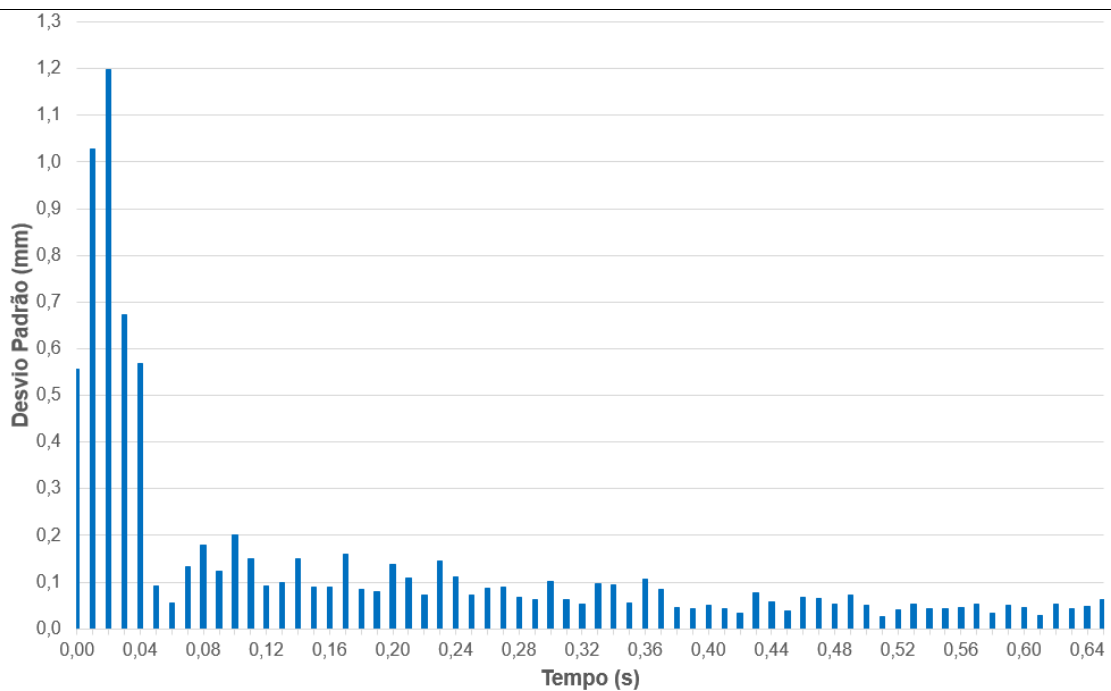
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Ultrassônico em P1 - C2G5R375
Desvio Padrão (mm) X Tempo (s)



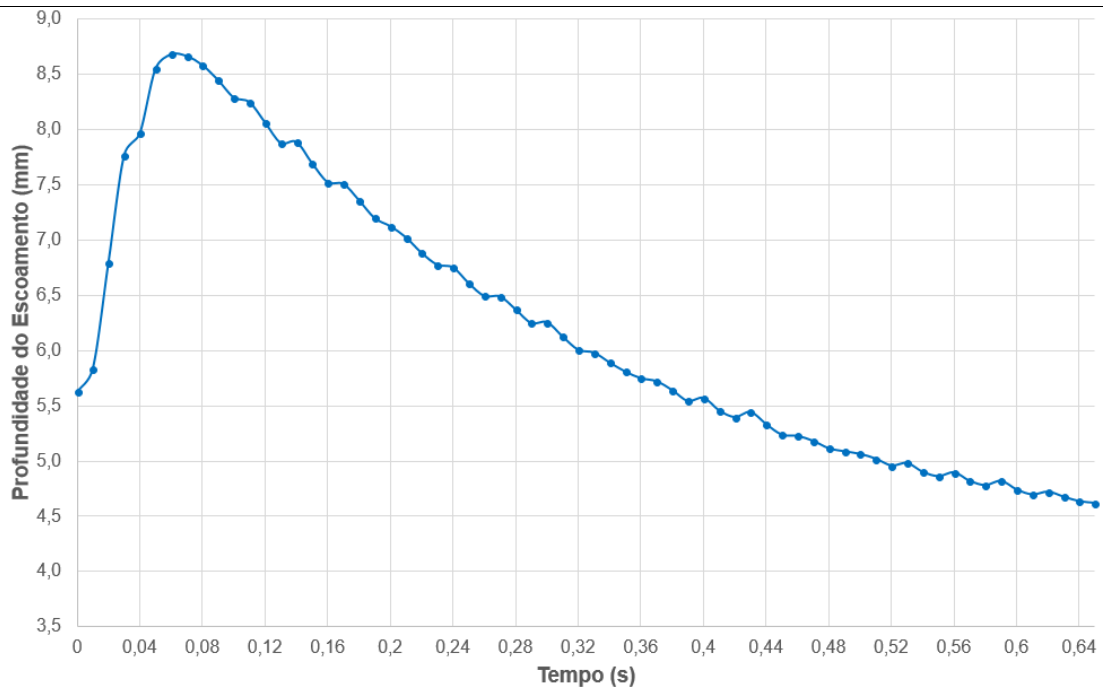
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Ultrassônico em P1 – C2G5R425
Profundidade de Escoamento (mm) X Tempo (s)



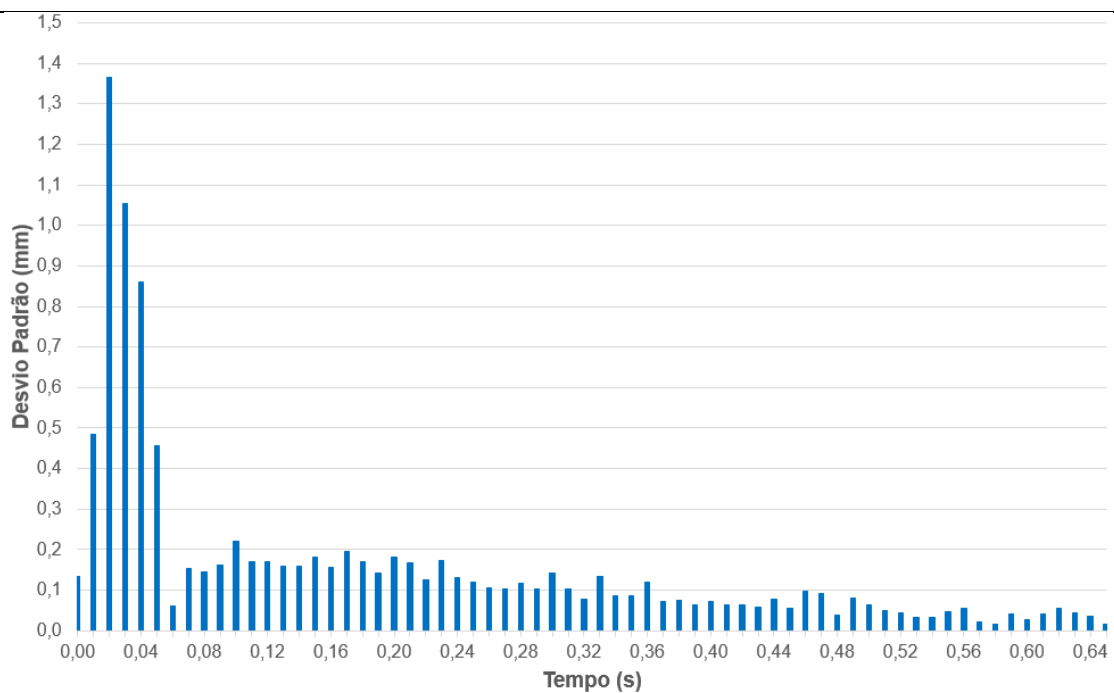
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Ultrassônico em P1 - C2G5R425
Desvio Padrão (mm) X Tempo (s)



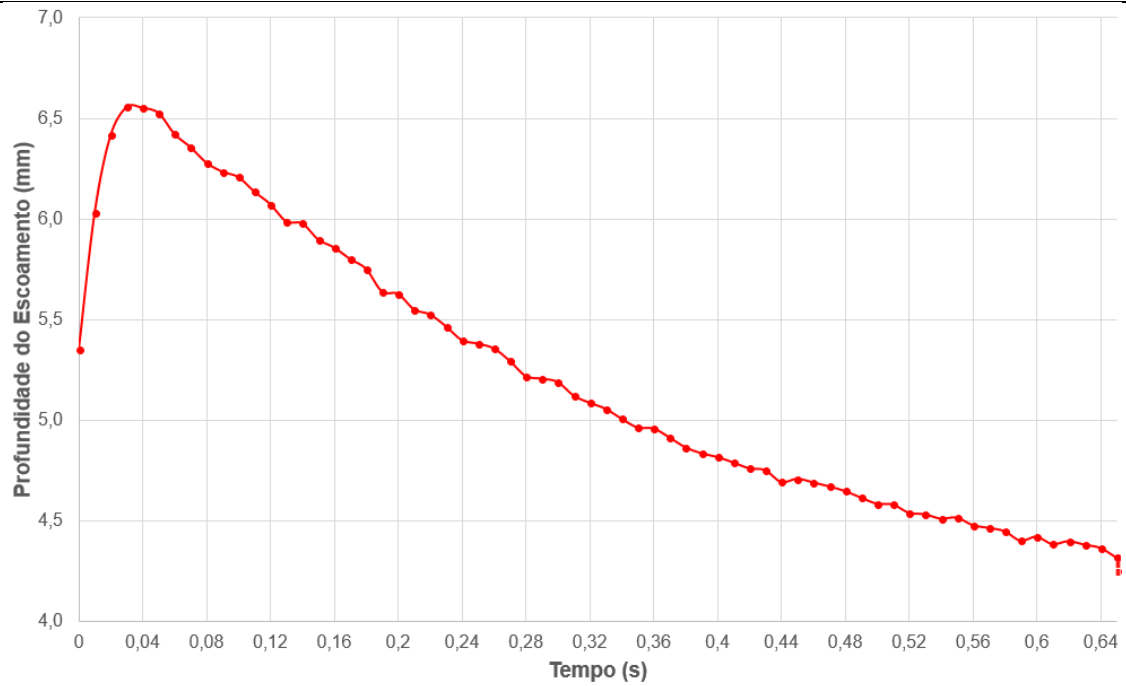
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Ultrassônico em P1 – C2G5R475
Profundidade de Escoamento (mm) X Tempo (s)



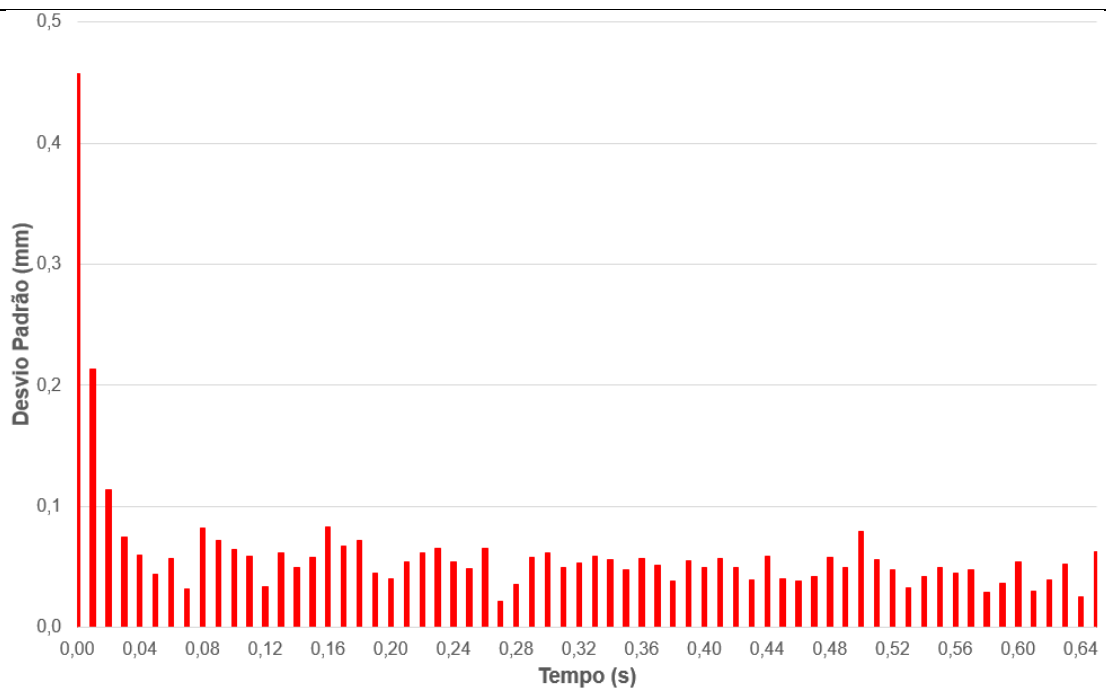
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Ultrassônico em P1 - C2G5R475
Desvio Padrão (mm) X Tempo (s)



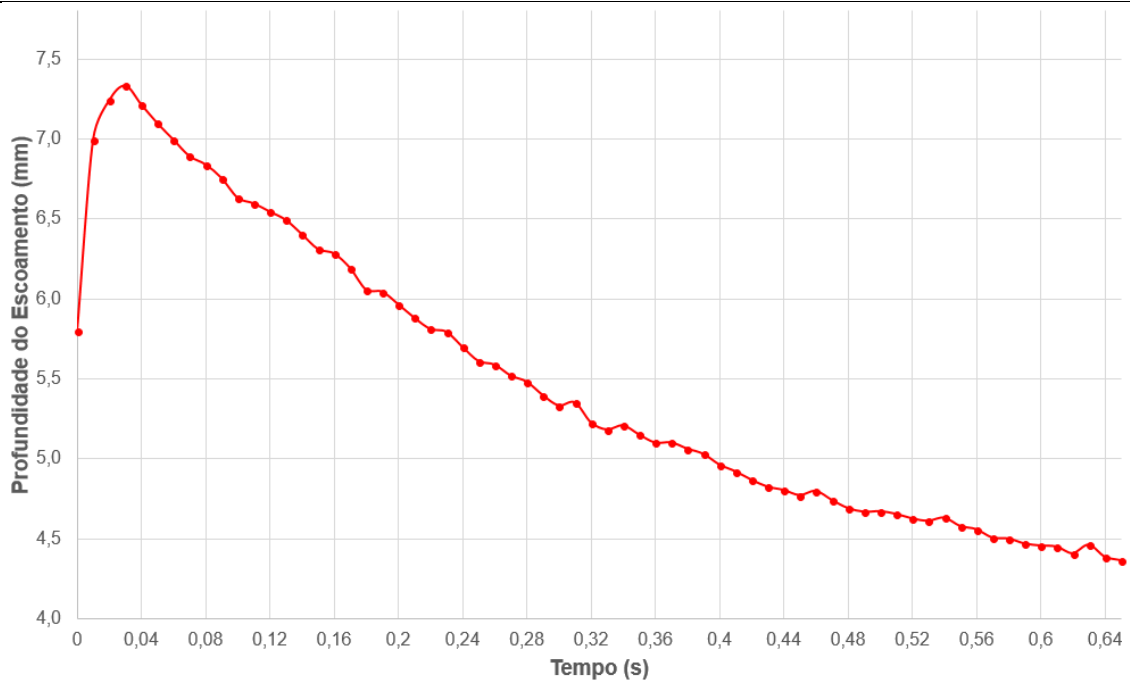
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Fotométrico em P1 – C2G5R225
Profundidade de Escoamento (mm) X Tempo (s)



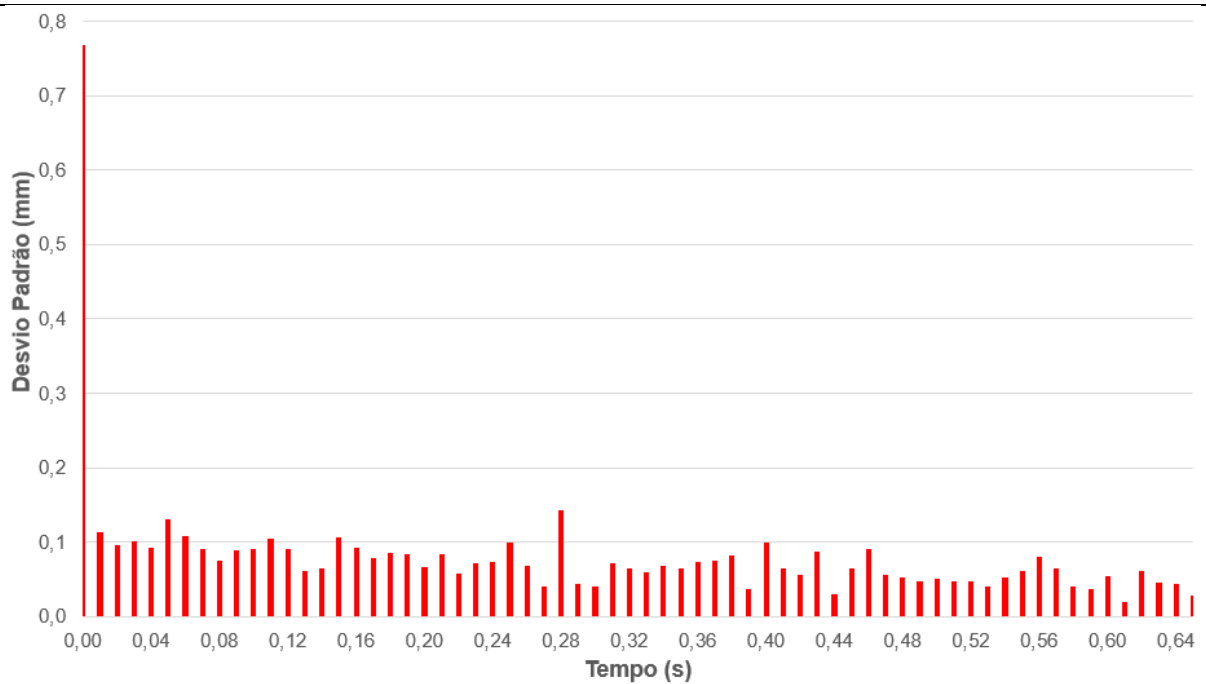
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Fotométrico em P1 - C2G5R225
Desvio Padrão (mm) X Tempo (s)



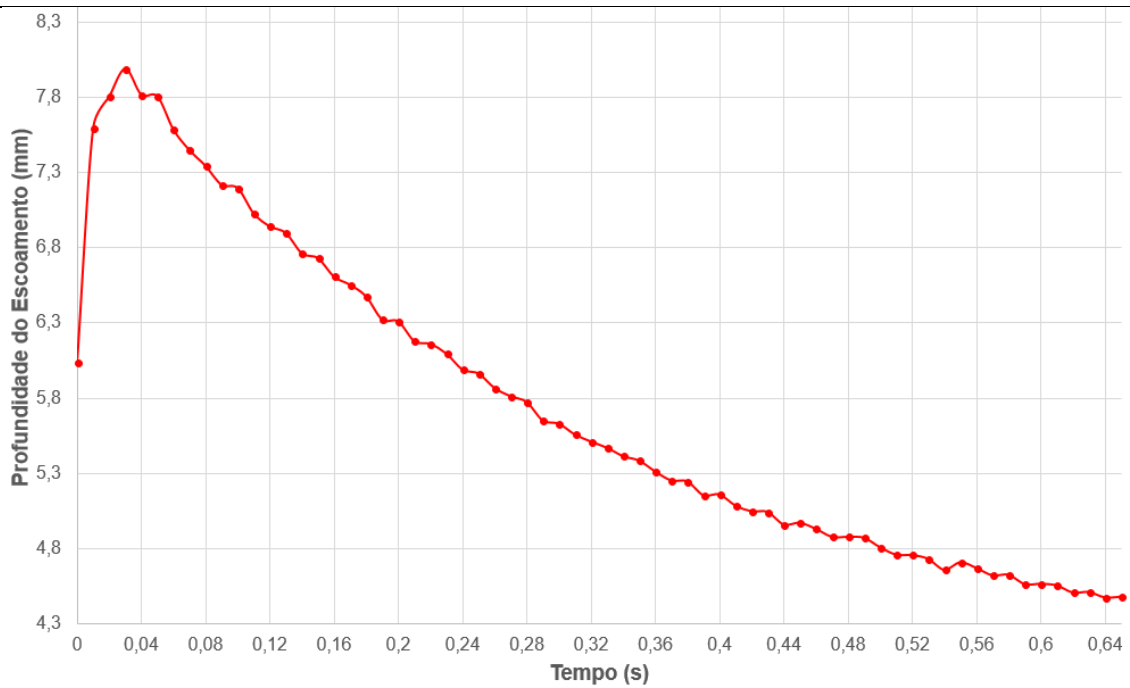
Perfil da Roll Wave - Sistema Fotométrico em P1 – C2G5R275
Profundidade de Escoamento (mm) X Tempo (s)



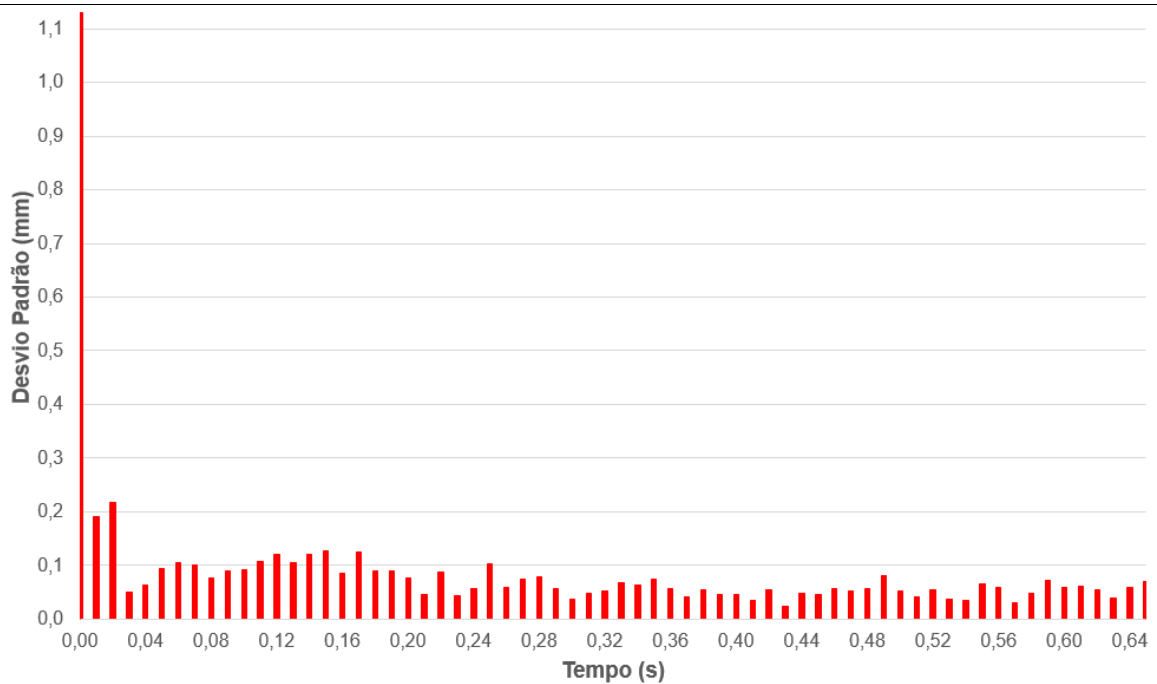
Perfil da Roll Wave - Sistema Fotométrico em P1 - C2G5R275
Desvio Padrão (mm) X Tempo (s)



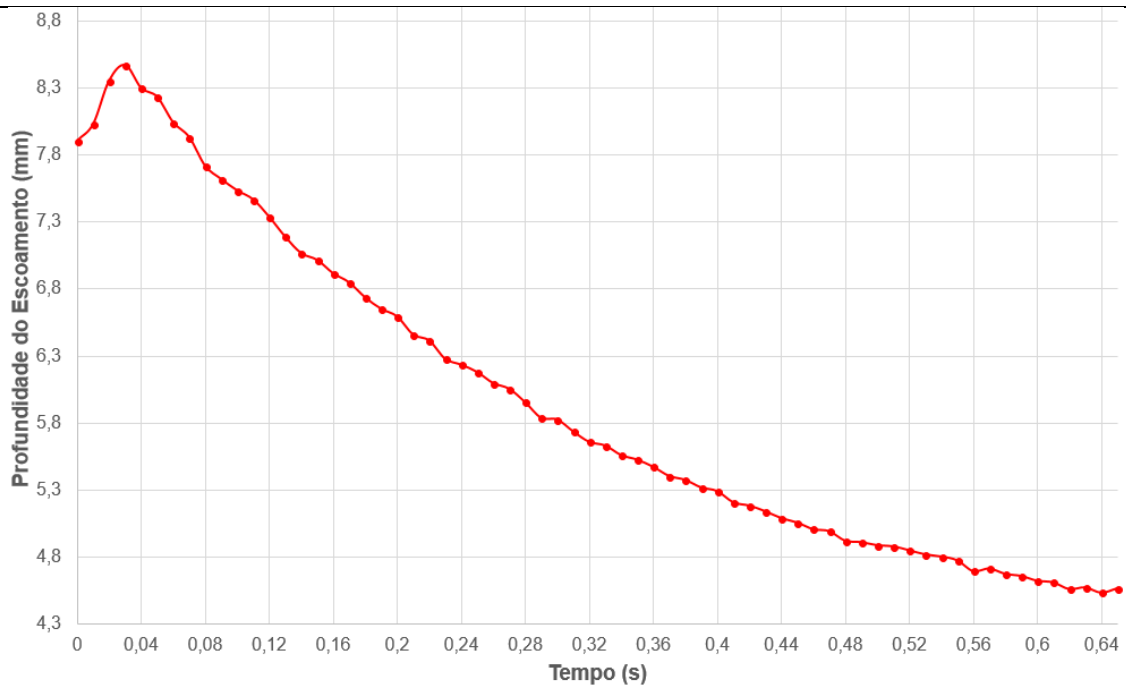
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Fotométrico em P1 – C2G5R325
Profundidade de Escoamento (mm) X Tempo (s)



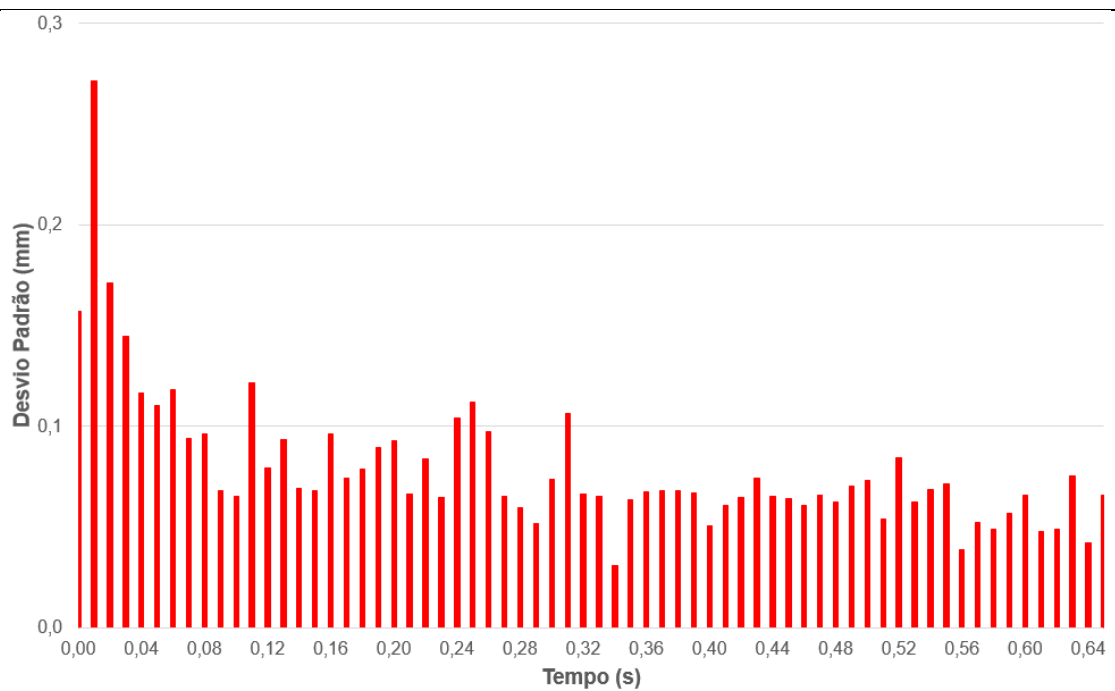
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Fotométrico em P1 - C2G5R325
Desvio Padrão (mm) X Tempo (s)



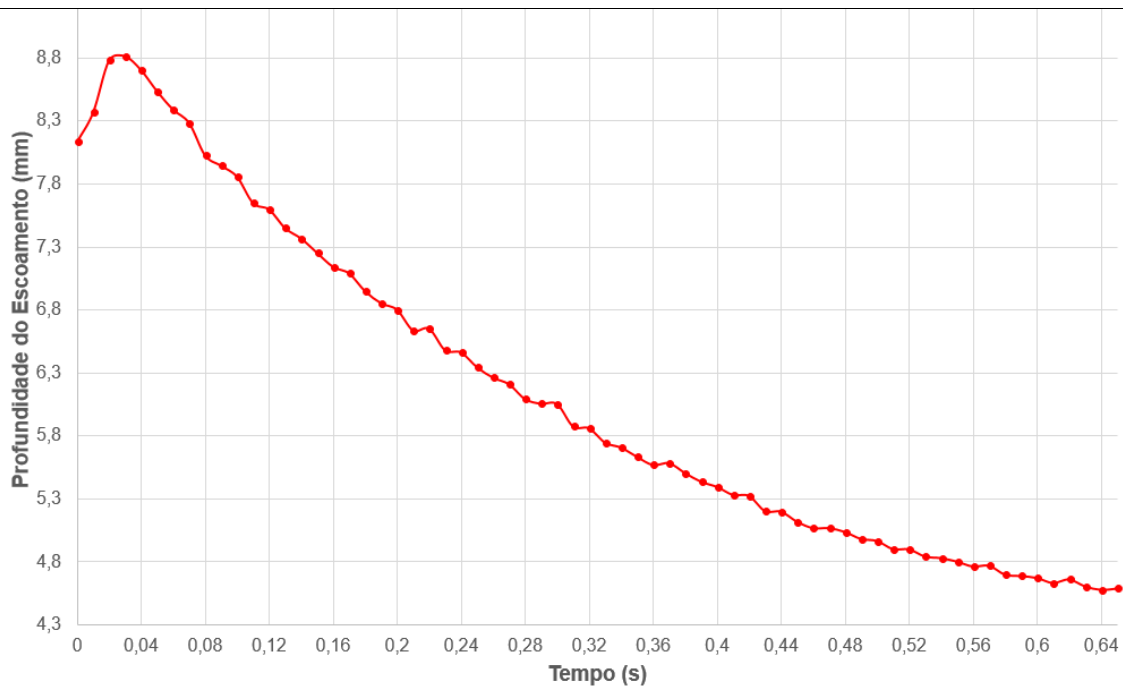
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Fotométrico em P1 – C2G5R375
Profundidade de Escoamento (mm) X Tempo (s)



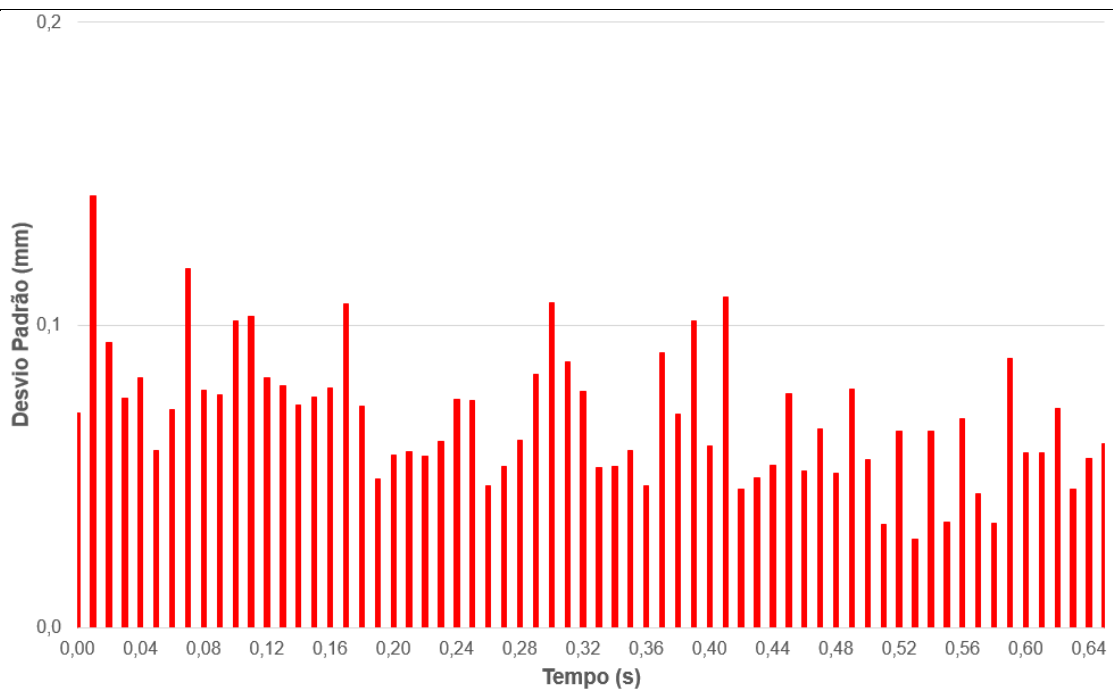
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Fotométrico em P1 - C2G5R375
Desvio Padrão (mm) X Tempo (s)



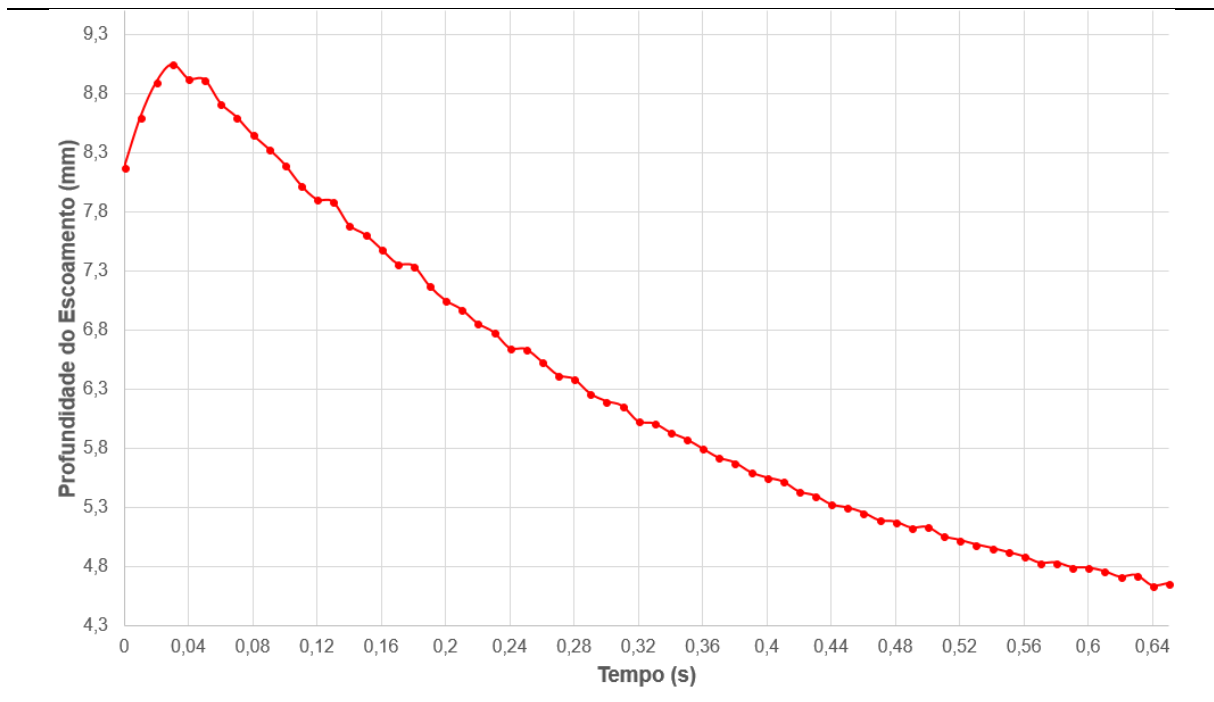
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Fotométrico em P1 – C2G5R425
Profundidade de Escoamento (mm) X Tempo (s)



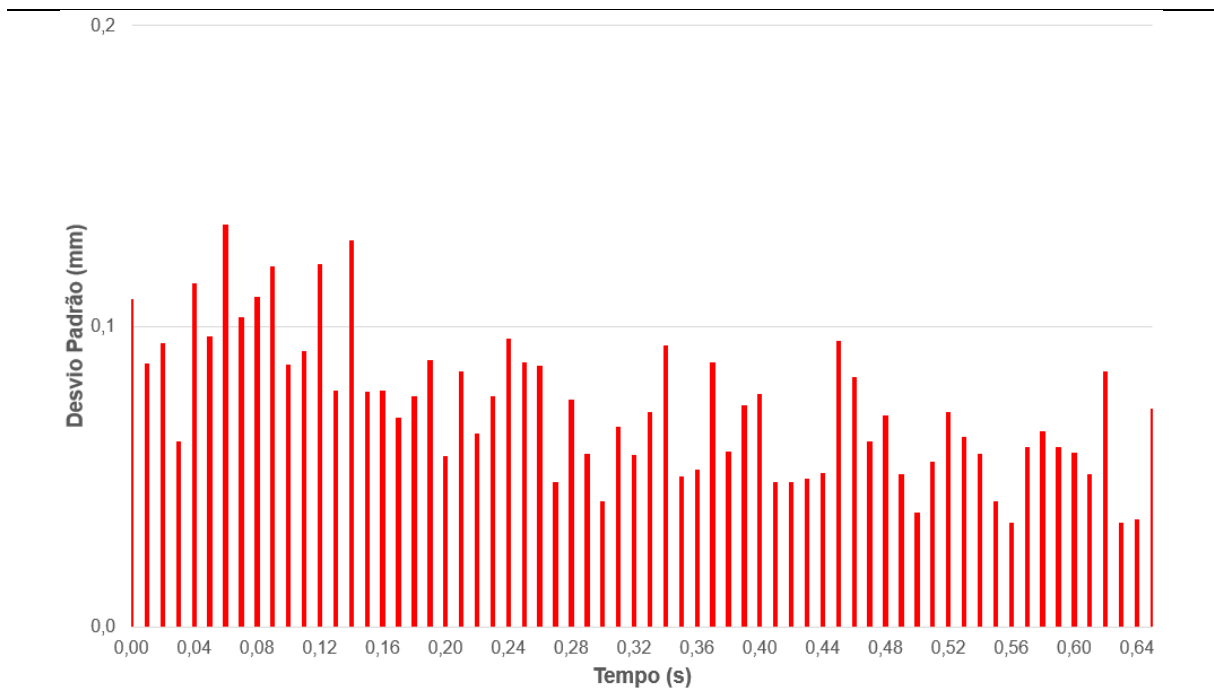
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Fotométrico em P1 - C2G5R425
Desvio Padrão (mm) X Tempo (s)



Perfil da *Roll Wave* - Sistema Fotométrico em P1 – C2G5R475
Profundidade de Escoamento (mm) X Tempo (s)



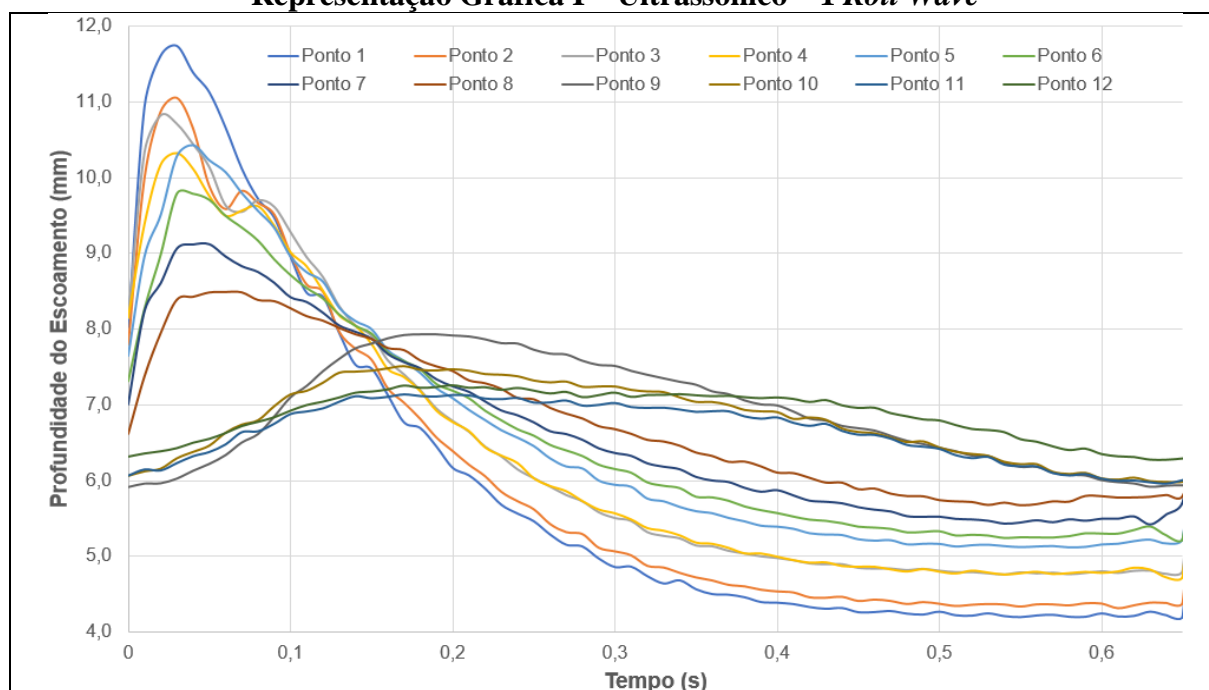
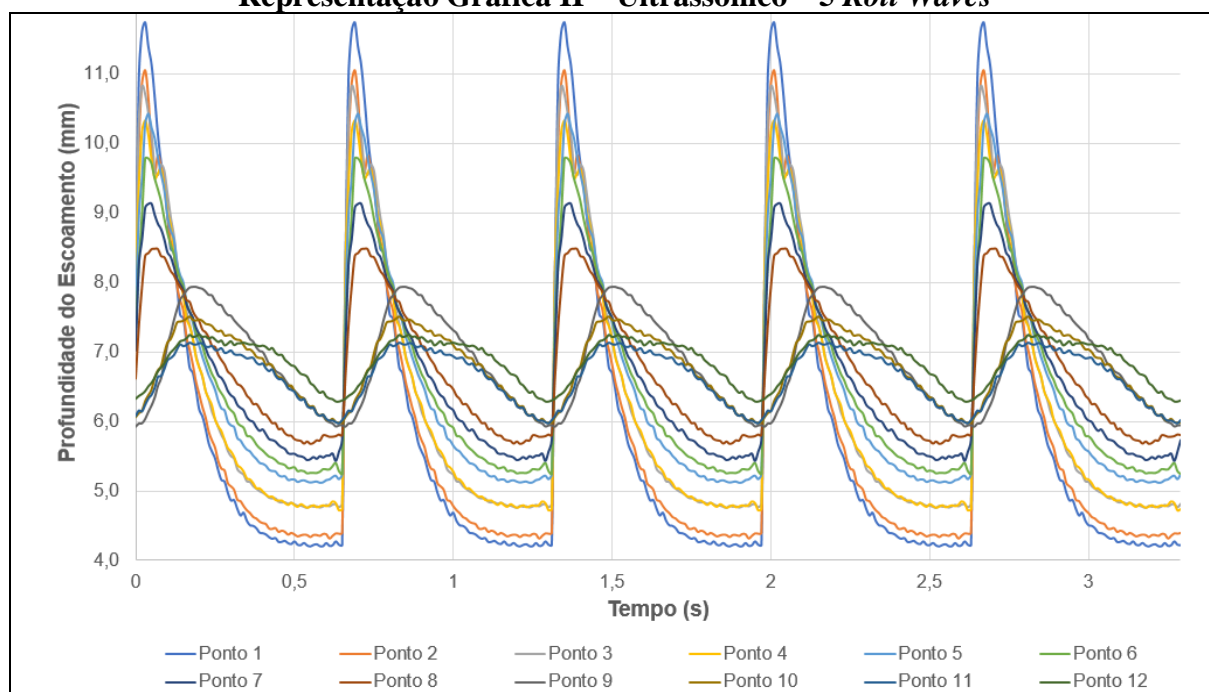
Perfil da *Roll Wave* - Sistema Fotométrico em P1 - C2G5R475
Desvio Padrão (mm) X Tempo (s)



APÊNDICE C – FICHA TÉCNICA DOS ENSAIOS

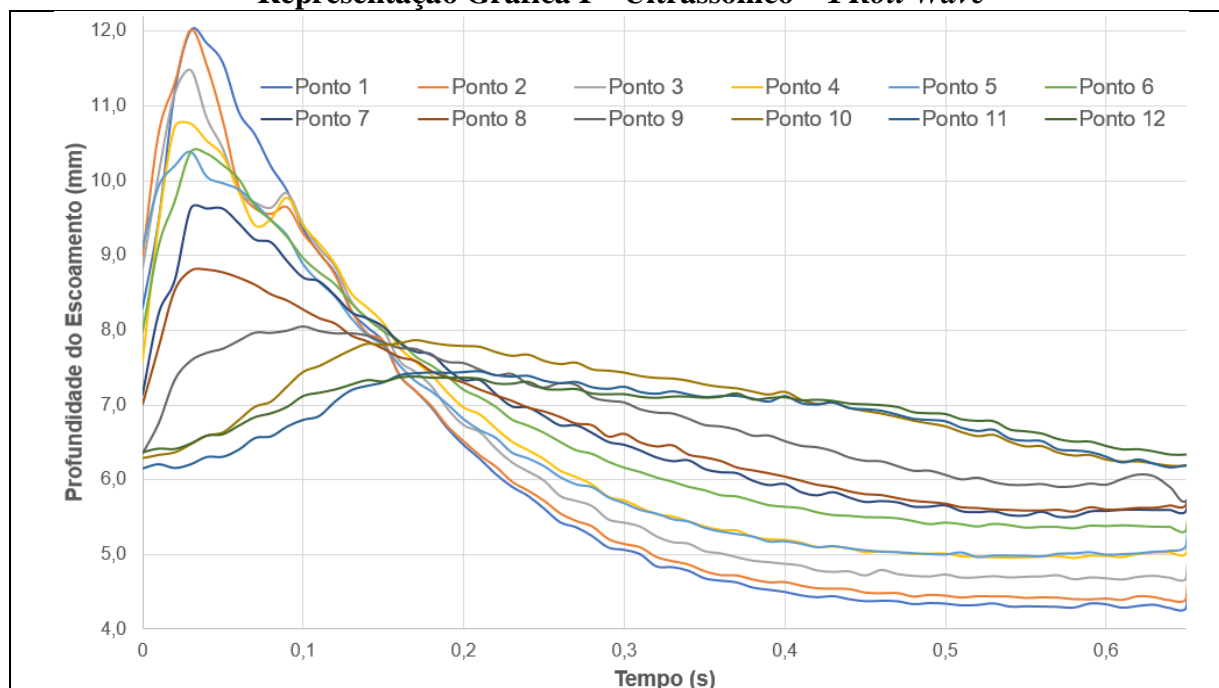
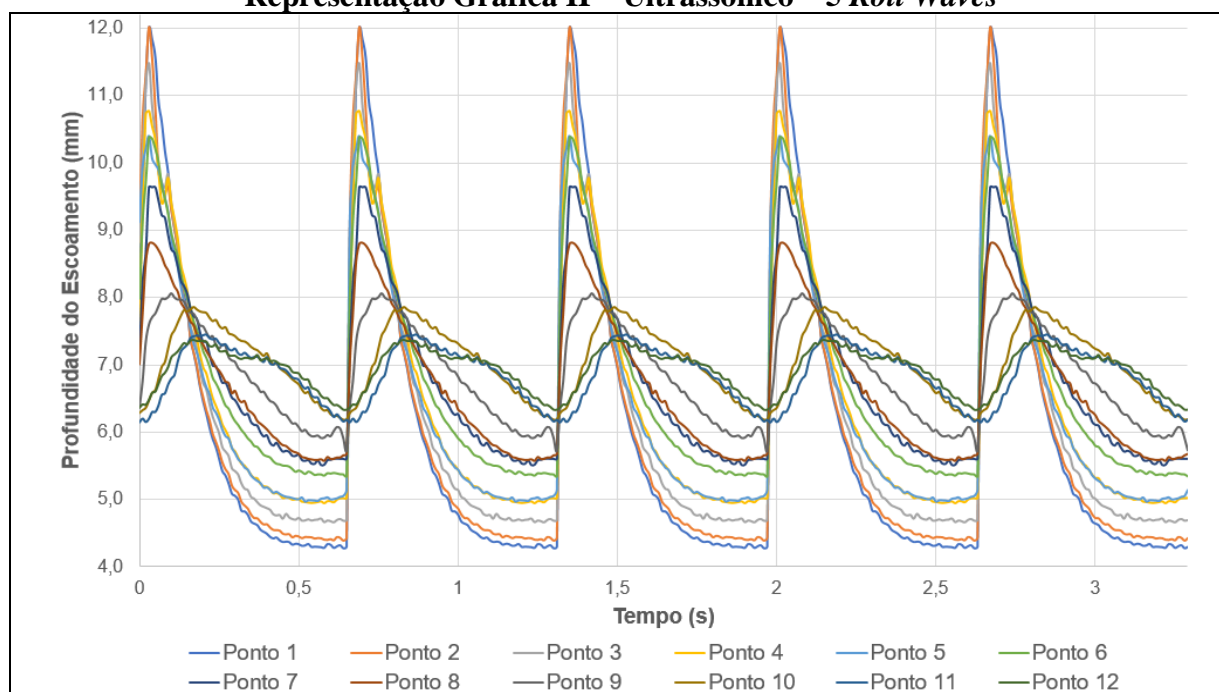
FICHA TÉCNICA DE ENSAIOS

Identificação do Ensaio					Configuração do Canal							
C1G14R400					Ensaio: Campanha 1 Inclinação do Canal: 14 graus Rotação da Bomba: 400 RPM							
Parâmetros Medidos no Canal sem Perturbação					Parâmetros Calculados – Canal sem Perturbação							
Vazão (Q): 0,00038 (m^3/s) Velocidade na Superfície (u_s): 0,222 (m/s) Lâmina do Escoamento (h_0): 7,255 (mm)					Velocidade Média (\bar{u}_0): 0,171 (m/s) Número de Froude (Fr): 0,646 Número de Reynolds (Re): 22,632							
Reologia do Fluido												
Fluido de Teste: Gel de Carbopol Composição: Água, Hidróxido de Sódio Carbopol Concentração Inicial: 0,12% C Carb Modelo: Não-newtoniano - Herschel Bulkley					Tensão Limite (τ_c): 0,400 (Pa) Índice de Escoamento (n): 0,626 Índice Consistência (K_n): 0,176 ($Pa \cdot s^n$) Massa Específica (ρ): 1000 (kg/m^3)							
Parâmetros Medidos no Canal com Perturbação – P1					Parâmetros Calculados no Canal com Perturbação (Sist. Fotométrico)							
Ultrassônico					Período da <i>Roll Wave</i> : 0,65 (s) Frequência da <i>Roll Wave</i> : 1,5 (Hz)							
Lâmina Baixa (h_1)		4,194 (mm)										
Amplitude (Δh)		7,551 (mm)										
Comparação dos Sistemas de Medição e Simulação												
Sist. Ultrassônico					Ponto 1 (P1), Ponto 2 (P2), Ponto 3 (P3), Ponto 4 (P4), Ponto 5 (P5), Ponto (P6), Ponto 7 (P7), Ponto 8 (P8), Ponto 9 (P9), Ponto 10 (P10), Ponto 11 (P11) e Ponto (P12)							
Parâmetros Medidos no Canal com Perturbação (Sist. Ultrassônico)												
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Lâmina Baixa (h_1) (mm)	4,194	4,319	4,757	4,720	5,113	5,238	5,429	5,679	5,921	5,985	5,969	6,278
Amplitude (Δh) (mm)	7,551	6,731	6,064	5,607	5,319	4,546	3,699	2,811	2,017	1,523	1,166	0,973
	Média – P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11 e P12					Desvio Padrão – P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11 e P12						
Lâmina Baixa (h_1) (mm)	5,300					0,692						
Amplitude (Δh) (mm)	4,001					2,291						

Representação Gráfica I – Ultrassônico – 1 Roll Wave**Representação Gráfica II – Ultrassônico – 5 Roll Waves**

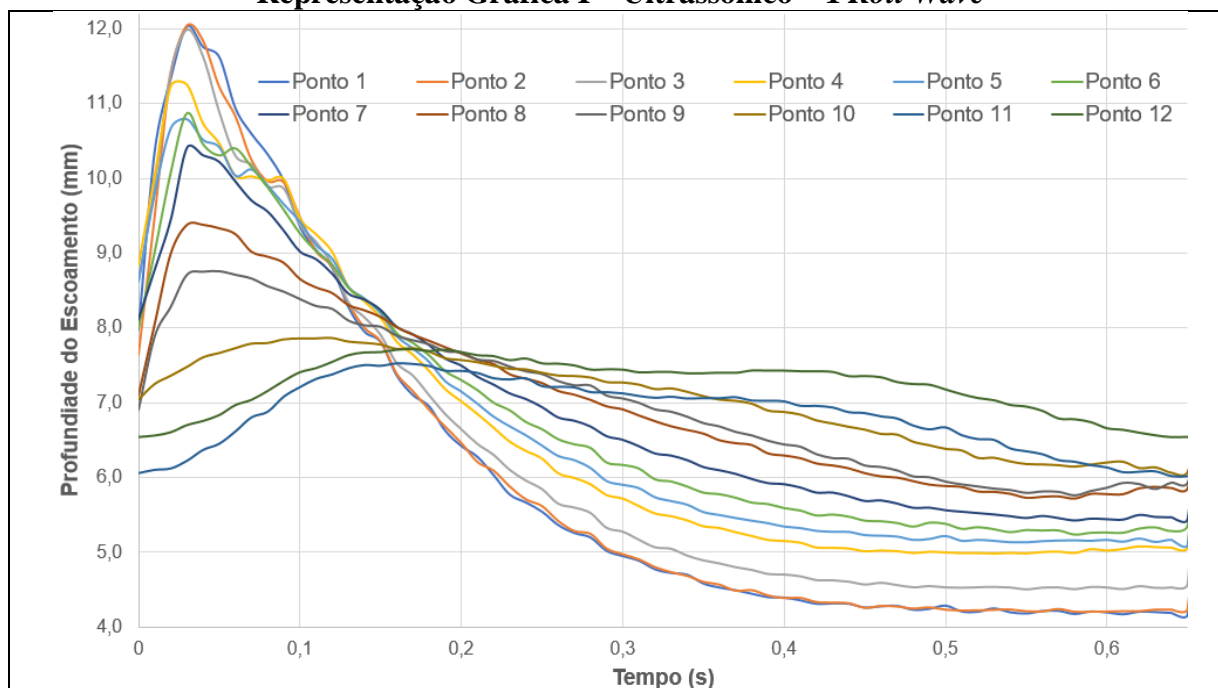
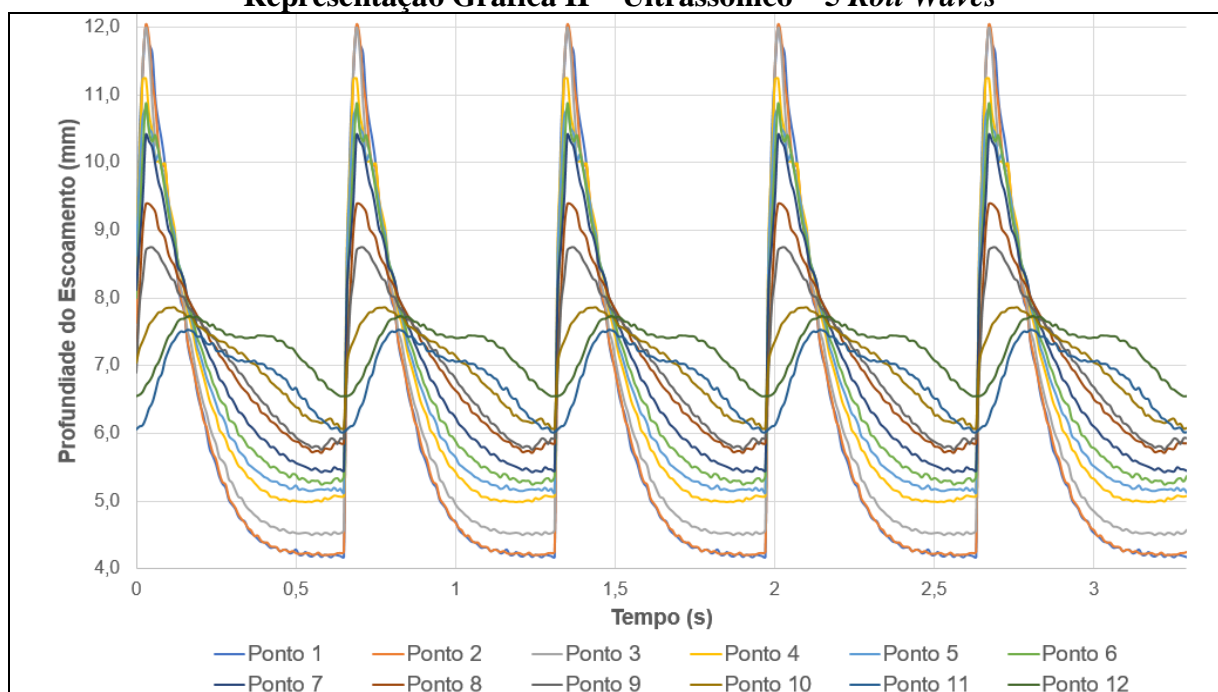
FICHA TÉCNICA DE ENSAIOS

Identificação do Ensaio		Configuração do Canal										
C1G14R420		Ensaio: Campanha 1 Inclinação do Canal: 14 graus Rotação da Bomba: 420 RPM										
Parâmetros Medidos no Canal sem Perturbação		Parâmetros Calculados – Canal sem Perturbação										
Vazão (Q): 0,00044 (m^3/s) Velocidade na Superfície (u_s): 0,225 (m/s) Lâmina do Escoamento (h_0): 7,394 (mm)		Velocidade Média (\bar{u}_0): 0,197 (m/s) Número de Froude (Fr): 0,739 Número de Reynolds (Re): 27,512										
Reologia do Fluido												
Fluido de Teste: Gel de Carbopol Composição: Água, Hidróxido de Sódio Carbopol Concentração Inicial: 0,12% C Carb Modelo: Não-newtoniano - Herschel Bulkley		Tensão Limite (τ_c): 0,400 (Pa) Índice de Escoamento (n): 0,626 Índice Consistência (K_n): 0,176 ($Pa \cdot s^n$) Massa Específica (ρ): 1000 (kg/m^3)										
Parâmetros Medidos no Canal com Perturbação – P1		Parâmetros Calculados no Canal com Perturbação (Sist. Fotométrico)										
	Ultrassônico	Período da <i>Roll Wave</i> : 0,65 (s) Frequência da <i>Roll Wave</i> : 1,5 (Hz)										
Lâmina Baixa (h_1)	4,280 (mm)											
Amplitude (Δh)	7,725 (mm)											
Comparação dos Sistemas de Medição e Simulação												
Sist. Ultrassônico		Ponto 1 (P1), Ponto 2 (P2), Ponto 3 (P3), Ponto 4 (P4), Ponto 5 (P5), Ponto 6 (P6), Ponto 7 (P7), Ponto 8 (P8), Ponto 9 (P9), Ponto 10 (P10), Ponto 11 (P11) e Ponto (P12)										
Parâmetros Medidos no Canal com Perturbação (Sist. Ultrassônico)												
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Lâmina Baixa (h_1) (mm)	4,280	4,392	4,660	4,949	4,964	5,346	5,506	5,571	5,727	6,192	6,145	6,334
Amplitude (Δh) (mm)	7,725	7,629	6,815	5,822	5,428	5,042	4,128	3,238	2,330	1,673	1,299	1,042
	Média – P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11 e P12					Desvio Padrão – P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11 e P12						
Lâmina Baixa (h_1) (mm)	5,339					0,699						
Amplitude (Δh) (mm)	4,348					2,427						

Representação Gráfica I – Ultrassônico – 1 Roll Wave**Representação Gráfica II – Ultrassônico – 5 Roll Waves**

FICHA TÉCNICA DE ENSAIOS

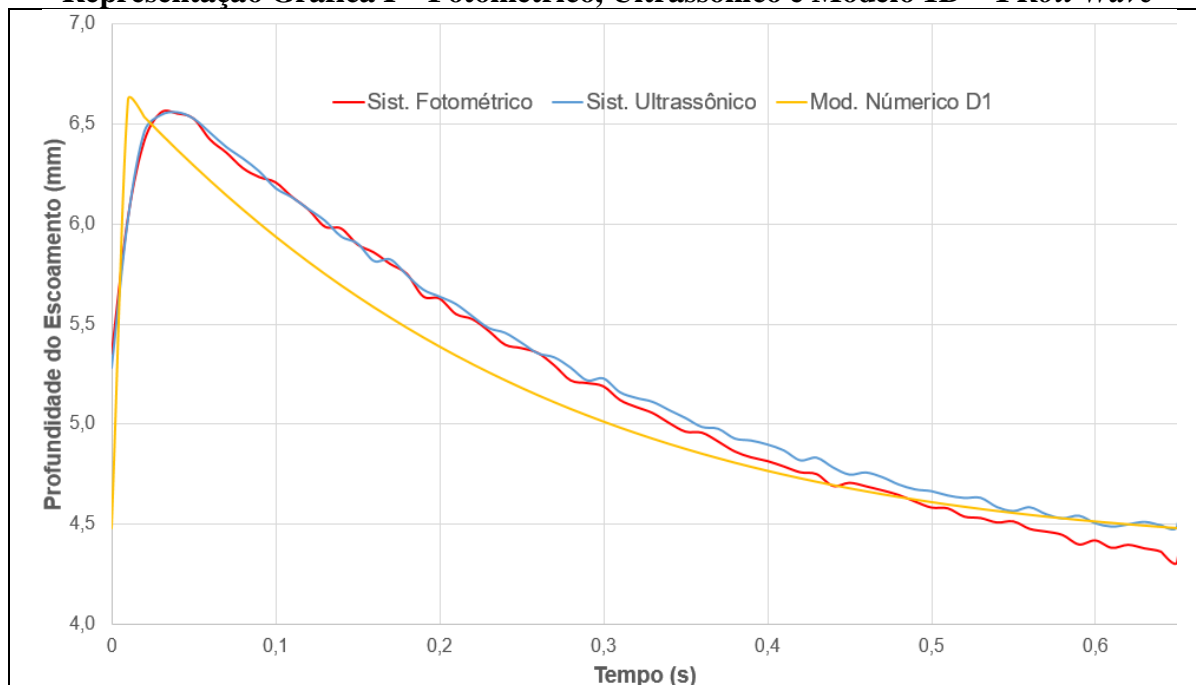
Identificação do Ensaio		Configuração do Canal										
C1G14R440		Ensaio: Campanha 1 Inclinação do Canal: 14 graus Rotação da Bomba: 440 RPM										
Parâmetros Medidos no Canal sem Perturbação		Parâmetros Calculados – Canal sem Perturbação										
Vazão (Q): 0,00046 (m^3/s) Velocidade na Superfície (u_s): 0,246 (m/s) Lâmina do Escoamento (h_0): 7,449 (mm)		Velocidade Média (\bar{u}_0): 0,211 (m/s) Número de Froude (Fr): 0,804 Número de Reynolds (Re): 29,851										
Reologia do Fluido												
Fluido de Teste: Gel de Carbopol Composição: Água, Hidróxido de Sódio Carbopol Concentração Inicial: 0,12% C Carb Modelo: Não-newtoniano - Herschel Bulkley		Tensão Limite (τ_c): 0,400 (Pa) Índice de Escoamento (n): 0,626 Índice Consistência (K_n): 0,176 ($Pa \cdot s^n$) Massa Específica (ρ): 1000 (kg/m^3)										
Parâmetros Medidos no Canal com Perturbação – P1		Parâmetros Calculados no Canal com Perturbação (Sist. Fotométrico)										
	Ultrassônico	Período da <i>Roll Wave</i> : 0,65 (s) Frequência da <i>Roll Wave</i> : 1,5 (Hz)										
Lâmina Baixa (h_1)	4,169 (mm)											
Amplitude (Δh)	7,861 (mm)											
Comparação dos Sistemas de Medição e Simulação												
Sist. Ultrassônico		Ponto 1 (P1), Ponto 2 (P2), Ponto 3 (P3), Ponto 4 (P4), Ponto 5 (P5), Ponto (P6), Ponto 7 (P7), Ponto 8 (P8), Ponto 9 (P9), Ponto 10 (P10), Ponto 11 (P11) e Ponto (P12)										
Parâmetros Medidos no Canal com Perturbação (Sist. Ultrassônico)												
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Lâmina Baixa (h_1) (mm)	4,169	4,208	4,504	4,977	5,114	5,233	5,427	5,717	5,759	6,064	6,019	6,542
Amplitude (Δh) (mm)	7,861	7,834	7,486	6,272	5,679	5,646	4,978	3,670	2,994	1,801	1,517	1,181
	Média – P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11 e P12					Desvio Padrão – P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11 e P12						
Lâmina Baixa (h_1) (mm)	5,311					0,756						
Amplitude (Δh) (mm)	4,743					2,465						

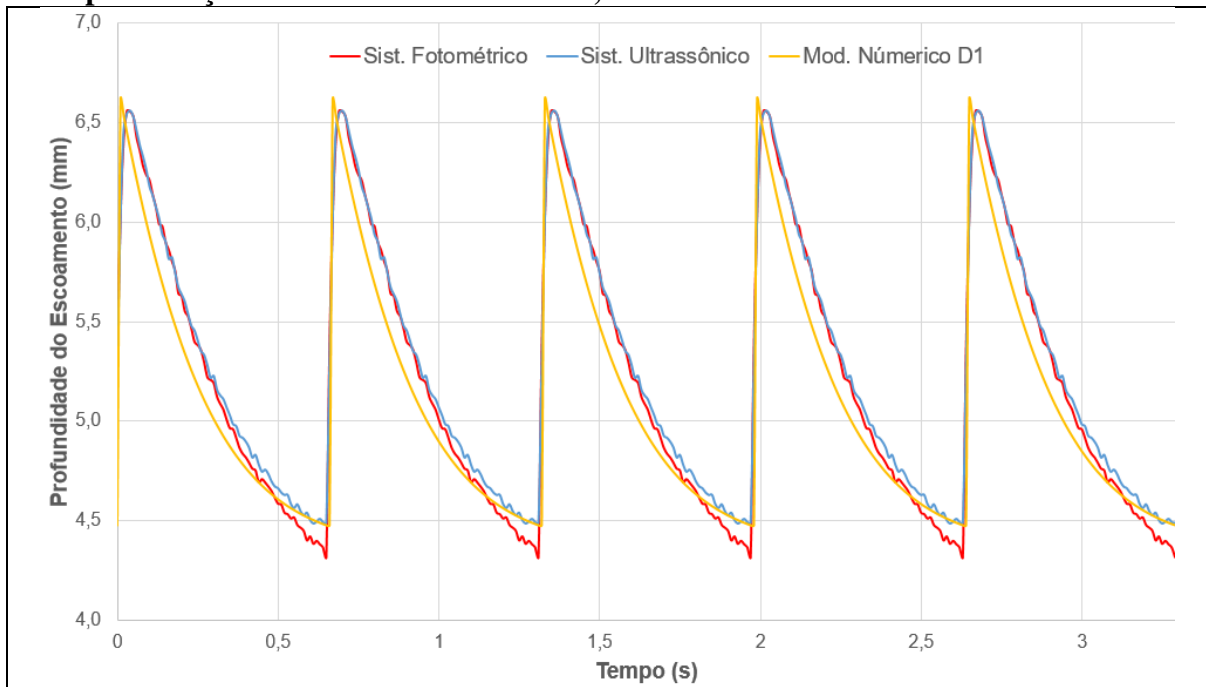
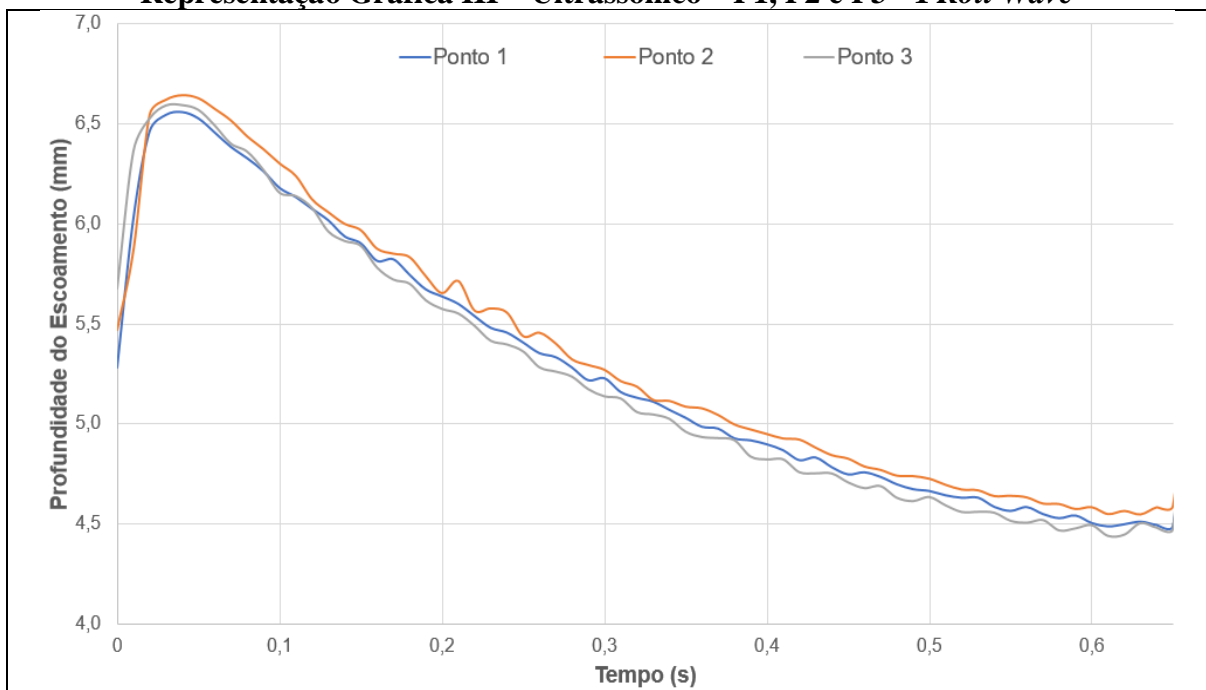
Representação Gráfica I – Ultrassônico – 1 Roll Wave**Representação Gráfica II – Ultrassônico – 5 Roll Waves**

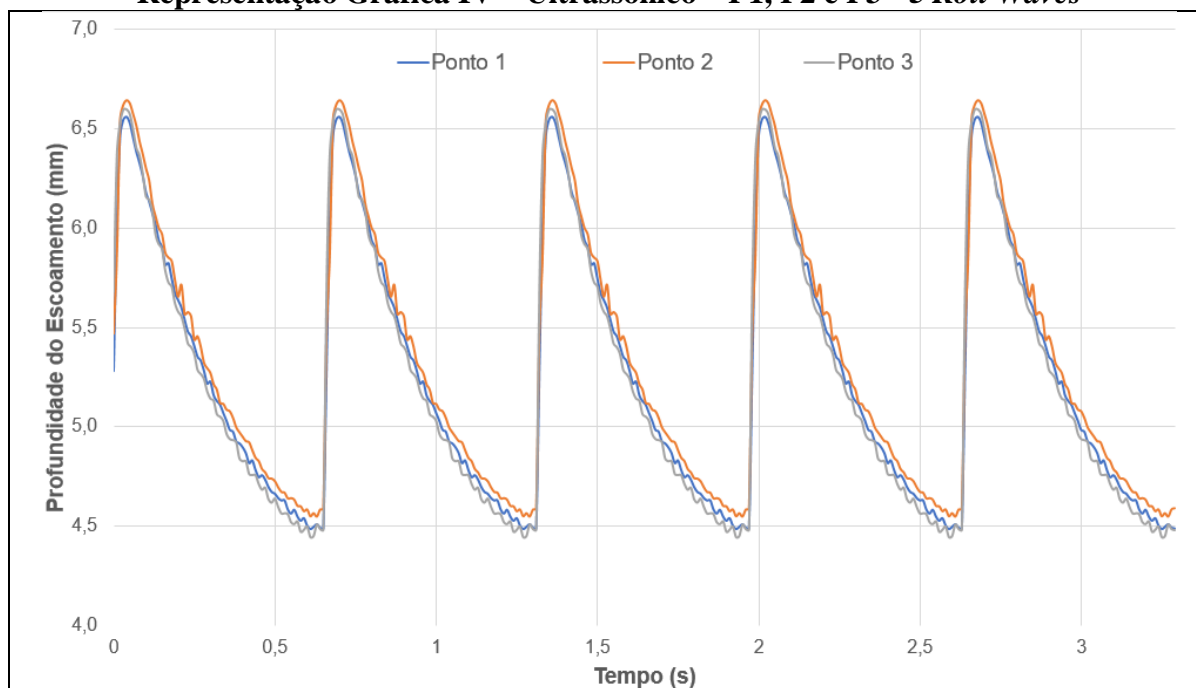
FICHA TÉCNICA DE ENSAIOS

Identificação do Ensaio		Configuração do Canal	
C2G5R225		Ensaio: Campanha 2 Inclinação do Canal: 5 graus Rotação da Bomba: 225 RPM	
Parâmetros Medidos no Canal sem Perturbação		Parâmetros Calculados – Canal sem Perturbação	
Vazão (Q): 0,00022 (m^3/s) Velocidade na Superfície (u_s): 0,176 (m/s) Lâmina do Escoamento (h_0): 5,49 (mm)		Velocidade Média (\bar{u}_0): 0,134 (m/s) Número de Froude (Fr): 0,577 Número de Reynolds (Re): 10,918	
Reologia do Fluido			
Fluido de Teste: Gel de Carbopol Composição: Água, Hidróxido de Sódio Carbopol e Azul de Metileno Concentração Inicial: 0,12% C Carb e 3,40% C AzM Modelo: Não-newtoniano - Herschel Bulkley		Tensão Limite (τ_c): 0,400 (Pa) Índice de Escoamento (n): 0,710 Índice Consistência (K_n): 0,171 ($Pa \cdot s^n$) Massa Específica (ρ): 1035 (kg/m^3)	
Parâmetros Medidos no Canal com Perturbação – P1		Parâmetros Calculados no Canal com Perturbação (Sist. Fotométrico)	
	Fotométrico	Ultrassônico	Comprimento de <i>Roll Wave</i> : 243,00 (mm) Período da <i>Roll Wave</i> : 0,65 (s) Frequência da <i>Roll Wave</i> : 1,5 (Hz)
Lâmina Baixa (h_1)	4,318 (mm)	4,489 (mm)	
Amplitude (Δh)	2,239 (mm)	2,071 (mm)	
Comparação dos Sistemas de Medição e Simulação			
Sist. Fotométrico	Ponto 1 (P1)		
Sist. Ultrassônico	Ponto 1 (P1), Ponto 2 (P2) e Ponto 3 (P3)		
Mod. Numérico 1D	Ponto 1 (P1)		

Representação Gráfica I – Fotométrico, Ultrassônico e Modelo 1D – 1 *Roll Wave*



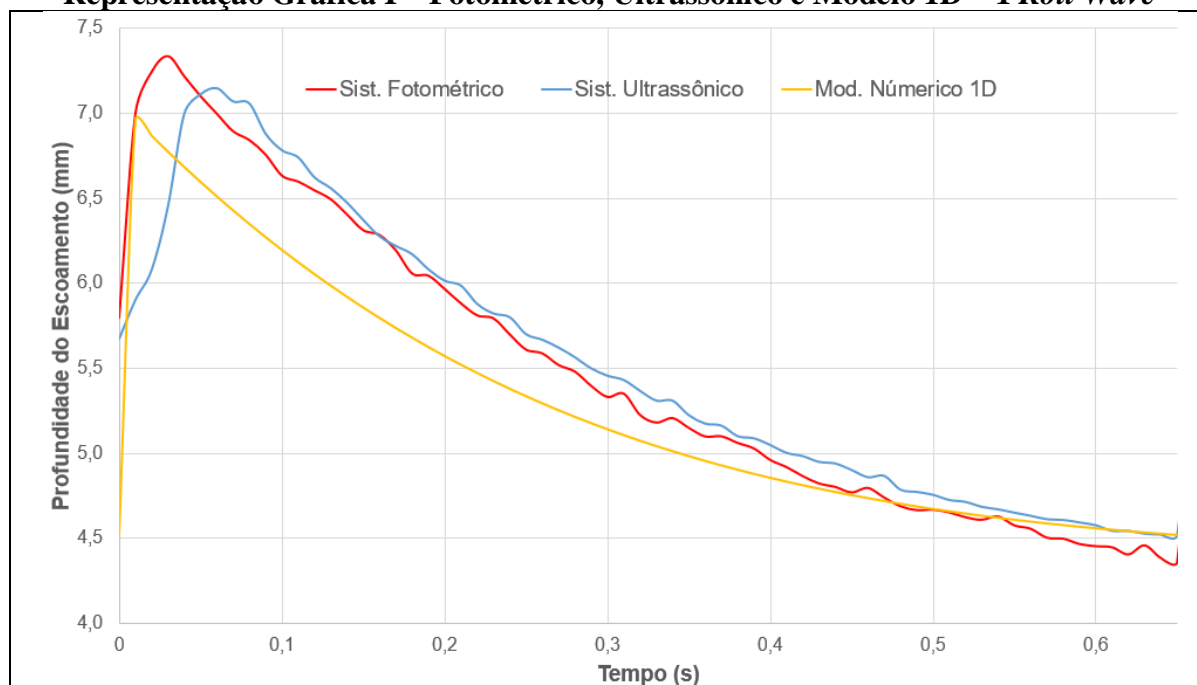
Representação Gráfica II – Fotométrico, Ultrassônico e Modelo 1D – 5 Roll Waves**Representação Gráfica III – Ultrassônico – P1, P2 e P3 - 1 Roll Wave**

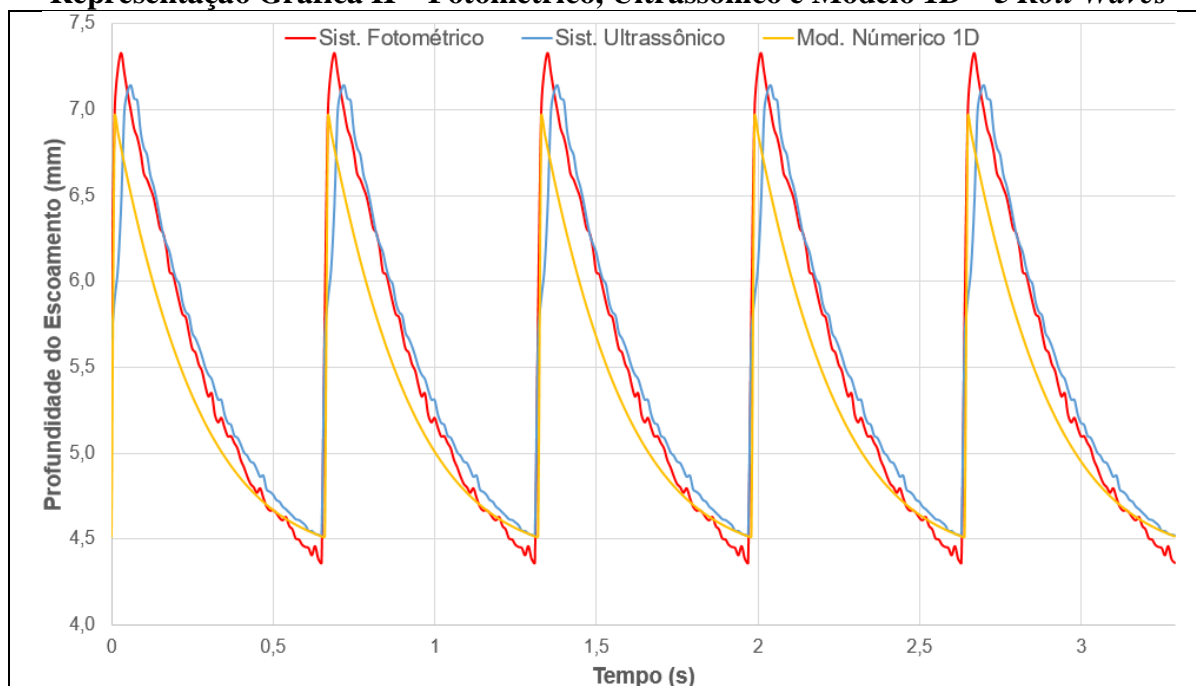
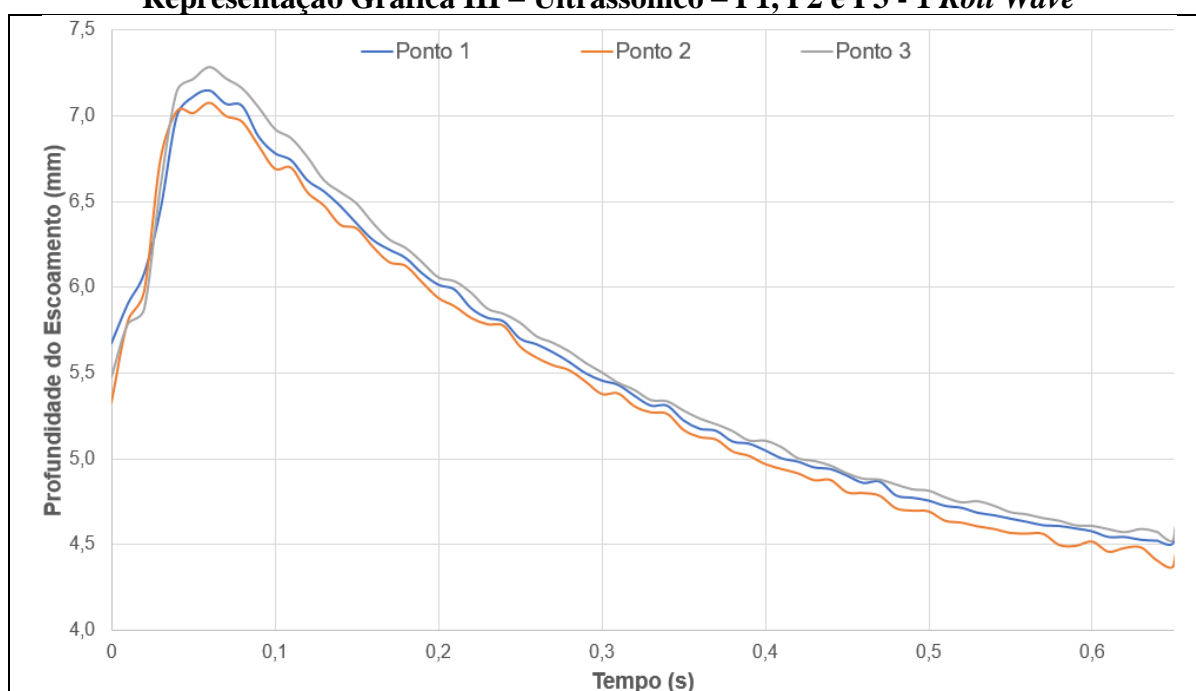
Representação Gráfica IV – Ultrassônico – P1, P2 e P3 - 5 Roll Waves

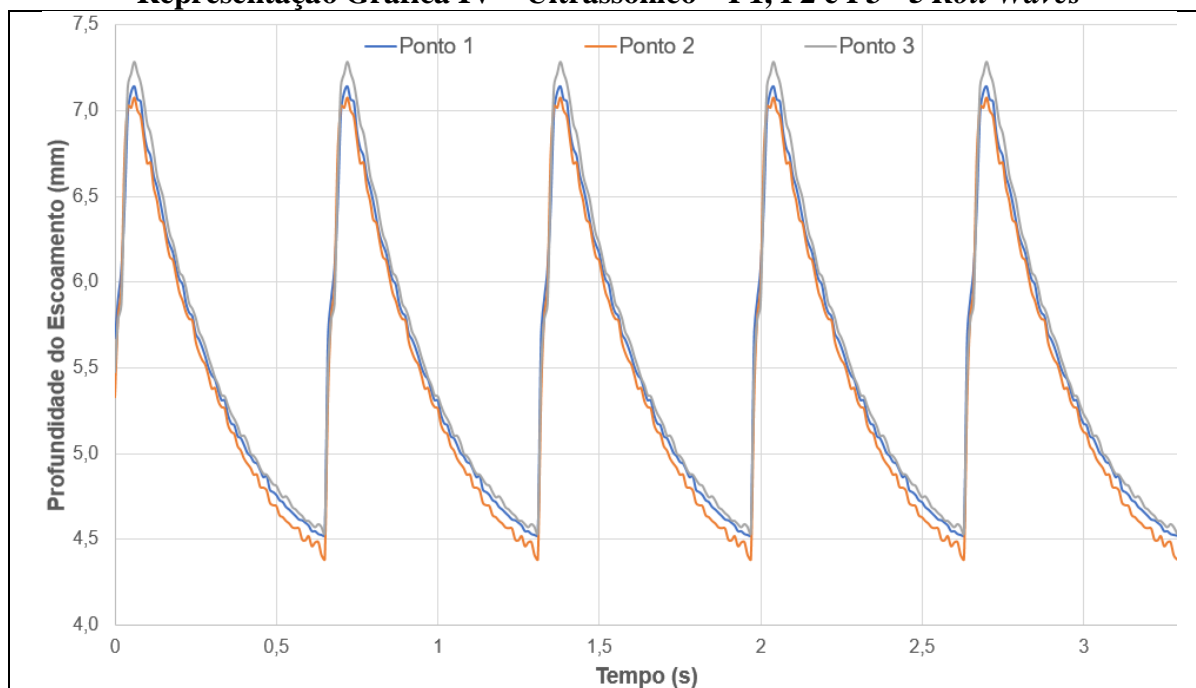
FICHA TÉCNICA DE ENSAIOS

Identificação do Ensaio		Configuração do Canal	
C2G5R275		Ensaio: Campanha 2 Inclinação do Canal: 5 graus Rotação da Bomba: 275 RPM	
Parâmetros Medidos no Canal sem Perturbação		Parâmetros Calculados – Canal sem Perturbação	
Vazão (Q): 0,00027 (m^3/s) Velocidade na Superfície (u_s): 0,206 (m/s) Lâmina do Escoamento (h_0): 5,66 (mm)		Velocidade Média (\bar{u}_0): 0,159 (m/s) Número de Froude (Fr): 0,676 Número de Reynolds (Re): 13,878	
Reologia do Fluido			
Fluido de Teste: Gel de Carbopol Composição: Água, Hidróxido de Sódio Carbopol e Azul de Metileno Concentração Inicial: 0,12% C Carb e 3,40% C AzM Modelo: Não-newtoniano - Herschel Bulkley		Tensão Limite (τ_c): 0,400 (Pa) Índice de Escoamento (n): 0,710 Índice Consistência (K_n): 0,172 ($Pa \cdot s^n$) Massa Específica (ρ): 1035 (kg/m^3)	
Parâmetros Medidos no Canal com Perturbação – P1		Parâmetros Calculados no Canal com Perturbação (Sist. Fotométrico)	
	Fotométrico	Ultrassônico	Comprimento de <i>Roll Wave</i> : 269,00 (mm) Período da <i>Roll Wave</i> : 0,65 (s) Frequência da <i>Roll Wave</i> : 1,5 (Hz)
Lâmina Baixa (h_1)	4,363 (mm)	4,52 (mm)	
Amplitude (Δh)	2,969 (mm)	2,624 (mm)	
Comparação dos Sistemas de Medição e Simulação			
Sist. Fotométrico	Ponto 1 (P1)		
Sist. Ultrassônico	Ponto 1 (P1), Ponto 2 (P2) e Ponto 3 (P3)		
Mod. Numérico 1D	Ponto 1 (P1)		

Representação Gráfica I – Fotométrico, Ultrassônico e Modelo 1D – 1 *Roll Wave*

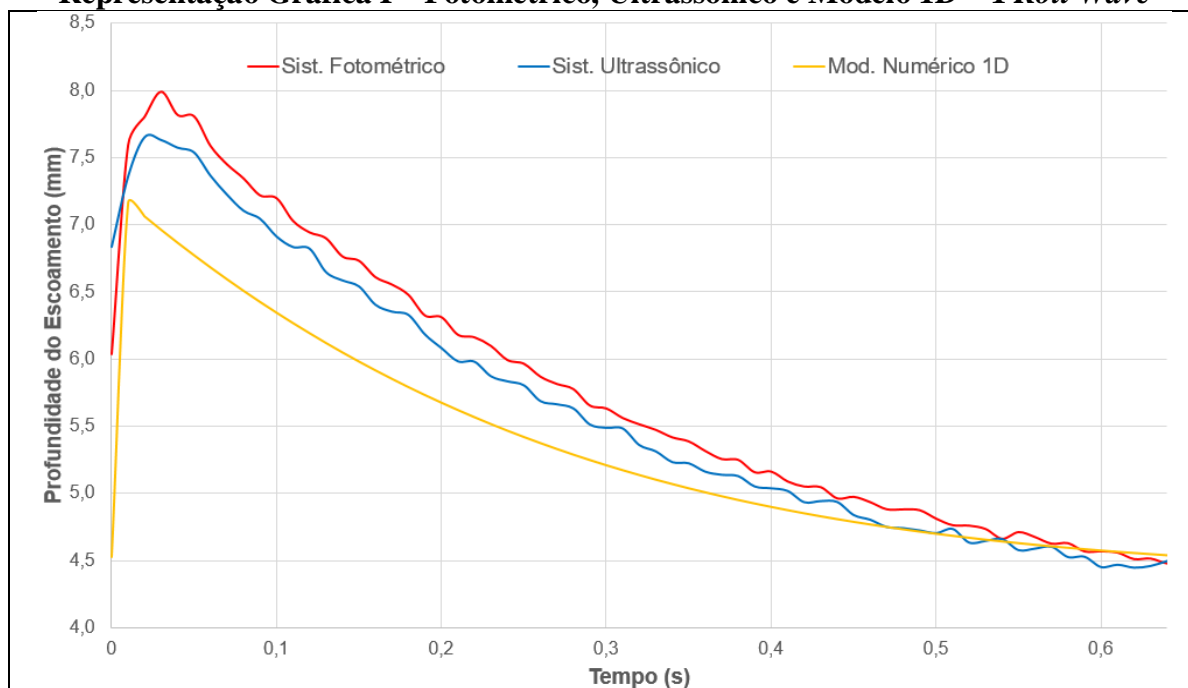
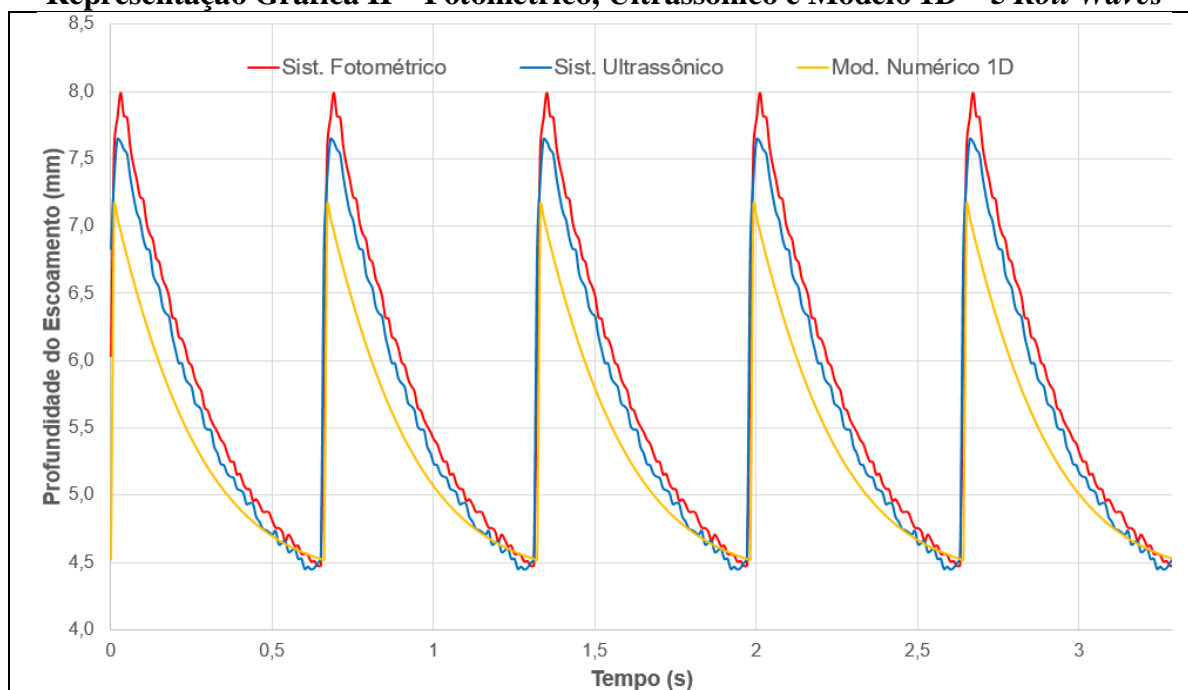


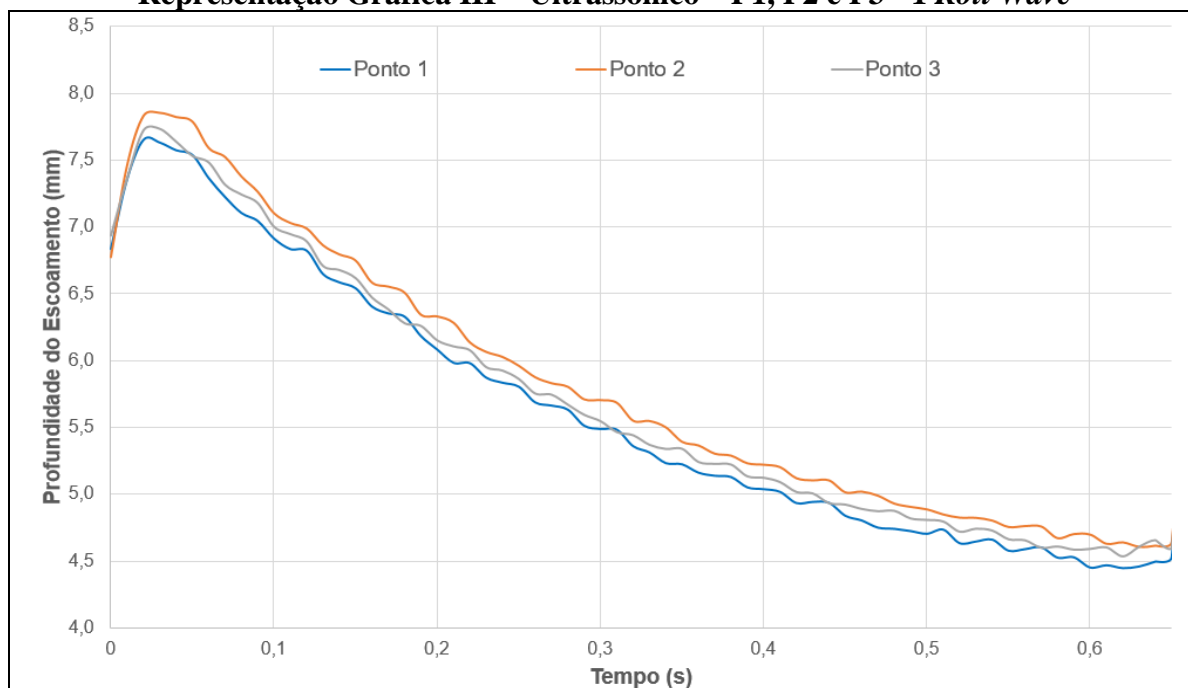
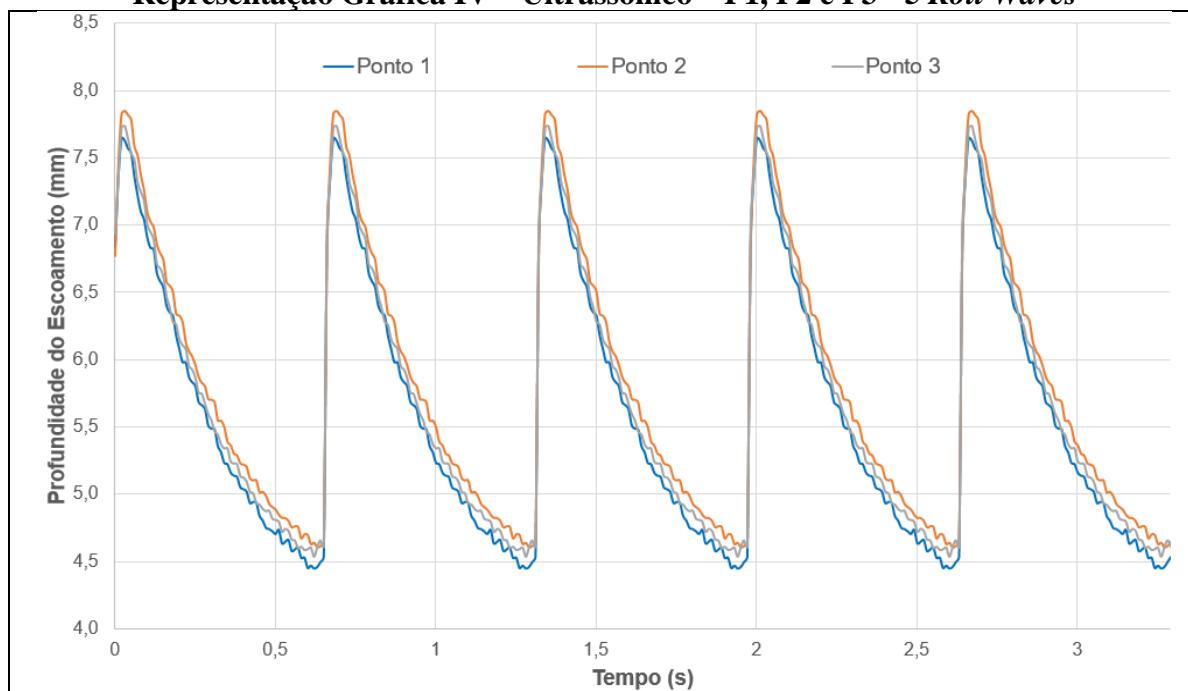
Representação Gráfica II – Fotométrico, Ultrassônico e Modelo 1D – 5 Roll Waves**Representação Gráfica III – Ultrassônico – P1, P2 e P3 - 1 Roll Wave**

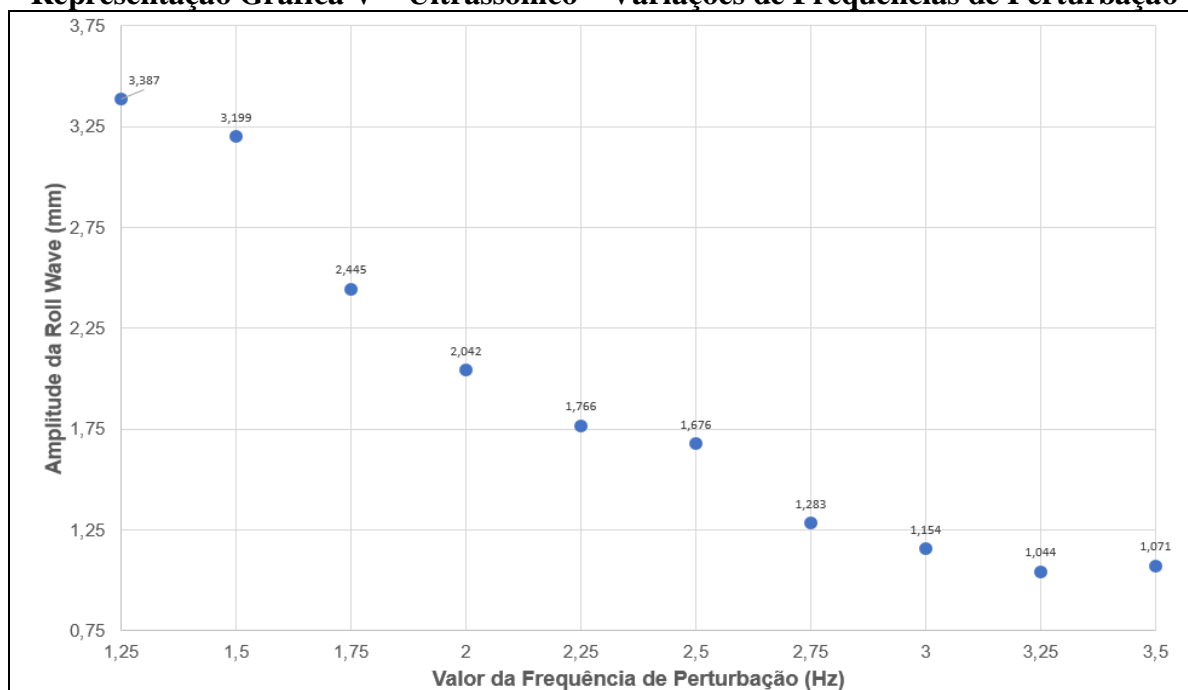
Representação Gráfica IV – Ultrassônico – P1, P2 e P3 - 5 Roll Waves

FICHA TÉCNICA DE ENSAIOS

Identificação do Ensaio		Configuração do Canal								
C2G5R325		Ensaio: Campanha 2 Inclinação do Canal: 5 graus Rotação da Bomba: 325 RPM								
Parâmetros Medidos no Canal sem Perturbação		Parâmetros Calculados – Canal sem Perturbação								
Vazão (Q): 0,00032 (m^3/s) Velocidade na Superfície (u_s): 0,232 (m/s) Lâmina do Escoamento (h_0): 5,757 (mm)		Velocidade Média (\bar{u}_0): 0,186 (m/s) Número de Froude (Fr): 0,783 Número de Reynolds (Re): 17,114								
Reologia do Fluido										
Fluido de Teste: Gel de Carbopol Composição: Água, Hidróxido de Sódio Carbopol e Azul de Metileno Concentração Inicial: 0,12% C Carb e 3,40% C AzM Modelo: Não-newtoniano - Herschel Bulkley		Tensão Limite (τ_c): 0,400 (Pa) Índice de Escoamento (n): 0,710 Índice Consistência (K_n): 0,172 ($Pa \cdot s^n$) Massa Específica (ρ): 1035 (kg/m^3)								
Parâmetros Medidos no Canal com Perturbação – P1		Parâmetros Calculados no Canal com Perturbação (Sist. Fotométrico)								
	Fotométrico	Ultrassônico	Comprimento de <i>Roll Wave</i> : 308,00 (mm) Período da <i>Roll Wave</i> : 0,65 (s) Frequência da <i>Roll Wave</i> : 1,5 (Hz)							
Lâmina Baixa (h_1)	4,477 (mm)	4,449 (mm)								
Amplitude (Δh)	3,513 (mm)	3,158 (mm)								
Comparação dos Sistemas de Medição e Simulação										
Sist. Fotométrico		Ponto 1 (P1)								
Sist. Ultrassônico		Ponto 1 (P1), Ponto 2 (P2) e Ponto 3 (P3) Ponto 1 - Frequências de Perturbação: 1,25 – 1,50 – 1,75 – 2,00 – 2,25 – 2,50 – 2,75 – 3,00 – 3,25 – 3,50 (Hz)								
Mod. Numérico 1D		Ponto 1 (P1)								
Parâmetros Medidos no Canal com Várias Perturbações (Sist. Ultrassônico)										
Hz	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50
Lâmina Baixa (h_1) (mm)	3,535	3,949	3,327	4,002	3,827	3,440	3,877	4,030	3,773	3,343
Amplitude (Δh) (mm)	3,387	3,199	2,445	2,042	1,766	1,676	1,283	1,154	1,044	1,071

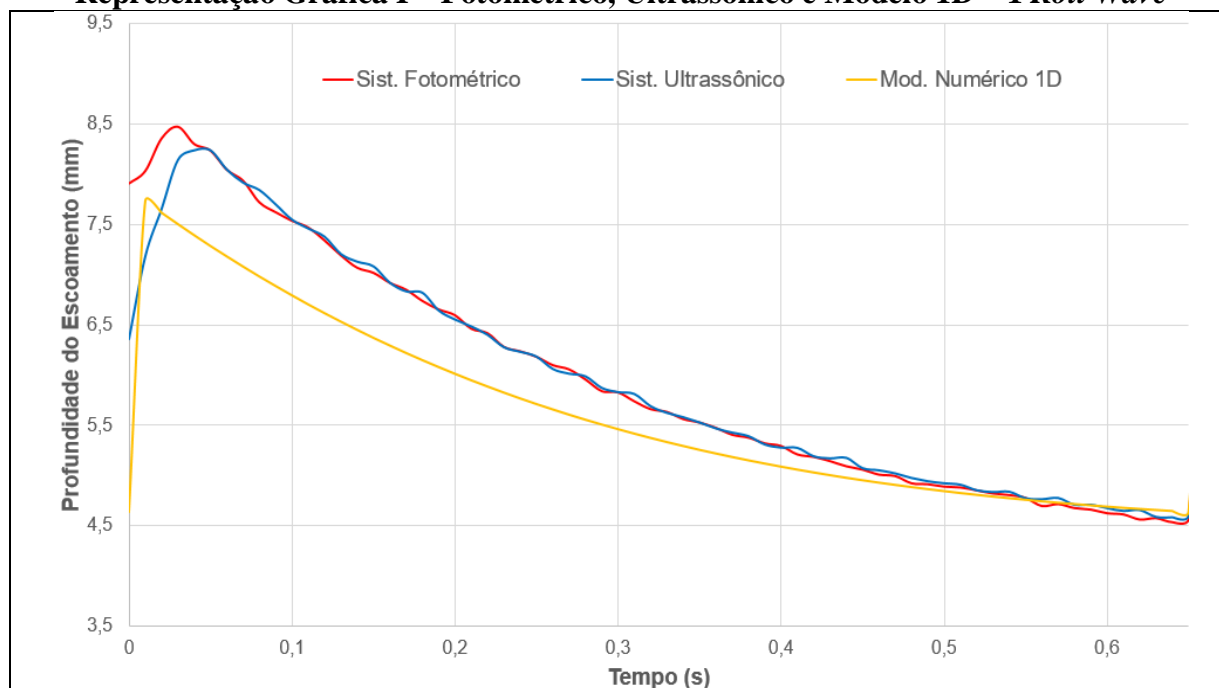
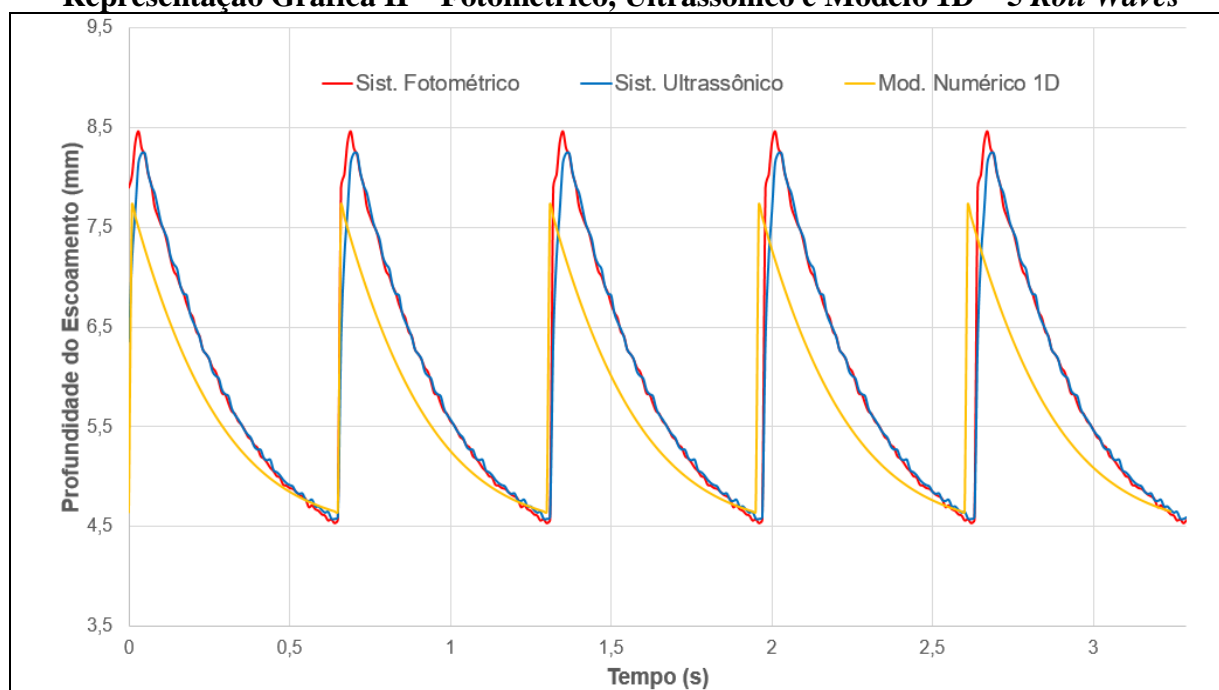
Representação Gráfica I – Fotométrico, Ultrassônico e Modelo 1D – 1 Roll Wave**Representação Gráfica II – Fotométrico, Ultrassônico e Modelo 1D – 5 Roll Waves**

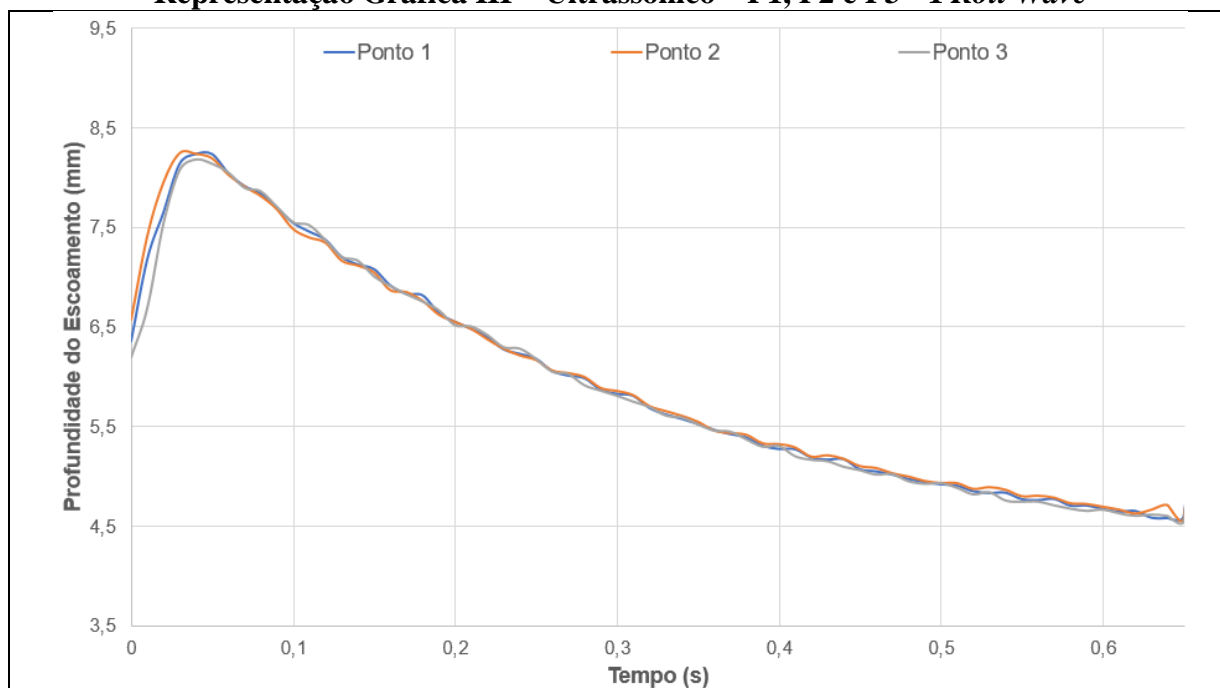
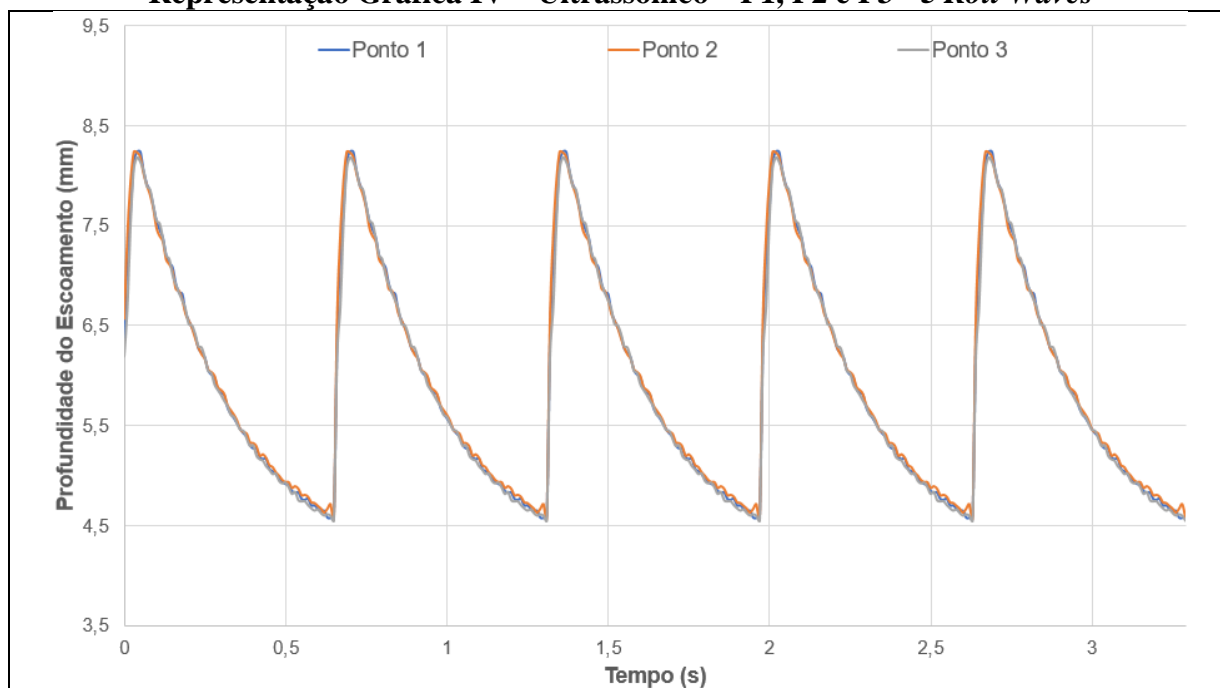
Representação Gráfica III – Ultrassônico – P1, P2 e P3 - 1 Roll Wave**Representação Gráfica IV – Ultrassônico – P1, P2 e P3 - 5 Roll Waves**

Representação Gráfica V – Ultrassônico – Variações de Frequências de Perturbação

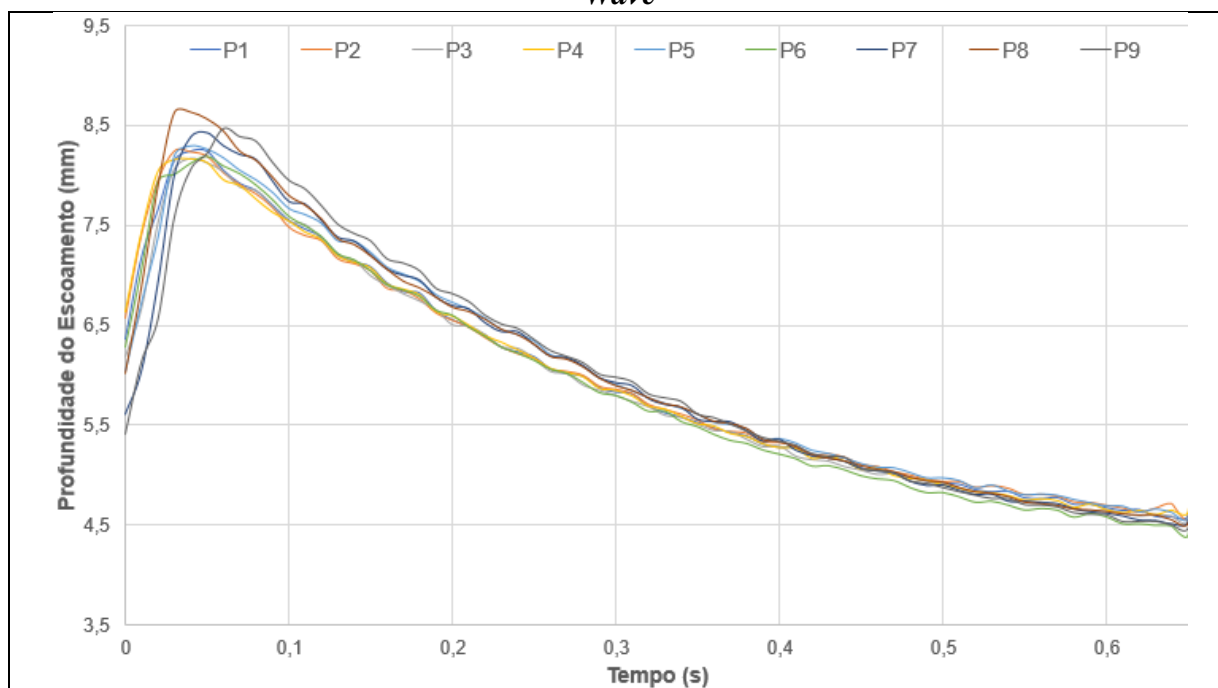
FICHA TÉCNICA DE ENSAIOS

Identificação do Ensaio		Configuração do Canal							
C2G5R375		Ensaio: Campanha 2 Inclinação do Canal: 5 graus Rotação da Bomba: 375 RPM							
Parâmetros Medidos no Canal sem Perturbação		Parâmetros Calculados – Canal sem Perturbação							
Vazão (Q): 0,00036 (m^3/s) Velocidade na Superfície (u_s): 0,263 (m/s) Lâmina do Escoamento (h_0): 6,061 (mm)		Velocidade Média (\bar{u}_0): 0,198 (m/s) Número de Froude (Fr): 0,814 Número de Reynolds (Re): 18,859							
Reologia do Fluido									
Fluido de Teste: Gel de Carbopol Composição: Água, Hidróxido de Sódio Carbopol e Azul de Metileno Concentração Inicial: 0,12% C Carb e 3,40% C AzM Modelo: Não-newtoniano - Herschel Bulkley		Tensão Limite (τ_c): 0,400 (Pa) Índice de Escoamento (n): 0,710 Índice Consistência (K_n): 0,176 ($Pa \cdot s^n$) Massa Específica (ρ): 1035 (kg/m^3)							
Parâmetros Medidos no Canal com Perturbação – P1		Parâmetros Calculados no Canal com Perturbação (Sist. Fotométrico)							
	Fotométrico	Ultrassônico	Comprimento de <i>Roll Wave</i> : 321,00 (mm) Período da <i>Roll Wave</i> : 0,65 (s) Frequência da <i>Roll Wave</i> : 1,5 (Hz)						
Lâmina Baixa (h_1)	4,534 (mm)	4,581 (mm)							
Amplitude (Δh)	3,934 (mm)	3,656 (mm)							
Comparação dos Sistemas de Medição e Simulação									
Sist. Fotométrico	Ponto 1 (P1)								
Sist. Ultrassônico	Ponto 1 (P1), Ponto 2 (P2), Ponto 3 (P3), Ponto 4 (P4), Ponto 5 (P5), Ponto (P6), Ponto 7 (P7), Ponto 8 (P8) e Ponto 9 (P9)								
Mod. Numérico 1D	Ponto 1 (P1)								
Parâmetros Medidos no Canal com Perturbação (Sist. Ultrassônico)									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Lâmina Baixa (h_1) (mm)	4,581	4,578	4,549	4,611	4,576	4,402	5,516	4,528	4,536
Amplitude (Δh) (mm)	3,656	3,660	3,626	3,554	3,682	3,795	3,904	4,104	3,941
	Média – P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8 e P9				Desvio Padrão – P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8 e P9				
Lâmina Baixa (h_1) (mm)	4,541				0,060				
Amplitude (Δh) (mm)	3,769				0,180				

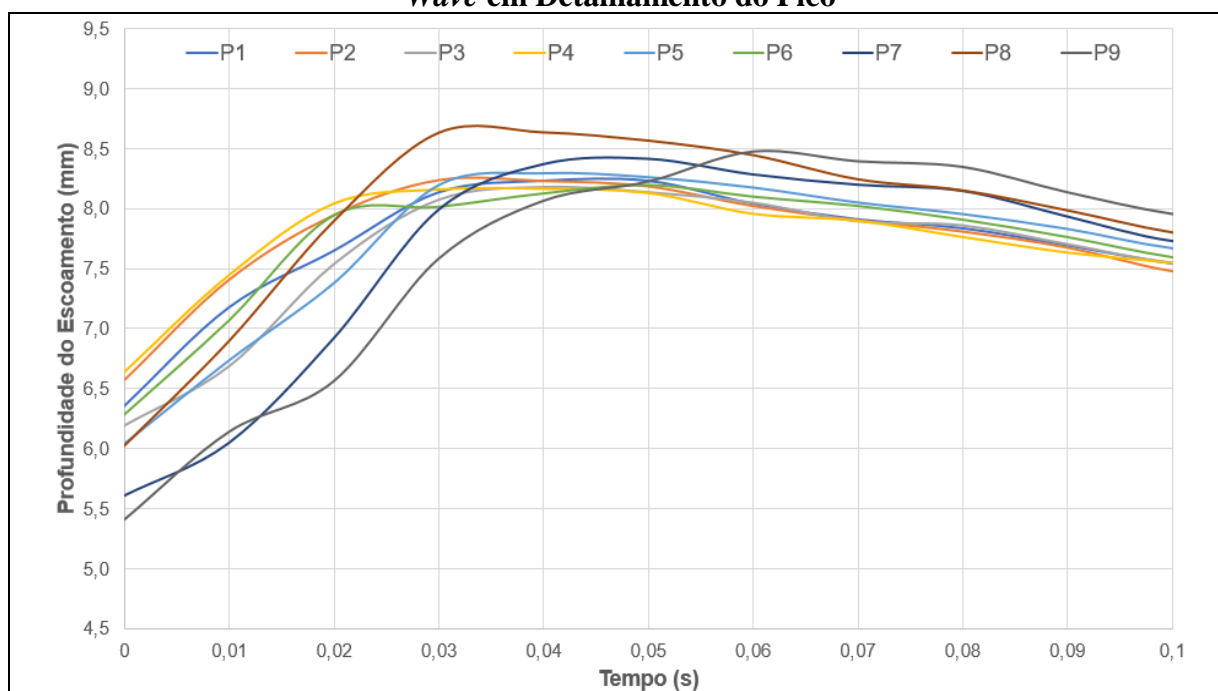
Representação Gráfica I – Fotométrico, Ultrassônico e Modelo 1D – 1 Roll Wave**Representação Gráfica II – Fotométrico, Ultrassônico e Modelo 1D – 5 Roll Waves**

Representação Gráfica III – Ultrassônico – P1, P2 e P3 - 1 Roll Wave**Representação Gráfica IV – Ultrassônico – P1, P2 e P3 - 5 Roll Waves**

Representação Gráfica V – Ultrassônico – P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8 e P9- 1 Roll Wave



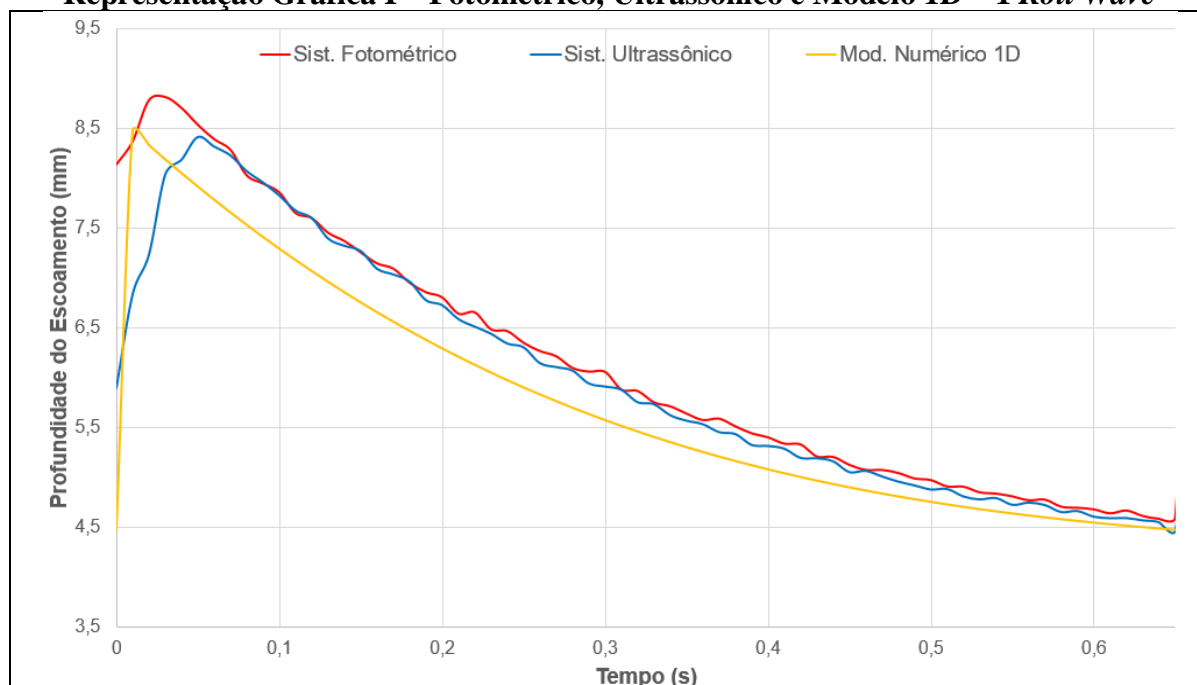
Representação Gráfica VI – Ultrassônico – P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8 e P9- 1 Roll Wave em Detalhamento do Pico

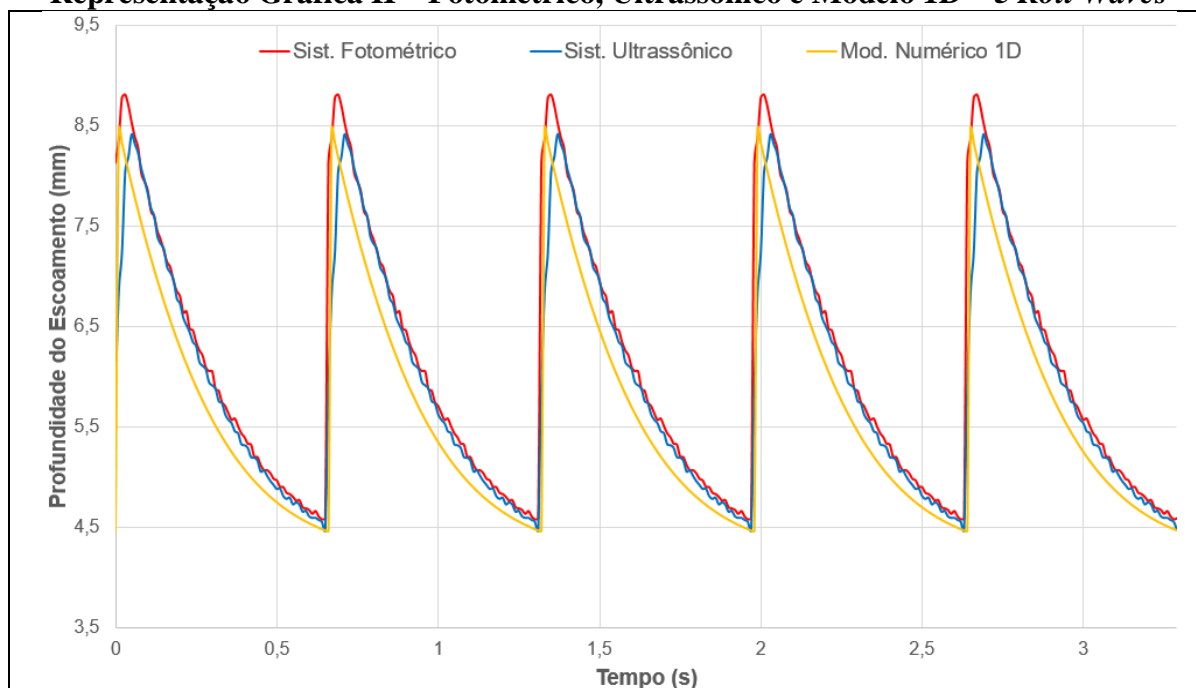
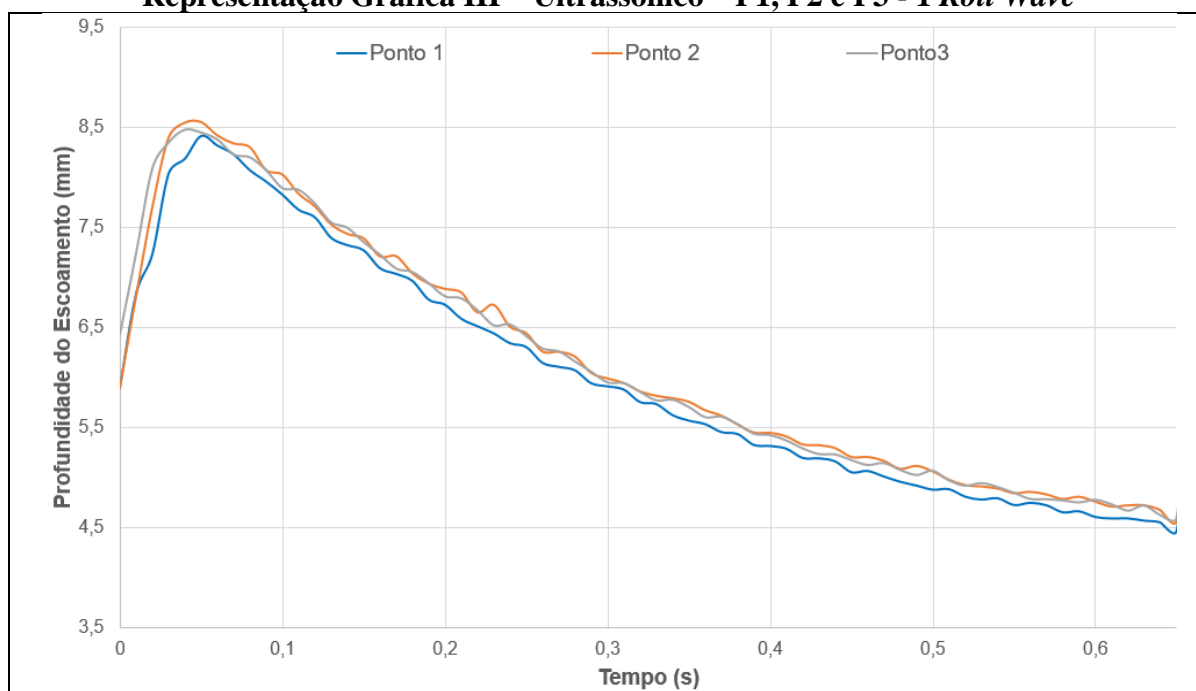


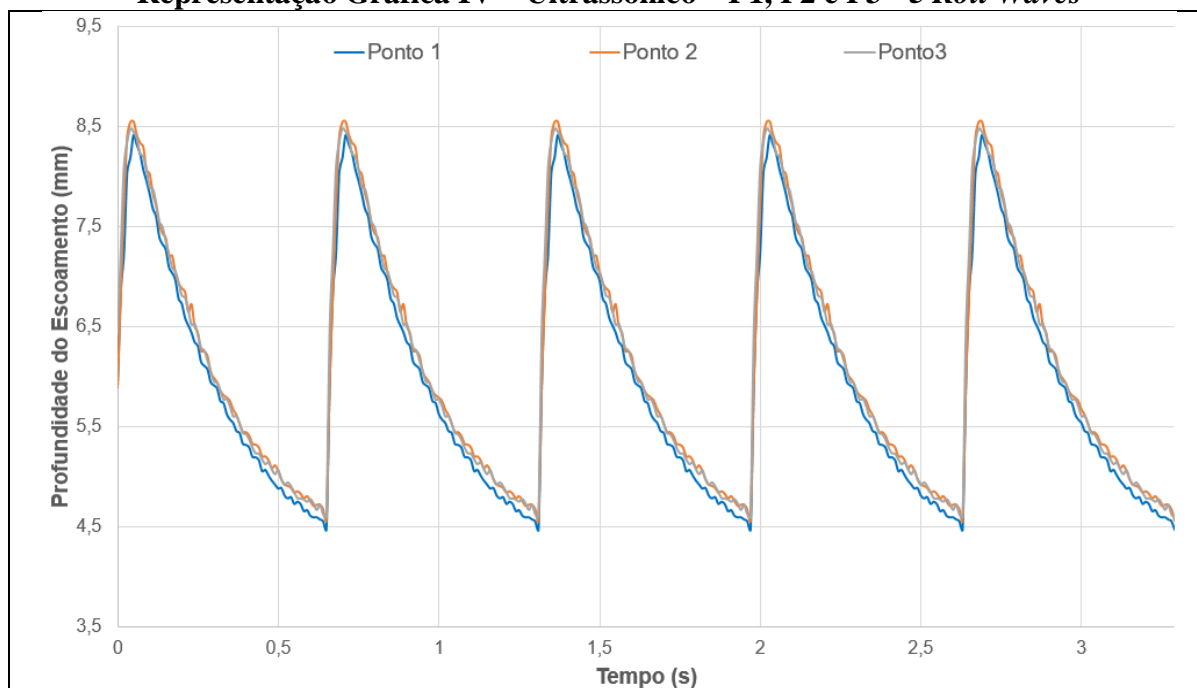
FICHA TÉCNICA DE ENSAIOS

Identificação do Ensaio		Configuração do Canal	
C2G5R425		Ensaio: Campanha 2 Inclinação do Canal: 5 graus Rotação da Bomba: 425 RPM	
Parâmetros Medidos no Canal sem Perturbação		Parâmetros Calculados – Canal sem Perturbação	
Vazão (Q): 0,00041 (m^3/s) Velocidade na Superfície (u_s): 0,287 (m/s) Lâmina do Escoamento (h_0): 6,253 (mm)		Velocidade Média (\bar{u}_0): 0,219 (m/s) Número de Froude (Fr): 0,885 Número de Reynolds (Re): 23,602	
Reologia do Fluido			
Fluido de Teste: Gel de Carbopol Composição: Água, Hidróxido de Sódio Carbopol e Azul de Metileno Concentração Inicial: 0,12% C Carb e 3,40% C AzM Modelo: Não-newtoniano - Herschel Bulkley		Tensão Limite (τ_c): 0,400 (Pa) Índice de Escoamento (n): 0,707 Índice Consistência (K_n): 0,165 ($Pa \cdot s^n$) Massa Específica (ρ): 1035 (kg/m^3)	
Parâmetros Medidos no Canal com Perturbação – P1		Parâmetros Calculados no Canal com Perturbação (Sist. Fotométrico)	
	Fotométrico	Ultrassônico	Comprimento de <i>Roll Wave</i> : 343,00 (mm) Período da <i>Roll Wave</i> : 0,65 (s) Frequência da <i>Roll Wave</i> : 1,5 (Hz)
Lâmina Baixa (h_1)	4,582 (mm)	4,553 (mm)	
Amplitude (Δh)	4,235 (mm)	3,772 (mm)	
Comparação dos Sistemas de Medição e Simulação			
Sist. Fotométrico	Ponto 1 (P1)		
Sist. Ultrassônico	Ponto 1 (P1), Ponto 2 (P2) e Ponto 3 (P3)		
Mod. Numérico 1D	Ponto 1 (P1)		

Representação Gráfica I – Fotométrico, Ultrassônico e Modelo 1D – 1 *Roll Wave*



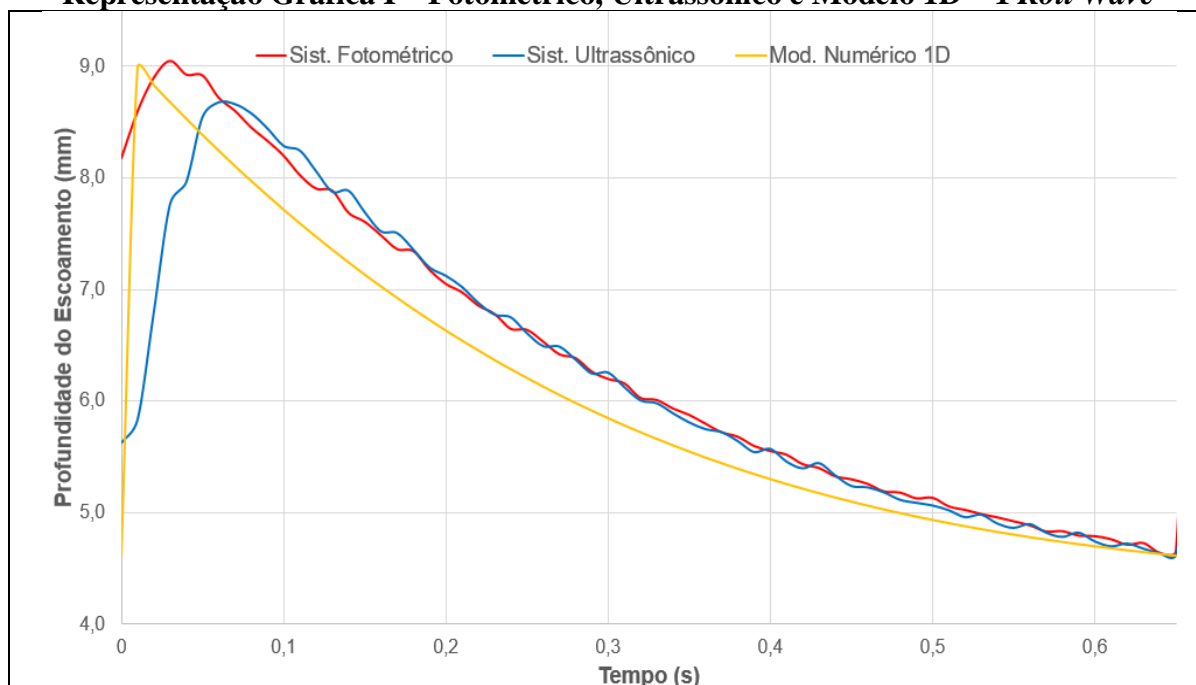
Representação Gráfica II – Fotométrico, Ultrassônico e Modelo 1D – 5 Roll Waves**Representação Gráfica III – Ultrassônico – P1, P2 e P3 - 1 Roll Wave**

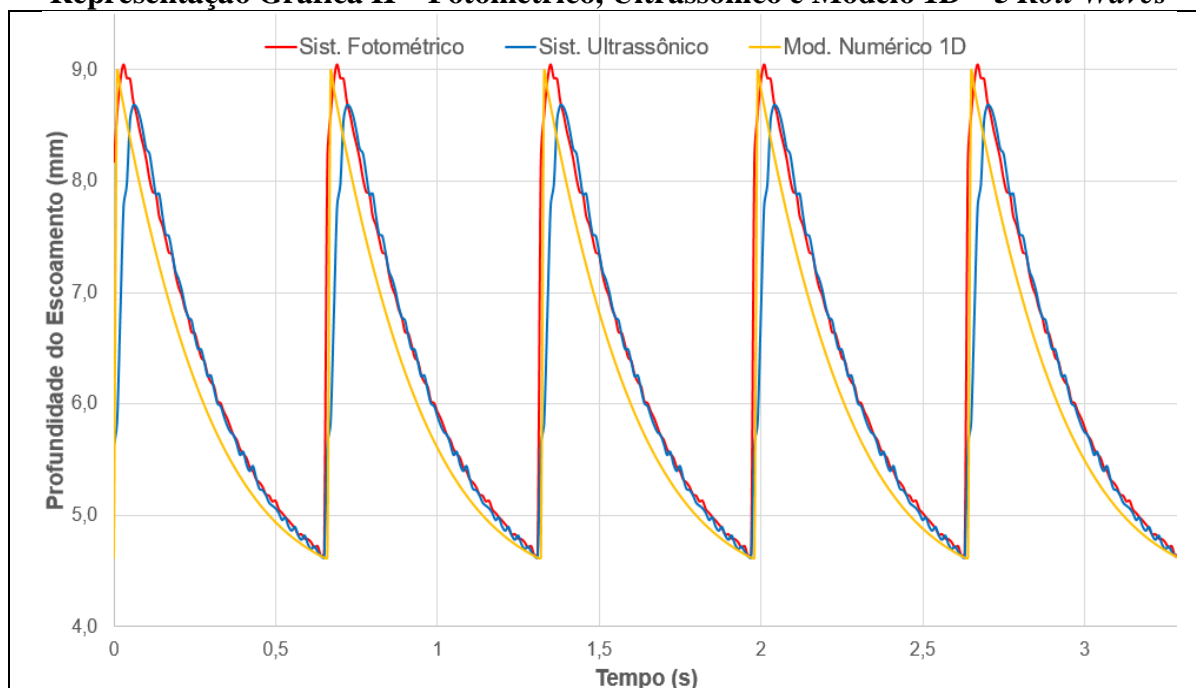
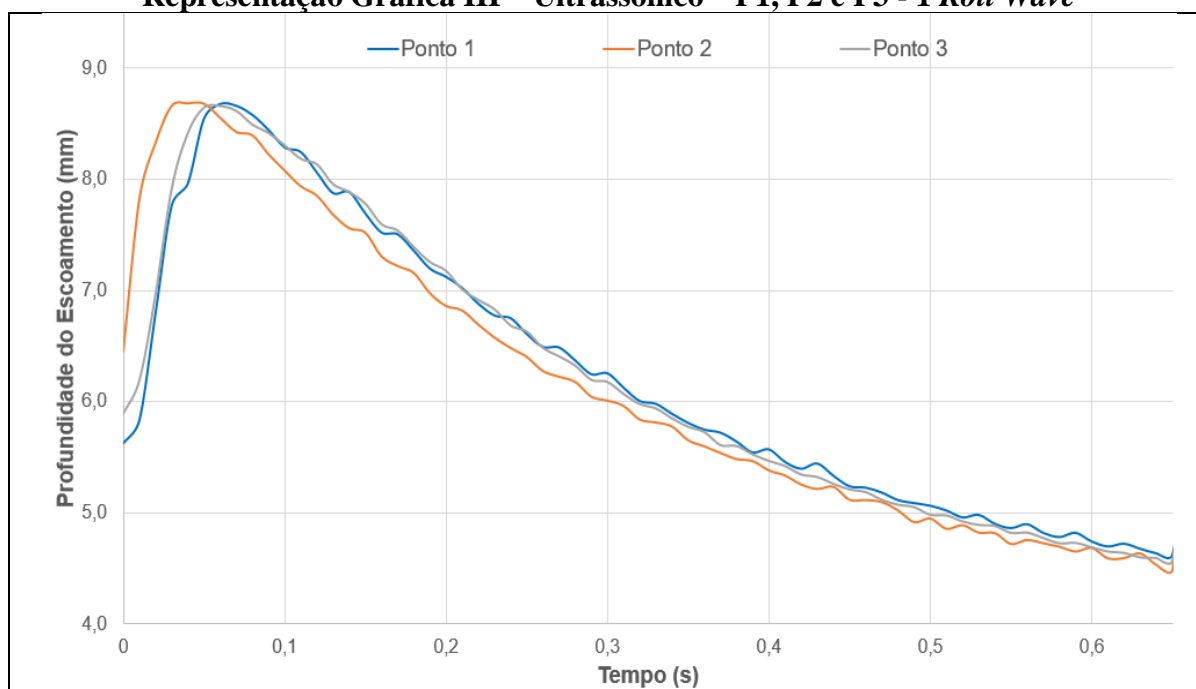
Representação Gráfica IV – Ultrassônico – P1, P2 e P3 - 5 Roll Waves

FICHA TÉCNICA DE ENSAIOS

Identificação do Ensaio		Configuração do Canal	
C2G5R475		Ensaio: Campanha 2 Inclinação do Canal: 5 graus Rotação da Bomba: 475 RPM	
Parâmetros Medidos no Canal sem Perturbação		Parâmetros Calculados – Canal sem Perturbação	
Vazão (Q): 0,00046 (m^3/s) Velocidade na Superfície (u_s): 0,319 (m/s) Lâmina do Escoamento (h_0): 6,554 (mm)		Velocidade Média (\bar{u}_0): 0,234 (m/s) Número de Froude (Fr): 0,924 Número de Reynolds (Re): 25,783	
Reologia do Fluido			
Fluido de Teste: Gel de Carbopol Composição: Água, Hidróxido de Sódio Carbopol e Azul de Metileno Concentração Inicial: 0,12% C Carb e 3,40% C AzM Modelo: Não-newtoniano - Herschel Bulkley		Tensão Limite (τ_c): 0,400 (Pa) Índice de Escoamento (n): 0,709 Índice Consistência (K_n): 0,169 ($Pa \cdot s^n$) Massa Específica (ρ): 1035 (kg/m^3)	
Parâmetros Medidos no Canal com Perturbação – P1		Parâmetros Calculados no Canal com Perturbação (Sist. Fotométrico)	
	Fotométrico	Ultrassônico	Comprimento de <i>Roll Wave</i> : 359,00 (mm) Período da <i>Roll Wave</i> : 0,65 (s) Frequência da <i>Roll Wave</i> : 1,5 (Hz)
Lâmina Baixa (h_1)	4,641 (mm)	4,621 (mm)	
Amplitude (Δh)	4,281 (mm)	4,059 (mm)	
Comparação dos Sistemas de Medição e Simulação			
Sist. Fotométrico	Ponto 1 (P1)		
Sist. Ultrassônico	Ponto 1 (P1), Ponto 2 (P2) e Ponto 3 (P3)		
Mod. Numérico 1D	Ponto 1 (P1)		

Representação Gráfica I – Fotométrico, Ultrassônico e Modelo 1D – 1 *Roll Wave*



Representação Gráfica II – Fotométrico, Ultrassônico e Modelo 1D – 5 Roll Waves**Representação Gráfica III – Ultrassônico – P1, P2 e P3 - 1 Roll Wave**

Representação Gráfica IV – Ultrassônico – P1, P2 e P3 - 5 Roll Waves