

**Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

**IMPLEMENTAÇÃO DE APARATO EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DE
INSTABILIDADES TIPO ROLL WAVES EM FLUIDOS NÃO-
NEWTONIANOS**

Evandro Fernandes da Cunha

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

Ilha Solteira-SP
2013

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
Campos de Ilha Solteira**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**IMPLEMENTAÇÃO DE APARATO EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DE
INSTABILIDADES TIPO ROLL WAVES EM FLUIDOS NÃO-
NEWTONIANOS**

Evandro Fernandes da Cunha

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

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia - UNESP – Campus de Ilha
Solteira, para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica.
Área de Conhecimento: Ciências Térmicas

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C972i Cunha, Evandro Fernandes.
Implementação de aparato experimental para medição de instabilidade tipo Roll Waves em fluidos não-newtonianos / Evandro Fernandes Cunha. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2013
107 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Térmicas, 2013

Orientador: Geraldo de Freitas Maciel

Co-orientador: Cláudio Kitano

Inclui bibliografia

1. Roll Waves. 2. Fluidos não-newtonianos. 3. Medição de instabilidades. 4. Implementação de aparato experimental.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

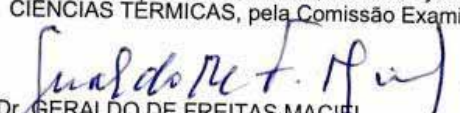
TÍTULO: Implementação de aparato experimental para a medição de instabilidades tipo roll waves em fluidos não-newtonianos

AUTOR: EVANDRO FERNANDES DA CUNHA

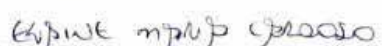
ORIENTADOR: Prof. Dr. GERALDO DE FREITAS MACIEL

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. CLAUDIO KITANO

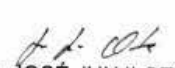
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica,
Área: CIÊNCIAS TÉRMICAS, pela Comissão Examinadora;


Prof. Dr. GERALDO DE FREITAS MACIEL

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Profa. Dra. ELAINE MARIA CARDOSO

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. JOSÉ JUNJI OTA

Departamento de Hidráulica e Saneamento / Universidade Federal do Paraná

Data da realização: 31 de julho de 2013.

RESUMO

Esta dissertação de mestrado faz uma abordagem do trabalho experimental desenvolvido no âmbito de pesquisa de escoamento de fluidos não-newtonianos em canais inclinados. Quando estes escoamentos são colocados em condições favoráveis de inclinação e vazão, pode-se constituir um domínio propício à propagação de instabilidades na superfície livre que, eventualmente, podem evoluir para um tipo específico de ondas, conhecidas na literatura como *roll waves*. Estas ondas, de comprimento e amplitude bem definidos, são especialmente afetadas pelas características do escoamento e do fluido. Em termos de fluido teste, foi confeccionado, caracterizado reologicamente e utilizado o gel de carbopol, de base polimérica e de propriedade não-newtonianas, com bom ajuste do modelo reológico de Herschel-Bulkley. Como existe na literatura uma grande lacuna no que diz respeito a medidas deste fenômeno tanto na natureza quanto em laboratório, buscou-se neste trabalho, projetar e construir um aparato experimental que fosse capaz de reproduzir as condições necessárias para a geração de *roll waves*, em condições controladas. Técnicas fotométricas e ultrassônicas foram utilizadas no experimento para aferir informações de altura de escoamento, após o fluido teste (gel de carbopol) ser perturbado, por um sistema específico projetado para este fim. O aparato experimental desenvolvido permite, doravante, simulações de *roll waves* em diversos cenários para fluidos de reologia diversa, constituindo assim, um suporte de grande valia ao entendimento e controle de *roll waves* presentes, por exemplo em corridas de lama.

Palavra-chave – *Roll waves*. Fluidos hiperconcentrados. Técnica de absorção luminosa. Técnica de pulso-eco.

ABSTRACT

This dissertation makes an approach to the experimental work carried out within the research of non-Newtonian fluids drained in inclined channels. When these flows are placed in favorable slope and flow, can be a suitable area to the spread of instability at the free surface which may eventually evolve into a specific type of waves, known in the literature as “roll waves”. These waves of well-defined length and amplitude are especially affected by the flow characteristics and the fluid. In terms of fluid test was elaborated, rheologically characterized and used carbopol gel, polymer-based and non-Newtonian property, with good adjustment of the rheological model of Herschel-Bulkley. As there is a big gap in the literature regarding to both measures of this phenomenon in nature as in the laboratory, was sought in this work, the formation of an experimental apparatus that was able to reproduce the necessary conditions for the generation of roll waves in the laboratory, under those controlled conditions. Photometric and ultrasonic techniques were used in the experiment for measuring height information of the flow after the test fluid (carbopol gel) being disturbed by a specific system designed for this purpose. The experimental apparatus developed now enables simulations of roll waves in various scenarios for different fluid rheology, is thus an invaluable support to the understanding and control of this "roll waves" present in mud, for example.

Keywords - Roll waves. Hiper-concentrated fluids. Light absorption technique. Pulse-echo technique

Lista de Figuras

Figura 1- Deslizamentos em Teresópolis em 2011.....	13
Figura 2: – Propagação de <i>roll waves</i> em canais: (a) <i>Roll waves</i> em vertedouro do reservatório de Llyn Brianne, em Wales, Reino Unido, (b) Canal de escoamentos de detritos (Serviço Geológico dos EUA, Oregon) (c) <i>Roll waves</i> em um canal de concreto (Lions Bay, British Columbia – Canadá), (d) <i>Roll waves</i> em canal natural.....	14
Figura 3 – <i>Roll waves</i> em Grönnbach, na cidade de Merligen, Suíça, visualizadas no sentido jusante (Cornish, 1934).	19
Figura 4 – Observação de <i>Roll Wave</i> por Coussot (1994).....	21
Figura 5 – Visualização de <i>roll waves</i> geradas a partir de uma frequência de perturbação de 3 Hz.	22
Figura 6: Medições de escoamento de filme fino (solução de água + azul de metileno) obtidas a partir de método de absorção luminosa (linha escura) e sonda condutiva (linha clara), para a mesma configuração de escoamento. Adaptado de Mouza et al. (1999).....	28
Figura 7 – Apresentação do modo Pulso-Eco.....	31
Figura 8 – Apresentação do modo Transparência.....	31
Figura 9 – Apresentação do modo Imersão.....	31
Figura 10- Reograma representando diferentes tipos de modelos reológicos.....	32
Figura 11 – Armação metálica da mesa e do canal, em processo de construção.....	37
Figura 12 – Detalhe do canal, de fundo de vidro com paredes laterais de acrílico, montado sobre a estrutura metálica.....	37
Figura 13 – Detalhe da caixa de estagnação.....	38
Figura 14 – Armação metálica completa da mesa inercial.....	38
Figura 15 - Dispositivo anti-vibração instalado no pé da mesa suporte, atenuando vibrações externas ao conjunto.	39
Figura 16 – Detalhe em desenho do conjunto de inclinação	39
Figura 17 - Sistema de inclinação por engrenagens. (a),(b): sistema montado na base do esqueleto metálico do canal; (c): transferidor no apoio dianteiro.....	40
Figura 18 – Reservatório de glicerina. (a) Reservatório aberto - detalhe mostrando sistema de descanso para elevar as bolhas de ar presente no fluido. (b) Reservatório fechado - detalhe orifício e canalização para guiar o fluido até o meio do sistema de descanso.....	41

Figura 19 – Reservatório de carbopol. (a) Reservatório aberto. (b) Reservatório fechado - detalhe mostrando dispositivo para amortecer o impacto e canalização para guiar o fluido até o meio do reservatório. (c) Proteção para não perder o fluido, quando este espirra devido à formação das oscilações.....	41
Figura 20 - (a) Bomba Hidráulica. (b) Válvula borboleta.....	42
Figura 21 – (a) Bomba de Cavidade Progressiva. (b) Inversor de Frequência.....	42
Figura 22 - Sistema de perturbação composto por caixa acústica e alto-falante para baixas frequências, mostrado fora do arranjo do experimento.....	43
Figura 23 - Pannel frontal do gerador de sinais.....	43
Figura 24 – Pannel frontal do amplificador T 400.....	44
Figura 25 - Sistema de perturbação composto por caixa acústica e alto-falante para baixas frequências. (a): Vista frontal, exibindo teste de eficiência da perturbação em escoamento translúcido de água; (b): Vista lateral - transferidor metálico auxilia no posicionamento do alto-falante.	44
Figura 26 - Conjunto do novo sistema de aquisição.	45
Figura 27 - (a): Fotodetector <i>Thorlabs</i> DET10A; (b): Resposta espectral típica do fotodetector. O modelo em questão é representado pela curva azul, DET10A. Para o comprimento de onda do laser, a resposta é aproximadamente 0,4 A/W. Gráfico extraído do <i>datasheet</i> fornecido pelo fabricante.	45
Figura 28 - Fotodetector <i>Newport</i> 818-SL.....	46
Figura 29 – Suporte para a fonte de luz com transferidor. (a) Mesa e canal - detalhe do suporte móvel da fonte de luz. (b) Inclinação da fonte de luz.....	46
Figura 30 – Fonte luminosa fixa e divisão em dois feixe.....	47
Figura 31 – Suporte de fixação no canal. (a) Suporte da fonte luminosa. (b) Suporte da lâmina de vidro. (c) Suporte do espelho. (d) Suporte do fotodetector.....	48
Figura 32 – Conjunto ultrassônico. (a) Suporte de fixação no canal. (b) Transdutor ultrassônico. (c) Conjunto montado fixado sobre o canal.....	49
Figura 33 – Placa de aquisição USB-6009 da <i>National Instruments</i>	49
Figura 34 – <i>Software LabView</i> 2011. (a) Escolha do sinal de entrada. (b) Escolha da faixa de tensão de leitura.....	50
Figura 35 – <i>Software LabView</i> 2011. Ambiente virtual.....	50
Figura 36 – <i>Software LabView</i> . (a) Configuração do filtro. (b) Sinal sem tratamento. (c) Tabela mostrando arquivo com os dados armazenados.....	51

Figura 37 – Reograma - Parâmetro reológico de Herschel-Bulkley para o gel de Carbopol 996. Correlação quase perfeita entre as curvas teórico-experiencial.....	52
Figura 38 - Modos de extinção de intensidade luminosa. (a) Dispersão luminosa: partículas de grande tamanho, desviam os feixes de luz incidentes. (b) Absorção luminosa: átomos e moléculas de pequena escala estão dissolvidos no meio líquido e são excitadas pelos feixes incidentes dependendo do comprimento de onda, absorvendo-os.	53
Figura 39 – Aparato de calibração, em detalhe cuba de vidro, fotodetector e termo sensor.....	54
Figura 40 – Aparato de calibração. (a) Configuração da primeira, segunda e terceira variação. (b) Configuração da quarta variação.....	55
Figura 41 – Geração de pulso.....	56
Figura 42 – Geração e recepção de pulso.....	56
Figura 43 – Aparato de calibração do transdutor ultrassônico.....	57
Figura 44 – Princípio de funcionamento da primeira fase de experimentos.....	58
Figura 45 – Interação laser e glicerina com micro – bolhas.....	59
Figura 46 - Resultado da aquisição de dados através do osciloscópio, após filtragens com filtros de média móvel de diversas ordens. Sendo M a ordem da média móvel.....	59
Figura 47 – Princípio de funcionamento da segunda fase do experimento.....	60
Figura 48 – Refração no sistema composto pelo escoamento com nível oscilatório.....	61
Figura 49 – Princípio de funcionamento da terceira fase do experimento.....	62
Figura 50 – Fluido teste perturbado sem a propagação de <i>roll waves</i>	64
Figura 51 – Fluido teste perturbado com a propagação de <i>roll waves</i>	64
Figura 52 - Caracterização das oscilações nas configuração de 250, 500 e 750 RPM da bomba de sucção a 5 graus de inclinação do canal.....	68
Figura 53 - Características das oscilações nas configuração de 750 RPM da bomba de sucção, 5 graus de inclinação do canal e sistema de perturbação configurado em frequência de 1,5 Hz e intensidade de ganho 2.....	70
Figura 54 - Características das oscilações nas configuração de 750 RPM da bomba de sucção, 5 graus de inclinação do canal e sistema de de perturbação configurado em frequência de 1,5 Hz e intensidade de ganho 4.....	70
Figura 55 – Comparação do sistema fotométrico e ultrassônico em tensão. Sinais resultante da frequência de aquisição à 3 kHz, através dos sistemas fotométrico e ultrassônico.....	71

Figura 56 – Sinais de calibração, variando tensão e milímetros.....	71
Figura 57 – Variação da absorbância por milímetros.....	72
Figura 58 – Fator médio entre a relação linear da absorbância e o espaço de atenuação do sinal....	72
Figura 59 – Relação de calibração do aparato ultrassônico.....	73
Figura 60 – Oscilações na superfície livre do escoamento. Comparação do sistema fotométrico e ultrassônico em milímetros. Sinais resultante da frequência de aquisição à 3 kHz, através dos sistemas fotométrico e ultrassônico.....	73
Figura 61 – Sinal do transdutor ultrassônico tratado.....	74
Figura 62 – Sinal do transdutor ultrassônico tratado. Apresentado em forma de tensão.....	74
Figura 63 - Sinal do transdutor ultrassônico tratado. Detalhe da <i>roll wave</i> em 1 segundo.....	75
Figura 64 – Gráfico comparativo entre ondas geradas para vazões de 0,197 l/s e 0,392 l/s, com números de Froude de 0,56 e 0,87, respectivamente.....	76
Figura 65 – Gráfico comparativo entre os modelos experimental e teórico para uma vazão de 0,196 (l/s)	77
Figura 66 – Gráfico comparativo entre os modelos experimental e teórico para uma vazão de 0,392 l/s	78
Figura 67 – Gráfico comparativo entre os modelos experimental e teórico para uma vazão de 0,392 l/s	79

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Propriedades do Glicerol.....	33
Tabela 2 – Parâmetro reológico de Herschel-Bulkley para o gel de Carbopol 940.....	34
Tabela 3 – Parâmetro reológico de Herschel-Bulkley para o gel de Carbopol 980.....	35
Tabela 4 – Parâmetro reológico de Herschel-Bulkley para o gel de Carbopol 996.....	51
Tabela 5 – Verificação da reologia após adição de água deionizada.....	66
Tabela 6 – Mudança reométrica devido o envelhecimento do fluido teste.....	67
Tabela 7 – Configurações específicas do aparato experimental.....	69
Tabela 8 – Configurações específicas da reologia em conformidade com a dinâmica do escoamento.	69
Tabela 9 – Parâmetros dos ensaios para vazões de 0,197 l/s e 0,392 l/s.....	75
Tabela 10 – Comparação entre resultados experimentais para uma vazão de 0,196 l/s e do modelo matemático, referente à Figura 65.....	77
Tabela 11 – Comparação entre resultados experimentais para uma vazão de 0,196 l/s e do modelo matemático, referente à Figura 66.....	78
Tabela 12 – Comparação entre resultados experimentais para uma vazão de 0,196 l/s e do modelo matemático, referente à Figura 67.....	79

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Justificativa da Pesquisa.....	15
1.2 Objetivo.....	16
2 ESTADO DA ARTE.....	17
2.1 Estudo de <i>Roll Waves</i> na Vertente Teórica e Numérica.....	17
2.2 Estudo de <i>Roll Waves</i> na Vertente Experimental – Evidencias do Fenômeno.....	19
3 CONSIDERAÇÕES INICIAIS: TÉCNICAS DE MEDIÇÃO E REOLOGIA.....	24
3.1 Técnicas de Medição.....	24
3.1.1 <i>Aguilha de Contato</i>	24
3.1.2 <i>Condutância Elétrica</i>	25
3.1.3 <i>Capacitância Elétrica</i>	25
3.1.4 <i>Técnicas Ópticas</i>	26
3.1.5 <i>Técnicas Ultrassônicas</i>	30
3.2 Reologia.....	32
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
4.1 Materiais.....	36
4.1.1 <i>Canal e Mesa do canal</i>	36
4.1.2 <i>Manejo do fluido teste</i>	40
4.1.3 <i>Sistema de perturbação</i>	43
4.1.4 <i>Sistema de aquisição de dados</i>	44
4.1.5 <i>Fluido Teste</i>	51
4.2 Métodos.....	52
4.2.1 <i>Sistema Fotométrico: Método Óptico – Absorção Luminosa</i>	52
4.2.2 <i>Sistema Ultrassônico: Método Pulsado, modo Pulso – Eco</i>	55
5 EVOLUÇÃO DO EXPERIMENTO.....	58
5.1 Primeira Fase.....	58
5.2 Segunda Fase.....	60
5.3 Terceira Fase.....	62
6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	66
6.1 Alterações na Reologia.....	66
6.2 Aparato Experimental.....	68
6.3 Sistema de Perturbação e Aquisição de Dados.....	69
6.4 Avaliação Sumária com Base em Modelos Matemáticos do Efeito da Vazão em Relação ao Número de Froude.....	75
6.5 Confrontação entre Resultados Teóricos e Experimentais.....	76
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	81
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	83
REFERÊNCIAS.....	85

APÊNDICE A.....89

1 INTRODUÇÃO

O tema riscos e desastres naturais têm sido cada vez mais divulgado, em decorrência dos acontecimentos dos últimos anos por várias partes do mundo: inundações no Brasil, terremotos na Nova Zelândia e no Japão (acidente na usina nuclear de Fukushima, seguido por tsunami), além de tempestades acompanhadas por tornados nos Estados Unidos, o furacão Irene também em território norte-americano, assim como alagamentos na Tailândia, tremores de terra na Turquia e tempestades nas Filipinas (UNISDR¹, 2012). No entanto, deve-se ficar claro, o que é um risco, uma catástrofe natural ou somente um evento natural.

O Risco é um termo utilizado em diversas áreas do conhecimento ou de pesquisa, abrangendo desde as ciências sociais até as engenharias. Assim, uma grande variedade de definições é apresentada na literatura, de acordo com a área de aplicação. Contudo, independentemente da área, a sua utilização é fundamentada na probabilidade e magnitude de uma situação que envolve a exposição ao perigo. (LOURENÇO ; MARTINS, 2009).

No que tange a eventos e desastres naturais, a diferença consiste no impacto causado na sociedade. Os desastres naturais podem ser distinguidos em função da natureza do fenômeno que o desencadeia, o efeito impactante do acidente é resultado de um conjunto de ações, de natureza meteorológica, geológica ou geomorfológica ou ainda, uma combinação destas, sendo potencializada, quase sempre, por ações de antropização. Tais desastres são decorrentes de fenômenos, como as tempestades, inundações, deslizamentos de terra, terremotos, vulcões, etc., que se fazem presentes em locais de maior vulnerabilidade. Caso estes fenômenos ocorram em regiões não povoadas ou não causem danos a uma comunidade ou população, o mesmo é considerado apenas um evento natural.

No Brasil tem ocorrido com uma certa frequência desastres naturais, como inundações e deslizamentos de terra, principalmente no verão por ser um período de chuvas intensas. Estas ocorrências, associadas ao assoreamento de rios, presenças de comunidades em locais inadequados para moradia e mal planejamento urbano, podem causar catástrofes de grande magnitude. As regiões Sul e Sudeste do Brasil tem sido cenários destes fenômenos naturais, sendo que, os que ganham mais destaque são as corridas de lama ao longo das encostas que ocorrem após as chuvas intensas (GUIDICINI ; NIEBLE, 1984). Estes escoamentos de lama ao atingirem áreas com

infraestrutura, torna o evento catastrófico, provocando prejuízos não só de ordem econômica, mas principalmente humana, social e ambiental.

Dentre inúmeros exemplos, destaca-se o Estado do Rio de Janeiro, cuja população da região serrana sofreu em 2011 consequências destes eventos, que se tornaram verdadeiras catástrofes em função dos danos causados.

Após chuvas intensas, os escorregamentos de encostas e frentes de lama, formam canais naturais de material lamoso, com transporte de detritos (Figura 1). Vale salientar, que nesta situação, grande parcela da destruição foi causada pelas frentes de lavas torrenciais que possuem dinâmica e energia suficiente para destruir infraestrutura e erodir leitos, provocando um grande número de vítimas. Segundo dados divulgados pela Defesa Civil Estadual do Rio de Janeiro houveram 8.777 desabrigados, mais de 20 mil desalojados e 950 vítimas fatais, além das pessoas desaparecidas.

Figura 1: Deslizamentos em Teresópolis em 2011.



Fonte: Foto Marino Azevedo/Rio de Janeiro, Governo.

Ressalta-se que as corridas de lama ou escoamentos de fluidos hiperconcentrados, exibindo propriedades não-newtonianas, geralmente são oriundos de misturas argilosas e têm sido objeto de estudo científico devido a sua aplicabilidade nas engenharias. Em especial, a Engenharia de Recursos Hídricos tem um interesse particular no estudo de escoamentos de fluidos deste tipo, por integrarem diversos problemas, tais como cheias e transbordamentos de rios, deslizamentos de terra e os problemas de transporte de sedimentos, entre outros.

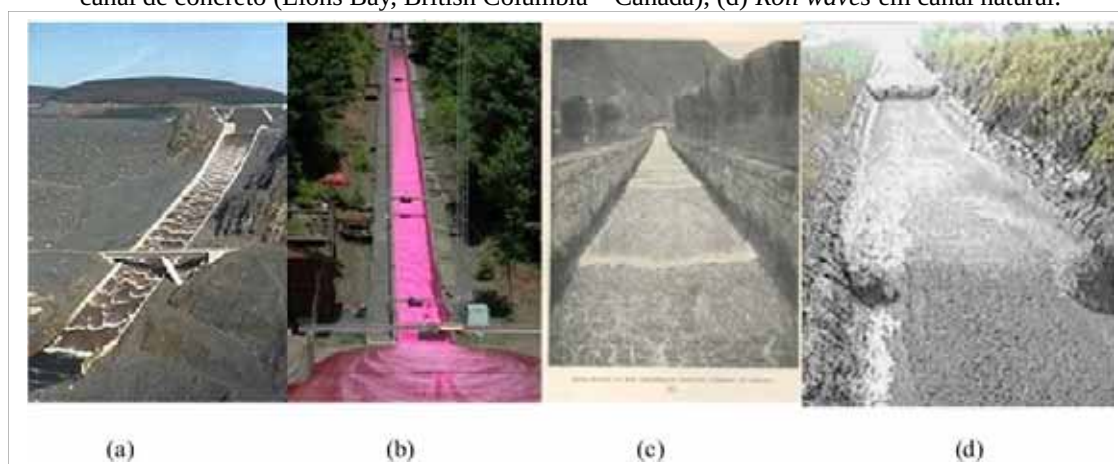
Nestes tipos de escoamentos, especificamente em canais inclinados, rios naturais ou encostas, podem surgir fenômenos sob forma de instabilidades periódicas na superfície livre, que são percebidas como um trem de ondas, de amplitude e comprimento bem definidos. Estas ondas, geralmente são provenientes de uma perturbação, seja natural (vento, chuvas intensas, topografia) ou por obstáculos (rochas, galhos, entre outros). Ocasionalmente durante a propagação destas

instabilidades a jusante, suas amplitudes amplificam-se e transformam-se em frentes ou ressaltos hidráulicos móveis sendo chamadas, nesta configuração, de *roll waves*.

As *roll waves* apesar de serem muito presentes em estruturas artificiais (Figura 2a, 2b e 2c), não é raro identificá-las em ambientes naturais tais como, rios e lagos, deslizamentos de encostas, *debris flows*, avalanches, etc. São ondas que se desenvolvem tanto em escoamentos de fluidos newtonianos, e sobretudo, em fluidos não-newtonianos (misturas hiperconcentradas de água, argila, areia e agregados de maior granulometria), vide Coussot (1994) e Liu e Mei (1994).

Desta forma, a ocorrência destas ondas pode potencializar os danos causados por um deslizamento, agravando ainda mais as consequências do acidente.

Figura 2:– Propagação de *roll waves* em canais: (a) *Roll waves* em vertedouro do reservatório de Llyn Brianne, em Wales, Reino Unido, (b) Canal de escoamentos de detritos (Serviço Geológico dos EUA, Oregon) (c) *Roll waves* em um canal de concreto (Lions Bay, British Columbia – Canadá), (d) *Roll waves* em canal natural.



Fontes: (a), (b), (c) Adaptado de Bohorquez (2010), (d) Filme do Cemagref - Grenoble – França.

Salienta-se que o estudo da ocorrência, evolução e prevenção destas instabilidades é tema de competências múltiplas, abrangendo desde a matemática (sistemas hiperbólicos) até ciências sociais, com um importante papel de tradução da catástrofe. Neste sentido, identificar as condições de formação e manutenção de instabilidades tipo *roll waves* e desenvolver métodos de previsão de sua evolução, são trabalhos de interesse científico que devem integrar projetos de engenharia, auxiliando na “gestão de políticas públicas”. Maciel (2011) ilustra este tema em sua reflexão sobre o atual problema de gestão de riscos e de prevenção de catástrofes no Brasil. É bem verdade que catástrofes dessa natureza têm sido resolvidas através de medidas paliativas, que dificilmente recuperam os prejuízos sofridos pelas famílias atingidas. Sabe-se que medidas corretivas diminuem pouco o risco, mas não evitam os acidentes, dada a condição em que moram muitos brasileiros. Desta forma, salienta-se que medidas de prevenção e de gestão devem urgentemente ser aplicadas a estes ambientes, evitando danos futuros à população.

Dentro deste contexto, esta dissertação de mestrado irá abordar particularmente o controle de instabilidades, a partir da implementação de um aparato experimental para a aferição de *roll waves* que se fazem presentes em corridas de lama, caso condições necessárias (perturbações e características dos canais) sejam atingidas.

1.1 Justificativa da Pesquisa

Dentre os tipos existentes de riscos naturais, pretende-se visualizar e aferir experimentalmente o fenômeno *roll waves*. Dá-se enfoque nesta pesquisa aos escoamentos hiperconcentrados, de reologia não newtoniana,

Sabe-se que *roll waves* podem ser presenciadas em estruturas artificiais e também em ambientes naturais, em escoamentos de fluidos newtonianos, tais como, em vertedouros de barragens (Dressler, 1949), e também em escoamentos de fluidos não newtonianos (NG ; MEI, 1994; MACIEL, 1997; LIU ; MEI, 1994; COUSSOT, 1994; BALMFORTH ; MANDRE, 2004, MACIEL et al., 2013). Estas instabilidades podem ocasionar eventuais transbordamentos dos canais onde ocorrem, favorecendo a incorporação de detritos e material lamoso, aumentando assim, o poder destrutivo do fenômeno que pode, quando aliado a estruturas civis com baixa manutenção, potencializar a catástrofe. Catástrofes desta natureza, como as corridas de lama, são frequentes e facilmente ilustradas através de eventos desastrosos em todo o mundo (ZANUTTIGH ; LAMBERTI, 2007).

O estudo destas ondas abrange diversas áreas do conhecimento, tais como matemática, física, reologia e engenharias, com uma forte aplicação nas ciências sociais. No entanto, as características destas instabilidades (amplitude, comprimento e velocidade de propagação) têm sido estimadas matematicamente (através de soluções analíticas e/ou numéricas), pois raramente encontram-se dados experimentais, principalmente no que diz respeito a geração em escoamentos de fluidos não newtonianos. Ressalta-se que no Brasil, embora exista a presença do fenômeno *roll waves*, principalmente em casos de deslizamentos e corridas de lamas, poucos estudos têm sido feito para identificar as condições de geração destas ondas.

Neste sentido, a equipe RMVP – Reologia de Materiais Viscosos e Viscoplasticos – Grupo de pesquisa do CNPq - UNESP de Ilha Solteira, associada ao estudo de riscos e catástrofes no meio ambiente, vem reunindo esforços no plano matemático e numérico para identificar critérios de geração e também suas propriedades, e recentemente, no âmbito experimental, para escoamento de fluido newtoniano em uma rampa de lava torrencial (FIOROT, 2012).

Seguindo esta linha, esta pesquisa de mestrado tem como objetivo contribuir para preencher a lacuna existente no âmbito experimental, no que diz respeito a geração de *roll waves* em

escoamentos de fluidos newtoniano e não newtonianos.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho consiste na concepção, projeto e construção de um aparato experimental que permita visualizar a geração e propagação de *roll waves* em fluidos hiperconcentrados (não newtoniano), a partir de uma perturbação imposta, conforme será descrito no Capítulo 4.

Os objetivos específicos podem ser enumerados da seguinte maneira:

- Analisar o fluido teste (gel de carbopol) com aferições reométricas, identificando as propriedades reológicas deste fluido;
- Aferir a amplitude das *roll waves*, utilizando duas técnicas: laser - fotometria – absorbância e ultrassom - modo pulsado - pulso-eco.

2 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo é apresentado o estado da arte do fenômeno *roll waves* em escoamentos de fluidos newtonianos e não newtonianos (hiperconcentrados), fazendo uma abordagem dos trabalhos clássicos e dos mais recentes. O capítulo é dividido em duas vertentes, a primeira trata de levantamentos bibliográficos do fenômeno *roll wave* no plano teórico/numérico e uma segunda trata de evidências e dados experimentais encontrados na literatura, mostrando a lacuna existente no que diz respeito a trabalhos experimentais.

2.1 Estudo de *Roll Waves* na Vertente Teórica e Numérica

Como explanado no Capítulo 1, o estudo de escoamentos com superfície livre, tem um grande número de aplicações em engenharia. Estudos teóricos e numéricos têm sido realizados para identificar condições de geração de *rollwaves*, caso condições propícias estejam presentes no escoamento.

Salienta-se que estas ondas podem ocorrer em diversos meios, seja em tremores vulcânico, conforme modelado por Julian (1994), assim como em oscilações de pressão em artéria humana (PEDLEY, 1980 ; BROOK, 1999), em meios hidráulicos, entre outros. Embora existam diversas aplicações, os estudos apresentados nesta dissertação referem-se à formação de *roll waves* em escoamentos com superfície livre de fluidos hiperconcentrados.

No meio hidráulico, as *roll waves* são definidas como ondas que se processam em canais com declividades em forma de ressalto hidráulico moveis e se apresentam como uma série de ondas de comprimentos bem definidos, separadas por descontinuidades, típicas de ondas de choques (Rankine Hugoniot). Podem também ser definidas como ondas que se propagam com forma, comprimento, amplitude e velocidade de propagação constantes, apresentando elevado nível energético (MACIEL, 2001), principalmente quando se trata de escoamentos de fluidos hiperconcentrados, tipo corridas de lama e detritos.

Geralmente, os critérios estabelecidos estão relacionados à dinâmica do escoamento e são representados por dois adimensionais importantes no meio hidráulico: o número de Froude (Fr) e de Reynolds (Re), sendo o primeiro representado pelas forças inerciais e gravitacionais do escoamento e o segundo, pelas forças inerciais e viscosas.

Para identificar estes critérios, um método que tem sido utilizado por pesquisadores que estudam o fenômeno *roll waves*, é a análise de estabilidade linear. Esta técnica é realizada com a imposição de uma perturbação de ordem infinitesimal nas equações de quantidade de movimento e

conservação da massa, partindo da hipótese de escoamento de águas rasas (equações do tipo Saint Venant), que são propícios ao surgimento de ondas longas.

O primeiro a estabelecer um critério sobre a formação de *roll waves* em escoamentos turbulentos foi Jeffreys (1925), deduzindo que o escoamento uniforme tornava-se instável quando $Fr > 2$. Ishihara et al (1954) mostraram através de análise de estabilidade linear, que para um escoamento laminar, as instabilidades tendem a aparecer quando de $Fr > 1/\sqrt{3}$ e, Benjamin (1957) e Yih (1963) verificaram numericamente o surgimento de *roll waves* em escoamentos laminares quando $Fr > 0,5$.

Trabalho matemático e clássico dentro do contexto de *roll waves* é o de Dressler (1949), que desenvolveu um equacionamento baseado na suposição de *roll waves* permanente e periódico, cuja solução depende da imposição das condições de choque (Rankine Hugoniot), com soluções de onda bastante íngreme.

Outros pesquisadores têm utilizado a metodologia de Dressler (1949), tanto para escoamentos de fluidos newtonianos quanto para escoamentos de fluidos não newtonianos. No entanto, os escoamentos de fluidos não newtonianos têm mostrado uma maior complexidade para a modelagem matemática e numérica, devido à influência das propriedades reológicas do fluido e principalmente na escolha do modelo reológico adequado, conforme será mostrado no Capítulo 3.

Utilizando a metodologia de Dressler (1994), Ng e Mei (1994) determinaram um modelo matemático para escoamentos laminares de reologia do tipo *power law*, onde as ondas obtidas são conectadas por choques (*shock waves*). Eles verificaram também que o domínio favorável para a geração de *roll waves*, é quando $Fr > n/\sqrt{(2n+1)}$, sendo que n é o índice de escoamento do fluido, característico do modelo reológico do tipo *power law*.

Embora o modelo reológico do tipo *power law* possua efeitos não newtonianos, este não é um bom representante de fluidos lamosos como as misturas de água e argila, pois neste modelo reológico não há o efeito da tensão de escoamento ou crítica, parâmetro importante na dinâmica do escoamento. Coussot (1994) mostrou, através de análise de estabilidade linear, que existe um número de Froude mínimo dependendo das características do fluido, utilizando a proposta reológica de Herschel Bulkley, Huang e Garcia (1998) mostrou a influência da tensão crítica de escoamento no perfil de velocidade.

Neste sentido o grupo RMVP tem trabalhado para identificar critérios para geração de *roll waves* em fluidos que apresentem tensão crítica de escoamento. Maciel (2001) utilizando da reologia binghamiana, estabeleceu as condições de existência e estabilidade do fenômeno.

Mais recentemente, Ferreira (2007) e Maciel et al. (2013) determinaram um modelo matemático que fornece as principais propriedades das *roll waves* (amplitude, comprimento e

velocidade de propagação) em escoamentos não newtonianos e, utilizando o modelo reológico de Herschel Bulkley verificaram também uma condição de existência relacionada ao número de Froude. E ainda, Ferreira et al. (2013) mostraram que existe uma segunda condição para a geração destas ondas relacionada à frequência de perturbação imposta ($f < f_c$), ou seja, para a geração de *roll waves* existe uma frequência máxima de perturbação (f_c), verificando também que o primeiro critério estabelecido é necessário, mas não suficiente.

Seguindo esta linha, o grupo RMVP tem abordado trabalhos experimentais com fluidos newtonianos (FIOROT, 2012) e não newtonianos, com o objetivo de caracterizar estes fluidos, analisar a dinâmica do escoamento e, sobretudo, aferir a amplitude das *roll waves*, melhorando as análises matemáticas e numéricas realizadas dentro do grupo.

2.2 Estudo de *Roll Waves* na Vertente Experimental – Evidencias do Fenômeno

As primeiras observações de *roll waves* foram feitas por (CORNISH, 1934), no canal de Merligen, Suíça. Através da foto (Figura 3), pode-se observar que estas ondas são periódicas longas e com cristas íngremes, conforme identificadas matematicamente por Dressler (1949).

Figura 3 – *Roll waves* em Grönnbach, na cidade de Merligen, Suíça, visualizadas no sentido jusante (Cornish, 1934).



Fonte: (CORNISH, 1934) - Freshwater and Marine Image Bank .

Esta observação foi a primeira evidência da existência do fenômeno em canais inclinados, com isto, iniciaram-se as pesquisas sobre o fenômeno *roll waves*. Cabe salientar que o trabalho experimental é delicado e de difícil realização, o que dificulta verificar a validade dos critérios

estabelecidos matematicamente e numericamente.

No âmbito experimental o trabalho pioneiro foi o de Brock (1969), que propiciou um grande número de informações sobre a formação de *roll waves* e seu desenvolvimento em escoamentos turbulentos de fluido newtoniano. Uma importante contribuição foi a verificação do critério estabelecido por Jeffreys (1925). Ele observou que quando $Fr < 2$ não havia a geração de *roll waves* e que, no domínio favorável $Fr > 2$ nem sempre estas ondas eram observadas. Os experimentos de Brock foram realizados em um canal cujas dimensões eram: 0,11m de largura e 40m de comprimento, com a inclinação do canal variando entre 5 e 10%. As profundidades dos escoamentos em regime uniforme se encontravam entre de 5 e 8mm, com números de Froude entre 3 e 6. O nível de água era medido em diversas seções do canal por medidores de pressão.

Ainda para a reologia newtoniana, destaca-se o trabalho de Liu e Gollub (1994) como uma importante contribuição, pois experimentos foram realizados para escoamentos de filmes finos de fluido altamente viscoso (solução aquosa de glicerina), cuja viscosidade era aproximadamente cinco vezes maior que a da água. Como sistema de medição para as ondas geradas, eles utilizaram 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 acoplado um sistema de aquisição computadorizado por fotoluminescência.

Já para fluidos não newtonianos, Coussot (1994) tem uma contribuição de ordem qualitativa no que diz respeito ao perfil das *roll waves*. Em seus experimentos sobre fluidos hiperconcentrados, Coussot não fez um estudo sistemático das características das ondas que surgiram em seus experimentos, apenas registrou as condições em que as instabilidades apareceram. O aparato experimental era constituído por um canal retangular com 8 m de comprimento e 0,6m de largura e a inclinação variava entre 3 e 27%. O fluido utilizado foi uma mistura de água e argila, com uma concentração em volume variando entre 20 e 25%. A vazão fornecida no início do canal variava entre 0,27 e 3,85 l/s. Coussot observou que o escoamento se tornava instável quando o canal estava acima de uma certa declividade e, de acordo com algumas vazões, pôde verificar a formação de *roll waves* (Figura 4). Mesmo não havendo nenhuma perturbação externa aplicada ao escoamento, pequenas ondas apareciam na superfície livre do escoamento. Tais ondas cresciam progressivamente até se tornarem *roll waves*. Ele descreveu estas ondas como longas e de grandes amplitudes, com velocidade de propagação maior que a do escoamento uniforme.

Figura 4 – Observação de Roll Wave por Coussot (1994).



Fonte: Adaptado de Zanuttigh.

Uma outra importante contribuição de Coussot (1994) através de seus experimentos é que ele mostrou que o modelo reológico do tipo Herschel Bulkley é o mais adequado para esse tipo de material (hiperconcentrado), porque utiliza 3 parâmetros para representar o comportamento dos fluidos: tensão de escoamento (τ_c), índice do escoamento (n) e índice de consistência (K_n). A mesma conclusão foi corroborada por Maciel et al. (2009), mostrando que o comportamento de misturas argilosas se encaixa ao modelo de Herschel Bulkley.

Seguindo a linha de Coussot e Wang (2000) realizou experimentos visando estudar o crescimento das instabilidades em escoamentos laminares de fluidos não-newtonianos. O canal utilizado por ele, tinha 26 m de comprimento, 0,6 m de largura e 0,5 m de altura, com paredes de vidro e o fundo era uma placa de aço liso. A inclinação do canal variava entre 2 e 8%. Suspensões argilosas eram recirculadas através do canal. O material de argila apresentava uma densidade de $2,68 \text{ g/cm}^3$ e o diâmetro médio de 0,2 mm. A argila e a água foram bem misturadas de modo que as suspensões comportaram-se como um líquido viscoso em vez de uma mistura de água e sólidos. O escoamento uniforme apresentava uma profundidade entre 1 e 12 cm (dependendo da vazão), o mesmo era perturbado com fluxos entre 3 e 5 l de solução argilosa a partir de um tanque adicional que era colocado a 2 m da entrada do canal. O perfil das ondas geradas ao longo do canal eram semelhantes a *roll waves*.

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 consistiram de

paredes de vidro, o fundo do canal era rugoso por meio de colagem, de uma camada das partículas utilizadas para o escoamento. Dois materiais foram testados, os grânulos de vidro caracterizados por um diâmetro médio igual a 0,5 mm, e areia com um diâmetro médio igual a 0,8 milímetros. A inclinação do canal variou entre 24° e 29° para os escoamentos que continham grânulos de vidro, e entre 32° e 36° para os escoamentos com partículas de areia.

Nos experimentos de Forterre e Pouliquen (2003), as *roll waves* eram observadas a partir de uma frequência de perturbação de amplitude conhecida que era aplicada sobre a superfície livre do escoamento, como no trabalho de Liu et al. (1993), tal método consistia em soprar, um fino jato de ar através de três auto-falantes incorporados em um bocal de 2-D, com uma fenda de 1 mm. A deformação da superfície livre era de aproximadamente 0,25 mm de altura. No caso dos grânulos de vidro, o comprimento do canal era insuficiente para permitir o desenvolvimento de ondas.

Conforme já mencionado, dentro deste contexto de geração, propagação e aferição de *roll waves*, o grupo RMVP iniciou pesquisas para preencher esta lacuna. Recentemente, Fiorot (2012) aferiu estas ondas em escoamentos laminares de fluido newtoniano, porém altamente viscosos (glicerina pura).

Nestes experimentos, as *roll waves* foram observadas com a imposição de uma perturbação controlada a partir de um gerador de funções. Era possível observar estas ondas somente quando o canal estava em condições favoráveis para a geração das mesmas ($Fr > 1/\sqrt{3}$). Pôde-se também observar a influência da frequência de perturbação imposta na amplitude destas ondas, além disso, verificou-se que muitas vezes, mesmo em condições favoráveis, tais ondas não se propagavam, conforme verificado através de análises matemáticas por Ferreira et al. (2013). Na Figura 5 é mostrado a formação de *roll waves* com o canal inclinado em 8° para uma frequência de perturbação de 3 Hz (FIOROT, 2012).

Figura 5 – Visualização de *roll waves* geradas a partir de uma frequência de perturbação de 3 Hz.



Fonte: Fiorot (2012).

Destaca-se que estas ondas foram aferidas através de um sistema de medição composto por fotodetectores alinhados com um diodo-laser, a aquisição dos dados foi feita por um PC acoplado diretamente à saída de um osciloscópio digital.

Com o intuito de dar continuidade ao trabalho de Fiorot (2012), esta dissertação de mestrado tem como objetivo aferir *roll waves* em escoamentos de fluidos não newtonianos, visto que, outros trabalhos já têm sido desenvolvidos dentro do grupo para caracterizar fluidos de reologia mais complexas (MINUSSI, 2007; LEITE, 2009; MACIEL et al. 2009).

Minussi (2007) e Leite (2009) desenvolveram trabalhos numéricos e experimentais, sobre ruptura de barragens utilizando o gel de carbopol (não newtoniano), mostrando que o fluido (tipo lamoso da natureza) é bem representado pelo modelo reológico de Herschel Bulkley. Maciel et al. (2009) realizaram um trabalho experimental com intuito de caracterizar as propriedades de soluções argilosas, identificando as propriedades reológicas do fluido, caracterizando-o como não newtoniano do tipo Herschel Bulkley para uma concentração em volume maior do que 5%.

Assim, esta pesquisa vem contribuir com a implementação de um aparato experimental fino e adequado, desenvolvido no Laboratório de Hidrologia e Hidrometria da Feis/Unesp, a fim de gerar e aferir *roll waves* em escoamentos de fluidos não-newtonianos.

O aparato experimental desenvolvido, desprovido de ruídos pela presença de uma mesa inercial, permite medir as instabilidades através de dois sistemas clássicos de medição: fotometria (diodo-laser) e ultrassom.

Ademais, esta pesquisa visa, preencher uma lacuna na literatura, qual seja a escassez ou inexistência de medidas de *roll waves* em fluidos não-newtonianos.

3 CONSIDERAÇÕES INICIAIS: TÉCNICAS DE MEDIÇÃO E REOLOGIA

3.1 Técnicas de Medição

Escoamento em filmes finos ocorrem frequentemente em diversas aplicações de Engenharia em fluxos que podem ter espessura menor que 10 microns até aproximadamente 10 mm. Sua importância em processos industriais assim como sua modelagem em processos de transferência de calor e massa são largamente conhecidos no aprimoramento de técnicas para utilização de equipamentos como reatores, torres de resfriamento, evaporadores, condensadores, e em processos de revestimento eletroquímico, crescimento de cristais, e muitos outros. Por escoamento de filme fino entende-se aquele que ocorre sobre um substrato sólido onde sua superfície é livre e exposta a outro fluido, geralmente um gás.

As técnicas adotadas por especialistas destas áreas para medir este tipo de fenômeno são precisas e de resposta rápida. Vale a pena lembrar que este tipo de escoamento também está sujeito ao surgimento de instabilidades.

Ao longo dos anos uma variedade de técnicas de medição vem evoluindo. Um dos primeiros métodos é a observação visual por fotografia. Este método é conhecido por ser uma técnica muito subjetiva, sendo adequado para aplicações de baixa velocidade do escoamento. Técnicas baseadas na capacitância ou resistência - impedância, também tem sido bastante empregada, propondo assim, vários modelos baseados nestes princípios, dependendo somente das aplicações. Atualmente, técnicas mais recentes, como ultrassom e fotônica, têm sido empregadas, resultando em melhores caracterizações dos fenômenos a serem observados.

Vários pesquisadores utilizaram-se destas técnicas para visualizar e caracterizar a altura, a velocidade e a instabilidade de escoamentos, observando bolhas, transporte de matérias, oscilações na superfície livre, dentre outras diversas observações características de cada configuração experimental.

3.1.1 *Agulha de Contato*

O método da agulha de contato é um dos mais antigos já desenvolvidos e sua utilização é bastante intuitiva. Normalmente, é utilizado para medição de filmes de água, por conta da condutividade elétrica da mesma. Neste aparato, uma bancada de testes é montada de forma a permitir que uma agulha (ou um fio fino) seja movimentada na direção do escoamento através de um micrômetro. Esta agulha deve ter diâmetro bem pequeno (décimos de milímetros) e ser revestida com material isolante, exceto na sua ponta. Na parede oposta, ou seja, na superfície por

onde o escoamento irá acontecer, um eletrodo é instalado permitindo que um circuito seja fechado quando a ponta da agulha tocar a superfície do escoamento.

3.1.2 Condutância Elétrica

Entre todos os métodos existentes para se efetuar medição de espessura de filmes, talvez este seja o método mais utilizado. Conceitualmente simples, este método se vale da capacidade de conduzir eletricidade da água. Dois fios paralelos e nus são imersos na água e a quantidade de corrente que irá atravessar o circuito será determinada pela quantidade de água entre os fios, diretamente proporcional à altura do fluido entre eles. Correntes alternadas são normalmente empregadas nestes sistemas para evitar a rápida deterioração dos eletrodos e também reduzir ruído.

Muitos trabalhos na literatura acerca deste método apontam que a precisão do método está relacionada com a frequência do sinal, devendo ser superiores aos 10 kHz. Apesar da teoria por trás deste prever um comportamento linear em resposta a altura do filme, efeitos não-lineares e a própria natureza do equipamento exigem constantes revisões, caso a precisão desejada seja superior a 10%. Além disso, há um limite inferior de funcionamento da sonda, em torno de 0,5 mm, devido ao efeito de capilaridade, fazendo com que o líquido suba pelos eletrodos. Implementações deste experimento feitas por Karapantsios et al. (1989), utilizando sinais de 25 kHz, estimou a incerteza dos seus experimentos em 0.02 mm, com sensibilidade de 0.002 mm, para lâminas acima de 0.5 mm.

3.1.3 Capacitância Elétrica

Os sistemas de medição por capacitância elétrica mostram uma vantagem sobre os métodos até agora discutidos e despertaram grande interesse da comunidade científica na década passada.

Através deste método torna-se possível a medição de fluidos testes não condutores de eletricidade, observando, este fluido como um material dielétrico. A capacitância (ou admitância) é medida ao se aplicar uma tensão alternada entre dois eletrodos posicionados de tal forma a permitir a passagem de fluido entre eles. Através de teoria do eletromagnetismo, uma relação entre espessura do fluido e capacitância é construída.

3.1.4 Técnicas Ópticas

A óptica tem sido apontada na engenharia como solução de uma grande quantidade de problemas, tais como: sistemas de processamentos, memória, chaveamento, etc. No entanto, a óptica teve seu desenvolvimento inicial em telecomunicações, aplicada a tráfego de dados em longa distância com uma elevada taxa de transmissão. Na instrumentação eletrônica, a óptica tem sido

usada com grande destaque em diversos ramos da ciência.

Métodos ópticos são os que empregam as propriedades de interação da luz com a matéria, para caracterizar algum tipo de fenômeno específico. Dentre diversos métodos, neste subtítulo serão apresentados: fluorescência foto induzida, absorção luminosa e reflexão luminosa.

Os métodos ópticos, dependendo da configuração, podem ser utilizados para caracterizar deslocamentos, deformação mecânica, posição, pressão, aceleração, ângulo, rotação, nível de líquido, radiações ionizantes, campo elétrico, campo magnético, campo acústico, corrente elétrica, tensão elétrica, temperatura, etc.

Fluorescência Foto Induzida

O método de fluorescência foto induzida pode fornecer informações detalhadas e precisas sobre o filme líquido. Para sua operação, uma fonte intensa de luz (lâmpada de vapor de mercúrio ou laser de íons de argônio) é focalizada no filme líquido que tem diluída uma tinta fluorescente.

Uma porcentagem da luz emitida é absorvida, fazendo com que as moléculas da tinta se tornem fluorescentes. A potência desta emissão fluorescente pode ser teoricamente determinada através de uma função do número de moléculas de corante no trajeto da luz. Assim, para uma dada mistura de corante, uma curva de calibração é obtida relacionando a espessura do filme (ou o volume da mistura líquido-corante exposto à luz) com a potência da luz fluorescente.

O experimento desenvolvido por Hewitt et al (1990) ilustra as primeiras tentativas de utilização deste método no qual uma fonte luminosa de vapor de mercúrio é utilizada com um corante de sódio fluorescente para medir a espessura do escoamento de filme sobre um tubo fechado. Através do uso de ótica simples, a luz emitida é introduzida em uma seção transparente do tubo e a luz fluorescente é capturada e analisada juntamente com a luz refletida. Devido ao fato de que o corante emite ondas luminosas em uma banda muito estreita de comprimento de ondas, o sinal do corante pode ser separado daquele emitido pela luz, através de filtros óticos. Posteriormente, a técnica foi sendo aprimorada, levando em consideração, a inclinação da superfície fluida, otimizando a obtenção da topologia do filme, alcançando sensibilidades de até 0,01 mm e resolução de até 0,04 mm e podendo ainda ser aplicado a filmes mais espessos (> 10 mm) com pequena perda de sensibilidade.

Dentro do contexto de *roll waves*, um dos mais interessantes trabalhos de experimentação surgiu dentro do grupo de pesquisa de Gollub (LIU ; GOLLUB, 1994; LIU et al., 1993) onde um canal, montado sobre uma plataforma, era capaz de resistir a vibrações e atenuar interferências externas.

Este método pode ser um dos poucos disponíveis capaz de fornecer tamanho detalhamento

de informações do filme líquido, quase que instantâneo. Algumas precauções devem ser tomadas para assegurar a estabilidade da fonte de luz com relação à seção de teste do fluido: bancada de testes isoladas de vibrações devem ser empregadas com o propósito de minimizar perturbações externas.

Este sistema requer o uso de fontes de luz mais caras, no entanto, com a queda dos preços de canhões a laser, elas poderão ser substituídas. Finalmente, as medições são limitadas a situações quando os fluidos podem ser impregnados com corante fluorescente, o que pode limitar significativamente o número de líquidos que podem ser estudados.

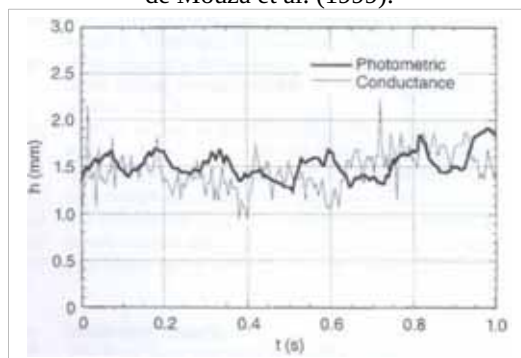
Absorção Luminosa

Um feixe de luz ao atravessar um líquido pode ser em parte absorvido; a quantidade de luz absorvida é uma propriedade volumétrica do líquido. Se, então, um feixe de luz é direcionado através de um filme líquido e posteriormente detectado por um sensor alinhado com a fonte, flutuações na intensidade luminosa recebida pelo sensor podem ser correlacionada com a espessura do filme.

Barter e Lee (1994) usaram esta propriedade para produzir informações sobre ondas de superfície livre em uma camada de fluido. A este fluido, é adicionado um corante verde para aumentar o coeficiente de absorção para a luz vermelha. Um diodo de 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.

Uma proposta muito similar foi adotada por Sattelmayer et al. (1987). Para compensar as alterações da composição e temperatura do fluido e possivelmente incrustação das superfícies óticas, uma célula de calibração recebe um fluxo contínuo de fluido em teste. A espessura do fluido na célula de calibração é regulada em 1 mm. Dados são extraídos simultaneamente da seção de teste do fluxo e da célula de calibração e cada dado da seção de teste é calibrada usando informações da célula de calibração. Estes cientistas usaram uma luz focalizada para estudar a variação de tempo de uma área espacialmente muito pequena. Mouza et al. (1999), utilizando esta técnica em comparação a uma sonda condutiva, obtiveram resultados bastante satisfatórios para um escoamento em regime laminar de filme fino (Figura 6). Excelentes dados são apresentados para uma variedade de fluidos com sensibilidades maiores que 0,005 mm.

Figura 6: Medições de escoamento de filme fino (solução de água + azul de metileno) obtidas a partir de método de absorção luminosa (linha escura) e sonda condutiva (linha clara), para a mesma configuração de escoamento. Adaptado de Mouza et al. (1999).



Fonte: Mouza et al. (1999)

Em técnicas mais sofisticadas que empregam fibras óticas, pode-se utilizar simultaneamente dois feixes luminosos, no qual o objetivo é melhorar a precisão do equipamento, onde as leituras de um feixe faz a calibração das medidas feitas pelo outro feixe. Medições de filmes de 0,025 mm a 0,1 mm são possíveis com incerteza da ordem de 0,005 mm. As principais preocupações com esta técnica são a estabilidade da fonte de luz em relação a seção de teste e a compensação para as reflexões da superfície. Isso complica muito a construção da seção de teste e, obviamente, qualquer projeção irá potencialmente perturbar o fluxo que está sendo examinado.

Reflexão Externa da Luz

A reflexão de luz em superfícies líquidas vem sendo usada para determinar não somente a 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 líquida, um normal à parede que conduz o líquido e outro a um certo ângulo dela. Usando uma sequência de espelhos, as reflexões desses feixes são trazidas em um mesmo painel, e essas posições sem o líquido são tidas como referência. Enquanto o líquido escoar pela superfície, as posições dos dois pontos de reflexão se movem e são gravadas com uma câmera. As imagens gravadas podem então ser analisadas e a altura do líquido e a inclinação da superfície no ponto de teste podem ser determinadas pelas posições dos feixes de luz refletidos em relação às marcas de referência.

Medições vêm sendo feitas para filmes entre 0,5 mm e 2 mm de espessura, com escala mínima de 0,01 mm e precisão de 4%. Este método pode ser utilizado com qualquer fluido, não importando sua composição ou propriedades óticas.

A estabilidade das fontes de laser, os espelhos utilizados e a tela de saída em relação às superfícies de teste são de extrema importância. Por esta razão, todo o experimento é realizado em uma bancada de testes anti-vibrações. Vale ressaltar que este dispositivo é requisitado com

frequência para utilização de equipamentos óticos, que sofrem interferências com vibrações mecânicas externas.

Reflexão Total Interna da Luz

Quando um feixe luminoso passa de uma substância para outra, uma parte dela é refletida na interface, enquanto o restante atravessa para a segunda substância, inclinando-se de acordo com a lei de Snell. Em um certo ângulo de inclinação (ângulo crítico), o feixe que atravessaria será refletido de volta à primeira substância. Esse fenômeno é chamado de reflexão total interna da luz (TIR). O TIR pode ser usado para determinar a altura do filme líquido escoando em um tubo ou em uma superfície transparente.

Uma das técnicas mais recentes que utilizam este fenômeno para medir a altura de filmes líquidos é aquela desenvolvida por Hurlburt e Newell (1996). O método oferece algumas vantagens sobre técnicas de medições similares, pois não é necessária uma montagem permanente (os dados podem ser obtidos em qualquer ponto de uma seção de teste transparente), e não é necessária calibração, já que o método é uma medição direta do sinal de uma função linear de uma altura do filme, e é relativamente barato e de fácil construção.

Com essa técnica, uma fonte de luz como um diodo emissor de luz (LED), é posicionado do lado de fora de uma parede transparente. Um revestimento fino e opaco na parede propaga a luz para fora e funciona como uma tela para mostrar a imagem da luz refletida da superfície líquida, formando um anel em torno da fonte de luz. O raio deste anel em qualquer ponto é diretamente proporcional à altura do escoamento do filme líquido. Assim, se os raios do anel gerado pela parede que não contém líquido são subtraídos dos raios do anel criado com líquido presente, a altura do filme pode ser calculada. Uma câmera é usada para gravar o movimento do anel, e cada quadro é individualmente selecionado e analisado para determinar o raio do anel da luz refletida. As alturas do filme pode então ser calculadas manualmente. Os dados de altura do filme são apresentados em um escoamento bifásico, horizontal e anular de água e ar, com valores variando de 0,15 mm a 1,40 mm. Uma precisão de 0,01 mm é atingida com uma estimativa de erro de menos de 10%. Por outro lado, como apresentado, esta técnica é propensa a erros de inclinação de até 20% e consome muito tempo para ser executada. O julgamento humano é necessário para determinar a distância entre uma fonte de luz e o padrão de luz formado pelas reflexões da superfície líquida.

Apesar dessas dificuldades, essa técnica é atraente, pois não é limitada a nenhuma posição específica na seção de teste. Tudo que é necessário é uma seção de teste transparente. Os dados podem ser obtidos em qualquer posição ao longo ou ao redor do fluxo, permitindo medições detalhadas do filme líquido, enquanto o fluxo se desenvolve e evolui. Além disso, esta técnica não é

limitada a água, e pode ser utilizada com qualquer fluido que não absorva fortemente a luz gerada pela fonte.

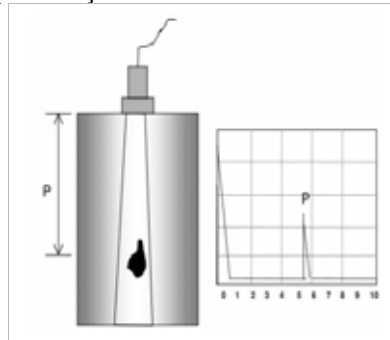
3.1.5 Técnicas Ultrassônicas

Ultra-som pode ser definido como ondas acústicas imperceptíveis ao ouvido humano, ou seja, aquelas cujas frequências são superiores a 20kHz. São vibrações mecânicas que se propagam em um determinado meio (ar, água, sangue, tecido biológico, materiais sólidos etc.), sendo que cada material apresenta propriedades acústicas características como impedância, velocidade de propagação e atenuação, por exemplo.

A radiação ultra-sônica (ou campo ultra-sônico) é gerada pela aplicação de um sinal elétrico (pulso de curta duração ou salva de senóides ou ondas retangulares) a um dispositivo transdutor com características piezoelétricas, ou seja, que converte a energia elétrica em energia mecânica (vibrações) e vice-versa. O transdutor, geralmente, fica em contato com o objeto em estudo (por exemplo, o corpo de um paciente, ou uma estrutura metálica) utilizando-se um meio de acoplamento. As ondas geradas pelo transdutor propagam-se para o interior do objeto e interagem com as diferentes estruturas presentes no objeto, gerando ondas (ecos) que são espalhadas e que propagam em todas as direções e também na direção do transdutor emissor. Estes ecos são detectados por este transdutor (que age como receptor). Conhecida a velocidade de propagação do ultra-som naquele meio, busca-se interpretar os sinais recebidos a diferentes profundidades (distâncias da face do transdutor). Se não for conhecida a velocidade, é possível determiná-la como meio de caracterizar o material. Dependendo da informação requerida é possível, por exemplo, visualizar estruturas internas ou estimar o fluxo de um líquido em escoamento por tubulações ou a atenuação das ondas devido às diferenças de densidades entre as diversas estruturas, podendo mais uma vez permitir sua caracterização.

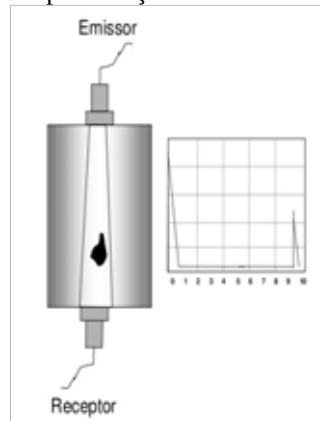
Existem vários modos de diferentes arquiteturas para caracterizar fenômenos, sendo cada modo em função apenas do que se quer caracterizar. Os modos mais utilizados são: pulso-eco, transparência e imersão.

Eco ou Pulso-Eco é o modo onde somente um transdutor é responsável para emitir e receber as ondas ultrassônicas (Figura 7).

Figura 7 – Apresentação do modo Pulso-Eco – Emissor/Receptor

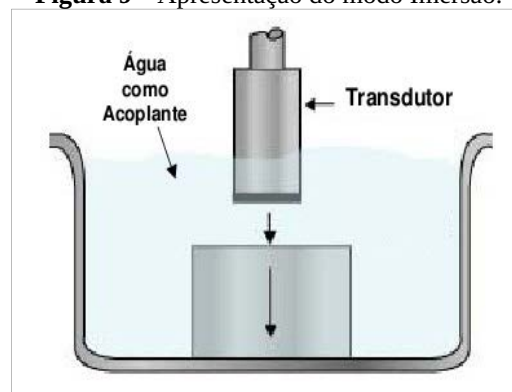
Fonte: Andreucci (2011).

A montagem que utiliza o modo de transparência utiliza dois transdutores, sendo um responsável por emitir e outro por receber as ondas ultrassônicas (Figura 8).

Figura 8 – Apresentação do modo Transparência.

Fonte: Andreucci (2011).

O modo conhecido como imersão utiliza o transdutor junto com um fluido de características conhecidas, para que este proporcione um melhor acoplamento das ondas ultrassônicas ao fenômeno que deverá ser caracterizado (Figura 9).

Figura 9 – Apresentação do modo Imersão.

Fonte: Andreucci (2011).

Existe um grande potencial de aplicação de métodos para caracterização de líquidos em diversos setores produtivos e de pesquisa. Para cada aplicação pode se medir uma ou mais propriedades do líquido, como a densidade, viscosidade, propriedades químicas, termodinâmicas, acústicas, ópticas, elétricas, que direta ou indiretamente podem ser utilizadas para caracterizar o líquido. As técnicas acústicas apresentam as características de serem não-destrutivas, com possibilidade de aplicações não-invasivas.

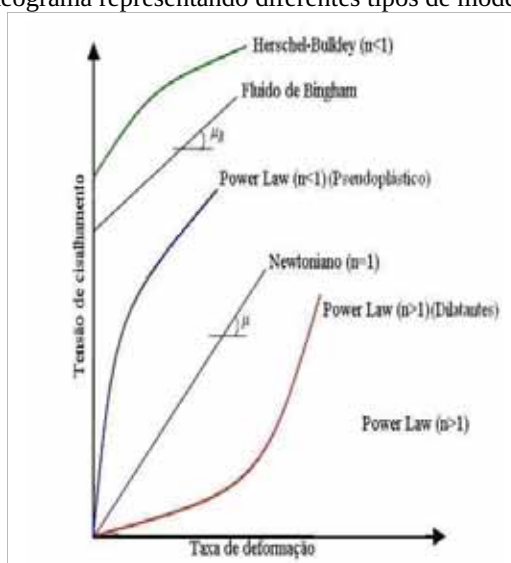
3.2 Reologia

Embora o conhecimento da reologia por Newton e Hooke date do século XVII, foi somente em 1920, quando o comportamento mecânico de materiais industriais – como a borracha, o plástico, a cerâmica, as tintas e os fluidos biológicos – passou a ser do interesse da física, da mecânica, da matemática e, inclusive, da química dos colóides, que surgiu a necessidade do estudo da reologia (TANNER, 1988).

Conceitualmente reologia é o estudo do escoamento e da deformação da matéria, ou seja, o estudo do comportamento de fluidez. Os componentes dos fluidos podem apresentar diferentes formas geométricas, características diversas de ligação e tamanhos variados que lhe conferem comportamentos distintos.

Para realização de trabalhos experimentais é necessário fazer a caracterização do fluido que será utilizado, definindo o modelo reológico mais representativo do fluido. A Figura 10 ilustra as curvas típicas da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para os diferentes tipos de modelos reológicos.

Figura 10- Reograma representando diferentes tipos de modelos reológicos.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Glicerol

Reologicamente a glicerina é considerada um fluido newtoniano, por apresentar uma relação linear entre a tensão e a taxa de deformação, porém, trata-se de um fluido altamente viscoso, onde a viscosidade é uma constante de proporcionalidade.

É comum o termo glicerol ou glicerina, porém, suas propriedades físico químicas não são as mesmas. O termo glicerol é utilizado somente para compostos puros 1,2,3 propanotriol, já o termo glicerina utiliza-se para soluções com uma concentração maior ou igual a 95% de glicerol. O glicerol, é reconhecido como substância atóxica, sendo a sua utilização permitida em indústrias de alimentos (FIOROT, 2012), devidos suas propriedades antioxidantes, emulsificantes e umectantes. Cabe salientar que a utilização do glicerol se estende para outras indústrias, tais como, a indústria farmacêutica e têxtil. É utilizado em produtos farmacêuticos, pois a sua alta viscosidade favorece o uso na fabricação de xaropes e na indústria têxtil é empregado para produzir resinas e poliésteres. Além das aplicações nesses tipos de indústria, pode ser aplicado no processamento de tabaco, ajudando a prevenir o ressecamento do produto. Dentre inúmeras aplicações do glicerol, novas descobertas vêm sendo realizadas, como por exemplo, o emprego do produto como substrato para fermentações bacterianas com a finalidade de se obter produtos de alto valor agregado como polímeros biodegradáveis (FIOROT, 2012).

Dentre as características do glicerol, destacam-se como principais, o fato de ser incolor, de sabor doce, oleoso, altamente viscoso e solúvel em água e álcool em todas as proporções e insolúvel em hidrocarbonetos. A associação destas características é que propiciam tantas aplicações. A Tabela 1 apresenta as propriedades do glicerol.

Tabela 1 – Propriedades do Glicerol.

Densidade (glicerol as 25°C)	1,2628 Kg/m ³
Ponto de fusão	18°C
Ponto de ebulição	290°C
Ponto de inflamação	290°C
Tensão superficial	63,4 N/m
Condição térmica	0,28W/m.K
Índice de refração	1,47

Fonte: Fiorot (2012).

No que diz respeito a geração de propagação de *roll waves*, a glicerina pura foi utilizada por Fiorot (2012) por se tratar de um fluido altamente viscoso o que garante a característica laminar do escoamento (baixos números de Reynolds), onde é de interesse fazer a aferição de tais ondas, além disso, embora o fluido não tenha comportamento não newtoniano, o mesmo apresenta aspecto

lamoso devido à alta viscosidade.

Gel de Carbopol

Geralmente, as substâncias formadoras de géis são polímeros que quando dispersos em meio aquoso assumem conformação doadora de viscosidade à preparação. Logo, pode-se definir o gel como uma preparação semi-sólida composta de partículas coloidais que não sedimentam (ficam dispersas).

Carbopol é o nome comercial de uma família de polímeros, poliacrílicos e ácidos poliacrílicos, bastante utilizado como espessantes (BOGER ; WATERS, 1993). Segundo dados da literatura, as propriedades reológicas de uma solução de carbopol podem ser alteradas variando-se o pH, a concentração e o solvente (MINUSSI, 2009).

Segundo Boger e Walters (1993), as soluções de Carbopol 940 são geralmente inelásticas e pseudoplásticas. Segundo a NoveonTM (2002), trata-se de soluções pseudoplásticas com tensão crítica . Encontram-se também na literatura, representações através de: modelo de Herschel-Bulkley (DEBIANE, 2000; LACHAMP, 2003); Já, Lin e Ko (1995) propõem o modelo do tipo Power law como modelo reológico da solução. Labanda et al. (2004) também propõem modelo do tipo Power law, porém admitem o efeito de tensão crítica.

Com base em trabalhos realizados no grupo RMVP, pode-se afirmar que o gel de carbopol tem apresentado propriedades não newtonianas e pode ser caracterizado pelo modelo reológico de Herschel-Bulkley (MINUSSI, 2007 ; LEITE, 2009). No entanto, convém salientar que estas características dependem da concentração de carbopol da solução.

A seguir, nas Tabelas 2 e 3, são apresentados os valores reológicos encontrados por Lachamp (2003) para solução neutralizada de Carbopol 940 e por Roberts e Barnes (2001) para o Carbopol 980.

Tabela 2 – Parâmetro reológico de Herschel-Bulkley para o gel de Carbopol 940.

Concentração	0,15%	0,16%	0,18%	0,19%
Índice de Consistência (Pas)	5,12	4,47	7,47	7,71
Tensão Críticas (Pa)	1,28	1,35	1,6	1,7
Índice de Escoamento	0,55	0,61	0,57	0,57

Fonte: Lanchamp (2003).

Tabela 3 – Parâmetro reológico de Herschel-Bulkley para o gel de Carbopol 980.

Concentração	0,06%	0,07%	0,08%	0,10%
Índice de Consistência (Pas)	0,12	0,345	0,67	1,40
Tensão Críticas (Pa)	0,30	1,25	3,00	10,00
Índice de Escoamento	0,60	0,55	0,50	0,50

Fonte: Lanchamp (2003).

Lachamp constatou valores de tensão crítica abaixo da expectativa em comparação com os valores de Robert e Barnes, porém foi constatado por ambos a adoção do modelo reológico de Herschel-Bulkley como o modelo reológico mais representativo para os gelificantes Carbopols 940 e 980.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Este aparato experimental é composto por diversos conjuntos, no qual cada um foi construído separadamente, tendo como princípio de projeto a melhor forma de interação e conexão:

- Canal - este é composto por um fundo de vidro e paredes de acrílico. Em sua parte inicial, há um rebaixamento no nível do fundo. Assim, a junção do nível rebaixado com o nível normal do canal é feito de forma suavizada, para que o fluido continue laminar.
- Mesa do canal - esta foi projetada de forma que toda vibração externa fosse amortecida, isolando o canal de qualquer perturbação.
- Circuito do fluido - o fluido que circula no canal sobre a mesa tem seu movimento oriundo de um circuito hidráulico adjacente à mesa do canal. Este circuito adjacente tem o início na caixa de armazenamento e, por intermédio de uma bomba hidráulica, o fluido é impulsionado montante do canal.
- Sistema de perturbação formado por dispositivos que impulsionam uma lâmina de ar sobre o fluido, perturbando o escoamento de forma controlada.
- Sistema de aquisição tem como característica principal não ser intrusivo permitindo verificar o resultado desta ação perturbadora (onda) sobre o fluido em escoamento.

4.1.1 Canal e Mesa do canal

O canal deste aparato experimental foi construído apoiando um fundo de vidro sobre um esqueleto metálico e fixando laterais de acrílico, ajustadas paralelamente ao esqueleto metálico e perpendicularmente ao fundo de vidro, respeitando as medidas de 2,50 m de comprimento, 0,15 m de altura e 0,30 m de largura (Figura 12).

Figura 11 – Armação metálica da mesa e do canal, em processo de construção.

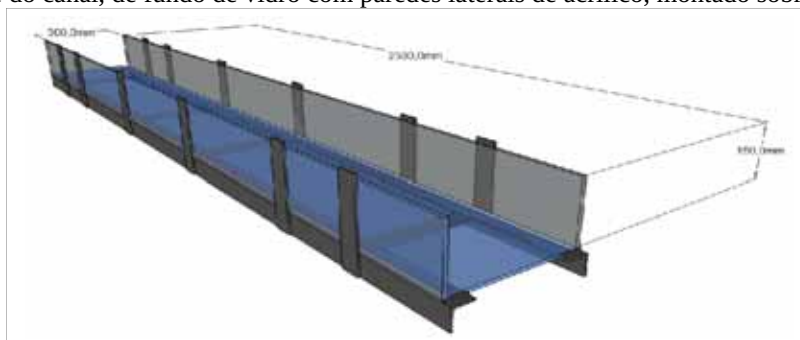


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A junção do acrílico lateral com o vidro ocorre pelo ajuste das medidas do esqueleto metálico, prensando o acrílico sobre o vidro. Para o travamento do acrílico com a estrutura metálica utilizou-se cola plástica e pequenos parafusos. Entre o vidro com a estrutura metálica foi colocado cola plástica entre os mesmos, prensando a cola pelo resultado do peso do vidro e do acrílico. Na parte interna do canal foi utilizada uma fina camada de cola plástica na junção vidro e acrílico, apenas para prevenir possíveis vazamentos na utilização do canal com fluidos de baixa viscosidade.

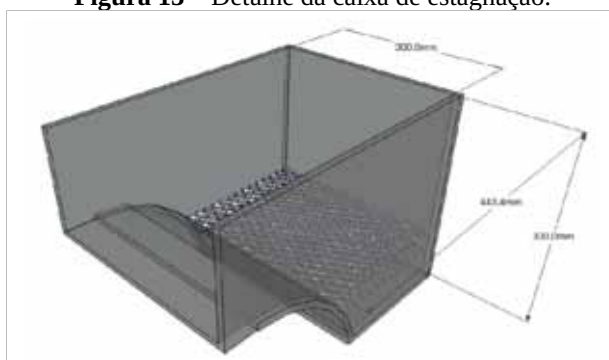
A escolha do uso de vidro no fundo do canal, e não acrílico, foi devido ao fato do acrílico ter um tempo de envelhecimento menor que o do vidro. Assim, com o passar do tempo, o acrílico apresentaria pequenas fissuras, que atrapalhariam o sinal do laser capitado pelo fotosensor, além de diminuir o tempo de vida útil do canal (Figura 13).

Figura 12 – Detalhe do canal, de fundo de vidro com paredes laterais de acrílico, montado sobre a estrutura metálica.



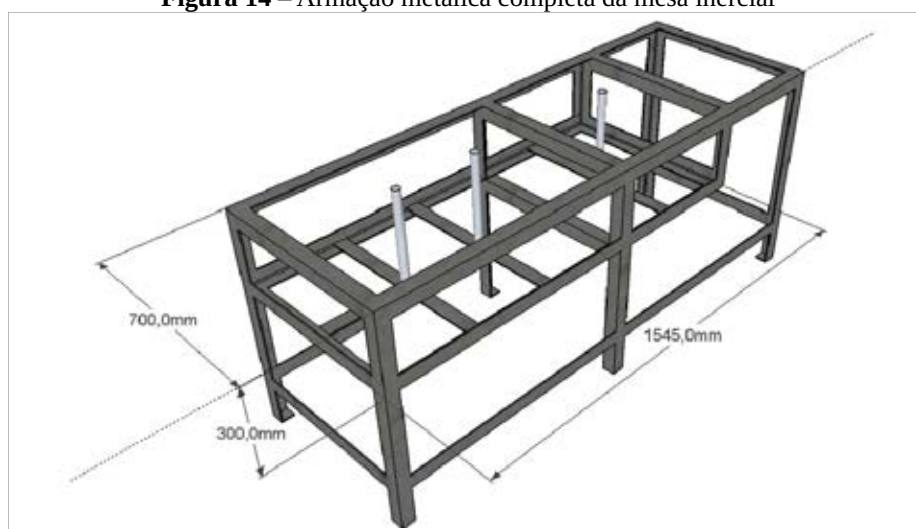
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A montante do canal, foi construída uma caixa de estagnação, proporcionando rebaixamento do fundo. A junção do nível rebaixado com o nível normal do canal é feito de forma suavizada, para que o fluido continue laminar (Figura 14).

Figura 13 – Detalhe da caixa de estagnação.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Todo os encaixes entre o canal e a mesa foram feitos com placas de borracha entre as junções, para auxiliar no amortecimento de quaisquer vibrações que pudessem vir a atingir o canal. A mesa suporte foi confeccionada a partir de barras de aço soldadas entre si, com dimensões finais de 2,00 m comprimento, 0,85 m de altura e 0,70 m de largura. (Figura 15)

Figura 14 – Armação metálica completa da mesa inercial

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

No interior da mesa, um volume de 325 litros foi concretado, atingindo o peso de 2.000 kg, com finalidade de garantir inércia suficiente ao corpo da mesa para evitar a propagação de vibrações pelo corpo metálico. Para finalizar a mesa suporte, dispositivos anti-vibração foram instalados nos pés, dimensionados apropriadamente em função da massa total da mesa (Figura 16).

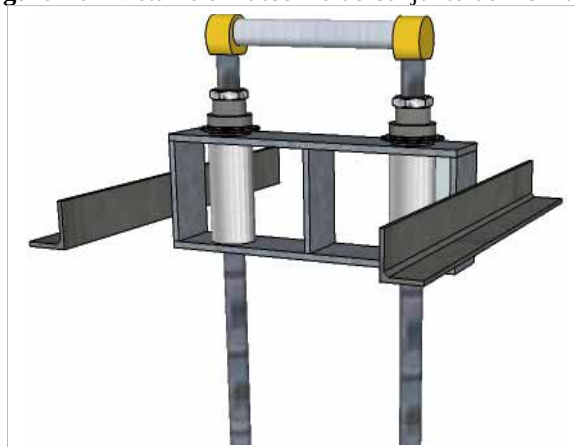
Figura 15 - Dispositivo anti-vibração instalado no pé da mesa suporte, atenuando vibrações externas ao conjunto.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Um sistema de inclinação foi projetado para possibilitar maior versatilidade do aparato experimental, proporcionando uma inclinação de 0 até 25 graus. Para isto, engrenagens foram associadas às barras roscadas paralelas que elevam o nível igualmente, de ambos os lados do canal, impedindo o desnível transversal (Figura 17).

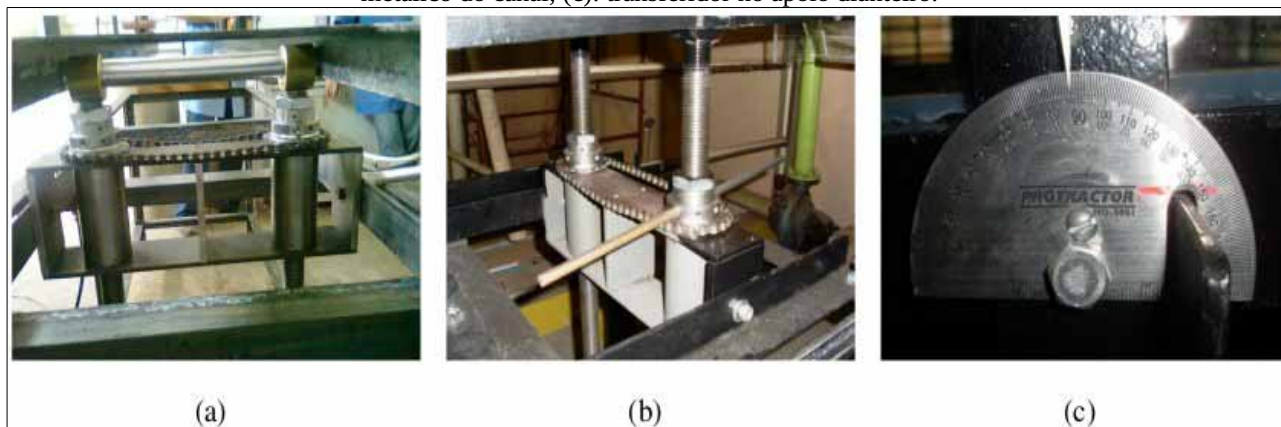
Figura 16 – Detalhe em desenho do conjunto de inclinação



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A inclinação do canal é possível, pois a parte inicial do canal pode ser elevada, mantendo imóvel a parte final, produzindo assim um desnível longitudinal. (Figuras 18 (a) e (b)). O transferidor apresentado na Figura 18 (c), foi utilizado para facilitar a leitura da inclinação.

Figura 17 - Sistema de inclinação por engrenagens. (a),(b): sistema montado na base do esqueleto metálico do canal; (c): transferidor no apoio dianteiro.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.1.2 Manejo do fluido teste

O conjunto de manejo do fluido teste é composto de 3 itens importantes: reservatório, bomba de sucção e controle da vazão, os quais foram alterados no desenvolver deste projeto, visando o melhor desempenho do aparato experimental.

O reservatório do fluido teste (glicerina) foi montado a partir de uma caixa d'água de 500 litros instalada sobre um apoio de madeira. Dentro do reservatório foi construído um sistema de descanso para o fluido, composto por compartimentos circulares, instalado de forma a permitir que bolhas que eventualmente se formassem no fluido tivessem tempo suficiente para subir até a superfície (Figura 19 (a)). A Figura 19 (b) mostra o reservatório tampado e com a canalização conduzindo o fluido teste até o reservatório, exatamente no centro do compartimento circular. Na saída do canal foi acoplado um anteparo para diminuir o impacto do fluido sobre a superfície da tampa do reservatório.

Figura 18 – Reservatório de glicerina. (a) Reservatório aberto - detalhe mostrando sistema de descanso para elevar as bolhas de ar presente no fluido. (b) Reservatório fechado - detalhe orifício e canalização para guiar o fluido até o meio do sistema de descanso.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O reservatório do fluido teste carbopol foi montado a partir de uma caixa d'água de 250 litros instalada sobre um apoio de madeira, e uma superfície de borracha. Diferente da glicerina, para elevar as bolhas contidas no carbopol é necessário um tempo extremamente grande, tornando inviável a utilização do sistema de descanso para o fluido. Assim, para diminuição das bolhas foi utilizado um dispositivo para amortecer o impacto do fluido sobre a tampa da caixa do reservatório encaminhando-o para a parte interna do reservatório (Figura 20).

Figura 19 – Reservatório de carbopol. (a) Reservatório aberto. (b) Reservatório fechado - detalhe mostrando dispositivo para amortecer o impacto e canalização para guiar o fluido até o meio do reservatório. (c) Proteção para não perder o fluido, quando este espirra devido à formação das oscilações.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As bombas de sucção utilizadas foram dimensionadas para um escoamento de baixa vazão, e fluido com alta viscosidade. Assim, na fase inicial do aparato experimental, a bomba de sucção utilizada foi do modelo centrífuga (Figura 21 (a)). Esta tinha por objetivo fazer o fluido teste circular por todo o aparato experimental, e para isto era necessário elevar o fluido a uma altura de 2.20 m, passando por uma canalização de 1" e atingir o reservatório de vazão constante. O controle da vazão estava condicionado à quantidade de abertura de uma válvula borboleta colocados na saída

da canalização e entrada do canal. Nestas condições, a vazão máxima (válvula borboleta totalmente aberta) de entrada no canal estava condicionada ao peso do fluido na canalização devido à queda de 2.20 m (Figura 21 (b)).

Figura 20 - (a) Bomba Hidráulica. (b) Válvula borboleta.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Em uma nova fase foi necessário a utilização de outra bomba de sucção, optando-se pela utilização de uma bomba de cavidade progressiva e canalização por mangueiras de 2". Esta nova bomba tem como elemento básico um rotor de aço de forma helicoidal dentro de uma secção circular. Em função desta geometria circular são formadas cavidades vedadas entre o bocal de sucção e o de descarga da bomba. A rotação do rotor causa abertura e fechamento destas cavidades alternadamente numa progressão ininterrupta ao longo da cavidade circular, fazendo com que o fluido seja deslocado continuamente da sucção para a descarga da bomba (Figura 22 (a)).

Figura 21 – (a) Bomba de Cavidade Progressiva. (b) Inversor de Frequência.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A vazão desta bomba é controlada por um inversor de frequência que permite o controle preciso das rotações do motor da bomba e, conseqüentemente da vazão. A Figura 22 (b), ilustra o inversor de frequência utilizado para controlar o fluxo do fluido teste sobre o canal.

4.1.3 Sistema de perturbação

O sistema de perturbação (Figura 23) foi montado a partir da associação de um gerador de sinais, modelo GF-550 da Instrutherm, acoplado a um amplificador, modelo T 400, classe de operação D, que por sua vez se liga-se a um alto-falante, modelo TS-W258D4 de 25 cm de diâmetro e potência máxima de 1200 W, específico para baixas frequências.

Figura 22 - Sistema de perturbação composto por caixa em forma de “V” e alto-falante para baixas frequências, mostrado fora do arranjo do experimento.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O sinal que percorre estes aparelhos é fornecido pelo gerador de sinais (Figura 24) em seleção de onda quadrada, de forma que este sinal seja semelhante a um pulso. No painel frontal do gerador de sinais também é possível controlar a amplitude (valor máximo do sinal) e a frequência de oscilação deste sinal.

Figura 23 - Painel frontal do gerador de sinais.

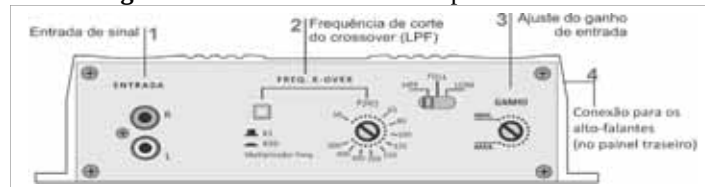


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Após o sinal sair do gerador de sinais, o mesmo é amplificado pelo amplificador. O amplificador T 400 tem como alimentação uma tensão contínua de 12 V proveniente de uma bateria, e sua sensibilidade de entrada de sinal pode ser ajustada de 370 mV a 1V, deixando o sinal

que este envia para o alto falante em função da sensibilidade de entrada do amplificador e do ganho ajustado no seu painel frontal (Figura 25).

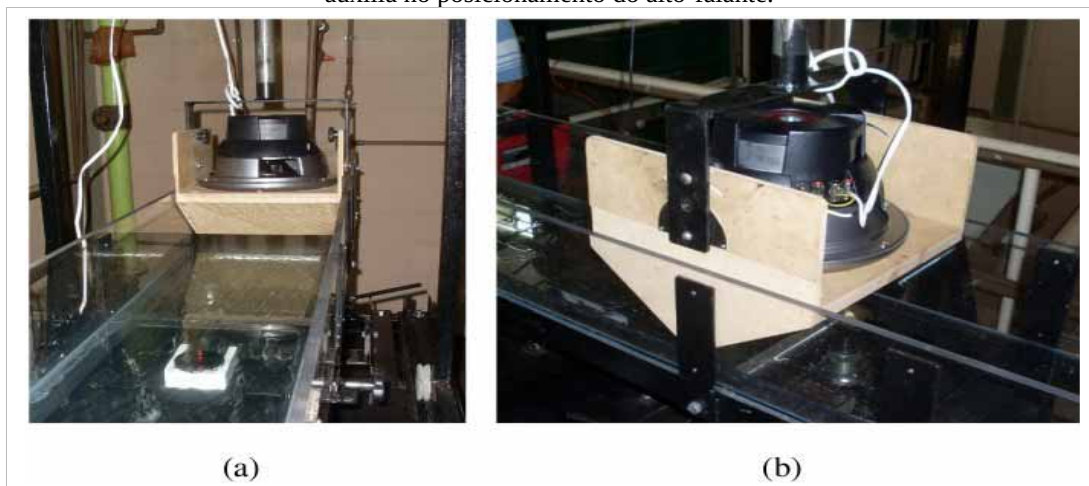
Figura 24 – Painel frontal do amplificador T 400.



Fonte: Manual *Tharamp's* Amplificadores.

O alto-falante foi instalado em uma caixa no formato de “V” com 2 fendas: a primeira é a direcionadora da lâmina de ar que será responsável pela perturbação do escoamento; a segunda auxilia na reposição do ar deslocado pelo alto-falante, posicionadas na parte superior, garantindo que não ocorra sucção de ar pela primeira fenda, o que poderia comprometer o escoamento. Seu suporte foi confeccionado de tal maneira que permite o seu deslocamento vertical, aproximando e afastando do escoamento, e também permite a rotação, fazendo com que o feixe de ar incida perpendicularmente ao escoamento (Figura 26 (a) e (b)).

Figura 25 - Sistema de perturbação composto por caixa em “V” e alto-falante para baixas frequências. (a): Vista frontal, exibindo teste de eficiência da perturbação em escoamento translúcido de água; (b): Vista lateral - transferidor metálico auxilia no posicionamento do alto-falante.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.1.4 Sistema de aquisição de dados

O conjunto adotado para efetuar a aquisição de dados teve diversas evoluções no transcorrer do projeto, no entanto, todas as evoluções ocorreram em torno do aparato fotométrico e ultrassônico, constituído pelo conjunto laser fotodetector e ultrassom. Este conjunto é integrado, com o objetivo de visualizar e capturar o sinal. Para isso, foram utilizados um osciloscópio, uma

placa de aquisição de dados e um computador (Figura 27).

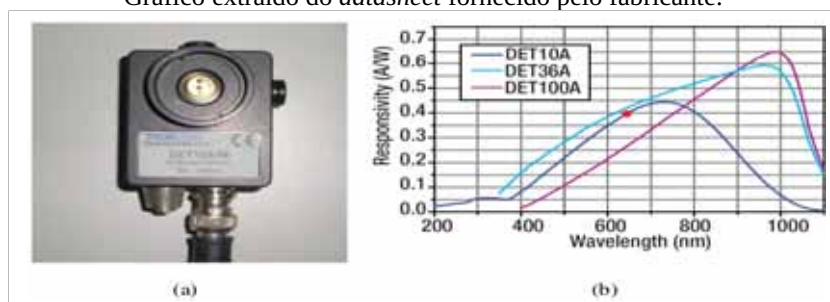
Figura 26 - Conjunto do novo sistema de aquisição.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O laser de He-Ne, produz luz com comprimento de onda de 633nm e 12mW de potência. O fotodetector escolhido para o conjunto é da marca Thorlabs, modelo DET10A (Figura 28(a)) com tempo de resposta da ordem de 1ns e banda de resposta na faixa de 200 a 1100nm (Figura 28(b)).

Figura 27 - (a): Fotodetector *Thorlabs* DET10A; (b): Resposta espectral típica do fotodetector. O modelo em questão é representado pela curva azul, DET10A. Para o comprimento de onda do laser, a resposta é aproximadamente 0,4 A/W. Gráfico extraído do *datasheet* fornecido pelo fabricante.



Fonte: *Datasheet* fornecido pelo fabricante *Thorlabs*.

Devido à pequena janela deste fotodetector, este foi substituído pelo *Newport* 818-SL, que tem como característica de interesse uma janela de 1cm², possibilitando assim, uma melhor captura do sinal. Filtros de densidade neutra são instalados sobre a janela do fotodetector, o que reduz a intensidade de luz recebida, impedindo a saturação (Figura 29).

Figura 28 - Fotodetector Newport 818-SL.

Fonte: Datasheet fornecido pelo fabricante Newport.

Durante a instalação do laser no canal, um suporte móvel foi montado de forma a possibilitar o deslocamento da fonte luminosa para distintas posições no canal. Como é de interesse a incidência sempre perpendicular, um sistema de inclinação também foi instalado neste suporte (Figura 30 (a) e (b)).

Figura 29 – Suporte para a fonte de luz com transferidor. (a) Mesa e canal - detalhe do suporte móvel da fonte de luz. (b) Inclinação da fonte de luz.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Outra configuração deste experimento consistiu em fixar o laser e dividir o feixe do laser em dois ramos, posicionando um divisor de feixe – lâmina de vidro, de forma que o primeiro feixe incida perpendicularmente no canal e o outro feixe, após ser refletido por um espelho, também incida perpendicular sobre o canal (Figura 31).

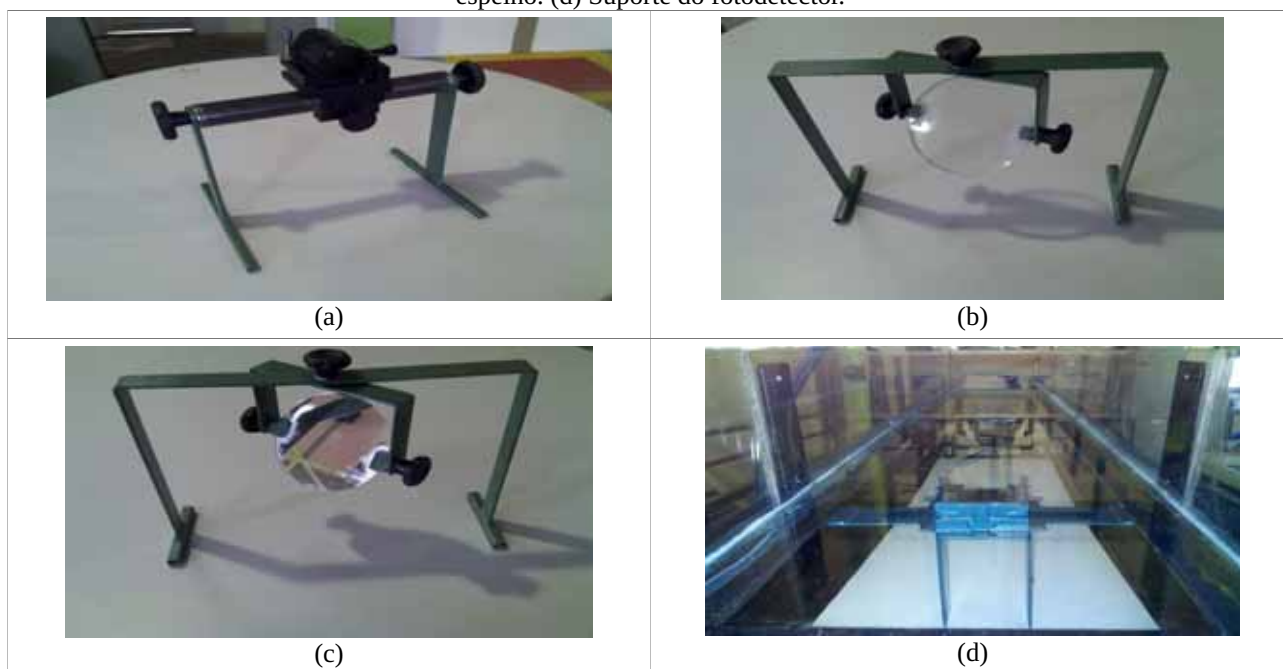
Figura 30 – Fonte luminosa fixa e divisão em dois feixe.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Nesse propósito, foi necessário construir um suporte fixo para o laser (Figura 32 (a)), e dois suportes com capacidade de girar sobre o eixo horizontal e vertical, para acoplar a lâmina de vidro (Figura 32 (b)), espelho (Figura 32 (c)), para assim, dividir o feixe do laser e incidi-lo perpendicularmente sobre o fotodetector. Desta forma, também foi necessário um suporte para acoplar o fotodetector no canal, logo abaixo do fundo de vidro (Figura 32 (d)).

Figura 31 – Suporte de fixação no canal. (a) Suporte da fonte luminosa. (b) Suporte da lâmina de vidro. (c) Suporte do espelho. (d) Suporte do fotodetector.



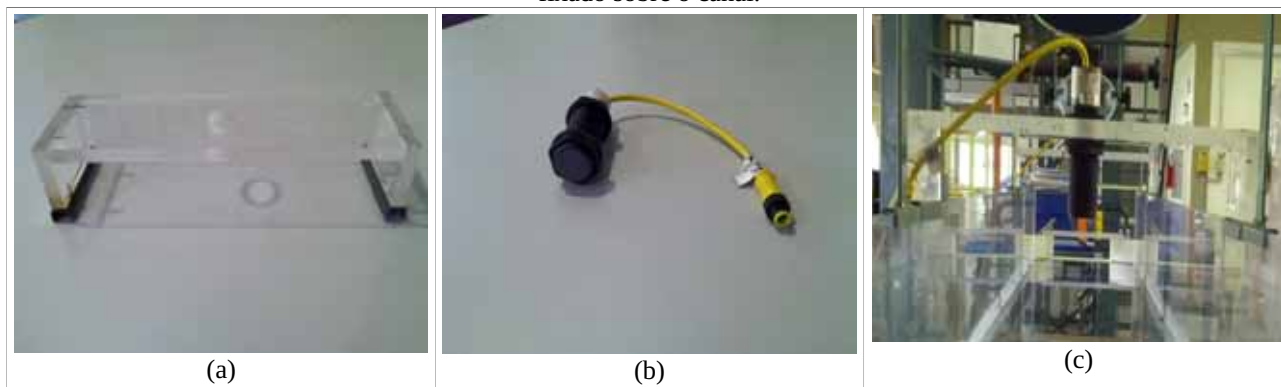
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O sinal do fotodetector, em um primeiro momento, foi captado através de um osciloscópio digital da Tektronix, que comunica-se com um PC através de uma rotina programada em Matlab. A tela do osciloscópio era capturada remotamente quando se desejava aferir uma medição. Na metodologia utilizada por Fiorot (2012), a escala de tempo do osciloscópio estava ajustada em 5 s e o programa de aquisição adquiriu 2500 pontos, ou seja, uma taxa de aquisição de 500Hz. Os dados capturados foram tratados utilizando um filtro de média móvel. Maiores detalhes desta configuração, assim como a metodologia de utilização e tratamento dos dados estão apresentados em Fiorot (2012).

Neste trabalho foi utilizada uma nova metodologia de aquisição de dados, a partir de um transdutor ultrassônico, juntamente com o fotométrico, e em substituição ao osciloscópio utilizou-se uma placa de aquisição.

O transdutor ultrassônico modelo RPS – 401A, foi fixado sobre o canal, necessitando a utilização de um suporte de acrílico, para ser acoplado sobre as paredes laterais do canal, deixando o ajuste de distância do transdutor até o fundo do canal em função de um parafuso, em torno do próprio transdutor. Na alimentação do transdutor foi utilizado uma fonte de tensão variável, sendo ajustado em 20 V. Este modelo de ultrassom tem como característica um tempo de resposta de 16 milissegundos e dois potenciômetros, sendo um para ajustar o valor do zero e outro o espaço de medição. A Figura 33 (a) apresenta o suporte de acrílico, no qual o transdutor ultrassônico (Figura 33 (b)), foi fixado, assim como mostrado na Figura 33 (c), exatamente sobre o canal.

Figura 32 – Conjunto ultrassônico. (a) Suporte de fixação no canal. (b) Transdutor ultrassônico. (c) Conjunto montado fixado sobre o canal.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A placa de aquisição modelo USB-6009 da *National Instruments* (Figura 34), utilizada em substituição ao osciloscópio, disponibilizou 4 entradas analógicas, sendo 2 para o transdutor ultrassônico e 2 para o fotodetector. Desta forma, foi possível distribuir dois conjuntos de sensores, sendo cada um deles formado por um transdutor ultrassônico e um fotodetector, um instalado à 50 cm do sistema de perturbação e o outro a 100 cm do primeiro conjunto.

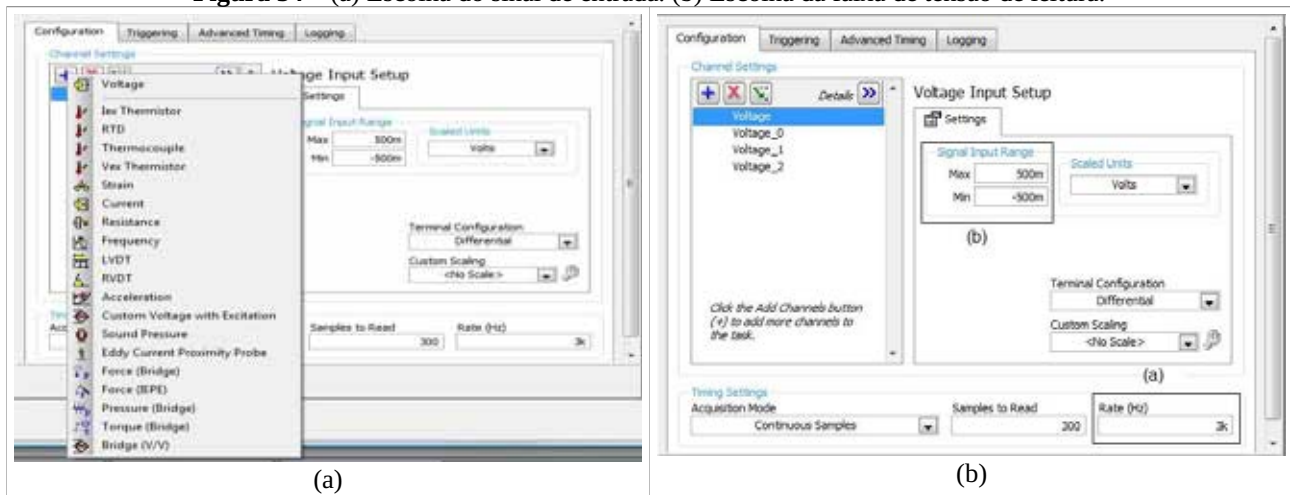
Figura 33 – Placa de aquisição USB-6009 da *National Instruments*.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A placa de aquisição foi configurada a partir do *software LabView 2011*, podendo assim, utilizar 4 entradas analógicas, sinal de entrada em forma de tensão e variar a taxa de aquisição. A Figura 35, apresenta a configuração do tipo de sinal, taxa de amostragem em 3 kHz e leitura da tensão no transdutor ultrassônico entre 0 e 10 V e no sensor fotométrico entre -0,500 e +0,500 V

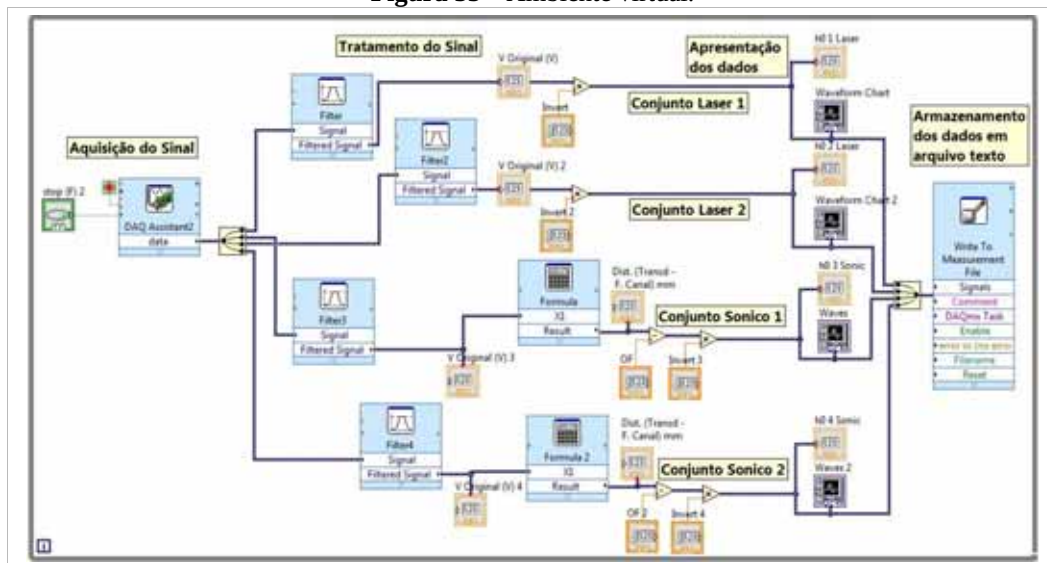
Figura 34 – (a) Escolha do sinal de entrada. (b) Escolha da faixa de tensão de leitura.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, utilizando o software *LabView* 2011.

Após a configuração da placa de aquisição, foi construído um ambiente virtual, ainda no *software LabView* para tratar, gravar e amostrar o sinal adquirido pela placa de aquisição através dos sensores (Figura 36).

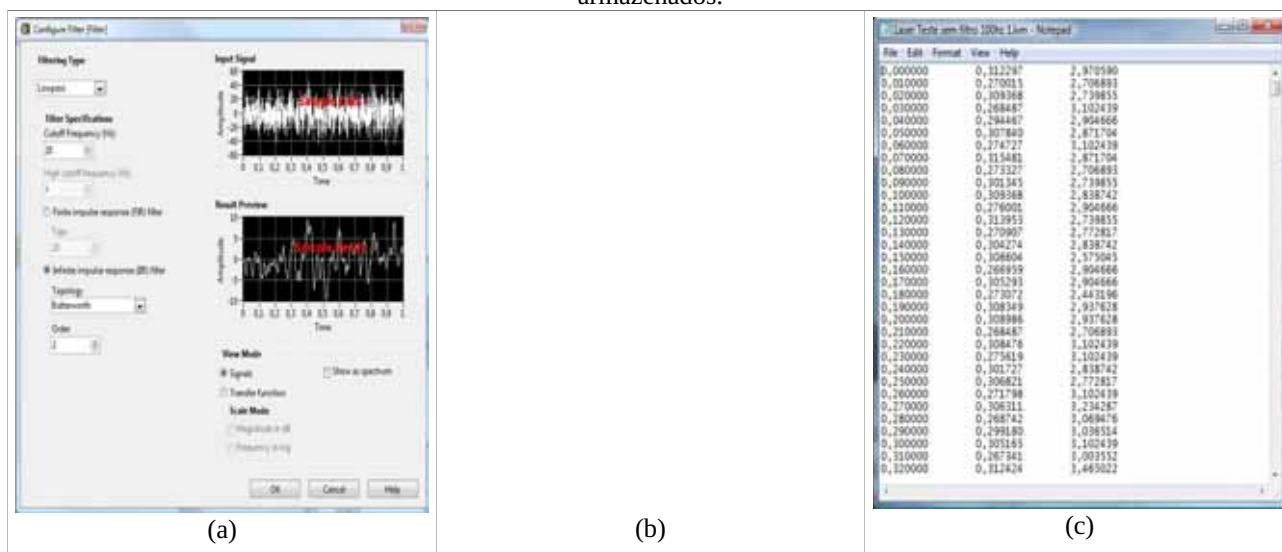
Figura 35 – Ambiente virtual.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, utilizando o software *LabView* 2011.

Através desta configuração é possível tratar o sinal variando a frequência de corte, ordem e modelo de filtro desejado (Figura 37 (a)), como também ampliar, reduzir, inverter ou mesmo aplicar um *offset* no sinal obtido. Após este tratamento é possível apresentar o sinal (Figura 37 (b)) ou gravá-lo em arquivo (Figura 37 (c)), sendo este posteriormente apresentado ou trabalhado em forma de dados numéricos.

Figura 36 – (a) Configuração do filtro. (b) Sinal sem tratamento. (c) Tabela mostrando arquivo com os dados armazenados.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, utilizando o software LabView 2011.

4.1.5 Fluido Teste

Na Tabela 4 e Figura 37, são apresentados os parâmetros reológicos, para o gel de carbopol 996, utilizado neste trabalho. A caracterização do fluido foi feita para diferentes concentrações, no desenvolver do experimento, e pôde-se observar alterações significativas nas propriedades do fluido, tais como, índice de consistência (k_n), índice de escoamento do fluido (n), tensão crítica de escoamento (τ_c), e consequentemente a viscosidade aparente do fluido (η) que é dependente de todas as outras propriedades.

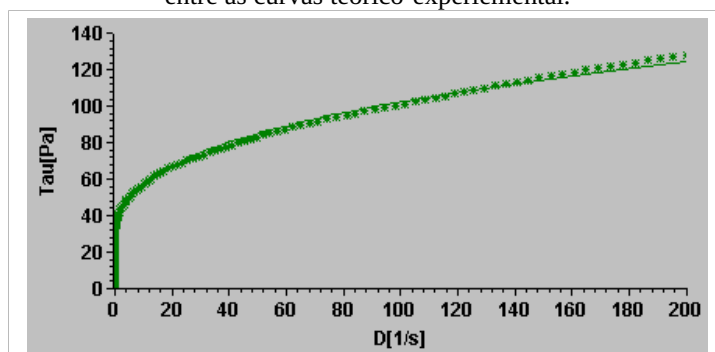
Tabela 4 – Parâmetro reológico de Herschel-Bulkley para o gel de Carbopol 996.

Concentração	0,15%
Índice de Consistência (Pas)	18,970
Tensão Críticas (Pa)	16,670
Índice de Escoamento	0,327

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Figura 37, ilustra a curva típica da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação, do gel de Carbopol 996. Após realizado uma regressão numérica, foi verificado uma forte correlação com o modelos reológicos de Herschel-Bulkley.

Figura 37- Reograma - Parâmetro reológico de Herschel-Bulkley para o gel de Carbopol 996. Correlação quase perfeita entre as curvas teórico-experiencial.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, utilizando software RHEO 2000, versão 2.6, no comando “best regression”.

Através do software RHEO da empresa Brookfield foram efetuadas todas as análises reométricas do fluido teste - Carbopol 996, sendo que o mesmo ocorreu de maneira concisa, possibilitando uma análise reométrica consistente para com os casos almejados.

4.2 Métodos

4.2.1 Sistema Fotométrico: Método Óptico – Absorção Luminosa

Métodos ópticos são os que empregam as propriedades de interação da luz com a matéria, para caracterizar algum tipo de fenômeno específico. Dentre diversos métodos ópticos, neste capítulo será detalhado a absorção luminosa aferindo o deslocamento de interfaces. O aparato que será apresentado é constituído por uma fonte de laser que projeta luz sobre a interface de um fluido. Sua reflexão é recebida por um fotodiodo.

Método de Caracterização

A caracterização do escoamento foi feita através da incidência do laser em meios translúcidos – ar, gel de carbopol, vidro e novamente ar – após este trajeto o laser incidirá sobre o fotodetector. Dependendo de como se dá esta transferência entre um meio e o outro, o laser também pode sofrer reflexão e/ou refração.

No entanto, tratando-se de um projeto onde o trajeto do laser em meio translúcido é relativamente curto, que o ar e o vidro não possuem nenhum material com capacidade de absorver quantidades significativas de intensidades luminosas e, que seja possível uma incidência totalmente perpendicular, a intensidade luminosa incidente no fotodetector estará reduzida apenas em relação a fonte de propagação do laser e, interações sofridas pelo meio líquido. Assim, esta redução está relacionada com a constituição do meio líquido, obedecendo a lei de Lambert, conforme Eq. 1.

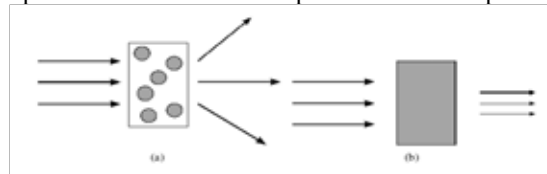
$$I = I_0 e^{-\gamma h} \quad (1)$$

onde γ é chamado coeficiente de extinção que depende das propriedades do meio e do comprimento da fonte luminosa incidente, e h é o percurso de luz no meio.

Esta relação abrange os efeitos de dispersão e absorção, sendo a dispersão o desvio do feixe de laser devido ao tamanho das partículas que compõem o meio em questão.

Neste experimento os efeitos de dispersão foram desconsiderados devido ao pequeno trajeto que o laser vai percorrer no meio líquido – filme fino. As perdas por dispersão foram, muito inferiores quando comparadas às perdas por absorção. A Figura 38 apresenta os modos de extinção da intensidade luminosa.

Figura 38 - Modos de extinção de intensidade luminosa. (a) Dispersão luminosa: partículas de grande tamanho, desviam os feixes de luz incidentes. (b) Absorção luminosa: átomos e moléculas de pequena escala estão dissolvidos no meio líquido e são excitados pelos feixes incidentes dependendo do comprimento de onda, absorvendo-os.



Fonte: Fiorot (2012).

Assim, a Eq. 2 pode então ser reduzida para a Lei de Beer-Lambert que expressa apenas o efeito de absorção luminosa:

$$I = I_0 e^{-\epsilon Ch} \quad (2)$$

na qual I_0 é a intensidade luminosa do feixe luminoso incidente, ϵ é propriedade da substância em solução chamada absortividade molecular, C é a concentração desta substância e h é o trajeto da laser no meio. Define-se a transmitância, denotada por T , como na Eq. 3:

$$T \equiv \frac{I}{I_0} = e^{-\epsilon Ch} \quad (3)$$

e, por fim, a grandeza de interesse, absorvância A , como na Eq. 4:

$$A \equiv -\ln(T) = -\ln(e^{-\epsilon Ch}) \rightarrow A = \epsilon Ch \quad (4)$$

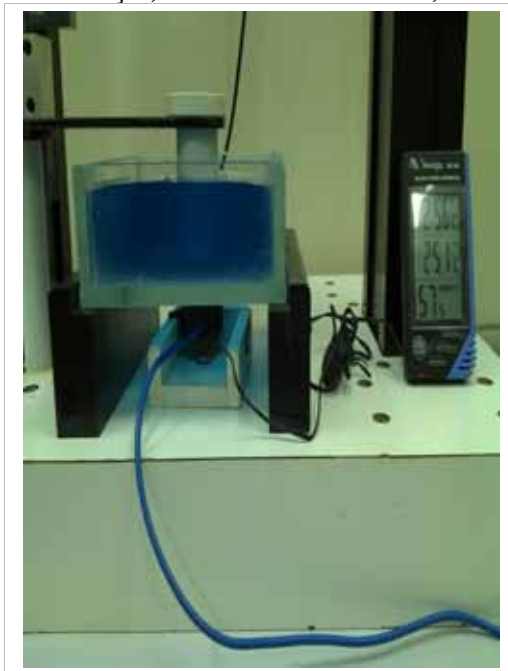
que expressa uma relação entre intensidade luminosa absorvida e o trajeto percorrido pela luz.

Calibração

As calibrações foram executadas para verificar a relação estabelecida pela Eq (4), e assim verificar a condição laser - fotodetector. O laser incide sobre o fotodetector após ser projetado pelo canhão de laser e percorrer os meios – ar, vidro, solução aquosa de azul de metileno, vidro e ar. A captura do sinal gerado pelo fotodetector em função do laser incidente, é feito por um osciloscópio.

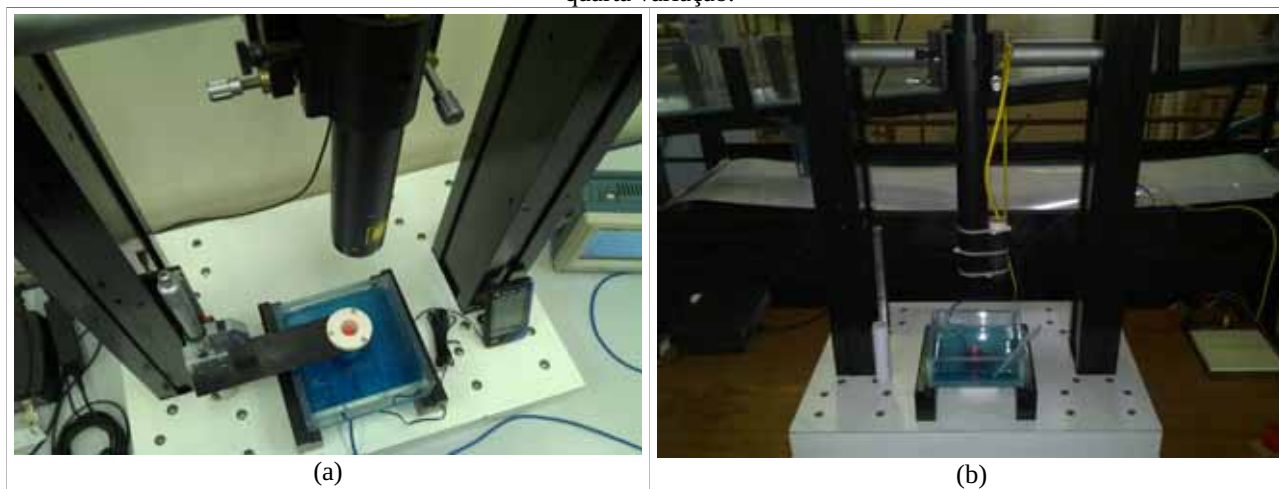
O funcionamento deste experimento consiste em variar o nível da solução contida dentro da cuba de vidro, para que seja percebido uma alteração da potência do laser incidente no fotodetector e este, produza diferentes valores de tensão. O laser tem seu foco sobre uma sonda, esta tem a funcionalidade de variar seu nível, através de um micrômetro, guiando o foco do laser do nível mínimo (vidro, o mínimo possível de solução e vidro) ao nível máximo (vidro, o máximo possível de solução e vidro). Proporcionalmente, quando a sonda estiver no nível máximo terá um diminuição da potencia do laser incidente sobre o fotodetector e quando o nível da sonda estiver no nível mínimo haverá um aumento do potência incidente sobre o fotodetector, resultando respectivamente, uma diminuição e uma elevação na tensão apresentado no osciloscópio. Também foi instalado um termo sensor junto ao vidro no fundo da cuba, para verificar possíveis alterações na temperatura do fluido teste (Figura 39).

Figura 39 – Aparato de calibração, em detalhe cuba de vidro, fotodetector e termo sensor.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 40 – Aparato de calibração. (a) Configuração da primeira, segunda e terceira variação. (b) Configuração da quarta variação.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.2.2 Sistema Ultrassônico: Método Pulsado, modo Pulso – Eco.

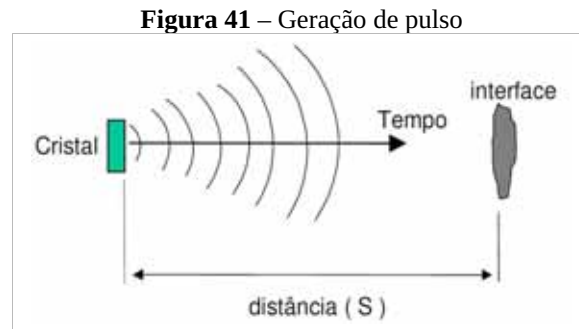
Métodos Ultrassônicos são os que empregam as propriedades do som, mais propriamente ondas ultrassônicas como verificador de propriedades físico-químicas de um anteparo, podendo este ser um líquido, gás ou sólido. O aparato ultrassônico, utilizado no sistema de aquisição de dados utilizou o método pulsado, no modo pulso-eco para caracterizar o escoamento em condições laminar e perturbado. A teoria apresentada neste item teve como referências base a publicação dos resultados da Rede de Automação Industrial e o livro de Aplicação Industrial: Ensaio por Ultrassom (ADAMOWSKI, et al. 2005).

Método de Caracterização

Os métodos de caracterização acústica consistem em definir características de materiais relacionando propriedades deste com a velocidade ou atenuação em função da frequência. Os métodos de caracterização são divididos em ondas contínuas ou ressonância e métodos pulsados. Segundo Adamowski et al. (2005), os métodos de ressonância são aplicados em frequências mais baixas, menores que 10MHz em geral, já os métodos de onda pulsada são aplicados desde frequências de MHz até GHz.

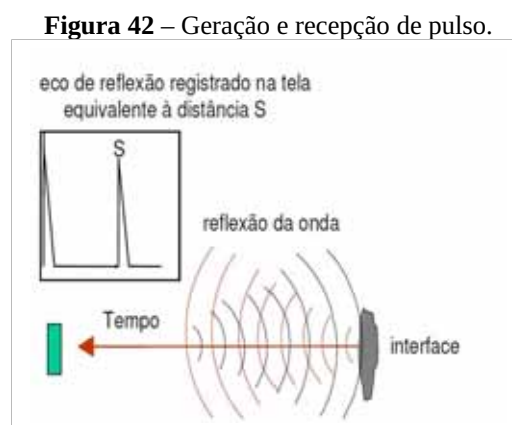
Os métodos pulsados tornaram-se mais populares a partir da Segunda Guerra Mundial, devido aos avanços nas técnicas de sonar e radar, e atualmente é o método mais aplicado devido à simplicidade e rapidez, sendo também o método mais comum na área de ensaios não destrutivos por ultrassom. (Adamowski et al., 2005). Os métodos pulsados podem operar com um ou dois transdutores. No primeiro caso operará no modo pulso-eco e no segundo caso no modo emissor-receptor.

O aparelho de ultrassom produz um pulso por meio de um cristal piezoelétrico, e este se propaga em direção a uma interface. No instante em que inicia-se o primeiro pulso, inicia-se também a contagem de tempo (Figura 41).



Fonte: Andreucci (2011).

Ao incidir em uma interface, localizada a uma distância “S”, ocorre a reflexão da onda que é detectada pelo cristal piezoelétrico, esta origina novamente um sinal elétrico. A posição do eco medido é proporcional ao tempo percorrido de retorno da interface (Figura 42).

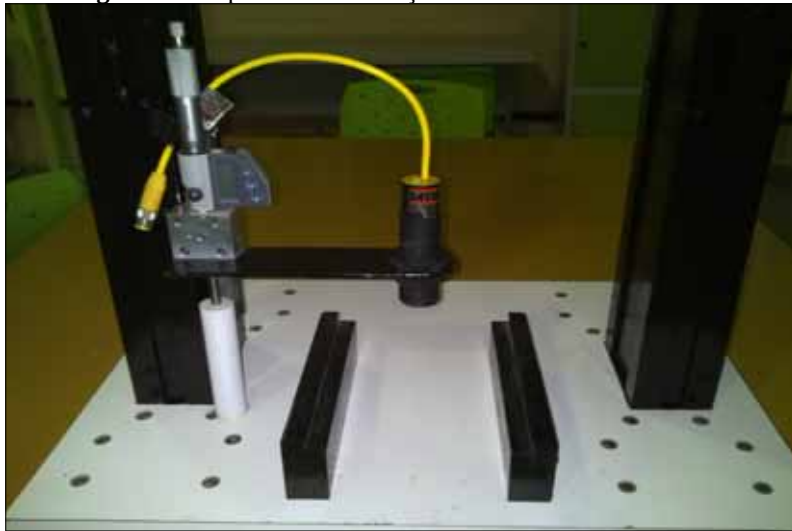


Fonte: Andreucci (2011).

Calibração

As calibrações foram executadas para verificar a relação de distância em milímetros da altura do transdutor ultrassônico em relação a uma interface e o sinal em volts apresentado pelo transdutor. Assim, utilizando o aparato de calibração (Croqui em Apêndice A) a distância do transdutor ultrassônico foi variada, em incrementos de 1 mm ajustando o micrômetro, possibilitando a aferição do sinal no osciloscópio. Desta forma, foi construída uma tabela. Com os pontos (distância versus volts) pôde-se determinar uma reta de tendência, cuja equação foi utilizada para transformar todo sinal (volts) aferido pelo ultrassom no canal, sobre a superfície livre do escoamento, em altura (Figura 43).

Figura 43 – Aparato de calibração do transdutor ultrassônico.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

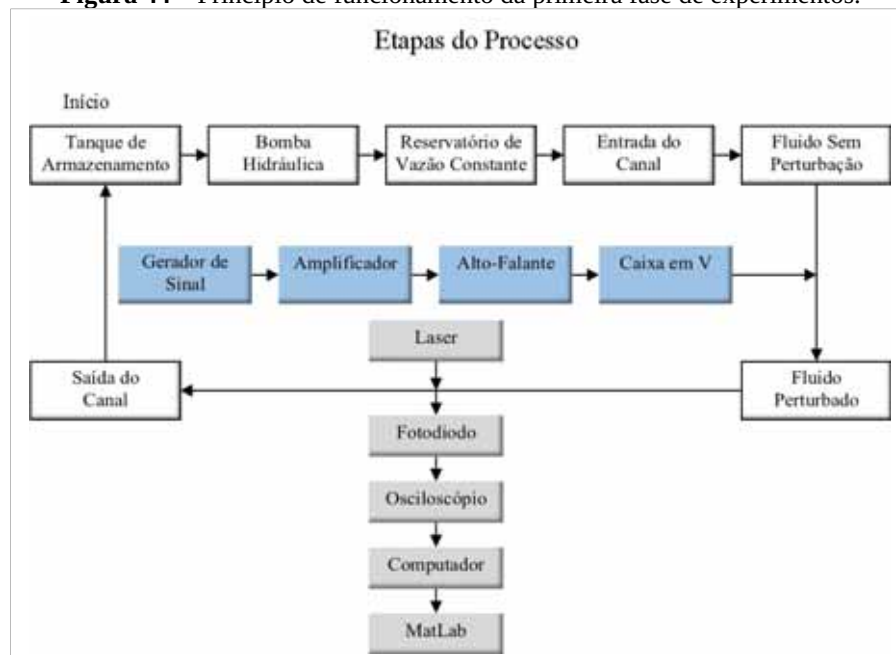
5 ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Este capítulo tem por objetivo apresentar os problemas e as soluções no desenvolvimento do aparato experimental. Vários equipamentos e sistemas foram detalhados no Capítulo anterior, bem como os dois métodos de caracterização.

5.1 Primeira Fase

O princípio de funcionamento (Figura 44), consiste na saída do fluido da caixa de armazenamento passando por uma bomba de sucção, que o impulsiona até a caixa de reservatório de nível constante a aproximadamente 2,5 m de altura em relação ao nível do chão, fazendo com que o fluido teste desça pela ação da gravidade até a parte inicial do canal. Ao escoar pelo canal o fluido é perturbado pelo ar pulsado do alto-falante e mais adiante a lâmina do escoamento é aferida através do sistema de medição (laser e fotodiodo). E assim, o fluido teste fecha o circuito voltando novamente à caixa de armazenamento. A principal característica desta fase é a utilização da bomba hidráulica, reservatório de vazão constante, com controle de vazão por válvula borboleta e o fluido teste utilizado no canal ser a glicerina (Figura 44).

Figura 44 – Princípio de funcionamento da primeira fase de experimentos.

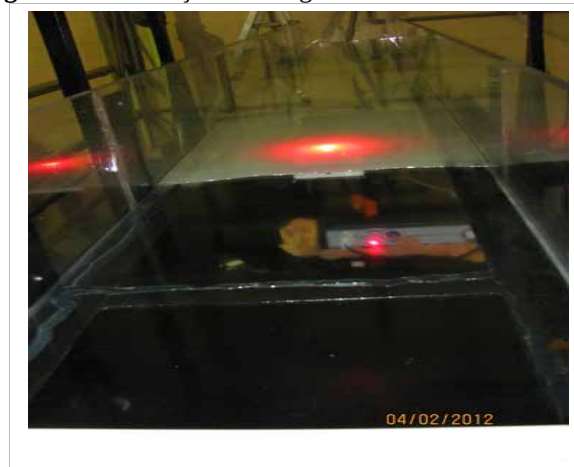


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

No decorrer desta fase foi percebido que existiam 2 condições desfavoráveis. A primeira delas foi devido à vazão, pois diante da configuração do sistema experimental a vazão máxima

atingida não consistia na vazão mínima necessária para visualização das *roll waves*. A segunda condição desfavorável foi devido à bomba hidráulica trabalhar com sistemas de pás giratórias impulsionando o fluido. Este giro de pá além de impulsionar o fluido viscoso, como é o caso da glicerina, também propicia o aparecimento de uma grande quantidade de micro – bolhas, deixando o fluido com uma aparência de espuma, tornando-o inviável à utilização da técnica de absorção luminosa. Devido à grande quantidade de micro – bolhas a dispersão luminosa sobre o fluido torna-se significativa, dificultando a medição (Figura 45).

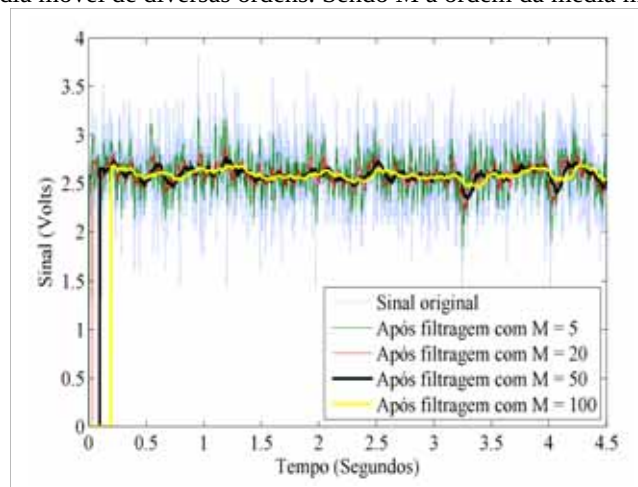
Figura 45 – Interação laser e glicerina com micro – bolhas.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Figura 46, mostra uma tentativa de visualização do sinal nestas condições desfavoráveis. Os dados capturados foram tratados com filtro de média móvel.

Figura 46 - Resultado da aquisição de dados através do osciloscópio, após filtrações com filtros de média móvel de diversas ordens. Sendo M a ordem da média móvel.

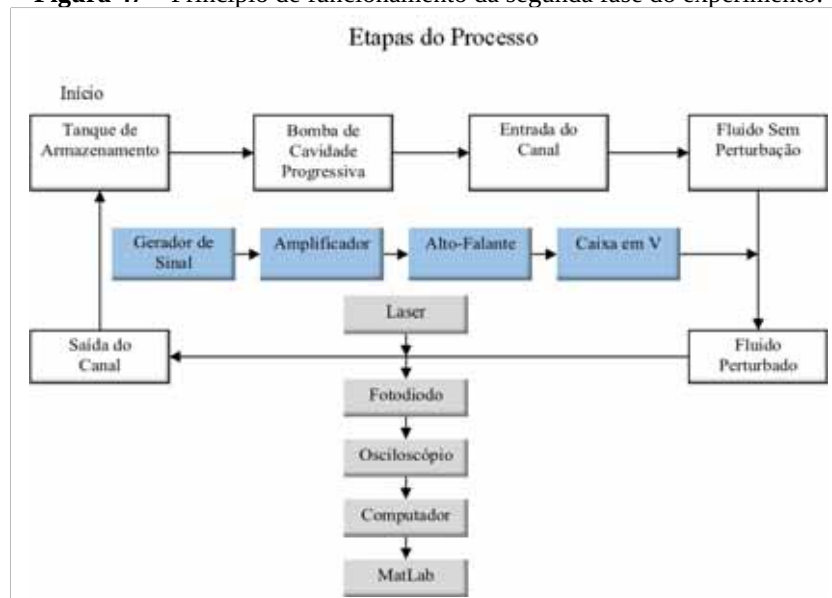


Fonte: Fiorot (2012).

5.2 Segunda Fase

Devido às condições desfavoráveis mencionadas no item 5.1, a segunda fase teve como objetivo reformular o projeto, começando pela troca da bomba hidráulica por uma bomba de vazão constante. Esta nova bomba, impulsional o fluido através do transporte dentro de cavidades progressiva, e não mais por intermédio de pás giratórias, como o caso da bomba hidráulica. Devido à troca da bomba foi necessário trocar as canalizações adjacentes de 1” para 2”, assim o controle da vazão que antes era feito pela válvula borboleta, agora foi feito em função da rotação da bomba, esta controlada pelo inversor de frequência. A alteração do funcionamento do sistema experimental está demonstrado no Figura 47.

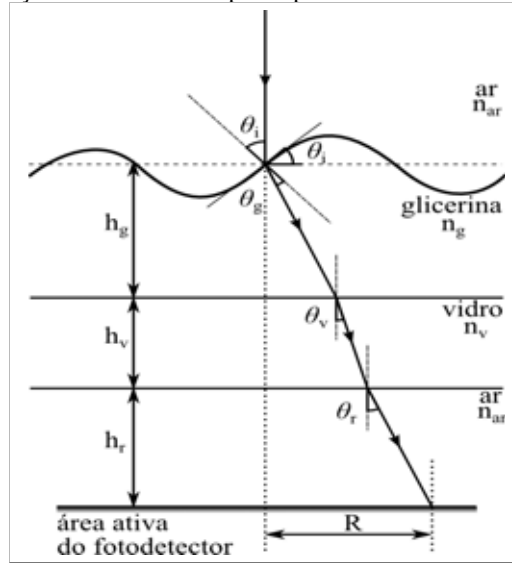
Figura 47 – Princípio de funcionamento da segunda fase do experimento.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Em decorrência de tais alterações, os problemas de pouca vazão e micro – bolhas foram solucionados, tornando possível a geração das *roll waves*. Mas ainda não havia concordância da caracterização do fenômeno a ser observado pela técnica de absorbância, pois quando o fluido teste apresentava as *roll waves*, havia uma inclinação na superfície livre do escoamento, gerando um desvio do feixe do laser, deslocando-o para fora da janela ativa do fotodetector. Este deslocamento pôde ser quantificado através da Lei de Snell (Figura 48).

Figura 48 – Refração no sistema composto pelo escoamento com nível oscilatório.



Fonte: Fiorot (2012).

O desvio total R pode ser encontrado calculando os desvios dos feixes em cada passagem de interface, conforme a Eq. (5).

$$\theta_g = \arcsen\left(\frac{n_{ar}}{n_g} \sen\theta_i\right); \theta_v = \arcsen\left(\frac{n_g}{n_v} \sen(\theta_i - \theta_g)\right); \theta_r = \arcsen\left(\frac{n_v}{n_{ar}} \sen\theta_v\right); \quad (5)$$

onde θ_i , θ_g , θ_v e θ_r são ângulos de incidências e refração do feixe laser nos diferentes meios. E n_{ar} , n_g e n_v são índice de refração.

Sendo R o desvio total, dado pela Eq 6:

$$R = h_g t_g (\theta_i - \theta_g) + h_v t_g \theta_v + h_r t_g \theta_r \quad (6)$$

onde h_g , h_v e h_r são distâncias percorridas pelo feixe laser em diferentes meios.

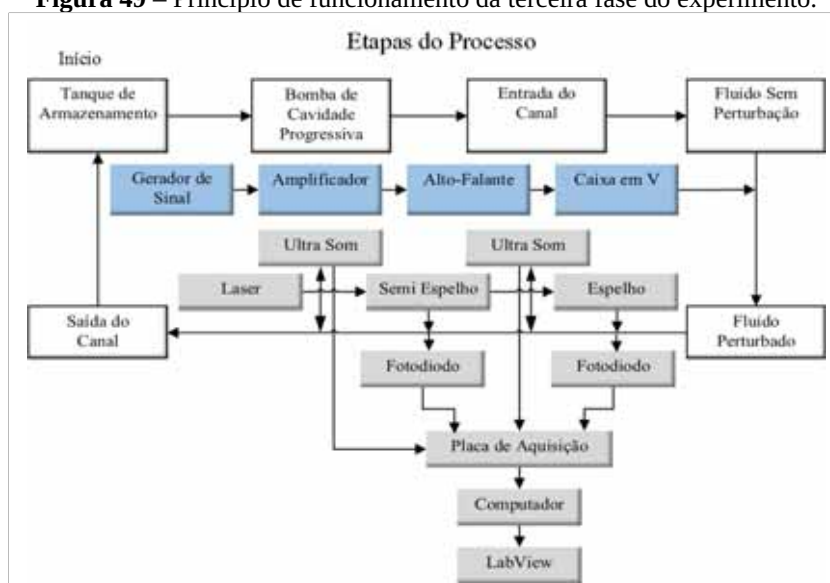
Assim, com o intuito de diminuir o valor de R , utilizando as dimensões apresentadas, diminuiu-se o h_r colocando o fotodetector junto ao vidro no fundo do canal e trocando o fotodetector *Thorlabs DET10A* pelo da *Newport 818-SL* que tem 1cm^2 de janela ativa.

Ressalta-se que na primeira e segunda fase, o fluido teste utilizado foi a glicerina juntamente com o azul de metileno como corante.

5.3 Terceira Fase

Após a concretização da segunda fase, houve o interesse de caracterizar as *roll waves* em fluido teste não-newtoniano (carbopol), em dois pontos fixos no mesmo instante e comparar duas formas de caracterização. Assim foi anexado ao sistema um conjunto de suporte – lâmina de vidro e espelho, para dividir o feixe de laser em dois ramos, e dois transdutores ultrassônicos. Para que isto fosse possível, o sinal dos sensores não poderia ser capturado pelo osciloscópio, pois o modelo utilizado dispõe somente de dois canais. Assim, o osciloscópio foi substituído pela placa de aquisição USB 6009 e o *software Matlab* pelo *LabView* como *software* para aquisição, tratamento e gravação do sinal (Figura 49).

Figura 49 – Princípio de funcionamento da terceira fase do experimento.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A utilização do carbopol como fluido teste levou-nos à verificação de toda variação possível do aparato experimental.

As características reológicas do gel de carbopol, tais como tensão crítica e viscosidade aparente elevada, tornavam o escoamento mais lento e exigia que o canal fosse suficientemente inclinado para que atingisse a condição mínima necessária para a geração das ondas.

Outro fator foi o sistema de perturbação utilizado, pois para fluido altamente concentrado pôde-se perceber que o sistema não perturbava o escoamento suficientemente de forma que as *roll waves* se propagassem. Diante disso, uma possível solução seria diminuir a viscosidade aparente do gel de carbopol.

Até a segunda fase do experimento, já tinha sido utilizada toda a faixa de variação de rotação da bomba (90 a 1750 RPM), mas a inclinação do canal apenas tinha sido variado de 0 a 10

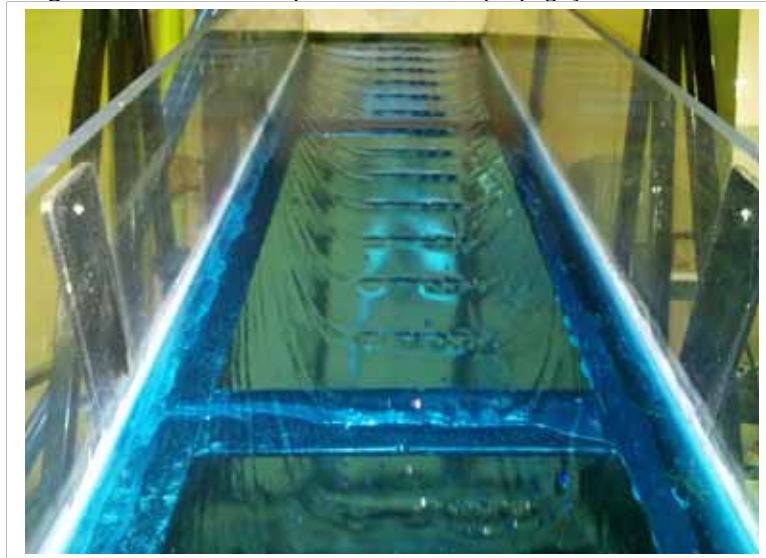
graus. Diante destas condições o canal foi inclinado a seu valor máximo atingindo 25 graus, apenas para confirmar que também nestas condições não haveria o aparecimento das *roll waves*.

Mesmo sendo previsto o surgimento das *roll waves* através de modelos matemáticos e numéricos estabelecidos pelo grupo RMVP, esta verificação foi necessária pois não há uma caracterização quantitativa do sistema de perturbação, somente qualitativa em variações de ganho. Mesmo sabendo a amplitude do sinal, mediante um certo ganho, este aparato experimental não tem caracterização da relação ganho do sinal pela quantidade de ar que é impulsionado da cavidade de saída da caixa em “V”.

Devido a não geração das *roll waves*, foi necessário alterar a reologia do carbopol, diminuindo parâmetros como: viscosidade aparente, tensão crítica e índice de escoamento. Para alterar a reologia utilizou-se de amostras para gerar uma caracterização padrão. Ou seja, foi retirado do tanque de armazenamento um volume que fosse aferido por uma balança de precisão 200 gramas, e assim adicionado 10% deste peso inicial de água deionizada. Após resultado da homogeneização desta primeira mistura, foi feita a caracterização reométrica, observando uma diminuição nos parâmetros reológicos. Este procedimento foi realizado 7 vezes, sempre utilizando a amostra anterior e adicionando 10% do peso da amostra original, resultando uma sétima amostra de 140 gramas de água deionizada. Esta caracterização foi executada por 3 vezes, resultando 21 ensaios reométricos.

Após esta caracterização padrão, foi estimado o volume total contido no experimento – tanque de armazenamento, canalização e bomba de cavidade progressiva, verificado em 140 litros. Desta forma, seguindo a proporção da caracterização padrão, foi adicionado 10% deste volume (15 litros) em água deionizada. Após esta adição, foram caracterizados os parâmetros reológicos deste novo fluido teste, e assim se iniciou novamente a caracterização do escoamento sem e com perturbação. Esta teve como variação a inclinação de 5 a 25 graus com incremento de 5 graus, e para cada grau foi variado de 250 a 1750 RPM com incremento de 500 RPM. Em cada inclinação com sua referida rotação foram aferidas as propriedades do escoamento, tais como: vazão, altura da lâmina do escoamento e velocidade na superfície. Pôde-se, assim, determinar a velocidade média do escoamento e também os adimensionais de interesse em engenharia hidráulica de superfície livre, tais como, número de *Froude* e *Reynolds*. O acréscimo de 10% em água deionizada do volume inicial de carbopol contido no experimento, ocorreu por três vezes, sempre utilizando a mesma forma de caracterização. Cabe salientar que em todas as configurações o fluido teste foi perturbado, no entanto, pôde-se visualizar apenas uma “protuberância” do sistema de perturbação sobre o escoamento, e não uma propagação de *roll waves* propriamente dita (Figura 50).

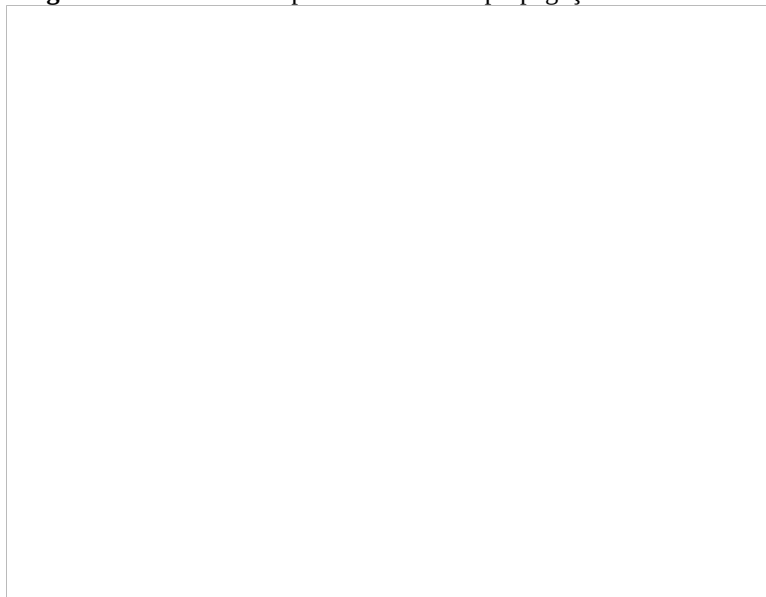
Figura 50 – Fluido teste perturbado sem a propagação de *roll waves*.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Após a terceira adição de água deionizada na solução de carbopol, pôde-se verificar situações com propagação de ondas. Desta forma, os ensaios foram feitos variando a inclinação do canal e aumentando a rotação da bomba de 250 a 1750 RPM, com incremento de 250 RPM. Após, confirmado a geração de *roll waves* (Figura 51), não houve mais adição de água deionizada no fluido teste. E assim, iniciaram-se os ajustes no sistema de perturbação e posteriormente os ajustes no sistema de caracterização.

Figura 51 – Fluido teste perturbado com a propagação de *roll waves*.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Quando o sistema de caracterização do escoamento, consistindo no conjunto ultrassônico, estavam aferindo o fluido teste em regime perturbado, houve necessidade de se ajustar uma distância ótima do fundo do canal em função do ajuste da faixa de medição do transdutor. Assim, o transdutor para cada reologia, inclinação do canal e rotação da bomba, deveria ser ajustado procurando uma distância de modo que, quando a frente de onda fosse aferida pelo sinal ultrassônico emitido, o transdutor captasse a maior quantidade possível deste sinal. Dependendo da distância do transdutor ao fundo do canal, o sinal refletido da superfície inclinada de frente da onda não retornou ao transdutor, ocasionando uma perda de sinal.

Para o sistema de caracterização do escoamento usando o conjunto fotométrico, não houve necessidade de ajuste de distâncias, pois os problemas de perda do sinal devido à inclinação da frente de onda, em condições de fluido teste perturbado, foram resolvidos na segunda fase deste experimento, fixando o fotodetector logo após o fundo do canal. No entanto, os problemas apresentados pelo conjunto fotodetector, nesta fase, ocorreram devido à alteração da condição inicial do carbopol, pela adição da água deionizada e impurezas decorrente do seu envelhecimento.

Após realizado todos os testes de ajustes do experimento, este foi testado efetivamente nas configurações de rotação 250, 500 e 750 RPM, e inclinação da rampa em 5 graus, no qual tais resultados serão abordados no Capítulo 6.

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

No decorrer deste projeto foram gerados uma grande quantidade de dados, e transformados em informações. O capítulo anterior apresentou as etapas do projeto relatando resultados qualitativos, já o presente capítulo visa apresentar os resultados quantitativos das alterações de reologia, assim como pontuar as condições atuais do experimento, através de dados levantados, em condições específicas de configuração do aparato e da reologia.

6.1 Alterações na Reologia

Dentre todas as informações presentes neste experimento, as informações da reologia do fluido teste esteve em evidência, pois todas as outras informações têm seus resultados em função das mudanças reológicas no transcorrer do experimento.

A utilização do carbopol como fluido teste, apresentava uma grande quantidade de perguntas, tais como: Qual seria o comportamento do fluido após passar por uma bomba de cavidade progressiva? Qual a viscosidade aparente necessária para visualizar as *roll waves* com este sistema de perturbação e com este comprimento de canal? Como diminuir a viscosidade aparente do carbopol, estando ele já na condição de gel?

Desta forma, todo passo a ser dado na utilização do carbopol poderia resultar em resposta ou mesmo em perda total do fluido. A adição de água deionizada foi feita, a princípio, através de pequenas amostras de gel de carbopol, como já relatado. Este procedimento foi feito por 7 vezes, no qual todas amostras obtidas após adição de água deionizada foram caracterizadas, resultando nas informações da Tabela 5.

Tabela 5 – Verificação da reologia após adição de água deionizada.

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
Tensão Crítica (Pa)	25,695	19,665	14,848	8,526	6,692	7,527	7,965	7,470
Viscosidade Plástica (Pas)	16,725	11,641	9,335	7,132	3,931	1,029	0,149	0,063
Índice de escoamento	0,360	0,386	0,395	0,402	0,478	0,704	1,050	1,205

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Após a visualização destes resultados, foi possível estimar como o fluido teste se comportaria, adicionando água deionizada na mesma proporção diretamente no reservatório. Assim foi feito um levantamento de quanto carbopol continha o experimento (canalização, caixa de estagnação, bomba de sucção e reservatório), resultando em 140 litros. Desta forma foi adicionado 14 litros de água deionizada por 3 vezes. Nos 3 primeiros ensaios não foi verificada a presença de propagação de ondas, mas somente impressão do sistema de perturbação na superfície livre, conforme ilustrado na Figura 50. No final do ensaio número 4 (inclinação do canal 25 graus e rotação de 1750 RPM) apareceram as primeiras propagações de ondas.

A partir deste momento, todos os ensaios apresentaram surgimento de *roll waves*, conforme Figura 51, sendo apenas necessário configurar o escoamento para condições adequadas (inclinação, vazão em função da rotação da bomba e perturbação). Desta forma, do ensaio número 5 até o ensaio número 9, apresentaram-se *roll waves*. O experimento apresentou *roll waves*, no ensaio número 9, com a seguinte configuração: canal inclinado a 5 graus e vazão na rotação de 200 RPM, ou seja nas condições mínimas do aparato experimental.

Salienta-se que, após a terceira adição de água deionizada no início do ensaio número 4, não houve mais adição de água deionizada nos ensaios seguintes. Toda mudança de reologia que os outros ensaios apresentaram, foi resultado do envelhecimento do fluido teste, em função de sua utilização.

Todas as características de mudança reométrica devido à adição de água deionizada, assim como o envelhecimento do fluido teste, estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Mudança reométrica devido o envelhecimento do fluido teste.

	Sem Roll Waves				Com Roll Waves				
Ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tensão Crítica (Pa)	13,002	13,337	9,878	9,624	10,279	9,419	6,885	7,643	2,905
Viscosidade Plástica (Pas)	15,881	14,881	13,112	8,789	8,591	7,131	2,057	1,012	0,016
Índice de Escoamento	0,296	0,337	0,335	0,376	0,383	0,413	0,602	0,721	0,999

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

6.2 Aparato Experimental

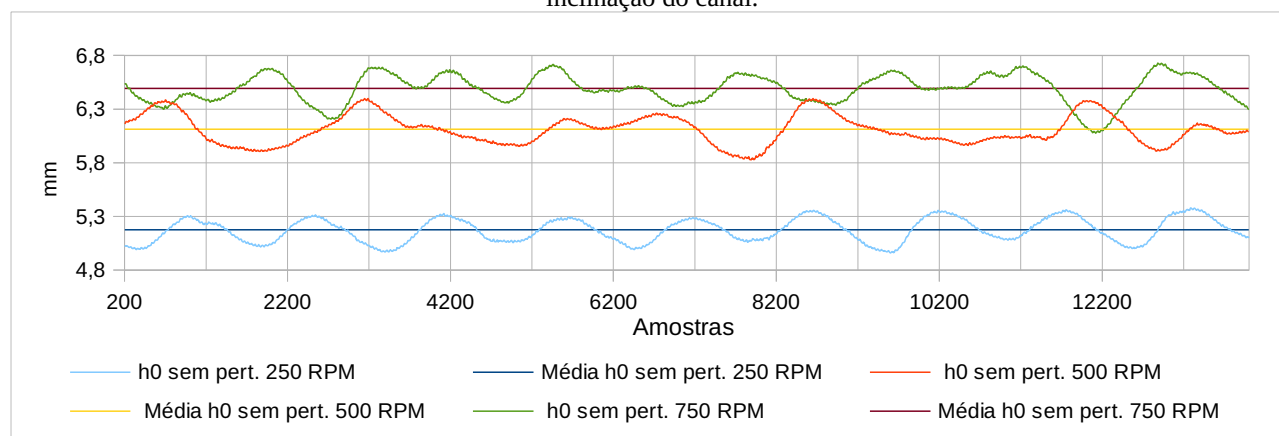
Como já relatado, o aparato experimental, teve por objetivo principal isolar o experimento de quaisquer vibrações mecânicas, assim como os outros cuidados e procedimentos também foram de suma importância, tal como inclinar o canal de 0 a 25 graus, proceder variações de vazão em

função da rotação da bomba de 200 a 1750 RPM, etc.

No entanto, mais uma vez em função da reologia do fluido teste, algumas vibrações mecânicas estiveram presentes no experimento. Devido ao giro do eixo de cavidade progressiva da bomba de sucção, algumas pequenas vibrações foram transmitidas através das mangueiras que encaminham o fluido teste para a caixa de entrada, provocando assim, propagações de oscilações na superfície livre no final do canal. Salienta-se que, apenas em função de condições adequada da configuração do aparato experimental e sobre certas condições da reologia do fluido teste, é possível verificar estas interferências mecânicas.

Devido às configurações do aparato relatadas neste capítulo, tais oscilações “inoportunas” também foram aferidas, sendo apresentadas na Figura 52. Cabe salientar que as informações apresentadas na Figura 52, foram obtidas sem a utilização do sistema de perturbação.

Figura 52 - Caracterização das oscilações nas configuração de 250, 500 e 750 RPM da bomba de sucção a 5 graus de inclinação do canal.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As Tabelas 7 e 8, apresentam os dados levantados nestas configurações específicas. Assim, após fixar a inclinação do canal em 5 graus, foi regulado o inversor de frequências em 250, 500 e 750 RPM. O levantamento da vazão foi feito aferindo o peso de uma quantidade de gel de carbopol na saída do canal em um certo tempo, utilizando respectivamente uma balança de precisão e um cronômetro. A velocidade de superfície foi aferida através de uma boia de isopor, que percorreu um certo espaço conhecido, em um tempo cronometrado. A altura da lâmina (h_0), foi quantificada através do transdutor ultrassônico. E por fim estes dados foram relacionados com as características reológicas aferidas pelo reômetro.

Tabela 7 – Configurações específicas do aparato experimental.

Rotação (RPM)	Vazão (kg/s)	Vazão (l/s)	Altura da Lamina (m)	Velocidade de Superfície (mm/s)
250	0,249	0,197	0,0052	248
500	0,494	0,392	0,0061	407,53
750	0,747	0,592	0,0065	518,39

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 8 – Configurações específicas da reologia em conformidade com a dinâmica do escoamento.

Rotação (RPM)	Velocidade Média (m/s)	Taxa de Deformação (l/s)	Viscosidade Aparente (Pas)	Tensão Crítica (Pa)	Índice de Escoamento
250	0,1271	47,9153	0,1549	7,559	0,999
500	0,2135	66,6662	0,1429	9,763	0,999
750	0,3037	79,8243	0,1395	11,024	0,999

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Ao levantar estes dados foi considerado que nestes estava contido uma quantidade de erros, inerente à precariedade da medição, como é o caso do levantamento da vazão e da velocidade na superfície. No entanto, os valores levantados serviram de parâmetros, para poder situar em que condições seria possível aferir as propagações da superfície livre, e posteriormente comparar o formato desta *roll waves* entre o modelo numérico e o experimental.

6.3 Sistema de Perturbação e Aquisição de Dados

Os dados apresentados neste capítulo de resultados apresentam o sistema de perturbação do escoamento na frequência 1,5 Hz. A intensidade da perturbação é proporcional ao ganho variado no amplificador, no entanto não foi caracterizado qual é a relação deste ganho com a potência da perturbação na saída de ar da caixa em “V”.

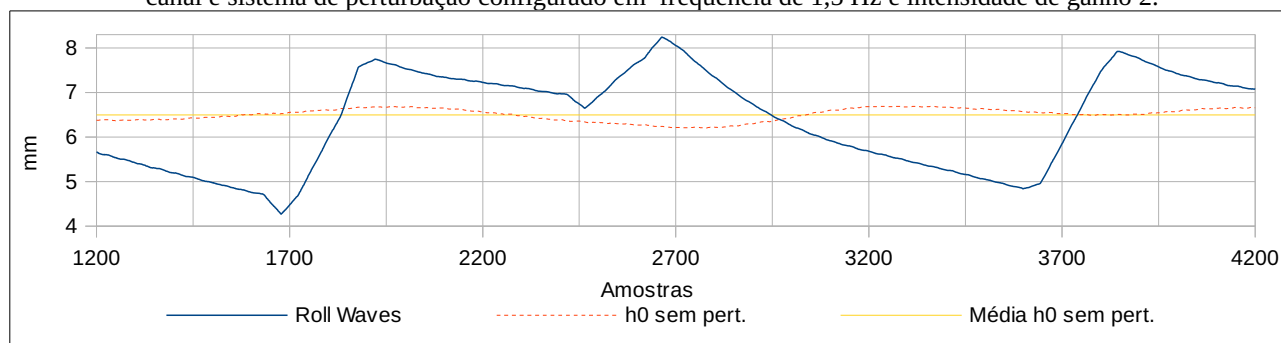
Dados apresentados neste capítulo e no Apêndice B mostram configurações de perturbação em valores numéricos, variando de 1 até 4. Estes representam apenas a variação no potenciômetro de ganho do amplificador, a saber: 1 e 4 representam o posicionamento mínimo e máximo respectivamente, e os valores de 2 e 3, o giro de 25% e 75% no potenciômetro.

Com esta variação, obtiveram-se resultados diversos na propagação das *roll waves* no escoamento. No momento em que a lâmina de ar toca o escoamento de gel de carbopol, uma porção de fluido é empurrada a montante e outra a jusante. A porção que foi empurrada a montante caminha poucos centímetros, e novamente retorna propagando-se no fluxo normal do canal. Neste momento, a outra porção de carbopol já está sendo propagada na direção do fluxo normal do canal, ganhando alguns centímetros à frente da oscilação que iniciou sua propagação mais a montante. As

duas oscilações ao se propagarem pelo canal irão se sobrepor, pois a oscilação que foi originada a montante tem maior velocidade, devido a perturbação que a originou não ter tanta intensidade, resultando em uma oscilação de baixa amplitude, mas de maior velocidade de propagação.

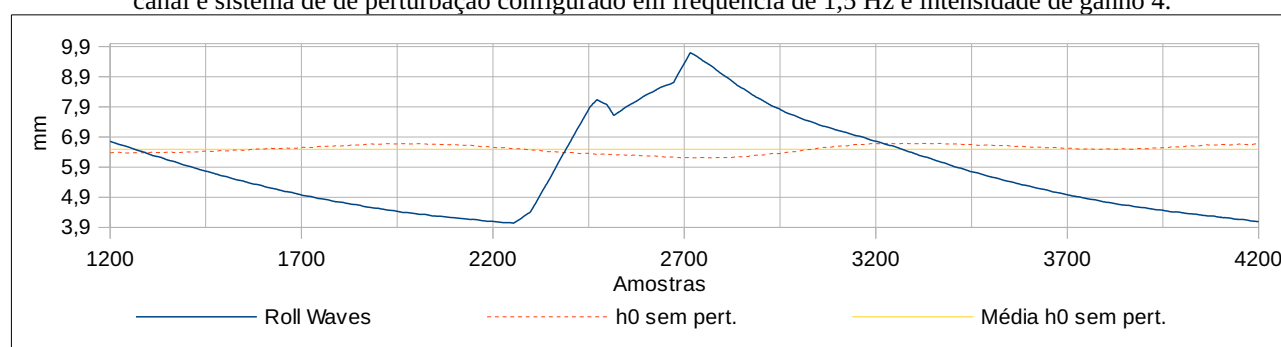
A posição em que as duas oscilações irão se sobrepor está em função da intensidade da perturbação. Esta sobreposição de ondas foi observado experimentalmente através das Figuras 53 e 54. A Figura 53 mostra duas ondas caminhando, como resultado de perturbações de pequenas intensidades. Já Figura 54 resultante de perturbações de maiores intensidade, apresenta uma aproximação de duas frentes de ondas, que devido à proximidade de seus dois picos aparenta ser apenas uma onda. Observa-se que estas ondas foram aferidas no mesmo ponto a uma mesma distância do aparato de perturbação.

Figura 53 - Características das oscilações nas configuração de 750 RPM da bomba de sucção, 5 graus de inclinação do canal e sistema de perturbação configurado em frequência de 1,5 Hz e intensidade de ganho 2.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 54 - Características das oscilações nas configuração de 750 RPM da bomba de sucção, 5 graus de inclinação do canal e sistema de de perturbação configurado em frequência de 1,5 Hz e intensidade de ganho 4.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

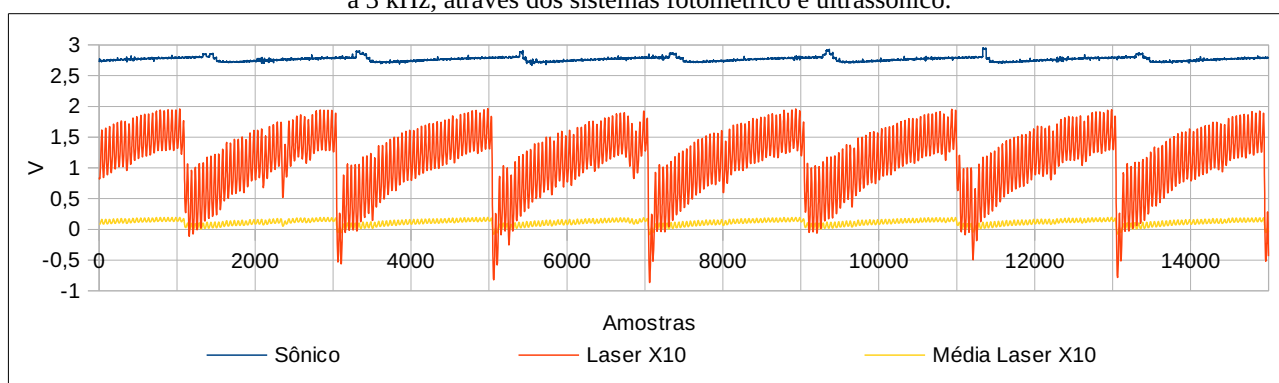
Já o sistema de aquisição de dados, logo após a concretização da terceira fase, apresentou grandes dificuldades em caracterizar as *roll waves*, nos testes iniciais, devido ao envelhecimento do fluido teste e a divisão do feixe de laser através da lâmina de vidro.

Primeiramente foi verificado que a lâmina de vidro não dividia o laser em dois ramos de potências iguais, como era esperado para um semi-espelho, mas atenuava grande parte do sinal

transmitido e refletido. No entanto, ainda seria possível a utilização desta configuração, amplificando o sinal capturado pelos fotodetectores. Mas, devido ao efeito de espalhamento, resultante das impurezas, que agora fazem parte do fluido teste envelhecido, esta configuração não pode ser utilizada.

O resultado apresentado na Figura 55, mostra a grande influência sofrida pelo sistema fotométrico devido ao espalhamento em função das impurezas do fluido teste. É possível, assim, visualizar a dificuldade em caracterizar as *roll waves*, primeiramente pela atenuação (sinal amarelo), que após ser amplificado 10 vezes, vê-se a grande quantidade de interferências no sinal devido ao espalhamento (sinal laranja).

Figura 55 – Comparação do sistema fotométrico e ultrassônico em tensão. Sinais resultante da frequência de aquisição à 3 kHz, através dos sistemas fotométrico e ultrassônico.

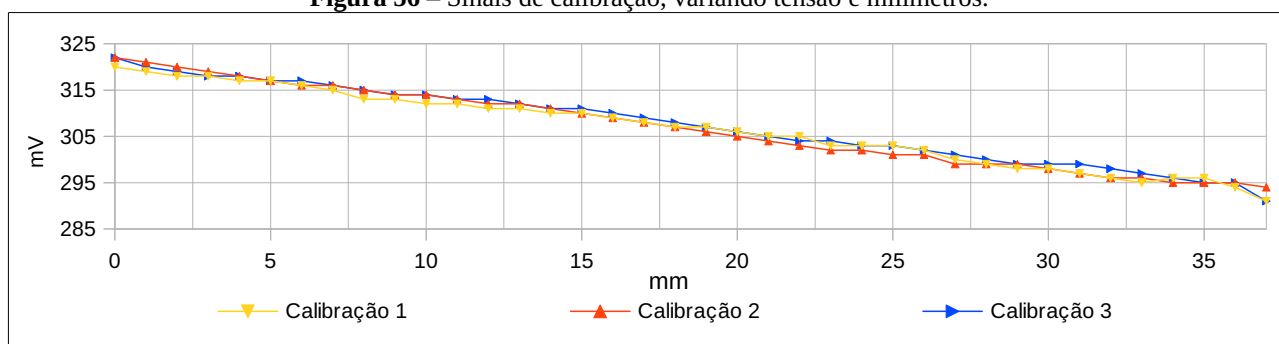


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Após o sinal ser adquirido em tensão, este foi transformado em milímetro através de sua calibração. Cada sistema tem sua devida calibração, como apresentado no Capítulo 4.

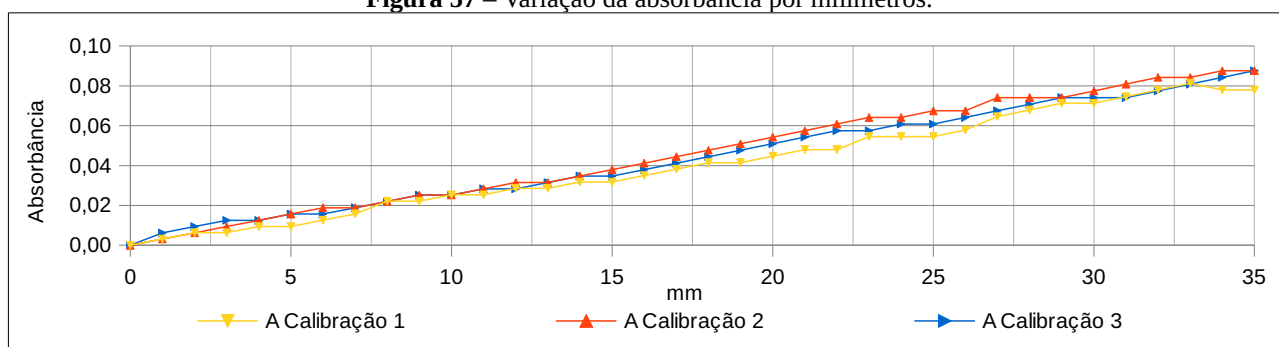
O sistema fotométrico tem sua calibração através da variação de 0 a 35 milímetros com incrementos de 1 milímetro, resultando em variações de sinal de tensão de 320 a 295 milivolts. A Figura 56 apresenta esta aquisição de sinais, dividida em 3 respostas de calibração.

Figura 56 – Sinais de calibração, variando tensão e milímetros.



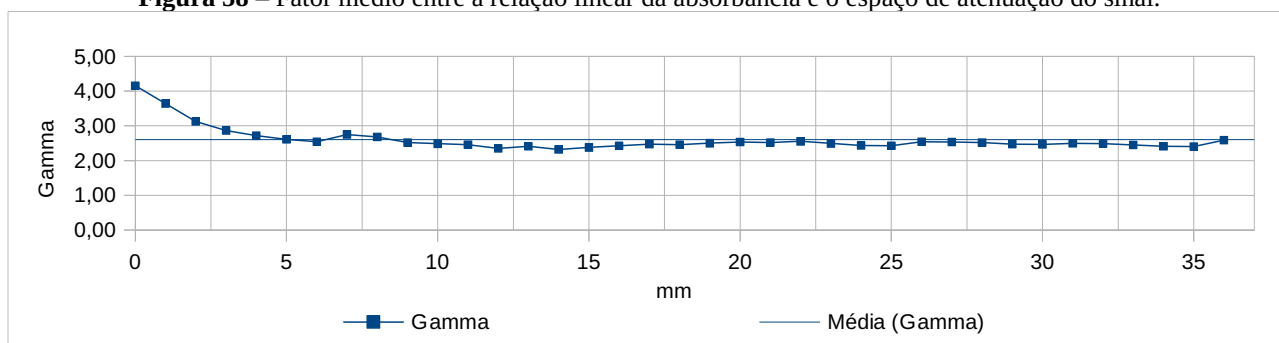
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Através das equações apresentadas no Capítulo 5, este sinal é transformado em absorbância, conforme apresentado na Figura 57.

Figura 57 – Variação da absorbância por milímetros.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

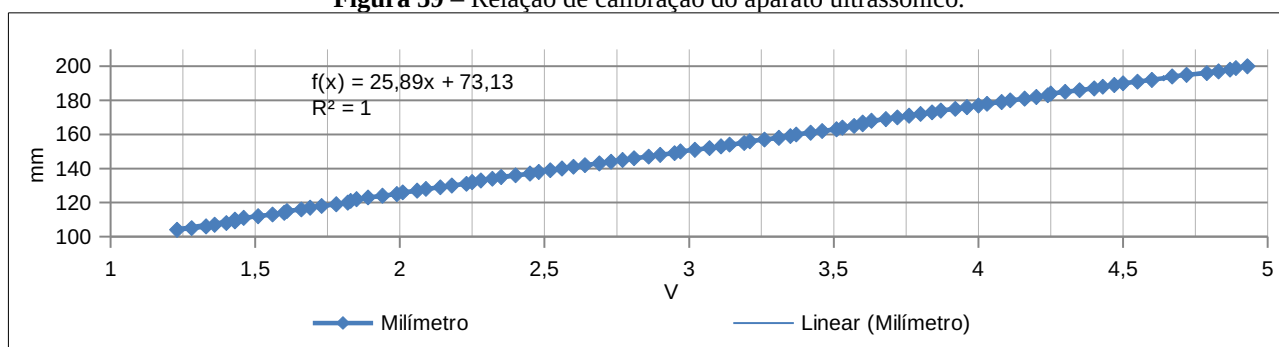
Assim, através da relação entre absorbância e o espaço de atenuação do sinal, altura da lâmina do fluido em milímetro, foi gerado o coeficiente de extinção $\gamma = 2,60$. A Figura 58, mostra o valor de γ médio obtido.

Figura 58 – Fator médio entre a relação linear da absorbância e o espaço de atenuação do sinal.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

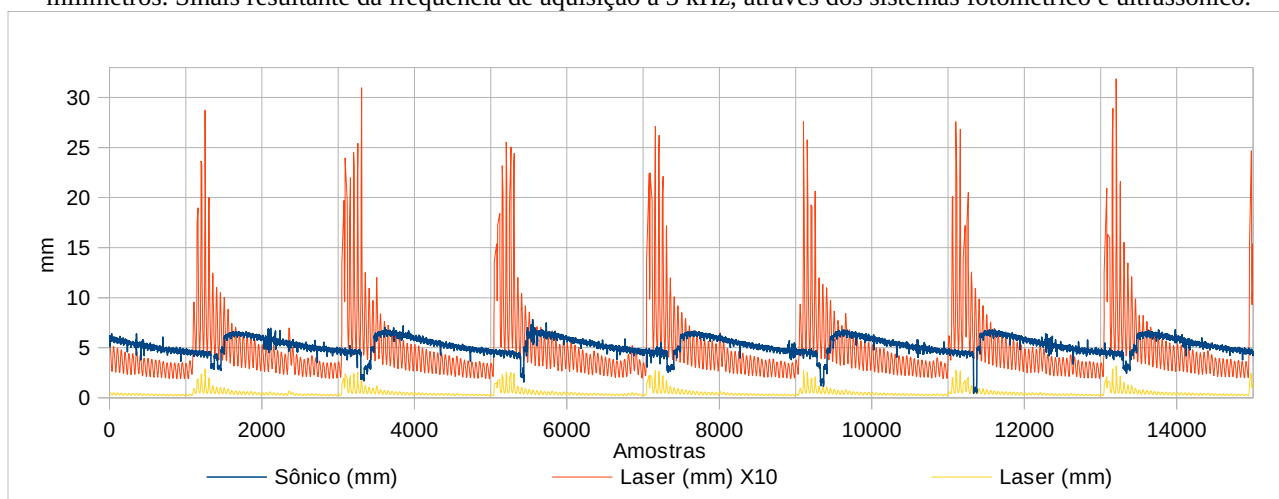
A variação mostrada na curva entre 0 e 5 milímetros (Figura 58) é devido ao efeito térmico. Este efeito foi estudado e definido por Fiorot (2012) como sendo uma variação na potência luminosa detectada, devido ao aquecimento do ponto de incidência da luz.

De forma similar no sistema ultrassônico, o aparato de calibração aferiu pontos relacionando o sinal do transdutor em função da altura de aferição, conforme Figura 59.

Figura 59 – Relação de calibração do aparato ultrassônico.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

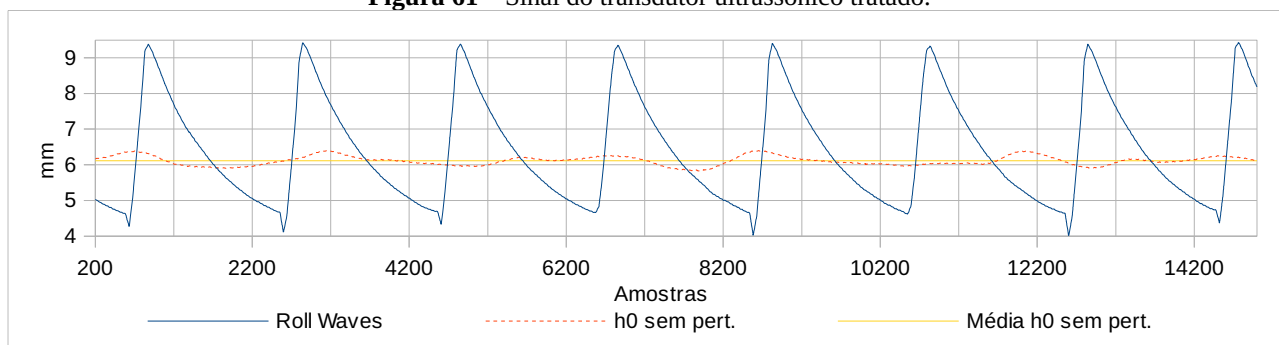
Desta forma através de uma regressão linear, foi traçada uma reta, cuja a equação traduza a relação de transformação do sinal em tensão para milímetros (Figura 60).

Figura 60 – Oscilações na superfície livre do escoamento. Comparação do sistema fotométrico e ultrassônico em milímetros. Sinais resultante da frequência de aquisição à 3 kHz, através dos sistemas fotométrico e ultrassônico.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Após comparação dos dados apresentados na Figura 60, foi possível verificar uma melhor conformidade e nitidez nas *roll waves*, apresentadas pelo sistema ultrassônico. No sistema fotométrico existem dificuldades em verificar o verdadeiro traçado das oscilações, e ainda uma ralação errônea dos valores de amplitudes das oscilações. No entanto, a forma de onda apresentada pelos dois sistemas, apresentaram uma boa conformidade, assim como o deslocamento entre as oscilações, que é devido ao distanciamento de 125 milímetros de um sensor ao outro, vindo das limitações físicas dos suportes dos sensores.

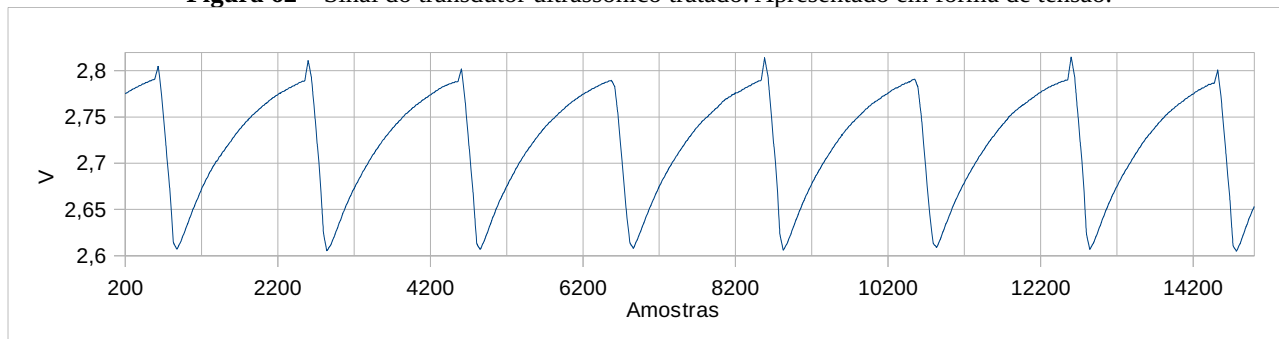
Os dados do transdutor ultrassônico apresentado nas Figuras 60, foram tratados por uma média móvel da ordem de 200, com o objetivo de suavizar o sinal apresentado, sem perder suas características e obter uma melhor visualização. Após este tratamento, o sinal com média móvel apresentou um erro médio quadrático de $0,47.10^{-3}$ (Figura 61).

Figura 61 – Sinal do transdutor ultrassônico tratado.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As informações obtidas pelos dados do sistema ultrassônico apresentaram algumas deficiências, em alguns vales entre os picos das *roll waves*. Estas “deficiências”, são resultados de efeitos de uma não linearidade do transdutor ultrassônico, ao aferir superfícies inclinadas.

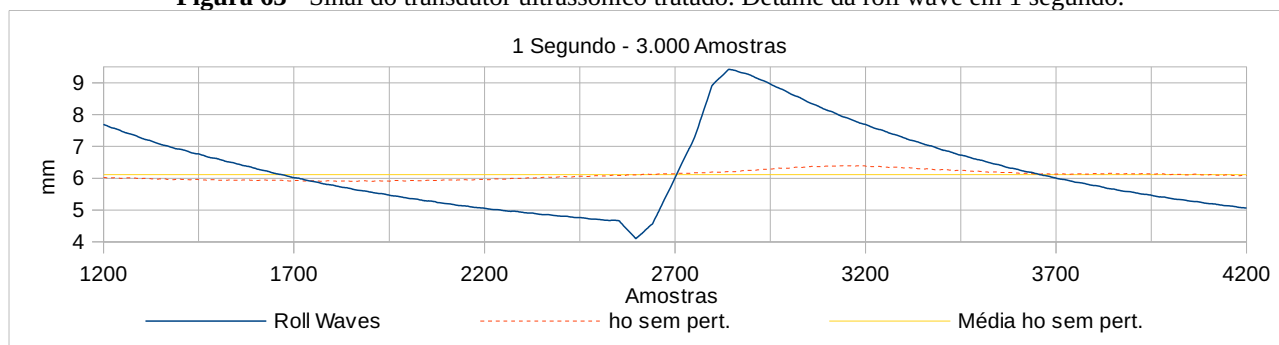
A Figura 62 mostra as mesmas *roll waves* apresentadas na Figura 61, tendo como diferença que na Figura 62 os dados estão ainda em forma de tensão e não em milímetros, como apresentado na Figura 61. Desta forma é possível visualizar que quando a tensão aferida pelo transdutor atinge proximidades de sinais da ordem de 2,78 V, ocorre esta não linearidade.

Figura 62 – Sinal do transdutor ultrassônico tratado. Apresentado em forma de tensão.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Após verificar a Figura 59, que mostra a relação de calibração do aparato ultrassônico, onde pode-se observar que a tensão de calibração foi linear de 1,25 V até 4,75 V, verifica-se que a não linearidade apresentada nas proximidades de 2,78 V é devido ao pouco sinal recebido, na volta do pulso de ultrassom, resultado da reflexão após o pulso de ultrassom atingir a oscilação com alto grau de inclinação.

A Figura 63 mostra o detalhe retirado da Figura 61, entre a amostra número 1200 e 4200, onde se vê, nitidamente, que a partir de uma certa inclinação, nível baixo da oscilação e nível alto de tensão, há pouco sinal de retorno, ou seja o transdutor entende rapidamente que o anteparo aferido se distanciou.

Figura 63 - Sinal do transdutor ultrassônico tratado. Detalhe da roll wave em 1 segundo.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

6.4 Influência da Vazão e do Número de Froude sobre o Perfil das *Roll Waves*

Este item tem como objetivo verificar a influência da vazão e do número de Froude do escoamento sobre o perfil das *roll waves*. Na Tabela 9 são mostradas as propriedades do escoamento, para o canal com uma inclinação de 5 graus e com vazões de 0,197 l/s e 0,392 l/s.

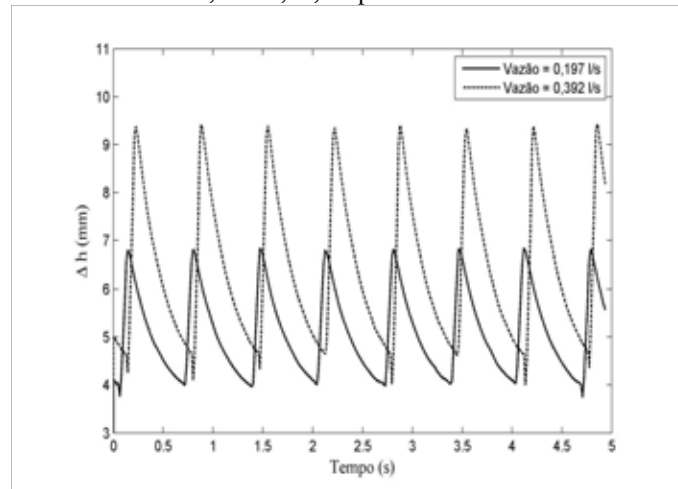
Tabela 9 – Parâmetros dos ensaios para vazões de 0,197 l/s e 0,392 l/s.

Vazão (l/s)	Viscosidade plástica (Pas)	Índice de escoamento	Tensão Crítica (Pa)	Massa específica ρ (kg/m ³)	Altura da Lâmina h_o (mm)	Velocidade média experimental (u_{oe}) (m/s)
0,197	0,016	0,900	2,905	990	5,175	0,127
0,392	0,016	0,950	2,905	990	6,113	0,213

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Através da Tabela 9, pode-se observar que o aumento da vazão provocou um aumento na lâmina do escoamento uniforme (h_o) e na velocidade média (u_{oe}) do escoamento, o que consequentemente acarreta em aumento do número de Froude. Na Figura 64 é apresentado o perfil das *roll waves* para as vazões de 0,197 e 0,392 l/s para números de Froude de 0,56 e 0,87. Salienta-se que estas ondas foram geradas para uma frequência de perturbação de 1,5 Hz.

Figura 64 – Gráfico comparativo entre ondas geradas para vazões de 0,197 l/s e 0,392 l/s, com números de Froude de 0,56 e 0,87, respectivamente.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

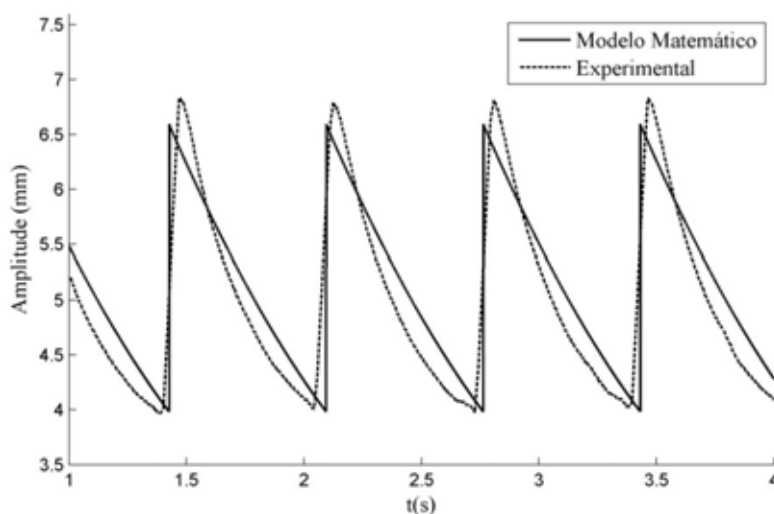
Através da Figura 64 pode-se observar que o aumento do número de Froude acarreta em um aumento significativo na amplitude das *roll waves*, o que está em consonância com resultados da literatura. Fiorot (2012) em seu trabalho experimental de geração de *roll waves* em escoamentos de fluido newtoniano (glicerina pura) também fez esta observação. No que tange a trabalhos numéricos, outros pesquisadores também chegaram a mesma conclusão (Maciel, 2001; Maciel *et al* 2013; Nedham e Merkin, 1986)

Deve-se ressaltar que ambos os casos satisfazem o critério de geração estabelecido através do modelo matemático $Fr > Fr_{min}$, onde Fr_{min} é o número de Froude mínimo necessário para geração de *roll waves*. Nestes casos, o Fr_{min} é de 0,1679 e 0,2291 para vazões de 0,197 e 0,392 (l/s) respectivamente.

6.5 Comparação entre Resultados Teóricos e Experimentais

Neste item será feito a comparação entre os resultados experimentais e teóricos desenvolvidos dentro do grupo RMVP (FERREIRA, 2007), para as vazões de 0,197 l/s e 0,392 l/s, cujas propriedades do escoamento são apresentadas na Tabela 9.

Figura 65 – Gráfico comparativo entre o modelo experimental e teórico para uma vazão de 0,196 l/s.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A Tabela 10 mostra a comparação entre os resultados experimentais e do modelo matemático no que diz respeito às propriedades do escoamento (velocidade média do escoamento em regime uniforme e número de Froude) e das *roll waves* (amplitude, comprimento e período).

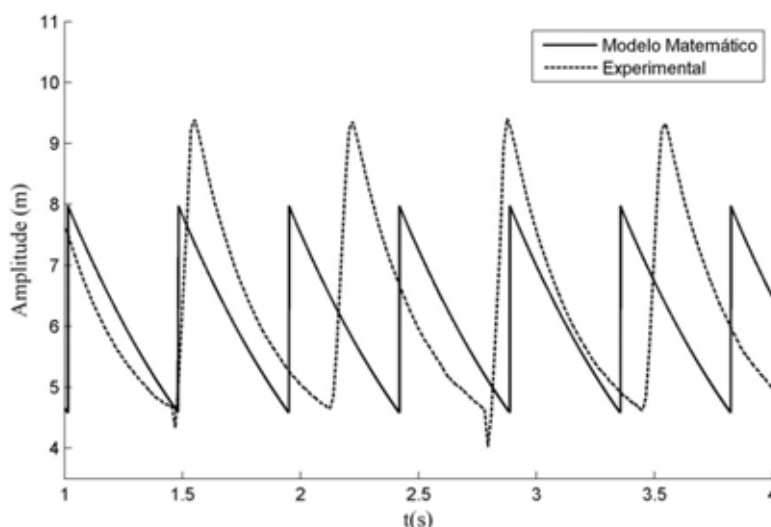
Tabela 10 – Comparação entre resultados experimentais para uma vazão de 0,196 l/s e do modelo matemático, referente à Figura 65.

Parâmetros	Experimental	Modelo Matemático (Ferreira, 2007)
u_o (m/s)	0,1271	0,1123
Fr	0,56	0,4995
h_1 (mm)	3,98	3,98
h_2 (mm)	6,816	6,596
Δh (mm)	2,836	2,616
T (s)	0,666	0,668

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Através da Figura 65 e da tabela 10, pode-se observar uma boa concordância entre os resultados experimentais e do modelo matemático para uma vazão de 0,197 l/s, com uma pequena diferença na velocidade média do escoamento e consequentemente no número de Froude, o que causa uma diferença na amplitude das *roll waves*.

A análise comparativa entre os resultados experimentais e do modelo matemático para uma vazão de 0,392 l/s é mostrada na Figura 66.

Figura 66 – Gráfico comparativo entre os modelos experimental e teórico para uma vazão de 0,392 l/s

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Na Tabela 11 são apresentadas as propriedades do escoamento e das *roll waves* referentes à Figura 66.

Tabela 11 – Comparação entre resultados experimentais para uma vazão de 0,392 l/s e do modelo matemático, referente à Figura 66.

Parâmetros	Experimental	Modelo Matemático (Ferreira, 2007)
u_o (m/s)	0,2135	0,2059
Fr	0,87	0,8424
h_1 (mm)	4,6	4,6
h_2 (mm)	9,4	8,0
Δh (mm)	4,8	3,4
T (s)	0,67	0,47

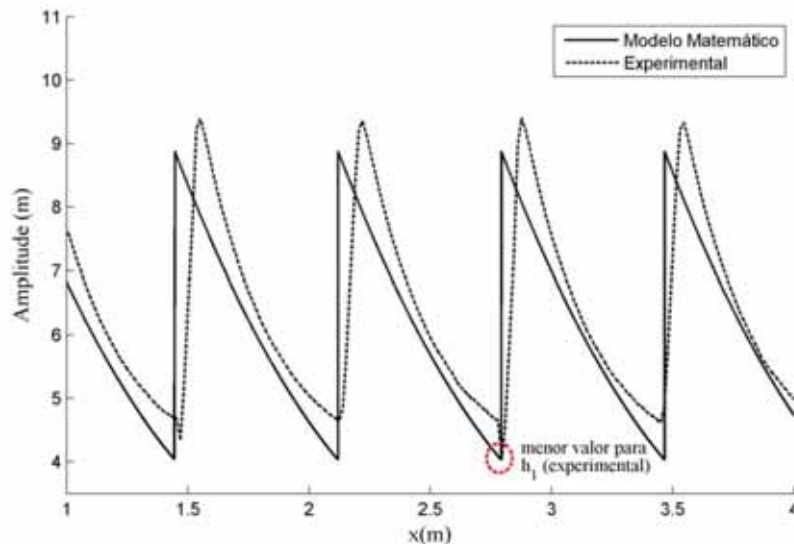
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Através da Figura 66 e da Tabela 11, pode-se observar que não existe uma boa concordância entre os resultados experimentais e do modelo matemático. Isto pode ser explicado em relação à escolha do parâmetro de entrada do modelo matemático h_1 (lâmina baixa da onda), pois o modelo é bastante sensível a este parâmetro. Este caso, em particular, apresentou dificuldade para a escolha de um bom h_1 , devida a não linearidade que se apresenta no sensor ultrassônico nesta condição de inclinação de onda. Conforme já apresentado, quanto maior a vazão, mais evidente fica esta não linearidade.

Com base nessa premissa, com o intuito de verificar a influência da lâmina baixa da onda (h_1), outra simulação através do modelo matemático foi feita utilizando outro valor de h_1 . O parâmetro foi escolhido, levando-se em consideração a não linearidade dos resultados

experimentais, conforme apresentado na Figura 67.

Figura 67 – Gráfico comparativo entre os modelos experimental e teórico para uma vazão de 0,392 l/s



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 12 – Comparação entre resultados experimentais para uma vazão de 0,392 l/s e do modelo matemático, referente à Figura 67.

Parâmetros	Experimental	Modelo Matemático (Ferreira, 2007)
u_o (m/s)	0,2135	0,2059
Fr	0,87	0,8424
h_1 (mm)	4,035	4,035
h_2 (mm)	9,4	8,84
Δh (mm)	5,36	4,805
T (s)	0,67	0,673

Fonte: Elaborada pela próprio autor.

Através da Figura 67 e da Tabela 12, pode-se observar uma melhor concordância entre os resultados experimentais e do modelo matemático, no entanto, no que diz respeito à amplitude das *roll waves*, ainda existe uma pequena diferença, devido à variação do número de Froude. Vale salientar que não se pode garantir que este valor de h_1 seja realmente a lâmina baixa da *roll wave*.

Por fim, neste capítulo foram apresentados os resultados experimentais de *roll waves* obtidos para fluido não newtoniano do tipo Herschel Bulkley (fracamente viscoplásticos), com a bomba nas rotações de 250 rpm, 500 rpm e 750 rpm, produzindo vazões de 0,197, 0,392 e 0,592 l/s. As *roll waves* foram observadas e aferidas para uma frequência de perturbação de 1,5 Hz. Através dos resultados obtidos pôde-se realizar uma análise crítica no que tange ao sistema de medição utilizado, mostrando as vantagens e desvantagens. Mostrou-se também uma comparação entre os

resultados experimentais e do modelo matemático desenvolvido no grupo RMVP (FERREIRA, 2007).

7 CONCLUSÕES

Esta dissertação de mestrado traz uma boa contribuição pois o aparato experimental desenvolvido permitirá, doravante, a realização de ensaios controlados com fluidos de propriedades newtonianas e não-newtonianas.

Grande parte dos objetivos foram cumpridos, ressaltando os pontos positivos, os problemas decorridos e observando atividades a serem desenvolvidas de modo a complementar o aparato de medição de instabilidades e suas interfaces.

No que tange ao aparato experimental:

- Mesa do canal: as condições de projeto uma vez executadas precisaram apenas de ajustes e reparos, se mostrando operacional e de fácil manuseio. Vale ressaltar que a presença da mesa do canal manteve o canal totalmente livre de interferências mecânicas.
- Canal: sua confecção em paredes laterais de acrílico facilitou bastante a visualização e controle da presença de *roll waves*. Assim como a confecção do fundo de vidro trouxe um maior tempo de vida, devido ao vidro não se tornar opaco com o passar do tempo, como é o caso do acrílico. O comprimento de 2,50 m de canal mostrou-se necessário para a formação e propagação das *roll waves*, mas não suficiente para deixar evoluir e medir com precisão as oscilações desenvolvidas, sobretudo para o escoamento de fluidos não-newtonianas (carbopol), sobre determinadas frequências e intensidades de perturbação.
- Circuito do fluido: a bomba de cavidade progressiva, deslocamento positivo (Geremia) foi extremamente útil, apresentando um ótimo desempenho e confirmando que devido a sua geometria, é a mais aconselhável no trato de fluidos de natureza viscosas.
- Sistema de perturbação: este cumpriu com funcionalidade o objetivo para o qual foi projetado. No entanto, não foi feita nenhuma caracterização da quantidade de ar que a caixa em “V” emite sobre o escoamento, nem a proporcionalidade desta perturbação em relação ao ganho do amplificador, deixando, para perspectivas futuras o estudo do real potencial de perturbação.
- Sistema de aquisição: dentre todo o conjunto que compõe o aparato experimental, o que teve maior modificação foi o sistema de aquisição, como visto no Capítulo 5.

No entanto, as condições finais apresentadas neste trabalho, mostram que ainda não foi obtido todo o potencial disponível pelo sistema construído, principalmente o conjunto fotométrico. Já o conjunto ultrassônico atingiu o objetivo para o qual foi projetado.

- O fluido teste (gel de carbopol): o grupo RMVP já vem há algum tempo aprimorando, com resultados positivos o preparo minucioso do gel, dentro das normas da NOVEON (fabricante do carbopol). No entanto, devido a dinâmica do aparato experimental e as condições necessárias para visualizar *roll waves*, foi necessário adicionar água deionizada para diminuir a viscosidade, conforme relatado nos Capítulos 5 e 6. Desta forma, o gel sofreu uma degradação substantiva, comprometendo, suas propriedades viscoplásticas. Atribui-se esta perda de qualidade a efeitos térmicos, presença de impurezas decorrente de longo período de manuseio (cerca de 16 semanas), potencializadas no caso, pela adição da água deionizada, resultando no envelhecimento do próprio material. Não se pode perder de vista que ínfimas alterações na composição do fluido teste, altera, de forma significativa seu comportamento reológico e sua dinâmica no canal.

O aparato experimental construído apresenta uma infinidade de combinações, podendo assim resultar em diversas formas de geração e caracterização de *roll waves*. No entanto, apresenta limitações. Pode ser utilizado como exemplo a não geração de *roll waves* nas condições iniciais que se encontra o gel de carbopol, como já relatado. A ausência de *roll waves* poderia ter sido atribuída a diversos elementos do aparato, bastando apenas a modificação de um para o surgimento do fenômeno. Desta forma, nas condições atuais de dimensão do canal, caso tivesse um sistema de perturbação de maior potência, possivelmente poderíamos ter visualizado *roll waves*. Ou ainda, caso o canal tivesse um maior comprimento, teria sido possível visualizar *roll waves* ainda utilizando o sistema de perturbação nas condições deste projeto.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A principal perspectiva deste trabalho é explorar, imediatamente, todas as configurações possíveis, utilizando um novo gel de carbopol (com concentração em massa da ordem de 0,12%), e dispor um semi-espelho e um espelho em dois pontos do canal.

No que tange ao aparato experimental:

- Mesa do canal: a automatização da inclinação será o próximo passo, sendo necessário apenas a utilização de um motor e conexões das engrenagens já instaladas. Uma vez percebido que devido à sensibilidade da dinâmica do aparato experimental, qualquer contato que possa desequilibrar o sistema resultaria em erro nas medidas, a automatização do sistema de inclinação seria de grande valia.
- Canal: foi percebido que se fez necessário um canal com maior comprimento. O grupo de pesquisa RMVP já cogita migrar todo o aparato desenvolvido para um canal de 10 m, já existente no Laboratório de Hidrologia e Hidrometria da Feis/Unesp.
- Circuito do fluido: as pequenas oscilações advindas da bomba relatadas no Capítulo 6, serão grandemente atenuadas, mudando a forma de fixação das mangueiras de 2” que interligam, reservatório e bomba, bomba e caixa de entrada. Ainda dentro da condição de melhorias, a utilização de um inversor de frequências com interface de comunicação (RS 232, USB, etc.) viria a contribuir na opção de automatização deste aparato experimental.
- Sistema de perturbação: a partir da utilização da placa de aquisição USB 6009, o aparelho gerador de funções pode ser eliminado, passando esta funcionalidade para a placa de aquisição/geração, no qual também tem a capacidade de gerar sinais. Uma vez este sinal vindo da placa de aquisição/geração, a perturbação poderá ser feita em mais de uma frequência e intensidade simultaneamente.
- Sistema de aquisição: todo o estudo aplicado sobre este sistema resultou em conhecimento e experiência, confirmando que certamente, após a utilização de um novo fluido teste (gel de carbopol em condições não deterioradas) e a utilização de um semi-espelho e um espelho, resultaria na utilização de todo potencial deste sistema de aquisição, aferindo medições com precisão, no sistema fotométrico, juntamente com o sistema ultrassônico em dois pontos do canal.

Esta modificações permitirá alterar inclinações e vazões, assim como caracterizar não somente amplitude, mas também a velocidade de propagação de *roll waves*. Por fim, objetiva-se controlar todo o aparato por uma interface gráfica.

REFERÊNCIAS

-
- ADAMOWSKI, J. C.; BUIOCHI F.; FURUKAWA M. C.; HIGUTI T. R. Caracterização de líquidos por ultra-som. In: ADAMOWSKI, J. C.; NADER, G. **Sensores: tecnologias e aplicações**. São Paulo: AlphaMidia Assessoria Fonográfica, 2005. p. 1-50.
- BENJAMIN, T. B. Wave formation in laminar flow down an inclined plane. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v. 2, p. 554–574, 1957.
- 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.
- BOGER, D. V.; WALTERS, K. **Rheological phenomena in focus**. Amsterdam: Elsevier, 1993. (Rheology Series, 4).
- BROCK, R. R. Development of roll-wave trains in open channels. **Journal Hydraulics Division**, New York, v. 95, p. 1401–1427, 1969.
- BROOK, B.S.; FALLE, S.A.E.G.; PEDLEY, T.J. Numerical solutions for unsteady gravity-driven flows in collapsible tubes: evolution an roll wave instability of a steady state. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v. 396, p. 223 – 256, 1999.
- CONEY, J. E. R.; EI-SHAFFI, 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.
- CORNISH, V. **Ocean waves and kindred geophysical phenomena**. Cambridge: Cambridge University Press, 1934.
- COUSSOT, P.; PIAU, J. M. On the behavior of mud suspensions. **Rheologica Acta**, Darmstadt, v. 33, n. 3, p. 175-184, 1994.
- DEBIANE, K. **Hydraulique des écoulements laminaires à surface libre dans un canal pour des milieux visqueux ou viscoplastiques**. 2000. 273 f. These (Doctor) - Université Joseph Fourier-Grenoble I, Grenoble, França. 2000.
- 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.
- FERREIRA, F. O. **Abordagem matemática de roll waves em escoamentos hiperconcentrados com superfície livre**. 2007. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. 2007.
- FERREIRA, F. O.; MACIEL, G. F.; FIOROT, G. H.; GIL, L. M. C. C.; MINUSSI, C. R. In: GENERATION AND PROPAGATION OF INSTABILITIES EN MUD FLOWS, SCACR, 6, 2013, Lisboa. **Anais...** Lisboa: International Short Course/Conference on Applied Coastal Research.

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, Ilha Solteira, 2012.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Edgar Blücher, 1984. 142 p.

HEWITT, G.; JAYANTI, S.; HOPE, C. Structure of thin liquid films in gas-liquid horizontal flow. **International Journal of Multiphase Flow**, Elmsford, v. 16, n. 6, p. 951 – 957, 1990. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030193229090100W>>. Acesso em: 12 jan. 2014.

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. **Experiments in Fluids**, Berlin, v. 21, n. 5, p. 357–362, 1996.

ISHIHARA, T.; IWAGAKI, Y.; IWASA, Y. Theory of the roll wave train in laminar water flow on a steep slope surface. **Transactions JSCE**, Tókyo, v. 19, p. 46-57, 1954.

JEFFREYS, H. The flow of water in an inclined channel of rectangular section. **Phil Magazine**, Cambridge, v. 49, p. 793-807, 1925.

JULIAN, B. R. Volcanic tremor: nonlinear excitation by fluid flow. **Journal Geophysics**, Berlin, v. 99, p. 11859–11877, 1994.

LABANDA, J.; MARCO, P.; LLORENS, J. Rheological model to predict the thixotropic behaviour of colloidal dispersions. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, Amsterdam, v. 249, p. 123–126, 2004.

LACHAMP, P. **Modélisation numérique de l'effet d'un obstacle sur les écoulements de fluides à seuil par la méthode SPH**. 2003. 231 f. These (Doctor) - Université Joseph Fourier-Grenoble I, Grenoble, França. 2003.

LIN, C. X.; KO, S. Y. Effects of temperature and concentration on the steady shear properties of aqueous solutions of carbopol and cmc. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 22, p. 157–166, 1995.

LIU, J.; PAUL, J. D.; GOLLUB, J. P. Measurement of the primary instabilities of film flows. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v. 250, p. 69–101, 1993.

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.

KAPITZA, P. L. **Wave flow of thin layers of a viscous fluid**. New York: Pergamon Press, 1948. 662-709 p.

KARAPANTSIOS, T.; PARAS, S.; KARABELAS, A. Statistical characteristics of free falling films at high reynolds numbers. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 15, n. 1, p. 1 – 21, 1989. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0301932289900827>>. Acesso em: 12 jul. 2013.

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.

LORENÇO L ;MARTINS, J. A. L. Os Riscos em protecção civil: importância da análise e gestão para a prevenção, o socorro e ... a reabilitação. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE RISCOS, 1, 2009, Coimbra. **Anais...** Coimbra: [S.n.t.], 2009.

MACIEL, G. F.; VILA, J. P.; MARTINET, G. Roll wave formation in the non-newtonian flows. In: ANAIS DO CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA - COBEM, 14, 1997. **Anais...** Bauru: Unesp, 1997. CD-ROM

MACIEL, G. F. **Roll waves evoluindo em canais de forte declividade**: uma abordagem matemática com aproximação numérica. 2001. 184 f. Tese (Livre Docência em Roll Waves) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2001.

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: ANAIS DO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18, 2009, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: UFMS, 2009. CD ROM.

MACIEL, G. F.; SANTOS, H. K.; FERREIRA F. O. Rheological analysis of water clay compositions in order to investigate mudflows developing in canals. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering**, Rio de Janeiro, v. 31, n. 1, p. 64-74, 2009.

MACIEL G. F.; FERREIRA F. O.; FIOROT, G. H. Control of instabilities in non-Newtonian free surface fluid flows. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering**, Rio de Janeiro, v. 35, n. 3, p. 217-229, 2013.

MINUSSI, R. B. **Rompimento de Berreiras**: 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.

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, p. 355–359, 1999.

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

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. 151-183, 1994.

NOVEONTM. Advances in polymer technology. 2002. Ohio: Noveon Corporation, 2002. Disponível em: <<http://www.noveon.com>>. Acesso em: 10 jan. 2008.

PEDLEY, T. J. **Fluid mechanics of large blood vessels**. Cambridge: Cambridge University Press, 1980. 461 p.

ROBERTS, G. P.; BARNES, H. A. New measurements of the flow-curves for carbopol dispersions without slip artefacts. **Rheological Acta**, Heidelberg, v. 40, n. 11, p. 499–503, 2001.

SATTELMAYER, T.; SILL, K. H.; WITTIG, S. Nonintrusive optical measurement technique for wavy liquid films. **Technisches Messen**, Munich, v. 54, n. 4, p. 155–160, 1987.

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION - UNISDR. Disponivel em: <<http://www.usaid.gov/Press/Pages/usaid-unisdr-partnership-framework-2011-13.aspx>>. Acesso em: 12 maio 2013.

ZANUTTIGH, B.; LAMBERTI, A. Instability and surge development in debris flows. **Reviews of Geophysics**, Washington, n. 45, p. 1–45, 2007.

APÊNDICE A

Catálogo de *Roll Waves*

Ensaio Número: 2

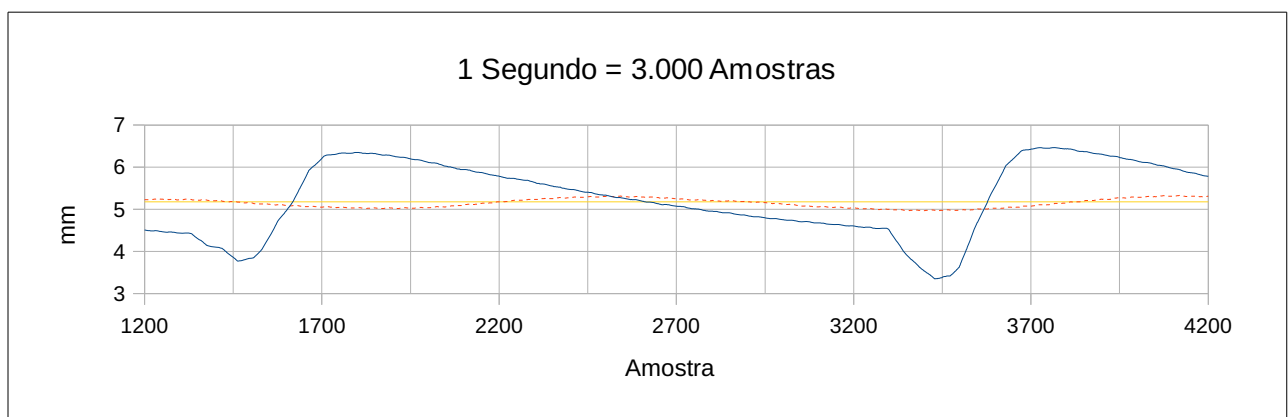
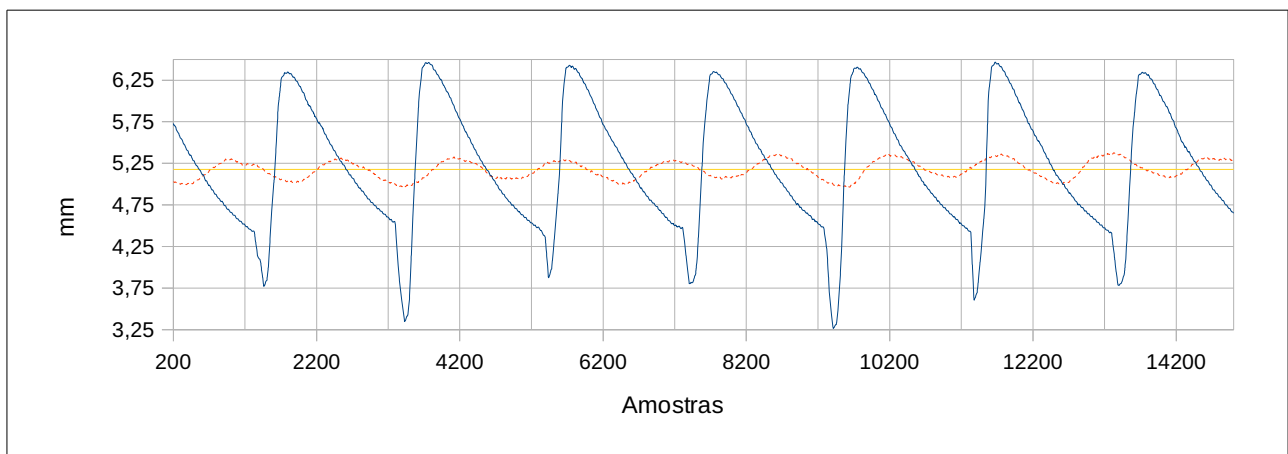
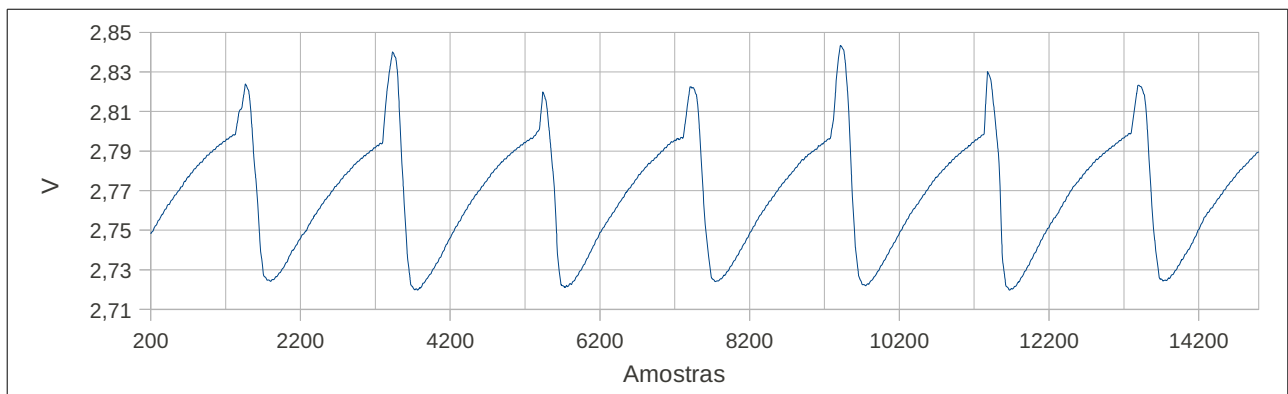
Característica do ensaio

Inclinação do canal: 5 graus

Rotação da bomba: 250 RPM

Perturbação: inclinação negativa 120°

Ganho: 2



Ensaio Número: 3

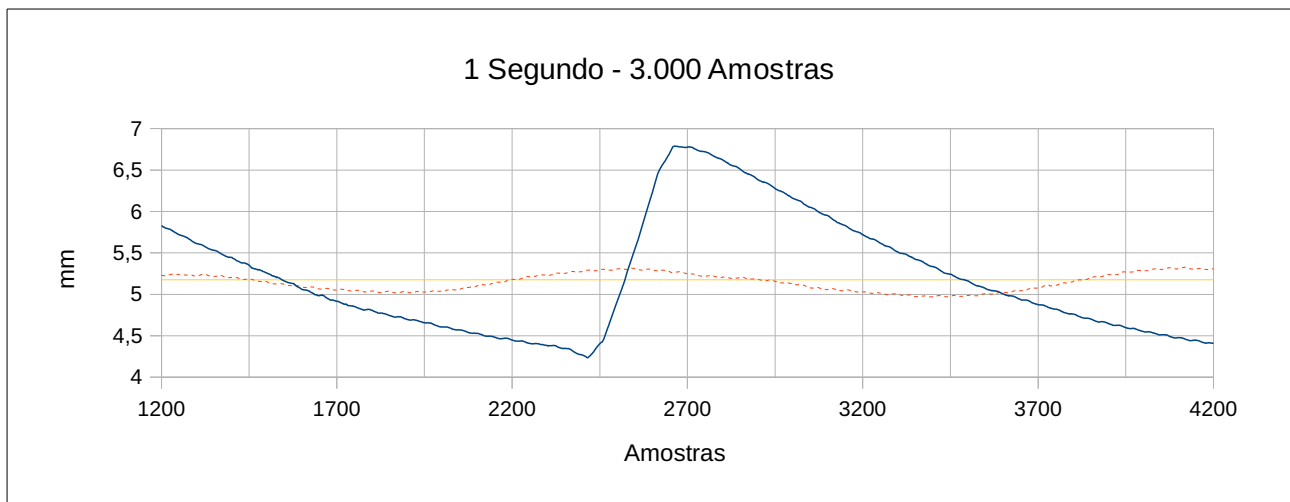
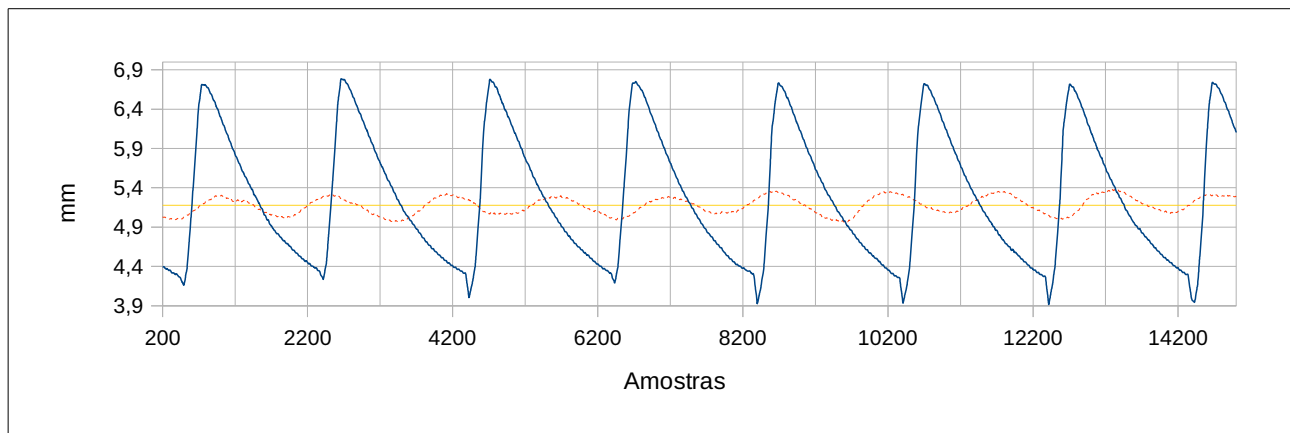
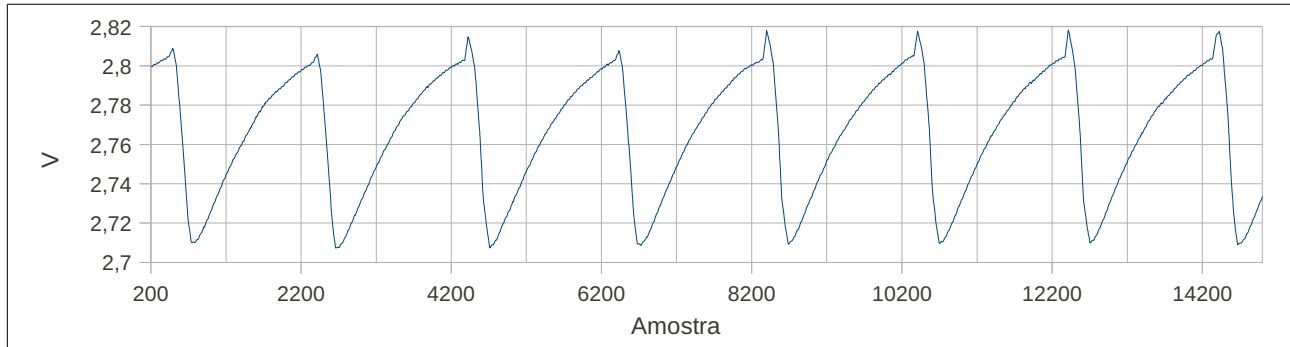
Característica do ensaio

Inclinação do canal: 5 graus

Rotação da bomba: 250 RPM

Perturbação: inclinação negativa 120°

Ganho: 3



Ensaio Número: 4

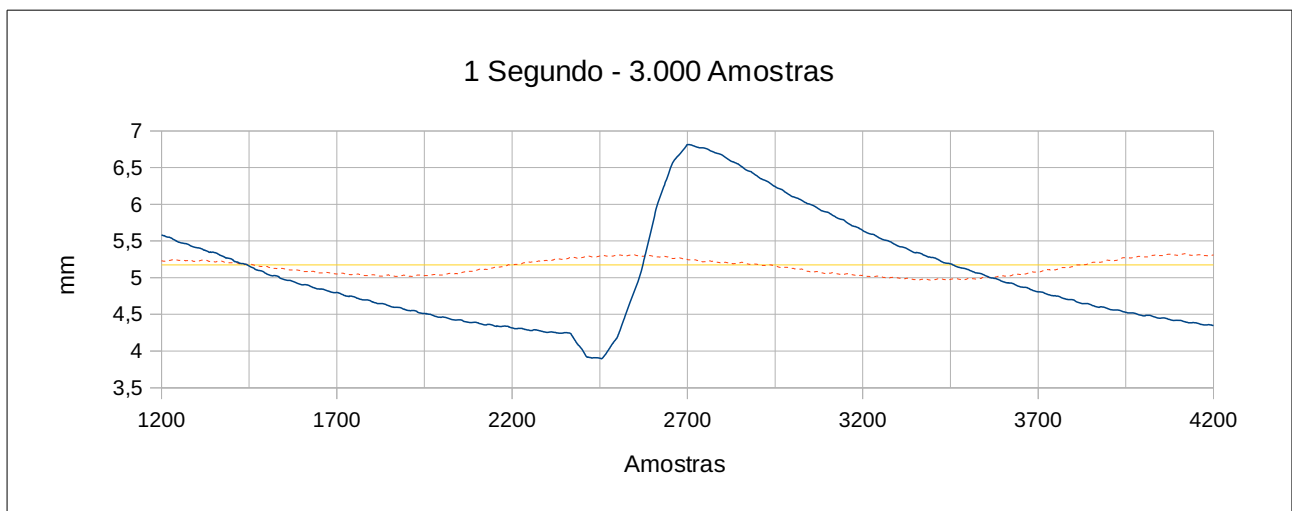
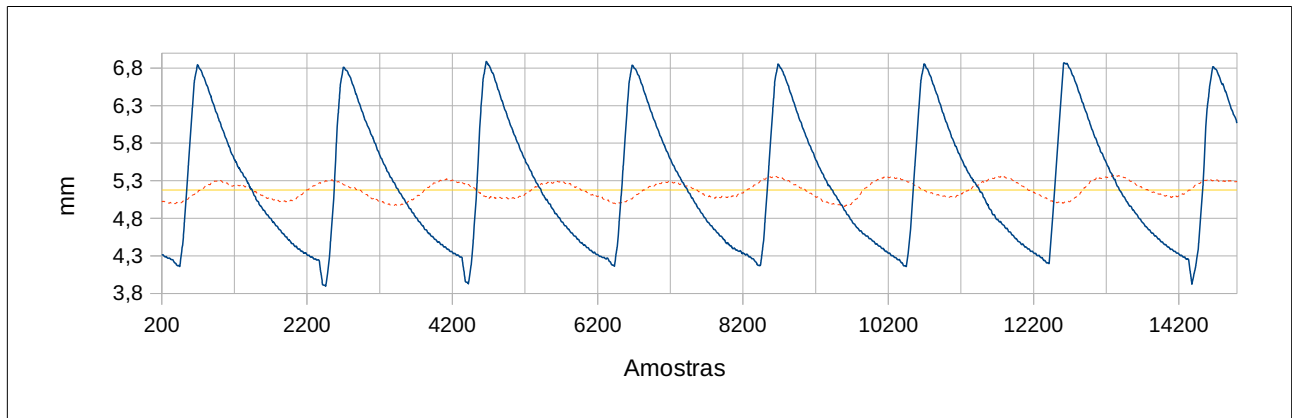
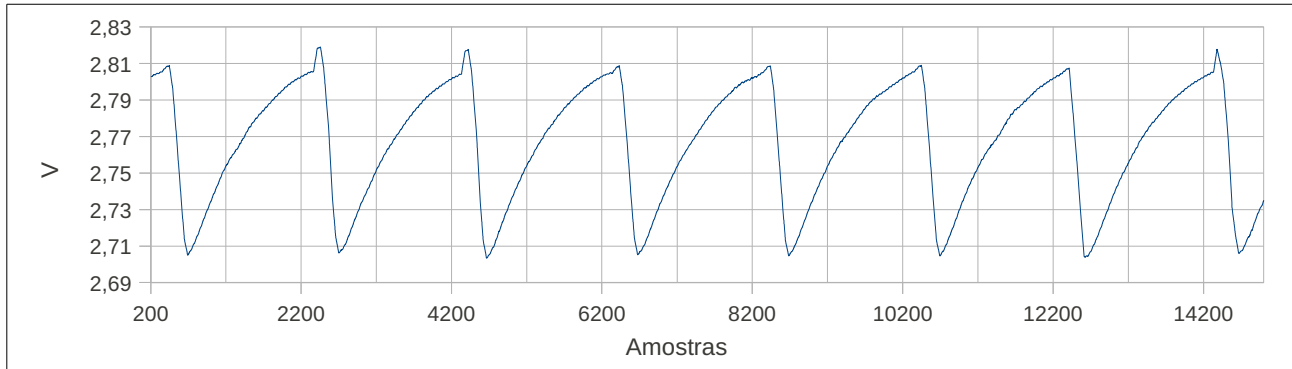
Característica do ensaio

Inclinação do canal: 5 graus

Rotação da bomba: 250 RPM

Perturbação: inclinação negativa 120°

Ganho: 4



Ensaio Número: 6

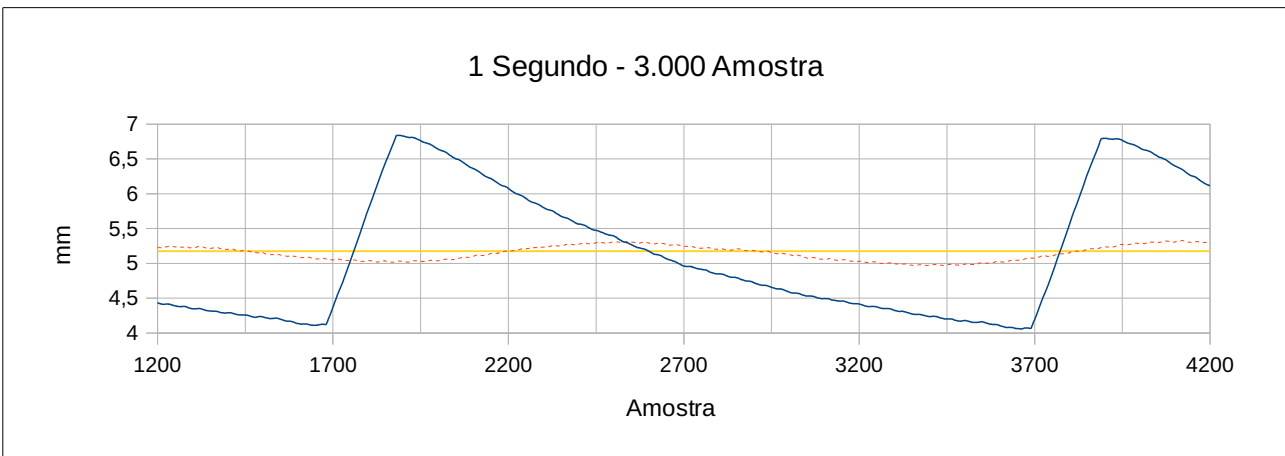
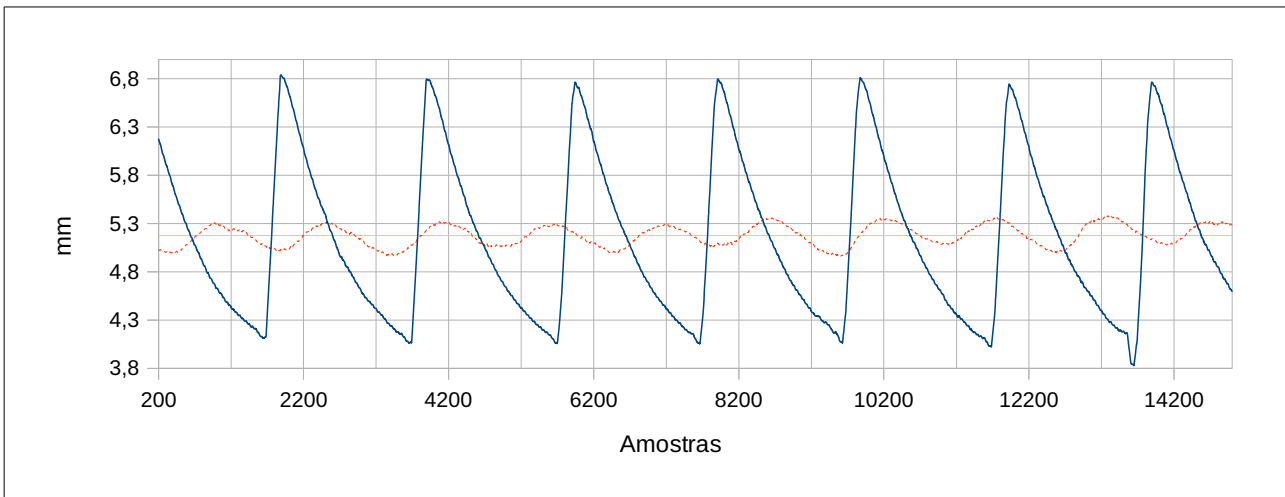
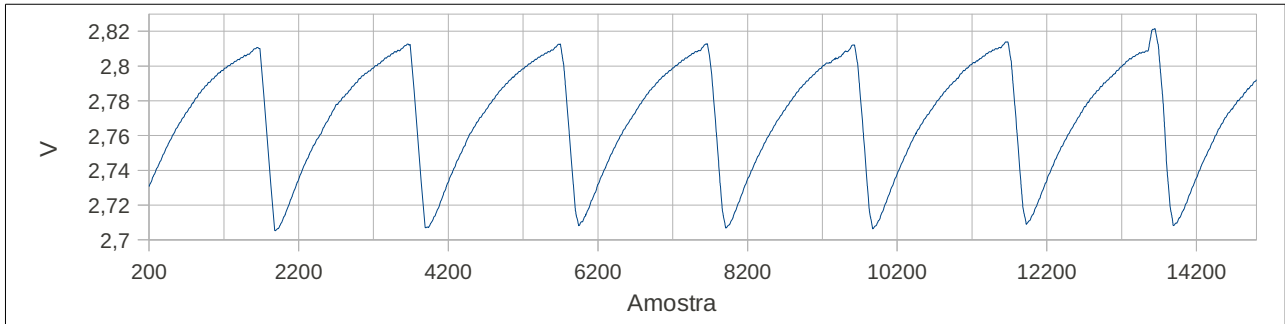
Característica do ensaio

Inclinação do canal: 5 graus

Rotação da bomba: 250 RPM

Perturbação: Perpendicular ao escoamento

Ganho: 2



Ensaio Número: 7

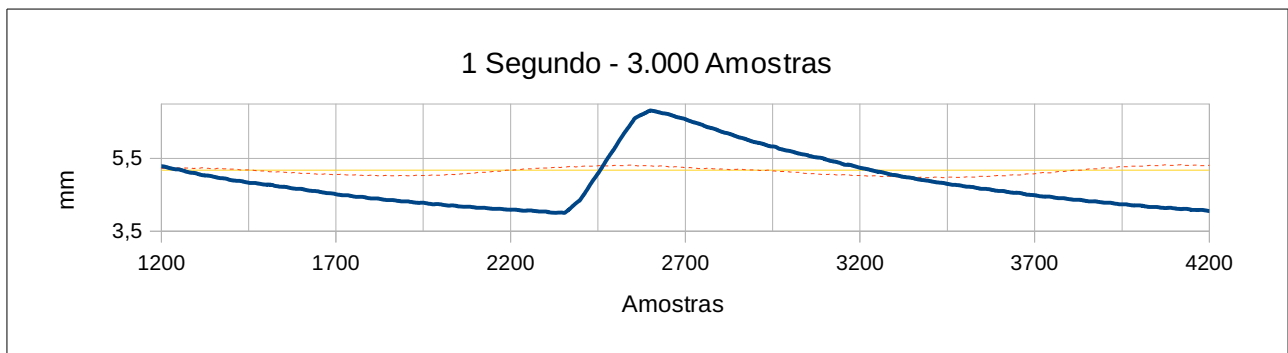
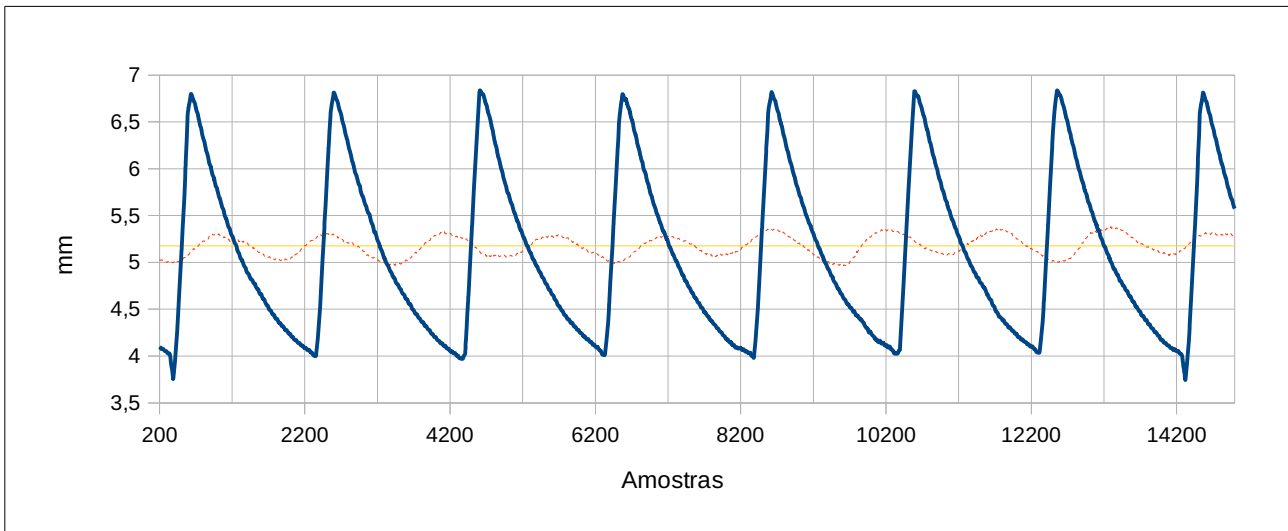
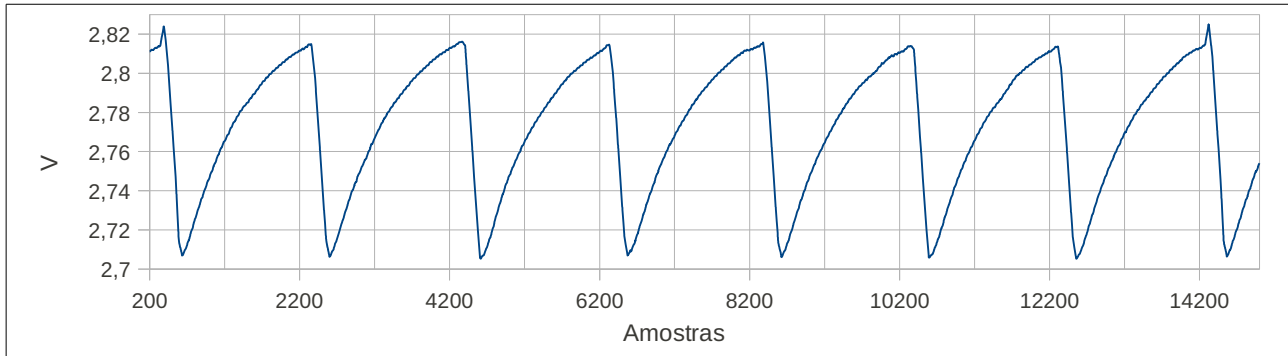
Característica do ensaio

Inclinação do canal: 5 graus

Rotação da bomba: 250 RPM

Perturbação: Perpendicular ao escoamento

Ganho: 3



Ensaio Número: 8

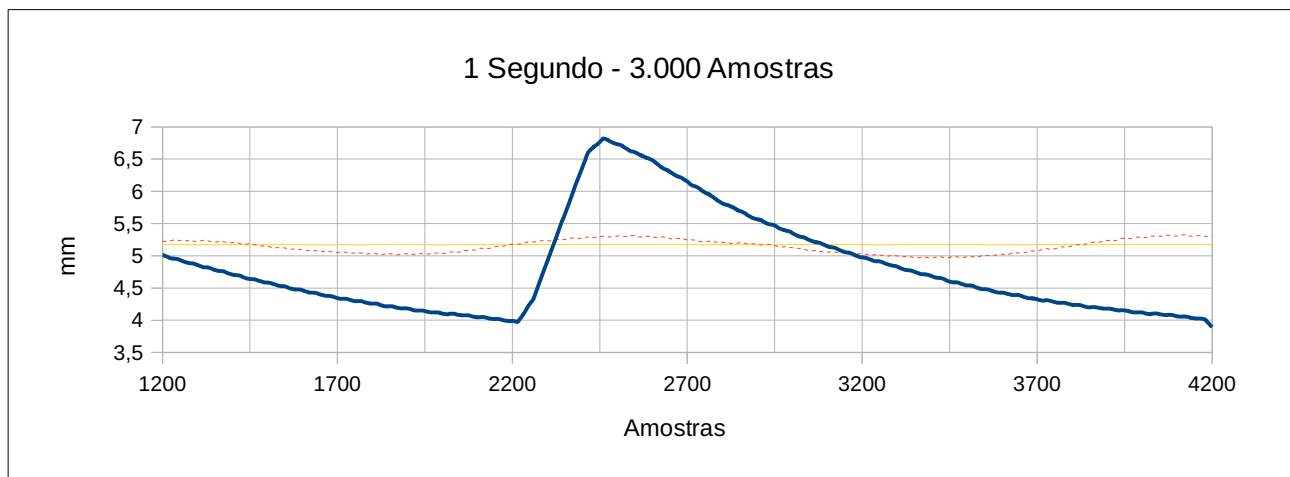
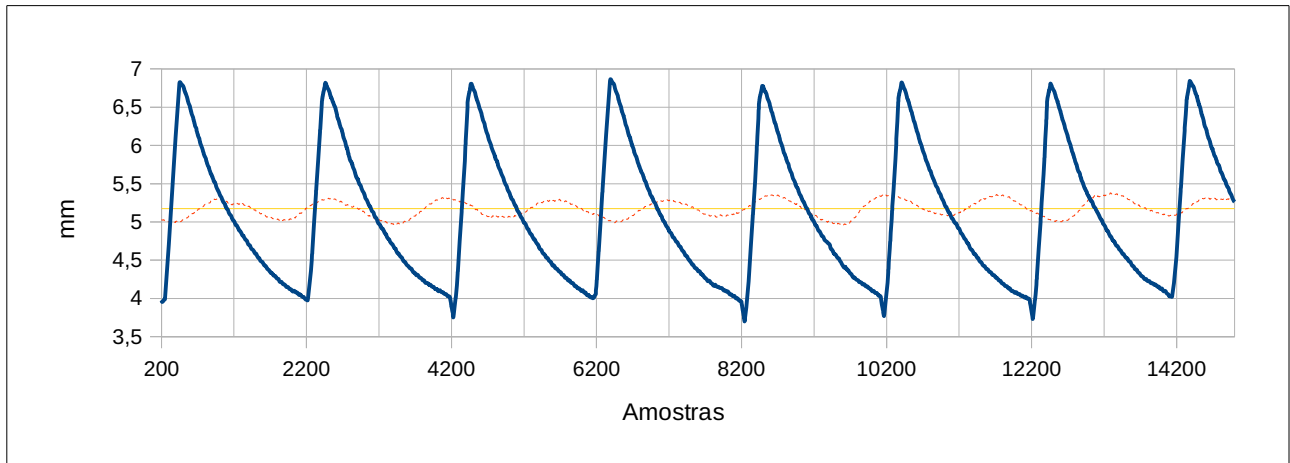
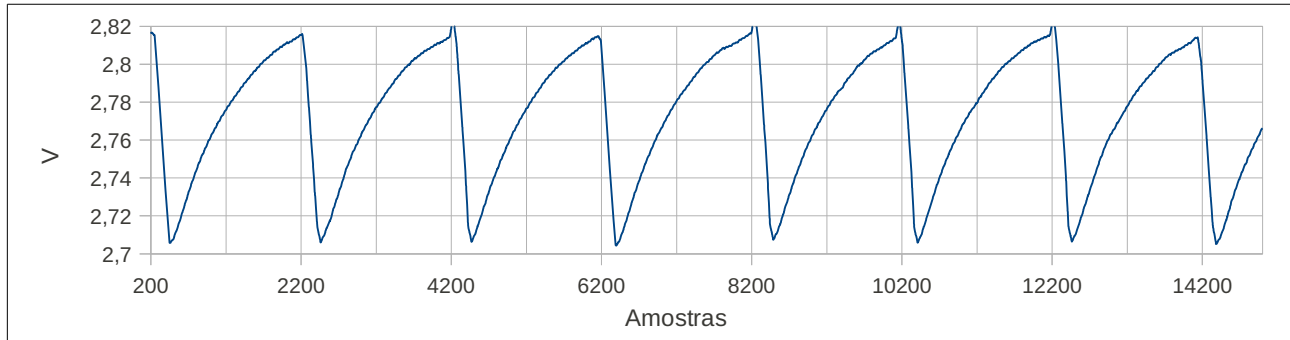
Característica do ensaio

Inclinação do canal: 5 graus

Rotação da bomba: 250 RPM

Perturbação: Perpendicular ao escoamento

Ganho: 4



Ensaio Número: 14

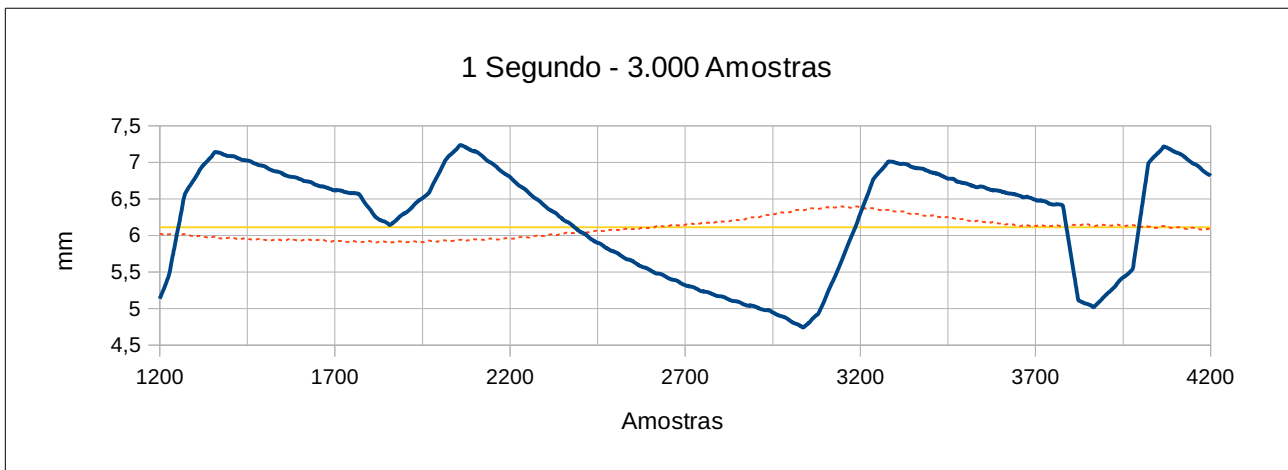
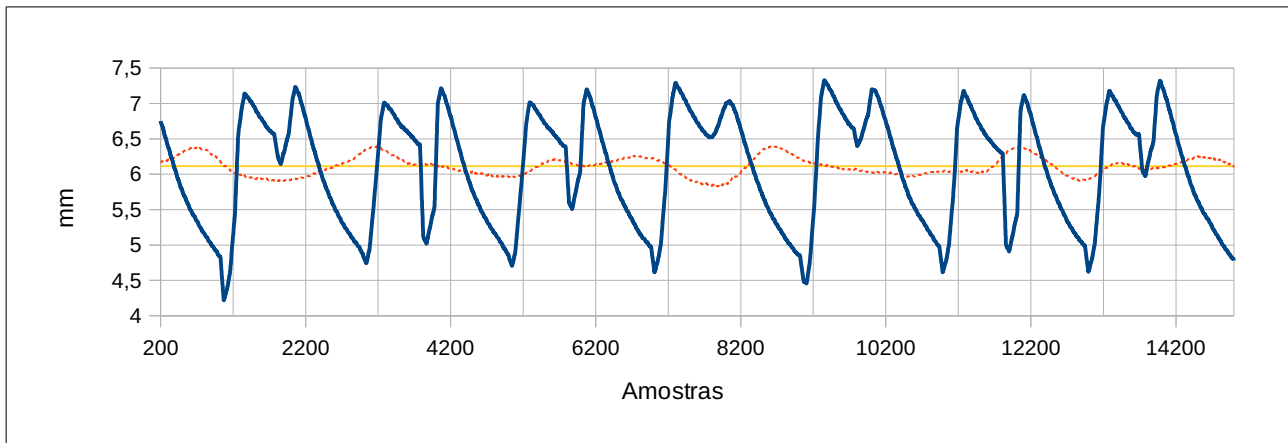
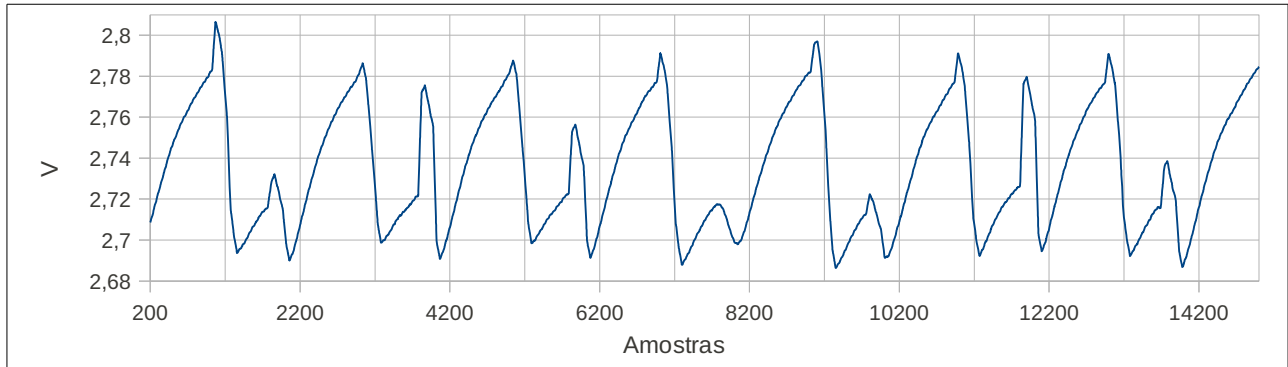
Característica do ensaio

Inclinação do canal: 5 graus

Rotação da bomba: 500 RPM

Perturbação: Inclinação negativa 120°

Ganho: 2



Ensaio Número: 15

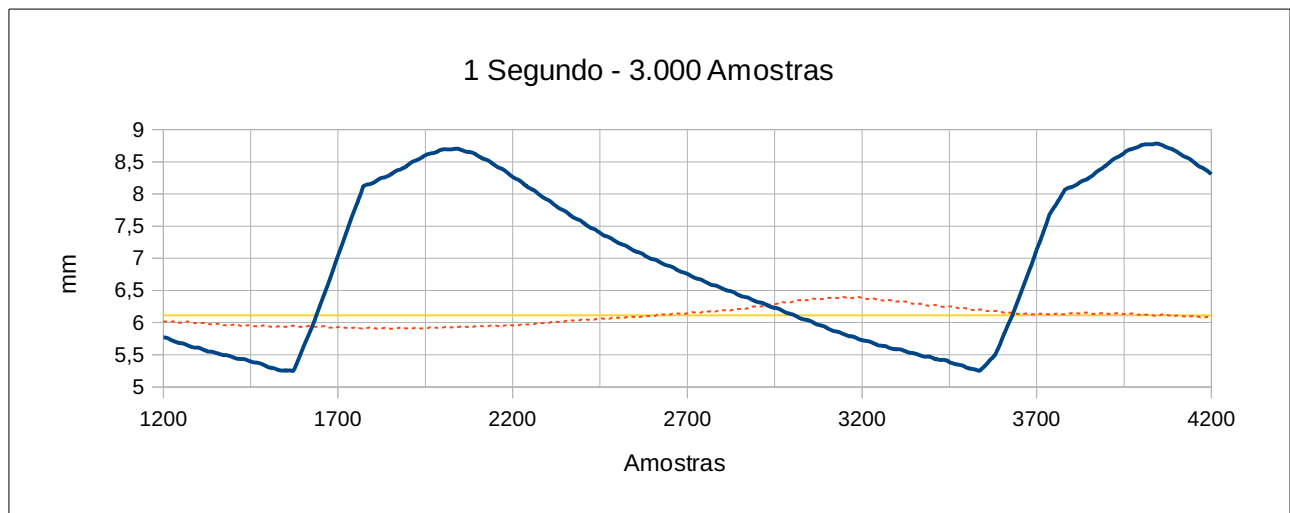
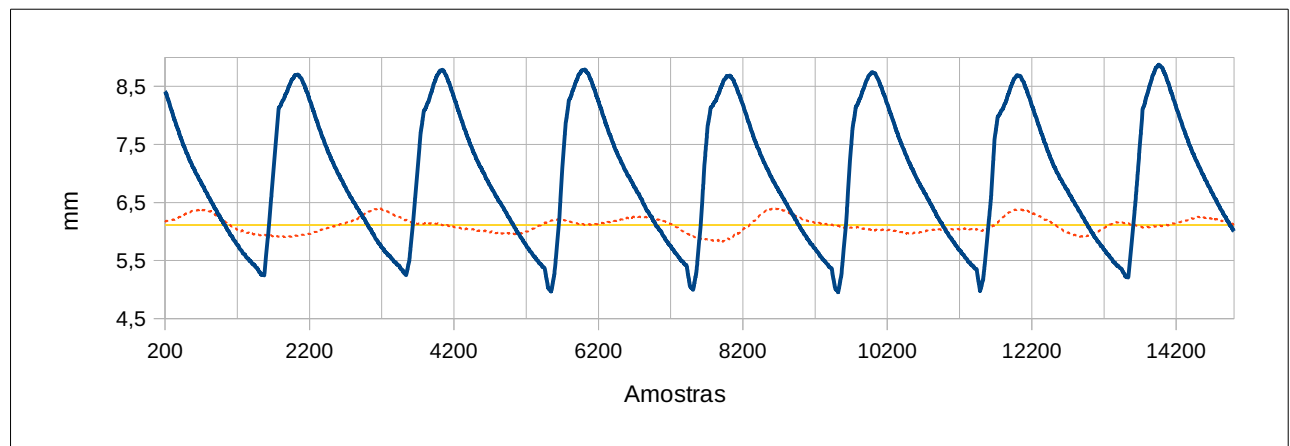
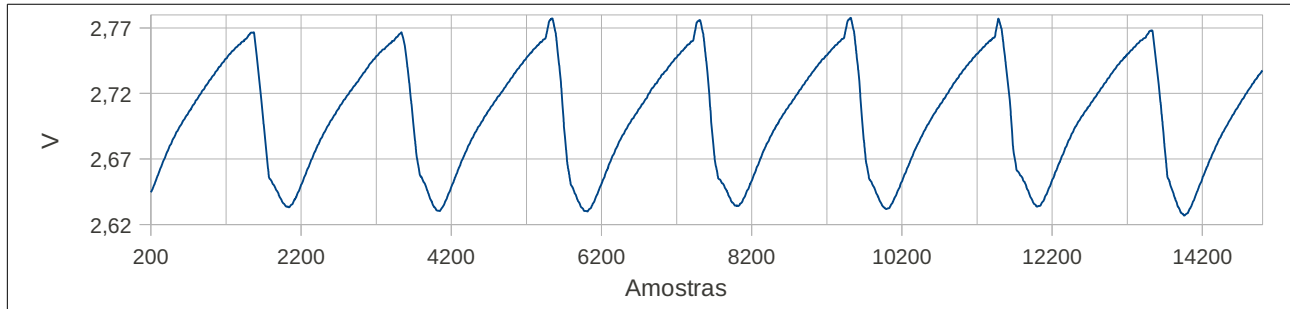
Característica do ensaio

Inclinação do canal: 5 graus

Rotação da bomba: 500 RPM

Perturbação: Inclinação negativa 120°

Ganho: 3



Ensaio Número: 16

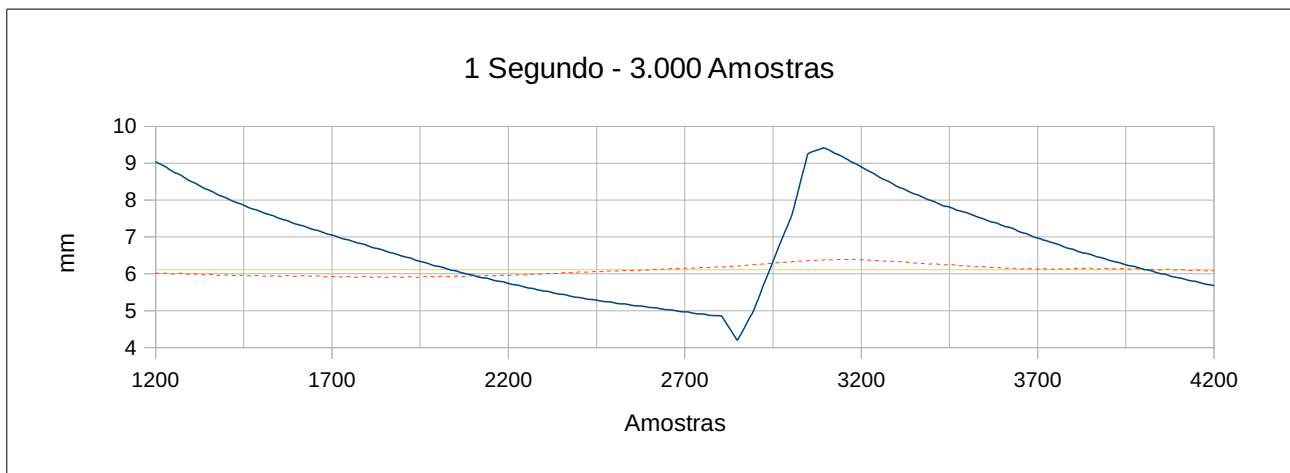
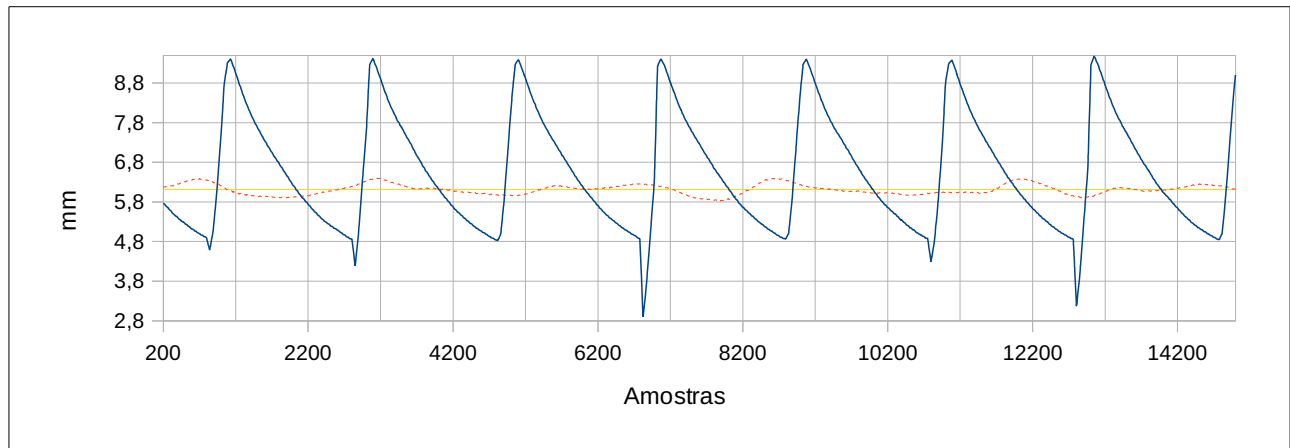
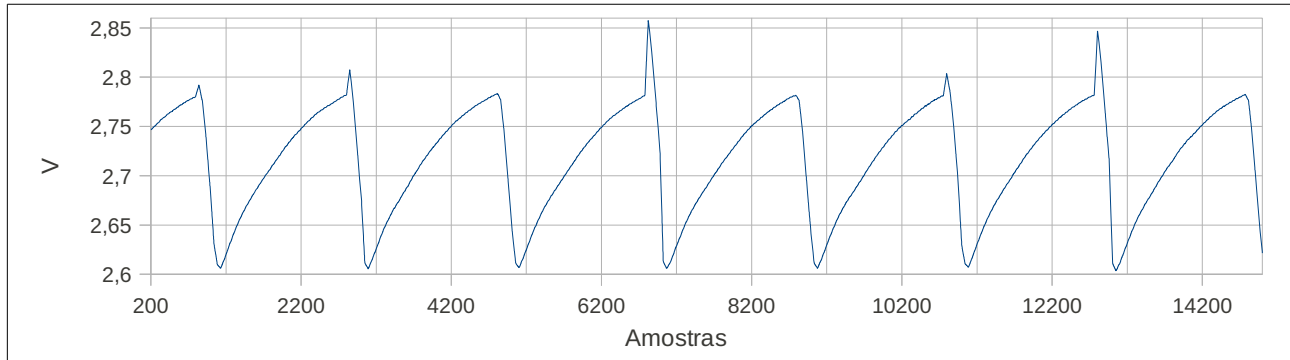
Característica do ensaio

Inclinação do canal: 5 graus

Rotação da bomba: 500 RPM

Perturbação: Inclinação negativa 120°

Ganho: 4



Ensaio Número: 18

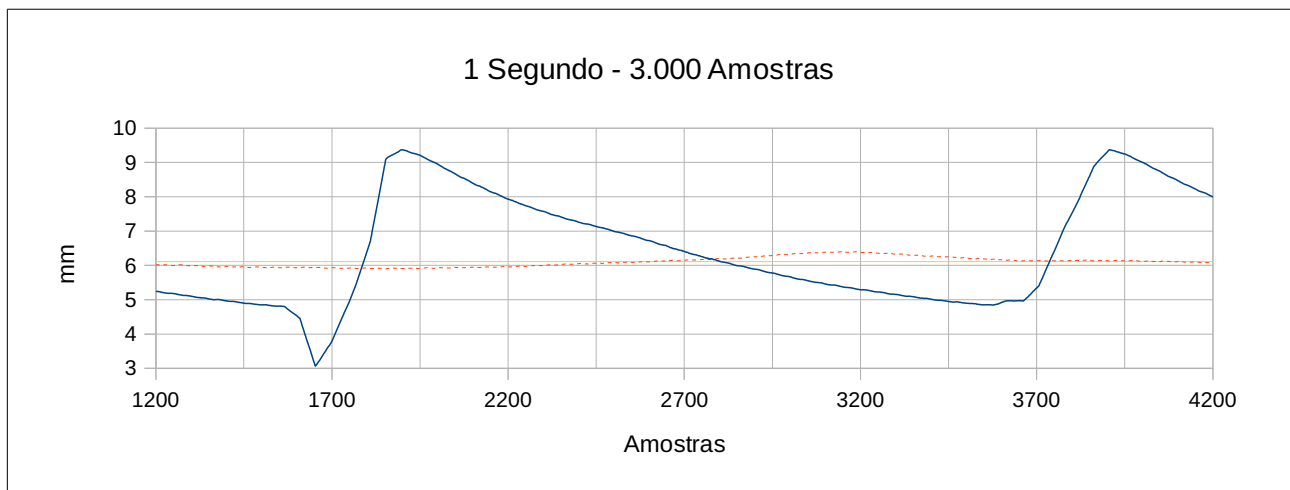
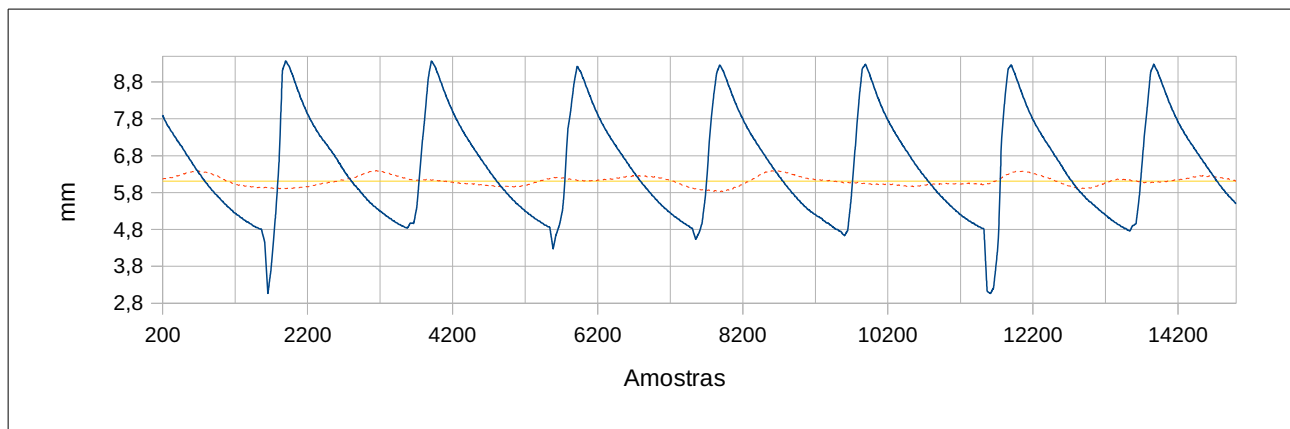
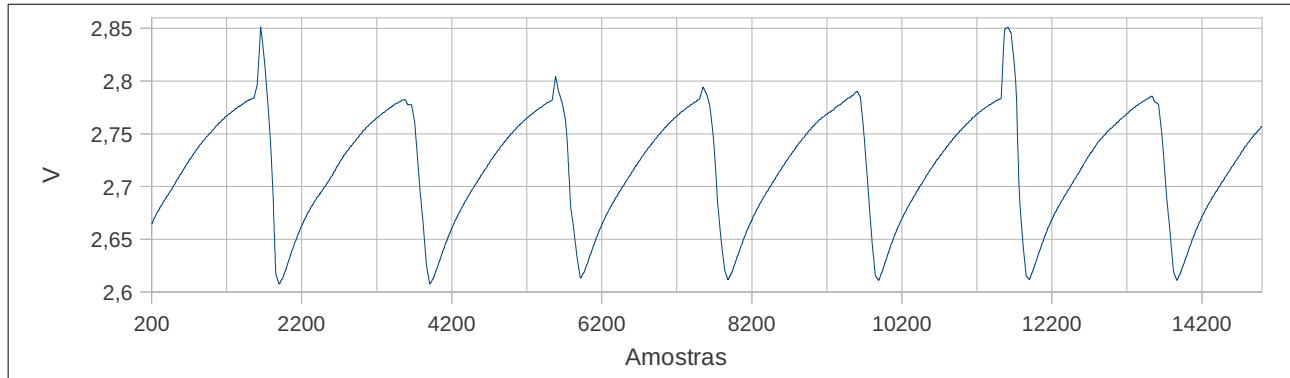
Característica do ensaio

Inclinação do canal: 5 graus

Rotação da bomba: 500 RPM

Perturbação: Perpendicular ao escoamento

Ganho: 2



Ensaio Número: 19

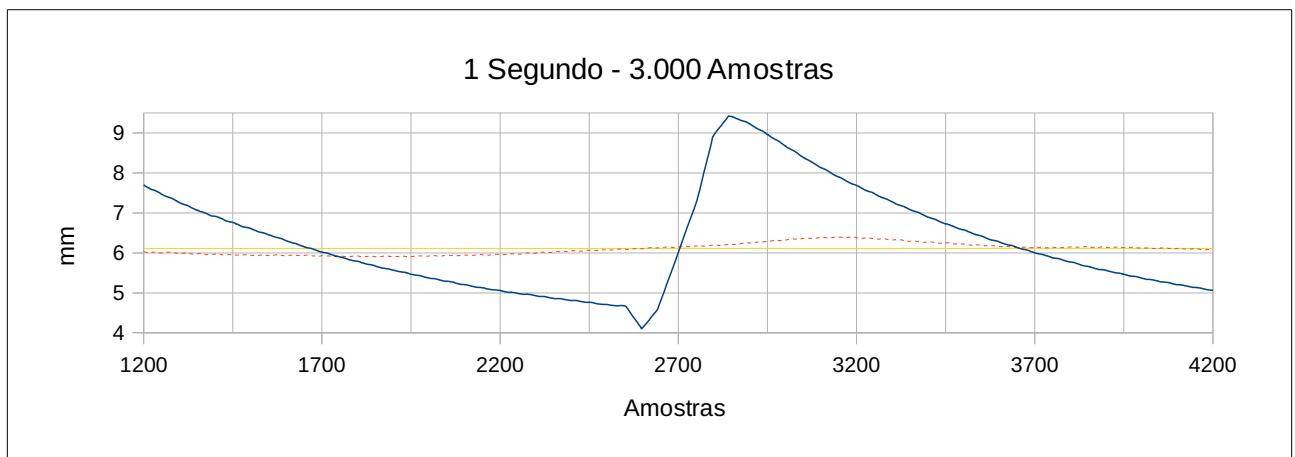
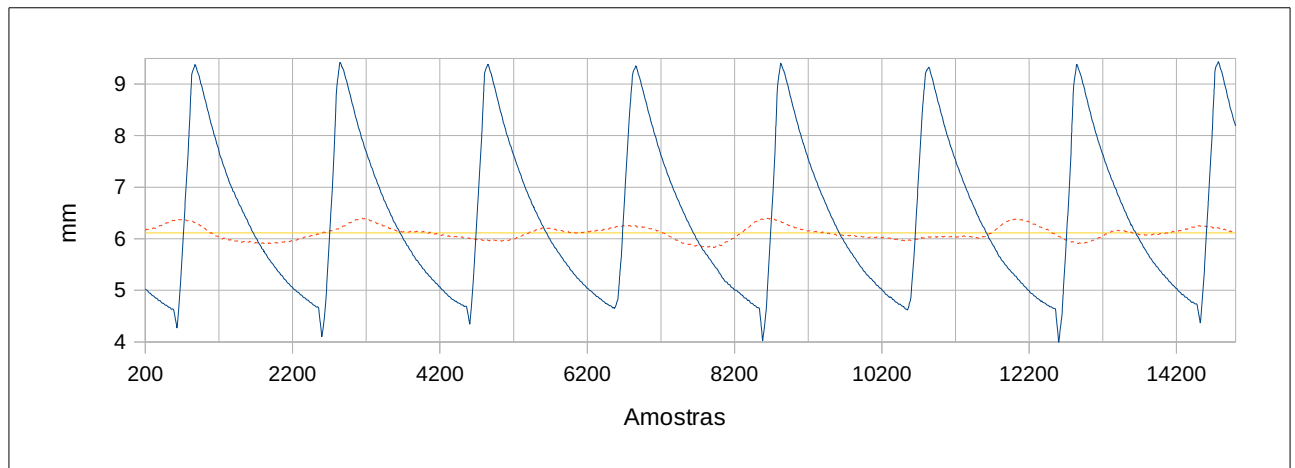
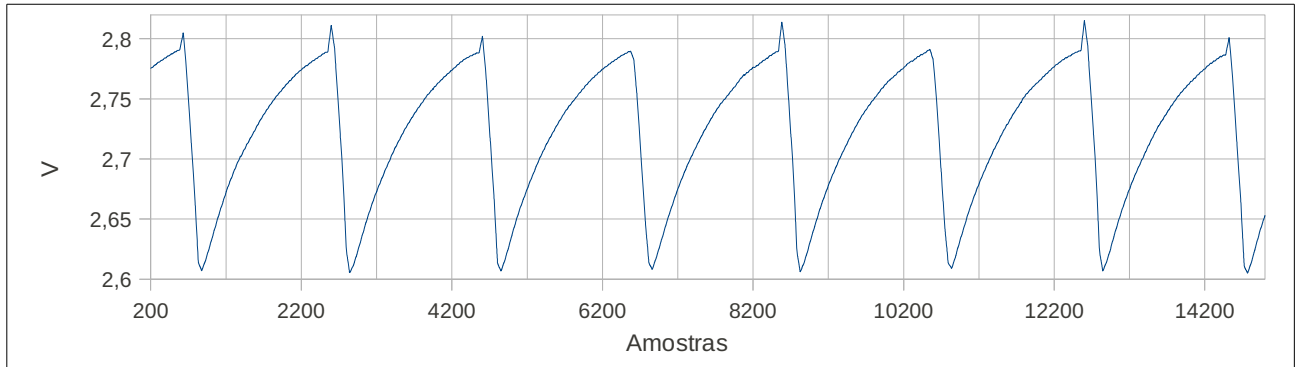
Característica do ensaio

Inclinação do canal: 5 graus

Rotação da bomba: 500 RPM

Perturbação: Perpendicular ao escoamento

Ganho: 3



Ensaio Número: 20

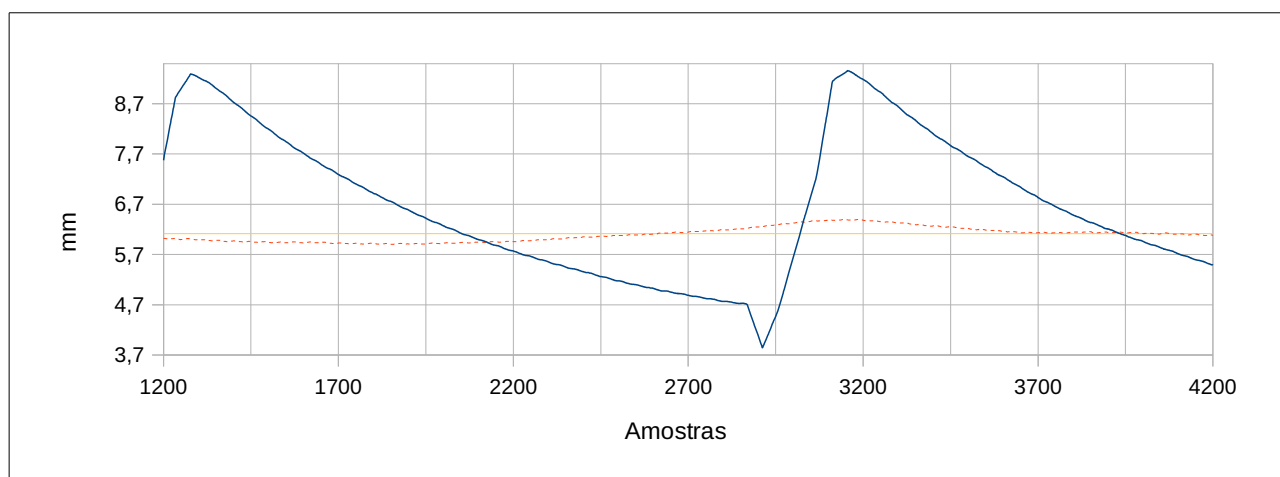
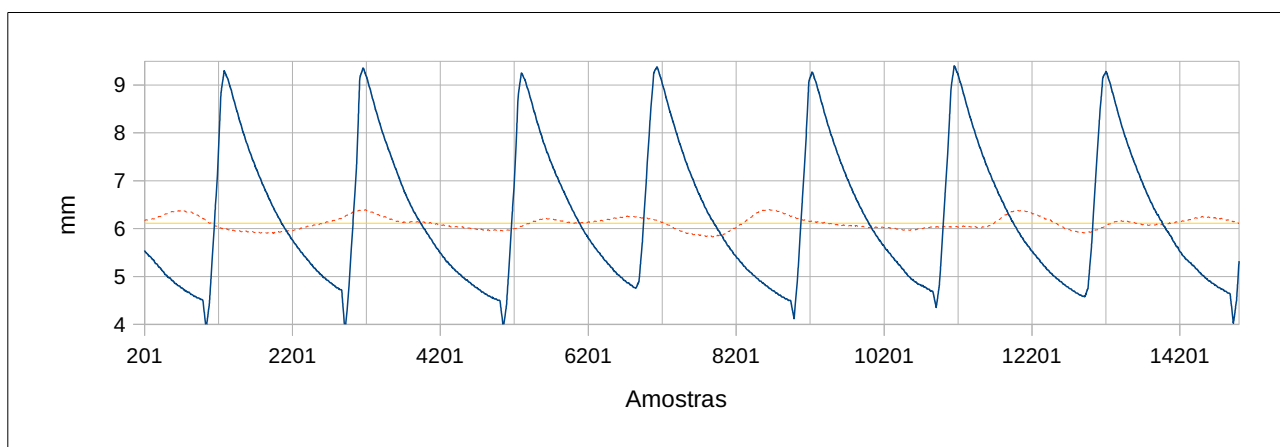
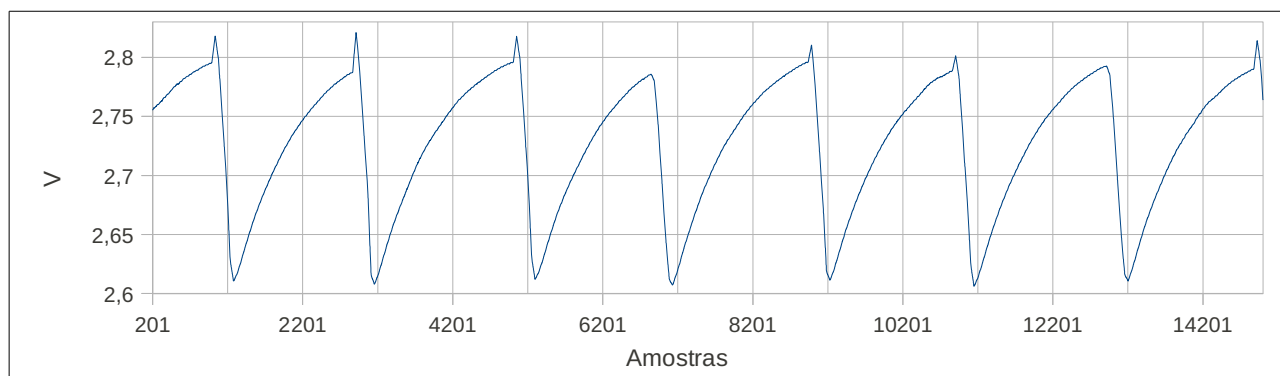
Característica do ensaio

Inclinação do canal: 5 graus

Rotação da bomba: 500 RPM

Perturbação: Perpendicular ao escoamento

Ganho: 4



Ensaio Número: 26

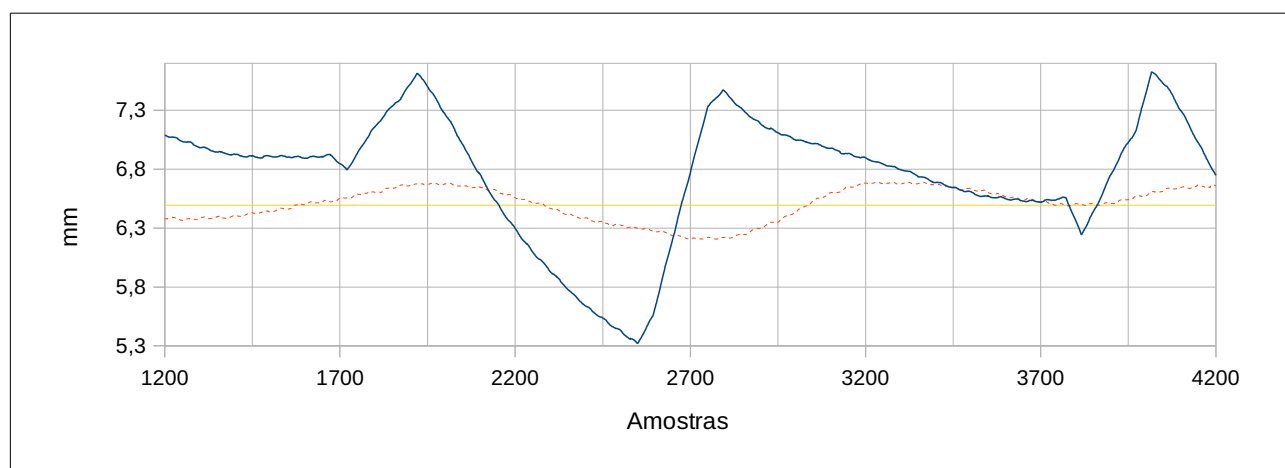
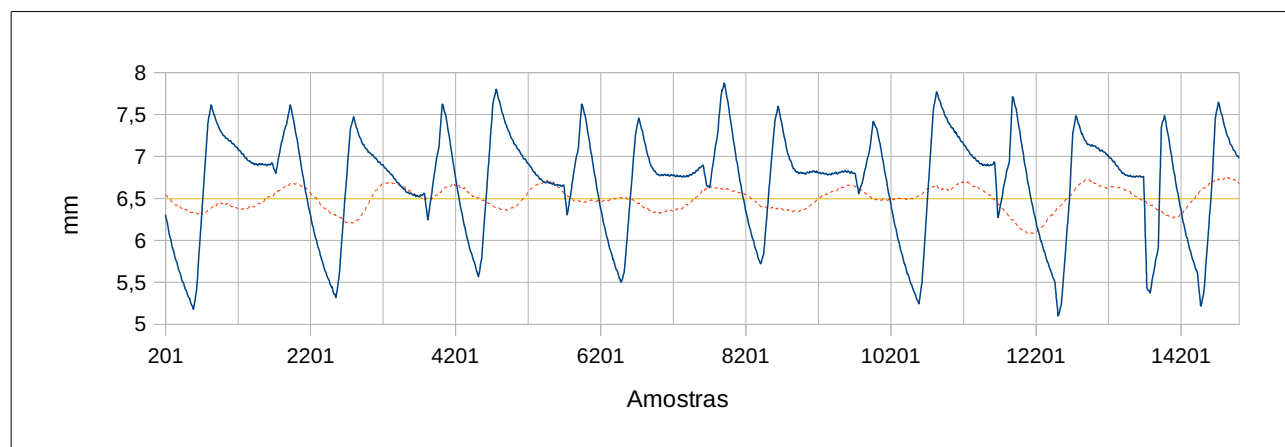
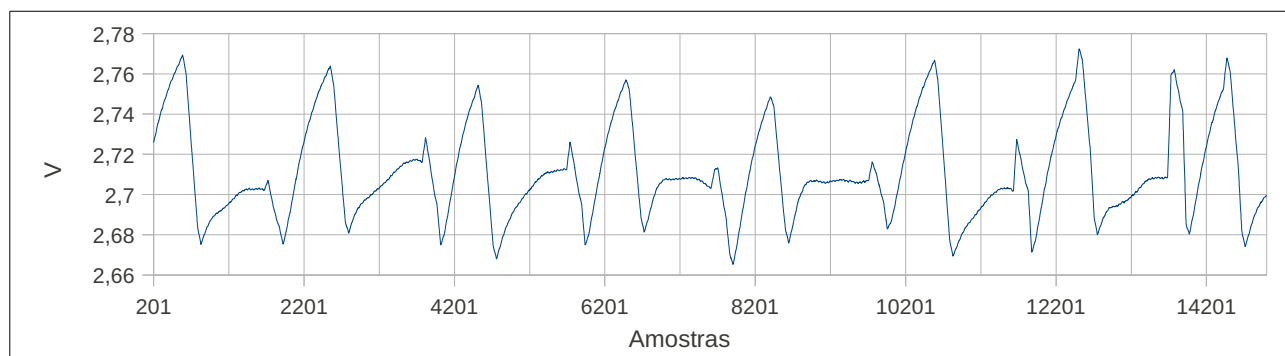
Característica do ensaio

Inclinação do canal: 5 graus

Rotação da bomba: 750 RPM

Perturbação: Inclinação negativa 120°

Ganho: 2



Ensaio Número: 27

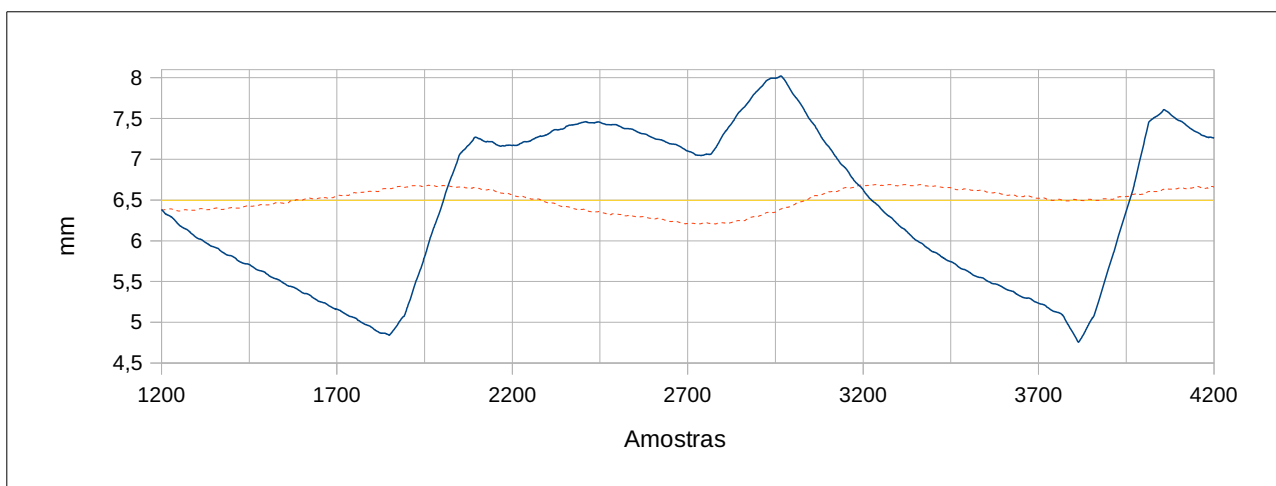
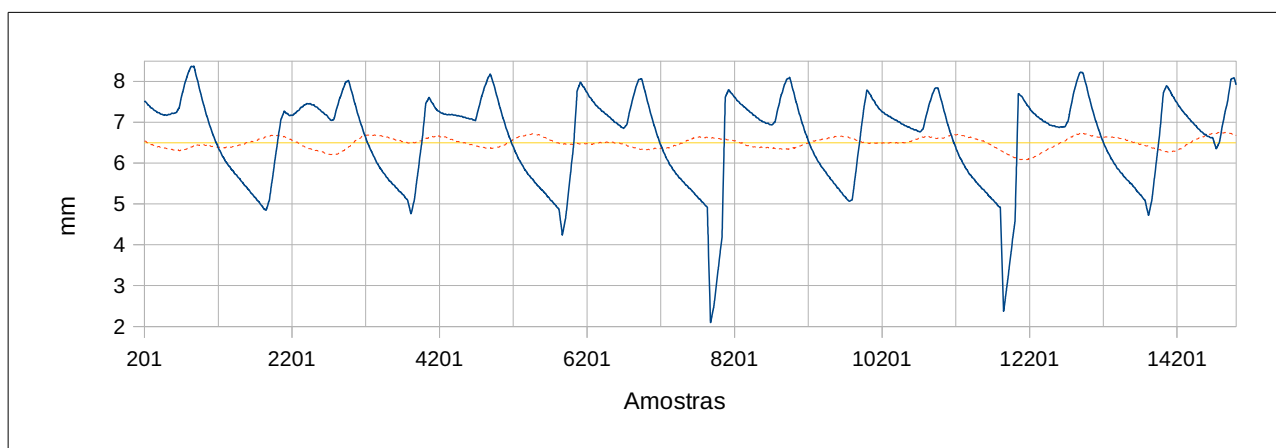
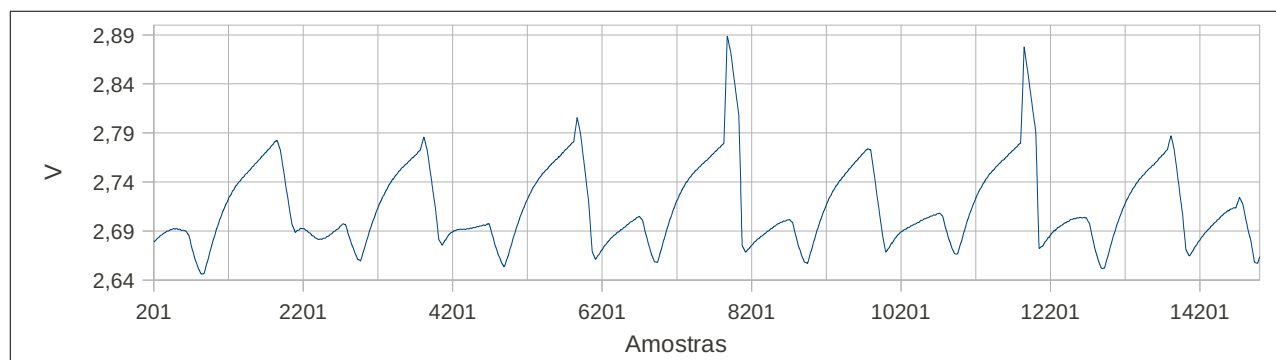
Característica do ensaio

Inclinação do canal: 5 graus

Rotação da bomba: 750 RPM

Perturbação: Inclinação negativa 120°

Ganho: 3



Ensaio Número: 28

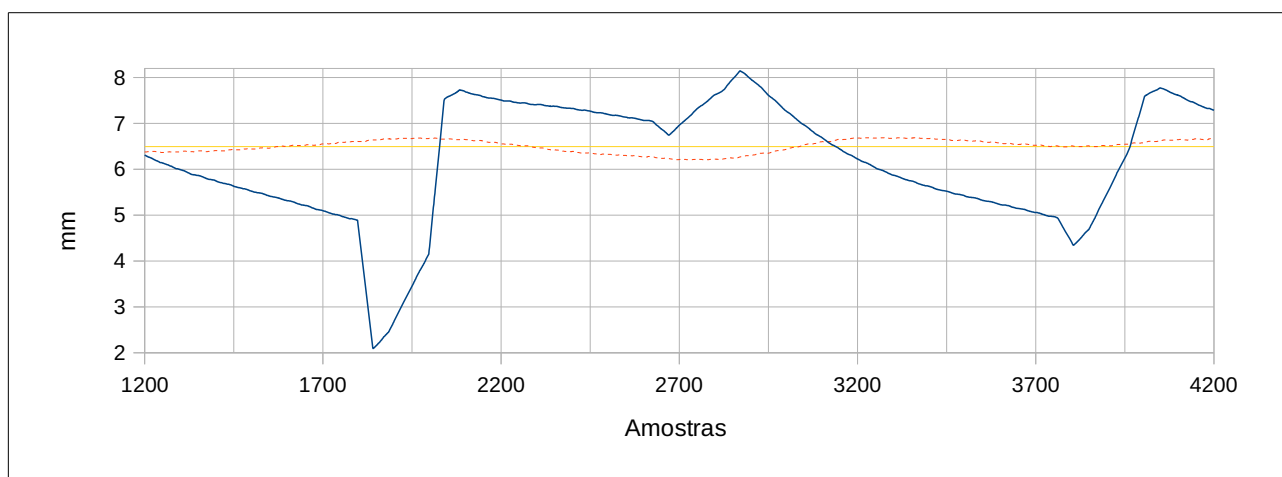
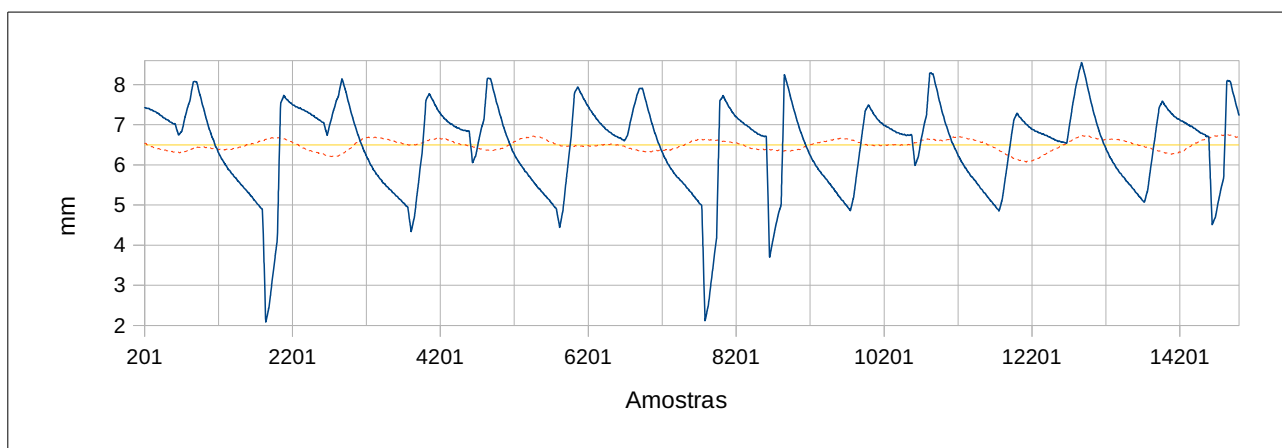
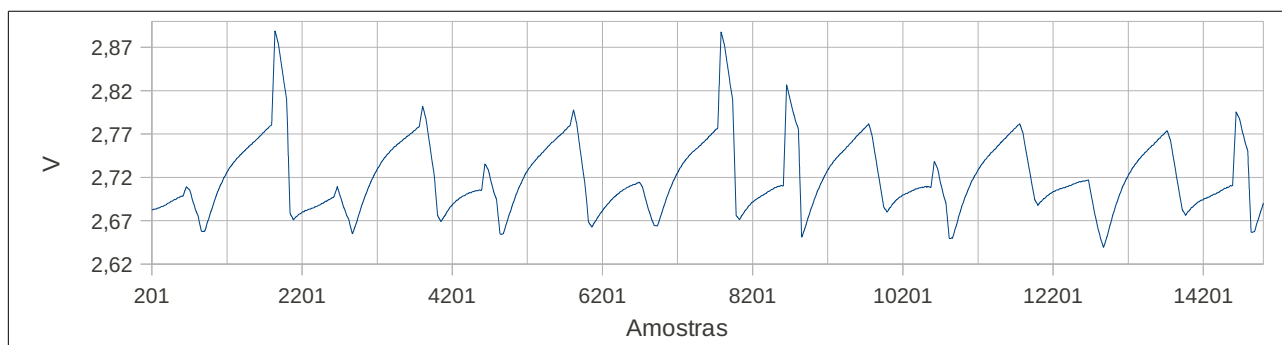
Característica do ensaio

Inclinação do canal: 5 graus

Rotação da bomba: 750 RPM

Perturbação: Inclinação negativa 120°

Ganho: 4



Ensaio Número: 30

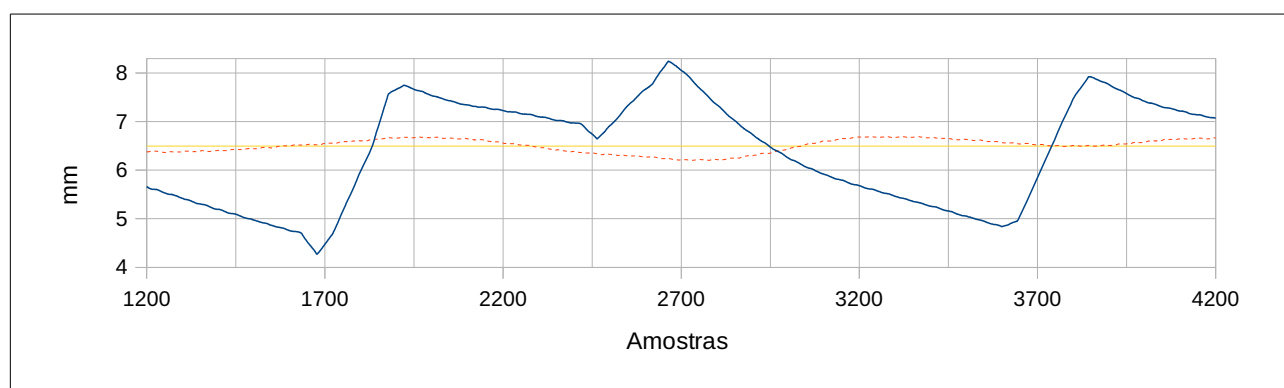
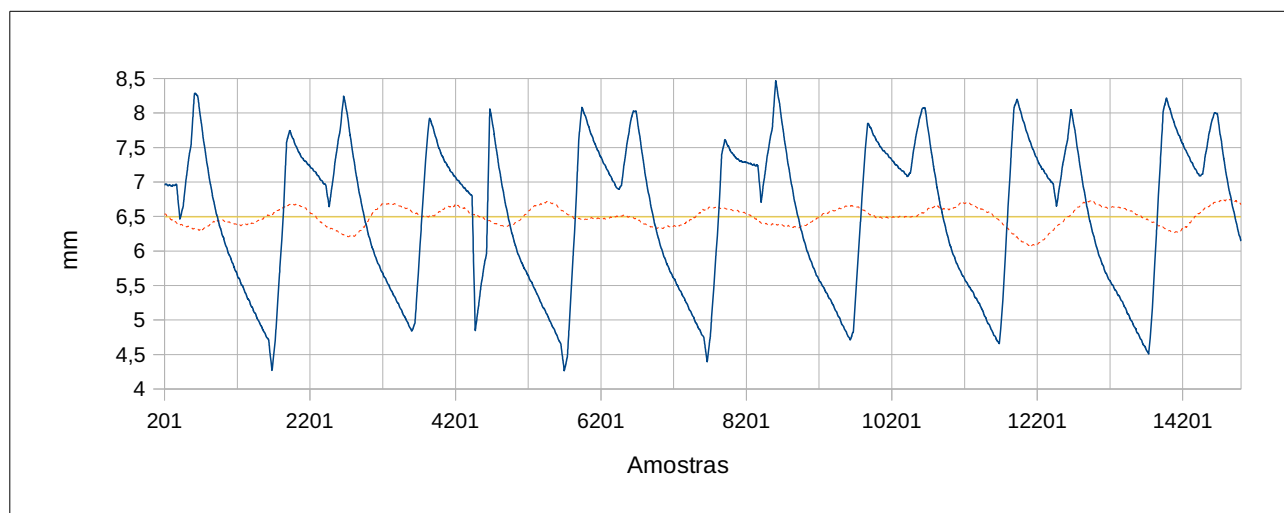
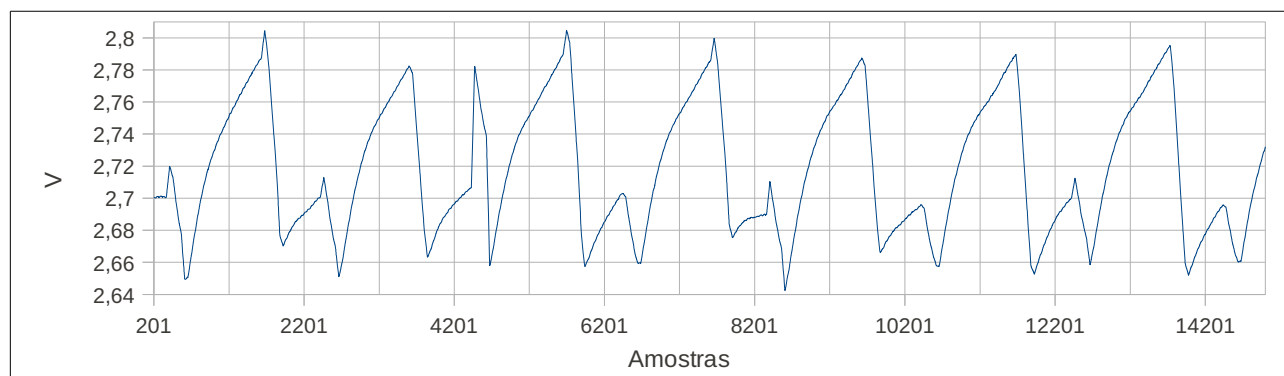
Característica do ensaio

Inclinação do canal: 5 graus

Rotação da bomba: 750 RPM

Perturbação: Perpendicular ao escoamento

Ganho: 2



Ensaio Número: 31

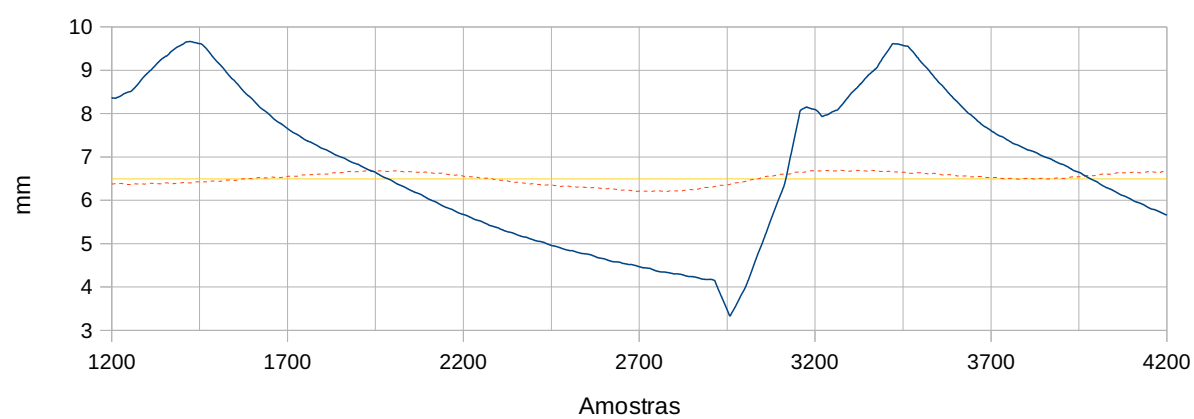
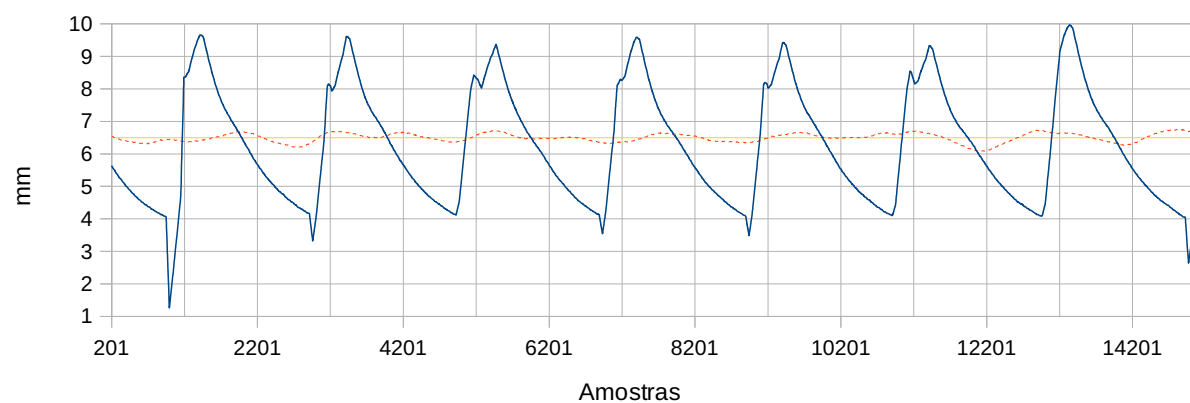
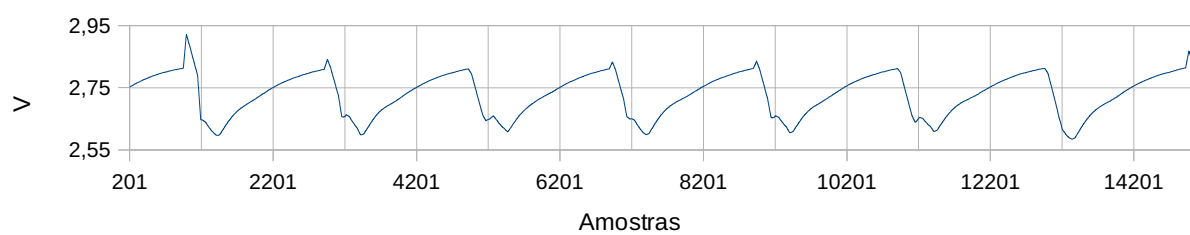
Característica do ensaio

Inclinação do canal: 5 graus

Rotação da bomba: 750 RPM

Perturbação: Perpendicular ao escoamento

Ganho: 3



Ensaio Número: 32

Característica do ensaio

Inclinação do canal: 5 graus

Rotação da bomba: 750 RPM

Perturbação: Perpendicular ao escoamento

Ganho: 4

